

Stieltjesweg 1
2628 CK Delft
Postbus 155
2600 AD Delft

www.tno.nl

T +31 88 866 20 00

TNO-rapport

TNO 2019 R10463

Faalkansmodel persleidingen - Proof of Principle

Datum	23 juli 2019
Auteur(s)	Liesette la Gasse, Wim Courage, Linda Abspoel, Henk Kruse (Deltares), Francois Clemens (Deltares), Jeroen Langeveld (Partners4UrbanWater).
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	136 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	5 A t/m E
Opdrachtgever	RIONED, STOWA, Gemeente Rotterdam, Waternet, TKI Deltatechnologie.
Projectnaam	TKI Faalkansmodel voor asset management van persleidingen
Projectnummer	060.32032

Alle rechten voorbehouden.

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

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2019 TNO

Samenvatting

Aanleiding

In Nederland ligt 13.000 km persleiding, waarvan een groot deel stamt uit de jaren '70. De huidige faalkans ligt op ca. 1 incident per 100 km/jaar en dat is laag in verhouding tot bijvoorbeeld drinkwater. De presentatie van Johan Post en Wouter van Riel op het persleidingensymposium in Gorinchem op 20 maart jl. liet echter zien dat het aantal incidenten toe lijkt te nemen. Daarnaast speelt bovendien dat de tijd gaat dringen, omdat veel leidingen hun ontwerplevensduur naderen.

In tegenstelling tot bij vrij verval riolering, waar visuele inspecties de basis vormen voor de besluitvorming over maatregelen als repareren of vervangen, geldt dat voor persleidingen nog geen breed toepasbare inspectietechniek beschikbaar is. Daarbij komt nog dat de meeste persleidingen slecht toegankelijk zijn en geen voorzieningen hebben om inspectieapparatuur toegang te verlenen. Dit maakt dat de beschikbare informatie over de actuele conditie van persleidingen zeer schaars is. Voor de meeste persleidingen is tot op heden de beheerstrategie 'fail and fix' gehanteerd, ofwel, alleen reactief ingrijpen bij problemen. Bij leidingen die 'to big to fail' zijn is dit binnen de zich ontwikkelende asset management strategieën niet meer houdbaar en wordt ofwel ingezet op vrij duur 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.

Aanpak

De oplossingsrichting die in dit project is uitgewerkt, is de ontwikkeling van een faalkansmodel, waarmee de prioriteringsbeslissingen en vervangingsinvesteringen in de toekomst beter onderbouwd kunnen worden.

Acceptabele waarden voor faalkansen, zoals geduid in voorgaande paragraaf, brengen de afwegingen en beslissingen binnen het asset management in de context van risico's. Risico's zijn te kwantificeren als (faal)kans * gevolg. In deze zin is de ontwikkeling van een faalkansmodel dan ook te zien als een onderdeel/bouwsteen richting een risico gebaseerde asset management benadering. Beslissen op basis van risico's (kansen, kosten en prestaties) behelst het kwantificeren en beheersen van kansen en gevolgen.

De grootste technische uitdaging in het maken van het faalkansmodel zijn de complexe interacties tussen de verschillende deelmodellen (hydraulische belasting, constructieve sterkte leiding, grondbelasting en materiaaldegradatie), leidend tot het mogelijk optreden van een faalmechanisme, en daarbij de gewenste combinatie van statistische gegevens en gegevens uit metingen. Dit principe is getoetst in de eerste (Proof of Principle) fase van het project, voor een afgebakend aantal mechanismen en met een voor een eerste fase hanteerbare diepgang.

De studie is uitgevoerd binnen TKI Deltatechnologie met kennispartners TNO, Deltares, en Partners4UrbanWater en met financiering en commitment van beheerders Gemeente Rotterdam, Waternet en branche organisaties STOWA en RIONED.

Doelgroep zijn de assetmanagers van Gemeenten en Waterschappen.

Het faalkansmodel geeft een voorspelling van de betrouwbaarheid van een leidingsegment op basis van de maximaal aanwezige kennis en informatie over de sterkte van, belasting op en slijtage van de leiding. Een tweede belangrijk principe van de aanpak is dat technische informatie over de leiding verkregen door de ene beheerder (leidingkenmerken, in combinatie met metingen en incidentenregistratie) op basis van overeenkomsten/correlaties benut wordt door de andere beheerders.

Voorzien is dat, uiteindelijk, het model te gebruiken is door asset managers in hun beheeromgeving, en dat voor elk leidingsegment de conditie wordt bepaald op basis van:

- input van de beheerder zelf;
 - over 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.,
- het faalkansmodel,
- correlaties met andere leidingsegmenten (binnen en buiten het eigen beheergebied, mogelijk ook andere typen leidingen) waarover conditiegegevens beschikbaar zijn.

Faalkansmodel

Het model gaat uit van een modulaire architectuur waarbinnen een decompositie plaatsvindt naar leidingdelen en naar (vooral nog constructieve) faalmechanismen waarbij per deel en mechanisme faalkansen worden gekwantificeerd. Middels systeem beschouwingen kunnen deze dan naar believen worden gecombineerd over mechanismen en leidingdelen naar totale faalkansen op een grotere schaal. Vice versa faciliteert het model om vanaf deze grotere schaal informatie te krijgen over de onderliggende oorzaken en meest kritische delen.

Het faalkansmodel benut verschillende soorten databronnen zowel voor modelinput als om de resultaten van het model te verifiëren. In deze eerste fase van het project zijn zo veel mogelijk gegevens opgevraagd bij de beheerders en zijn andere bronnen geraadpleegd of aannames gedaan waar nodig.

Veel data is in het algemeen aanwezig maar stuit vaak op een moeizame ontsluiting. De mate van aanwezigheid en toegankelijkheid verschilt qua type data. Zo zijn bijvoorbeeld objectkenmerken redelijk compleet (met opvallende uitzondering van de gegevens t.a.v. de diepteligging van de leidingen) maar historische faalgebeurtenissen weer beperkt beschikbaar en sterk variërend in de manier van vastlegging. Binnen de Proof of Principle fase is dit acceptabel gebleken en, in het licht van opstartende programma's in de sector richting het op orde brengen van data, als 'lessons learned' mee te nemen. Zo is het te overwegen waard om gegevens, die nauw samenhangen met materiaaltype en fabricaat, centraal te ontsluiten, bijvoorbeeld conform een soortgelijk initiatief in de drinkwatersector.

In het huidige traject voor de ontwikkeling van het faalkansmodel is een selectie in mechanismen gemaakt die;

- gebruik maken van bestaande kennis (geen nieuwe model kennis ontwikkelen),
- onderkend zijn als significant,
- leiden tot een gekwantificeerde faalkans,
- zich beperkt tot een aantal mechanismen, voldoende voor een Proof of Principle, namelijk;
 - breuk leiding door zettingsverschillen,
 - lekkage bij voegen door zettingsverschillen,
 - breuk leiding door inwendige chemische aantasting.

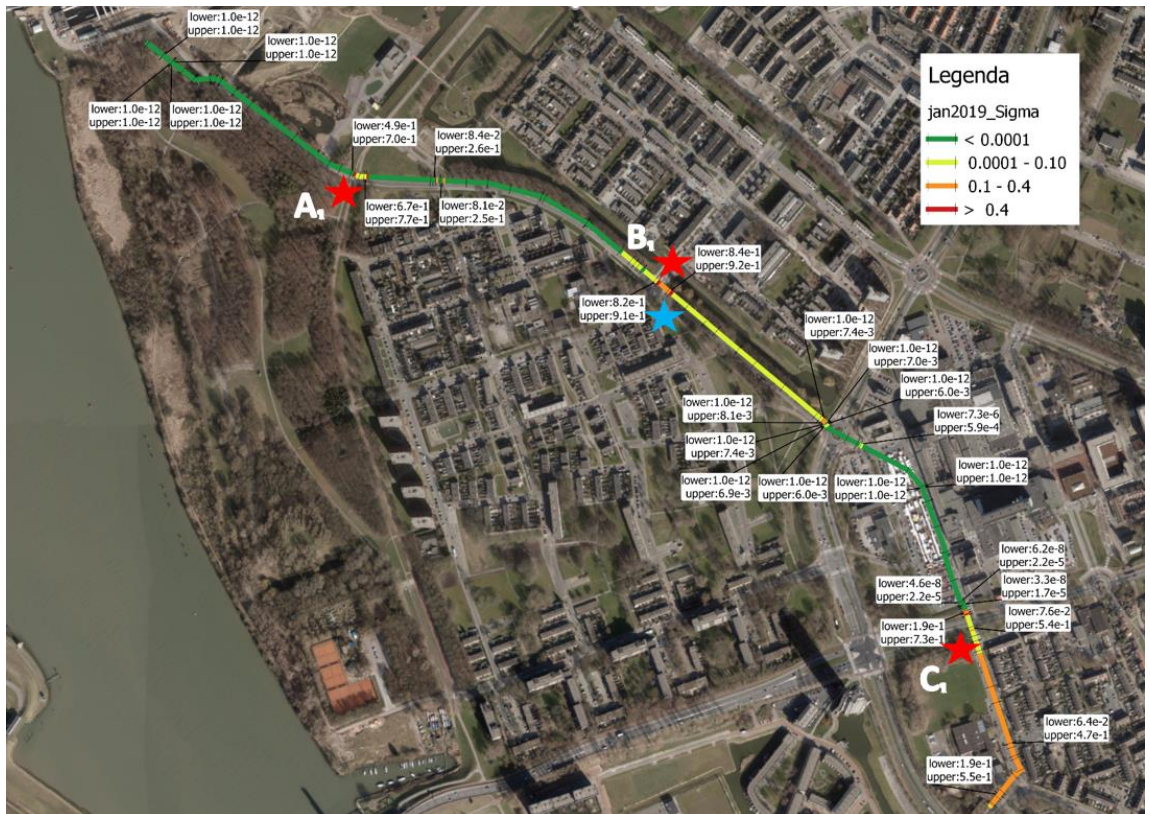
Resultaten

De bijbehorende modellen zijn uitgewerkt en hun toepassing wordt in dit rapport beschreven in termen van schematisering, berekeningen door deelmodellen, in- en uitvoer, hun onderlinge interactie en hun plek in het overkoepelende faalkansmodel.

Het faalkansmodel zelf is, eveneens in hoofdlijnen, neergezet en beschreven. Hierbij is ingegaan op de individuele toetsingen van de belastingeffecten middels grenstoestandfuncties en het gebruik van stochasten voor de onzekerheden in scenario's, belastingeffecten en sterkten. Ook de nabewerkingen (samenvoegen van mechanismen en leidingdelen, ontwikkeling over de tijd, aanpassingen van faalkans op basis van informatie) en het gebruik en betekenis van de resultaten (waarde, bandbreedtes en gevoeligheid voor parameters) worden besproken. Daarnaast wordt de inbedding van faalkansen in toekomstig risico gebaseerd assetmanagement en vervangingsbeleid kort geduid. Het correlatiemodel kon in deze fase niet uitgewerkt worden. Enerzijds door onvoldoende informatie, anderzijds door de beperkte geschiktheid hiervoor van de onderzochte faalmechanismen.

Cases

In deze Proof-of-Principle fase is de methodiek uitgewerkt en toegepast op 2 cases. Deze cases zijn aangedragen door de Gemeente Rotterdam (persleiding Holwinde) en Waternet (persleiding Ducaton in Mijdrecht). Hiermee zijn een varia aan materialen (staal, gietijzer, beton, AC, PE) en afmetingen (diameters, wanddikten) beschouwd. Bovendien zijn verschillende grondgebieden te onderscheiden en daarnaast lokale bovenbelastingen geïdentificeerd. Voor beide cases zijn overzichtskaarten opgesteld met resulterende faalkansen voor een gegeven tijdstip. Zowel als gevolg van zakkingsverschillen door variatie in bodemeigenschappen alsook van zakkingsverschillen door bovenbelasting op specifieke locaties. Ook de modellen voor wanddikte afname zijn in deze 2 cases toegepast en verwerkt tot een bijdrage aan de faalkansen. De wanddikte afnames zijn met name uitgewerkt voor de case Ducaton, waar deze ook op voorhand waren geduid in de faalgebeurtenissen rapportage.



Figuur 1: Conditionele faalkansen voor alle leidingdelen. Ter hoogte van de rode sterren worden de hoogste faalkansen berekend.

De berekende faalkansen zijn over het algemeen hoog, waarbij wordt opgemerkt dat dit grotendeels conditioneel is op de aanwezig geachte zettingen. In verdere ontwikkelstappen moet hier zeker aandacht aan worden besteed om deze te onderbouwen dan wel te verbeteren tot waarden die overeenkomen met waarnemingen uit de praktijk. Het totale beeld in termen van oorzaak en gevolg voldoet prima aan de verwachtingen. Bovendien blijken de meest kritische locaties ook als zodanig door de beheerders te worden herkend.

Conclusies op basis van workshops

Dit laatste is gebleken tijdens twee workshops die zijn gehouden met de beheerders. Doel van deze workshops was – naast het communiceren van de werkwijze en de resultaten – om inzicht te krijgen in de inschattingen van faalkansen door de beheerders zelf en met name feedback van hen te krijgen over de toegevoegde waarde van een faalkansmodel. De feedback heeft geleid tot een positieve conclusie met betrekking tot het halen van de Proof of Principle. Ook de relatie tot de praktijk is positief bekrachtigd, specifiek op de punten:

- Case Ducaton: ten behoeve van wanddikte afname berekening is luchtophopping beschouwd. Deze locaties hebben een sterke relatie met schade opgetreden aan ontluichters, een en ander is nader uit te werken in de volgende fase,
- Case Holwinde: van de drie geïdentificeerde locaties met hoge faalkans bleek in het recente verleden ook daadwerkelijk een faalgebeurtenis te hebben plaatsgevonden (dit was de onderzoekers tijdens uitwerking van de case niet bekend)

De werkwijze en het doel om faalkansen te kwantificeren in absolute en (onderling) relatieve zin wordt hierbij als waardevol gezien. Zowel Rotterdam als Waternet geven aan stappen te maken van een reactief naar een actief management, hetgeen ook door overige deelnemers wordt beoogd.

Als resultaat heeft men – net als in het voorgestelde faalkansmodel – een kaart/GIS-applicatie voor ogen met faalkans indicaties. Hieraan wordt een grote toegevoegde waarde toegekend voor het strategisch asset management. Ook het feit dat automatiseringen plaatsvinden, vindt bijval en dat kennis en informatie van andere beheerders gebruikt wordt.

Als verdere opmerkingen/verbeteringen zijn de volgende zaken in de workshops naar voren gekomen:

- Achter (eventueel opgerolde) faalkanswaarden moet informatie beschikbaar blijven en toegankelijk zijn met betrekking tot de verschillende mechanismen, onderliggende oorzaken, data en omstandigheden.
- Een goede wisselwerking en communicatie over specifieke data die voor het faalkansmodel nodig is en data en kennis die bij de beheerders aanwezig is of gaat zijn.
- De berekende faalkansen zijn in een aantal situaties zeer hoog. Dit wordt door de deelnemers aangekaart, maar ook door de kennispartners zelf onderkend. Veel kansen op falen zijn nu sterk conditioneel op de vermeende aanwezige belastingen (zettingen). Voor de Proof of Principle is dit geen bezwaar, maar bij verdere fases moeten realistische orde groottes en onderbouwingen beschikbaar komen.
- Er moet samen met de beheerders goed overlegd worden hoe de presentatie eruit moet zien (bijvoorbeeld ook een overzicht met planjaren voor vervanging in blokken van 5 jaar).
- Een branche breed gedragen definitie van systeem componenten moet worden gedefinieerd en gebruikt. Met duidelijke uitwisselingsformaten en de nood aan version control van programma's en interfaces.
- Onderkend wordt dat de modellen dynamisch zijn en moeten blijven; nieuwe informatie (bijvoorbeeld inspecties) moet een (gedeeltelijke) rerun en update van faalkansen leveren. Hierbij hoort ook het dan bijhouden van de geschiedenis van veranderingen in informatie en berekeningen.
- Men wil voorbereid kunnen zijn op onverwachte ontwikkelingen; bijvoorbeeld extreem weer (de droogte vorig jaar).
- Men ziet het model en de resultaten als een nuttig in te kopen dienst, anders dan een systeem dat bij de beheerders zelf operationeel gemaakt gaat worden.
- Het faalkansmodel helpt bij het onderbouwen van;
 - inspanningen om data op orde te krijgen richting management,
 - te reserveren budgetten voor vervangingsbeleid.

Vervolg

De bereikte resultaten in deze fase en de ontvangst van de werkwijze door de beheerders en branche onderbouwen de conclusie dat het Proof of Principle voldoende is aangetoond om vervolgfases te initiëren.

De voorziene vervolgfase betreft dan een Proof of Concept als voorloper op de laatste fase: Proof of Producibility. Bij een Proof of Producibility kan men denken aan het vormgeven van de koppeling van het faalkansmodel aan de bestaande systemen bij de asset-eigenaren en beheerders met uitwerkingen richting risico's (kans en effect).

Met dit in het achterhoofd ligt een aantal richtingen in het verschiet voor de fase Proof of Concept:

- Verdieping:
 - Verfijnen en verder uitwerken van het raamwerk voor de faalkansen (inbrengen van data uit inspecties, bewezen sterkte, beschouwingen over tijd en oprollen van faalkansen).
 - Onderzoek naar gedrag en eigenschappen van koppelingen/voegopeningen.
- Verbreding:
 - Toevoegen van operationele component (hydraulische modellen en gegevens).
 - Toevoegen van andere mechanismen.
 - Toevoegen van andere componenten (appendages).
 - Gebruik van satelliet beelden (zetting).
- Automatisering en versnelling.
- Correlatie uitwerken.

In de Proof of Concept fase wordt ook onderzocht op welke wijze het FKM geïmplementeerd zal worden. Denk daarbij aan het feit dat het FKM verbonden moet zijn met de leidingdata, de modellen, andere data en er moet rekenkracht zijn om de berekeningen te maken, binnen randvoorwaarden van tijd en geld. Implicaties hiervan voor het FKM moeten worden geadresseerd.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
1	Inleiding	9
1.1	Aanleiding	9
1.2	Aanpak.....	9
1.3	Projectorganisatie	10
1.4	Fasering	11
1.5	Fase 1 – Proof-of-principle	11
2	Opbouw faalkansmodel	12
3	Input voor faalkansmodel	14
4	Modellering faalmechanismen	17
4.1	Keuze faalmechanismen	17
4.2	Deelmodel zettingen (onderdeel van stap [4] in Figuur 2.1)	19
4.3	Deelmodel wanddikte afname (onderdeel van stap [4] in Figuur 2.1)	25
4.4	Deelmodel constructief gedrag (stap [6.1] in Figuur 2.1)	26
5	Faalkansmodel.....	28
5.1	Dataflow faalkansmodel	28
5.2	Faalkans berekening (stap [6.2] van Figuur 2.1 en Figuur 5.1)	28
5.3	Oprollen faalkans.....	34
5.4	Output	35
5.5	Correlatiescore	38
6	Cases	40
6.1	Rotterdam – Holwinde	40
6.2	Waternet – Ducaton.....	56
7	Valorisatie van Proof-of-Principle.....	73
7.1	Aanpak valorisatie Proof-of-Principle	73
7.2	Inschattingen van de faalkansen door beheerders	73
7.3	Discussie met betrekking tot valorisatie	76
7.4	Conclusie met betrekking tot Proof of Principle.....	77
8	Conclusie en aanbevelingen	79
9	Referenties	82
10	Ondertekening	83
	Bijlage(n)	
	A Weerstand leiding	
	B Afleiding model factor	
	C Proof of Principle workshop 25 februari 2019	
	D Proof of Principle workshop 6 maart 2019	
	E Programma van eisen	

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

In Nederland ligt 13.000 km persleiding, waarvan een groot deel stamt uit de jaren '70. De huidige faalkans ligt op 1 incident per 100 km/jaar en dat is laag in verhouding tot bijvoorbeeld drinkwater. De verwachting is echter dat door veroudering de faalkans fors zal oplopen, alleen is niet duidelijk wanneer en hoe snel. Toch begint de tijd te dringen, omdat veel leidingen hun ontwerplevensduur naderen.

In tegenstelling tot bij vrij verval riolering, waar visuele inspecties de basis vormen voor de besluitvorming over maatregelen als repareren of vervangen, geldt dat voor persleidingen nog geen breed toepasbare inspectietechniek beschikbaar is. Daarbij komt nog dat de meeste persleidingen slecht toegankelijk zijn en geen voorzieningen hebben om inspectieapparatuur toegang te verlenen. Dit maakt dat de beschikbare informatie over de actuele conditie van persleidingen zeer schaars is. Voor de meeste persleidingen is tot op heden de beheerstrategie 'fail and fix' gehanteerd, ofwel, alleen reactief ingrijpen bij problemen. Bij leidingen die 'too big to fail' zijn is dit binnen de zich ontwikkelende asset management strategieën niet meer houdbaar en wordt ofwel ingezet op vrij duur 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.

De oplossingsrichting die in dit project is uitgewerkt is de ontwikkeling van een faalkansmodel, waarmee de vervangingsinvesteringen in de toekomst beter onderbouwd kunnen worden.

Een faalkans model brengt de afwegingen binnen het asset management in de context van risico's. Risico's zijn te kwantificeren als (faal)kans * gevolg. In deze zin is de ontwikkeling van een faalkansmodel dan ook te zien als een onderdeel/bouwsteen in een risico gebaseerde asset management benadering. Beslissen op basis van risico's (kansen, kosten en prestaties) behelst het kwantificeren en beheersen van kansen en gevolgen.

1.2 Aanpak

De hierboven geschetste situatie maakt het nodig om het toekomstige asset management van de persleidingen te baseren op:

- maximaal beschikbare objectieve informatie over de leidingenconditie, nú en in de toekomst,
- optimale kennisdeling over de verschillende beheerders
- optimale utilisatie van alle kennis voor alle beheerders in de asset management beslissingen; inspectie, onderhoud, reparaties en vervangingen.

De in dit project gekozen aanpak om dit voor elkaar te krijgen is het ontwikkelen van een asset management tool op basis van een faalkansmodel. De tool geeft een voorspelling van de betrouwbaarheid en de restlevensduur van een leidingsegment op basis van de maximaal aanwezige kennis en informatie over de sterkte van, belasting op en slijtage van de leiding. Een tweede belangrijk principe van deze tool is dat technische informatie over de leiding verkregen door de ene beheerder gedeeld en benut wordt door de andere beheerders. Hierbij moet op adequate wijze recht gedaan worden aan de wensen van beheerders wat betreft het wel en niet delen van operationele informatie van hun netwerk.

Het middel (de asset management tool) dat daarvoor op termijn voorzien wordt, is een via GIS ontsloten tool, te gebruiken door beheerders, die voor elk leidingsegment de conditie bepaalt op basis van:

- input van de beheerder zelf
 - over huidige leiding; denk aan diameter, materiaal, aanlegjaar;
 - over de conditie; denk aan uitkomsten van eventueel uitgevoerde inspecties en incidenten;
- informatie over belastingen; denk aan omgevingsfactoren als grondsoorten, verkeersbelastingen, etc.
- het faalkansmodel
- correlaties met andere leidingsegmenten (binnen en buiten het eigen beheergebied, mogelijk ook andere typen leidingen) waarover conditiegegevens beschikbaar zijn.

De tool zal het mogelijk maken de bepaalde conditie te combineren met keuzes gemaakt door de beheerder m.b.t. 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 getest kunnen worden op de verschillende scores. Grondwerkzaamheden, onjuiste bediening van afsluiters en overbelasting door verkeer zijn oorzaken van falen die buiten de afbakening van het faalkansmodel en daarmee buiten de afbakening van het project vallen. In een gezamenlijk opgesteld concept Programma van Eisen (zie bijlage E) zijn de eisen van de gebruikers aan het bovenstaande Asset Management tool voorlopig vastgesteld, waaronder de leidingmaterialen, software omgeving (GIS), etc.

1.3 Projectorganisatie

Het onderzoek heeft plaatsgevonden binnen TKI Deltatechnologie met partners TNO, Deltares, Partners4UrbanWater, STOWA, RIONED, beheerders Gemeente Rotterdam en Waternet.

Kennispartners TNO, Deltares en Partners4UrbanWater hebben een brede kennisbasis op het gebied van faalkansmodellering en faalmechanismen van persleidingen.

Om zorg te dragen voor draagvlak in de sector en een goede toepasbaarheid van de resultaten is er financiering en commitment vanuit de koepelorganisaties STOWA en RIONED en beheerders Gemeente Rotterdam en Waternet. Andere

beheerders hebben een kleinere, maar belangrijke rol als leveranciers van beheer informatie en gegevens.

1.4 Fasering

Voor het opstellen van het faalkansmodel wordt een gefaseerd traject doorlopen welke er op hoofdlijnen als volgt uitziet:

- Fase 1: proof-of principle
Aantonen dat het principe van een faalkansmodel ten aanzien van persleidingen kan werken. Een beperkt aantal relevante aspecten (zoals materialen en degradatiemechanismen) wordt meegenomen in de modellering.
- Fase 2: proof-of-concept
Als dit principe als werkbaar is aangetoond in Fase 1, kan een concept worden uitgewerkt van het faalkansmodel dat meer praktisch gericht is. Tevens wordt het aantal aspecten dat wordt meegenomen in de modellering uitgebreid.
- Fase 3: proof-of-producibility
In deze laatste fase worden alle nog niet eerder meegenomen relevante aspecten betrokken en wordt ook de user interface en de koppeling van het faalkansmodel aan de bestaande systemen bij de asset-eigenaren en beheerders vorm gegeven.

1.5 Fase 1 – Proof-of-principle

De grootste technische uitdaging in het maken van het faalkansmodel zijn de complexe interacties tussen de verschillende deelmodellen (hydraulische belasting, constructieve sterkte leiding, grondbelasting en materiaaldegradatie), leidend tot het mogelijk optreden van een faalmechanisme, en daarbij de gewenste combinatie van statistische gegevens en gegevens uit metingen. Dit principe wordt getoetst in de eerste fase van het project.

Het onderhavige rapport beschrijft de uitwerking van Fase 1. In hoofdstuk 2 wordt de globale opbouw van het faalkansmodel als geheel beschreven (benodigde input, faalmechanismen, faalkansmodellering en gewenste output). In de daarop volgende hoofdstukken worden deze verschillende onderdelen/stappen in het faalkansmodel in meer detail beschreven. Zo wordt in hoofdstuk 3 de benodigde input behandeld. In hoofdstuk 4 worden op basis van deze input de deelmodellen voor de faalmechanismen zetting en wanddikte afname beschreven. Daarnaast wordt ook het deelmodel die het constructieve gedrag van de leiding beschrijft, besproken. In hoofdstuk 5 wordt beschreven hoe het toegepaste faalkansmodel op basis van de in voorgaande hoofdstukken vergaarde kennis een faalkans bepaald. In hoofdstuk 6 worden de uitgevoerde cases besproken en mogelijkheden voor presentatie van de resultaten van het faalkansmodel besproken. Tot slot is in hoofdstuk 7 beschreven op welke manier de in fase 1 behaalde resultaten zijn getoetst (validatie en valorisatie) en worden in hoofdstuk 8 conclusies en aanbevelingen gepresenteerd.

2 Opbouw faalkansmodel

Het uitgangspunt voor het ontwikkelen van een faalkansmodel is het afleiden van een kwantitatieve methode voor de betrouwbaarheidsbepaling en restlevensduur bepaling van persleidingen in het areaal van de beheerder. Hiertoe wordt in dit project gebruik gemaakt van reeds beschikbare technieken en reeds beschikbare kennis, welke op een innovatie manier aan elkaar worden gekoppeld.

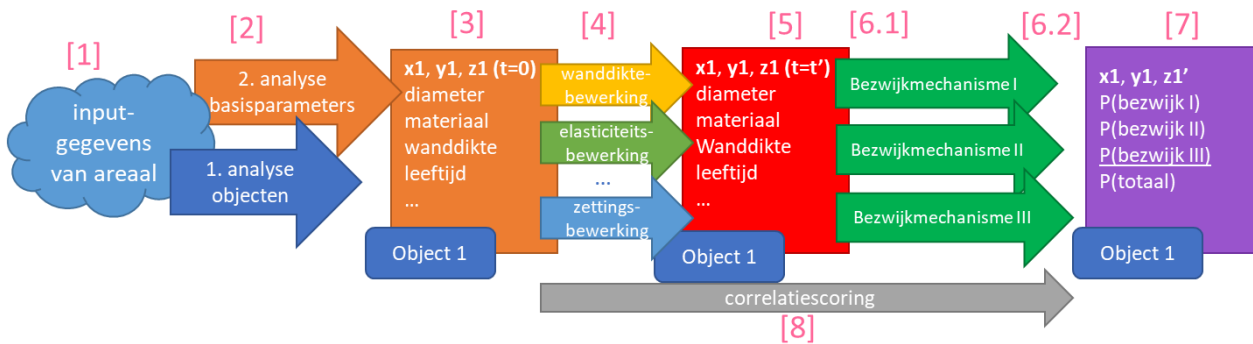
In Figuur 2.1 is weergegeven welke modellen en technieken gekoppeld worden en op welke manier deze koppeling plaats vindt:

- [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 object. Deze stap wordt verder beschreven in hoofdstuk 3.
- [3] Basisparameters per object (bijvoorbeeld jaar van aanleg, wanddikte, diameter, materiaal, elasticiteit etc.).
- [4] De basisparameters zijn onderhevig aan verandering: de modellering van deze verandering over tijd wordt gesymboliseerd in de gele/lichtgroene/lichtblauwe 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 object opnieuw een set eigenschappen, representatief voor een bepaald moment in de tijd.
- [6.1] 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. 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 0.
- [6.2] De output van de faalkansberekening is per object (leidingsegment) per bezwijkmechanisme een kans van falen op het betreffende tijdsmoment. Dit wordt in meer detail beschreven in hoofdstuk 5.
- [7] Deze faalkansen per object per bezwijkmechanisme worden gecombineerd tot totale faalkansen per leiding(deel). Ook dit wordt in meer detail beschreven in hoofdstuk 5.

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.

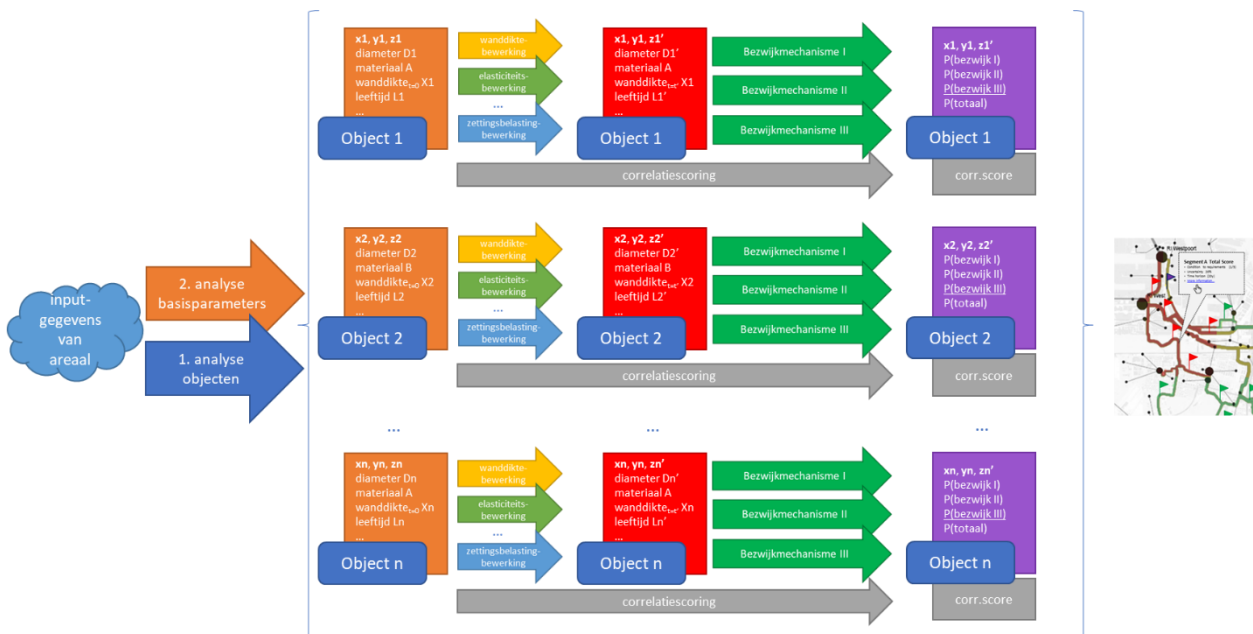
- [8] Naast deze fysische modellering (zoals weergegeven in stap [1] t/m [7] van figuur 2.1) wordt een data-analyse uitgevoerd op de invoergegevens. Op basis van correlaties tussen een gedetailleerd gemodelleerd deel van het areaal (info op niveau [7] beschikbaar) en de rest van het areaal (info op niveau [3] beschikbaar) wordt een score toegekend. Dit wordt toegelicht in hoofdstuk 5.

In een latere fase kunnen de gegevens uit de incidentendatabase ook gebruikt worden in deze correlatiescoreing.



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

Het in figuur 2.1 weergegeven faalkansmodel dat in het onderhavige rapport wordt beschreven, is object georiënteerd; het object waaraan alle eigenschappen gekoppeld worden, is een leidingsegment waarvoor de relevante eigenschappen constant zijn. Dit segment 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. De beschreven stappen worden voor ieder object in een dataset (deels geautomatiseerd) doorlopen om de faalkansen per object te bepalen. Vervolgens zullen deze faalkansen per object worden gecombineerd tot faalkansen per (deel van een) leiding in het areaal. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 2.2.



Figuur 2.2: Schematische weergave van de werking van het faalkansmodel; van inputdata tot faalkans met correlatiescore voor n onderdelen in het systeem

3 Input voor faalkansmodel

Het faalkansmodel benut verschillende soorten databronnen voor modelinput en om de resultaten van het model te verifiëren. In het project zijn zo veel mogelijk gegevens opgevraagd bij de beheerders en zijn andere bronnen geraadpleegd of aannames gedaan waar nodig.

De beheerders is in eerste instantie het in Tabel 3.1 opgenomen formulier toegezonden, waarop zij konden aangeven of de gevraagde gegevens beschikbaar waren, en zo ja, in welk format en op welke termijn aanlevering mogelijk zou zijn.

Tabel 3.1: Overzicht benodigde gegevens

Benodigd gegeven	Beschikbaar Ja/nee	format	Aanlever termijn
historische faalgebeurtenissen			
Objectkenmerken			
ligging (x,y,z)			
materiaal			
Wanddikte			
Diameter			
jaar van aanleg			
bijzondere objecten/appendages (locaties ontluchters etc.)			
fundering: onderheid – niet onderheid			
Leidingkenmerken			
nominale werkdruk			
stroomsnelheid bij ontwerpdebiet			
range aan debieten in praktijk			
voorkomen waterslag			
Omgevingskenmerken			
kruisingen met andere infrastructuur			
Zetting			
sonderingsdata		GEF- format?	
Grondwaterstand			

De beheerders gaven aan te beschikken over vrijwel alle benodigde gegevens. Het ontsluiten van de verschillende gegevens bleek echter alleen mogelijk met de nodige moeite.

Historische faalgebeurtenissen

Historische faalgebeurtenissen zijn beperkt beschikbaar. Zowel Rotterdam als Waternet beschikken over een registratie van faalgebeurtenissen van de afgelopen jaren. De wijze en mate van detail van vastleggen van de gebeurtenissen verschilt daarbij wel tussen beiden. Rotterdam heeft sinds 2015 een duidelijk overzicht met aard en locatie van de gebeurtenis, de oorzaak en de gevolgen op hoofdlijnen. Waternet heeft een overzicht met locatie en oorzaak van falen, gecombineerd met lokale leidingkenmerken.

Objectkenmerken

De objectkenmerken zijn bij beide beheerders op zich redelijk compleet. De ligging (x,y) is goed bekend, de z-ligging is niet voor alle leidingen direct goed beschikbaar. Het materiaal en de diameter zijn altijd beschikbaar, de wanddikte niet in alle gevallen. Het jaar van aanleg is bekend en Rotterdam beschikte ook over een overzicht van de ligging van bijzondere objecten en appendages. Of een leiding onderheid is, is niet altijd beschikbaar.

Leidingkenmerken

De leidingkenmerken zijn wel beschikbaar, maar het verzamelen vraagt meer moeite dan de objectkenmerken. De nominale werkdruk en de stroomsnelheid bij het ontwerpdebiet komen uit ontwerprapporten. Niet altijd is informatie beschikbaar over het optreden van waterslag. Debietmetingen zijn wel beschikbaar bij veel gemalen, maar bij grotere, vertakte, persleidingen moet het debiet per leidingsegment hieruit afgeleid worden. Dit vraagt om maatwerk per leidingsegment.

Omgevingskenmerken

De omgevingskenmerken zijn niet zo gestructureerd aanwezig als de objectkenmerken. Kruisingen met andere infrastructuren moeten vaak van oude technische tekeningen op pdf's worden afgeleid. Zowel Rotterdam als Waternet beschikken over zettingskaarten met de huidige zettingssnelheid. Voor het faalkansmodel is het echter nodig om enkele decennia vooruit te kijken. Dit is de reden dat Deltares de zettingsverwachting heeft opgesteld aan de hand van beschikbare bodemkenmerken (zie paragraaf 4.2). Grondwaterstandsgegevens zijn niet beschikbaar gekomen in het project, hoewel beide beheerders beschikken over informatie over de grondwaterstanden. Dit is echter weer elders belegd in de organisaties.

Benodigde inspanning om aangeleverde data te verwerken

Het uitwisselen van areaalgegevens van persleidingen is duidelijk nog een minder vaak doorlopen procedure dan het uitwisselen van gegevens over vrij verval riolering. Dit laatste is staande praktijk ten behoeve van rioleringsberekeningen. Rotterdam heeft bijvoorbeeld ten behoeve van het project een export gemaakt die de benodigde gegevens uit het beheerpakket heeft getrokken. Hierbij bleek een aantal iteratieslagen nodig, omdat niet alle benodigde gegevens (zoals z-waarden begin-eind leidingstuk of kloppende binnen- buitendiameter met wanddikte) in een keer goed mee waren gekomen.

Ook bleek het koppelen van zettingsbestanden aan leidingstukken, waarbij in GIS de zetting per leidingsectie is toegekend, vrij bewerkelijk. Voor dit project betekende dit een vrij grote inspanning, maar is voor de toekomstige toepassing van het faalkansmodel te zien als een opstartprobleem. Immers, de benodigde beheerdata zijn wel beschikbaar, maar nog niet makkelijk te ontsluiten.

Gegevens op een klein detailniveau, zoals segmentlengte, type koppelingen tussen buissegmenten, toleranties ten aanzien van hoekverdraaiing etc., zijn echter niet vastgelegd in de beheerpakketten. Dit geldt overigens ook voor vrij verval riolering. Dit betekent voor het faalkansmodel dat nu aannames zijn gedaan over deze aspecten. Aangezien deze gegevens nauw samenhangen met materiaaltype en fabricaat, is het wellicht mogelijk om dergelijke gegevens centraal te ontsluiten, conform het initiatief in de drinkwatersector.

4 Modelling faalmechanismen

4.1 Keuze faalmechanismen

Er is aansluiting gezocht bij bestaande initiatieven richting beschrijving en beheersen van faalgedrag van persleidingen. Zo is er onder auspiciën van STOWA/RIONED een inventarisatie gemaakt van faalmechanismen, die is verwerkt in een zogenaamde foutenboom, (zie ref. [1]).

Binnen Fase 1 van het huidige traject voor de ontwikkeling van het faalkansmodel is een selectie in mechanismen gemaakt die:

- gebruik maken van bestaande kennis (geen nieuwe model kennis ontwikkelen);
- onderkend kunnen worden als significant;
- leiden tot een gekwantificeerde faalkans;
- zich beperkt tot een select aantal mechanismen, voldoende voor een Proof of Principle.

Met deze criteria zijn de mechanismen in een werksessie met de kennispartners geplaatst in een keuze matrix op basis van “relevantie” versus “beschikbare kennis”. Figuur 4.2 geeft hiervan het resultaat weer.

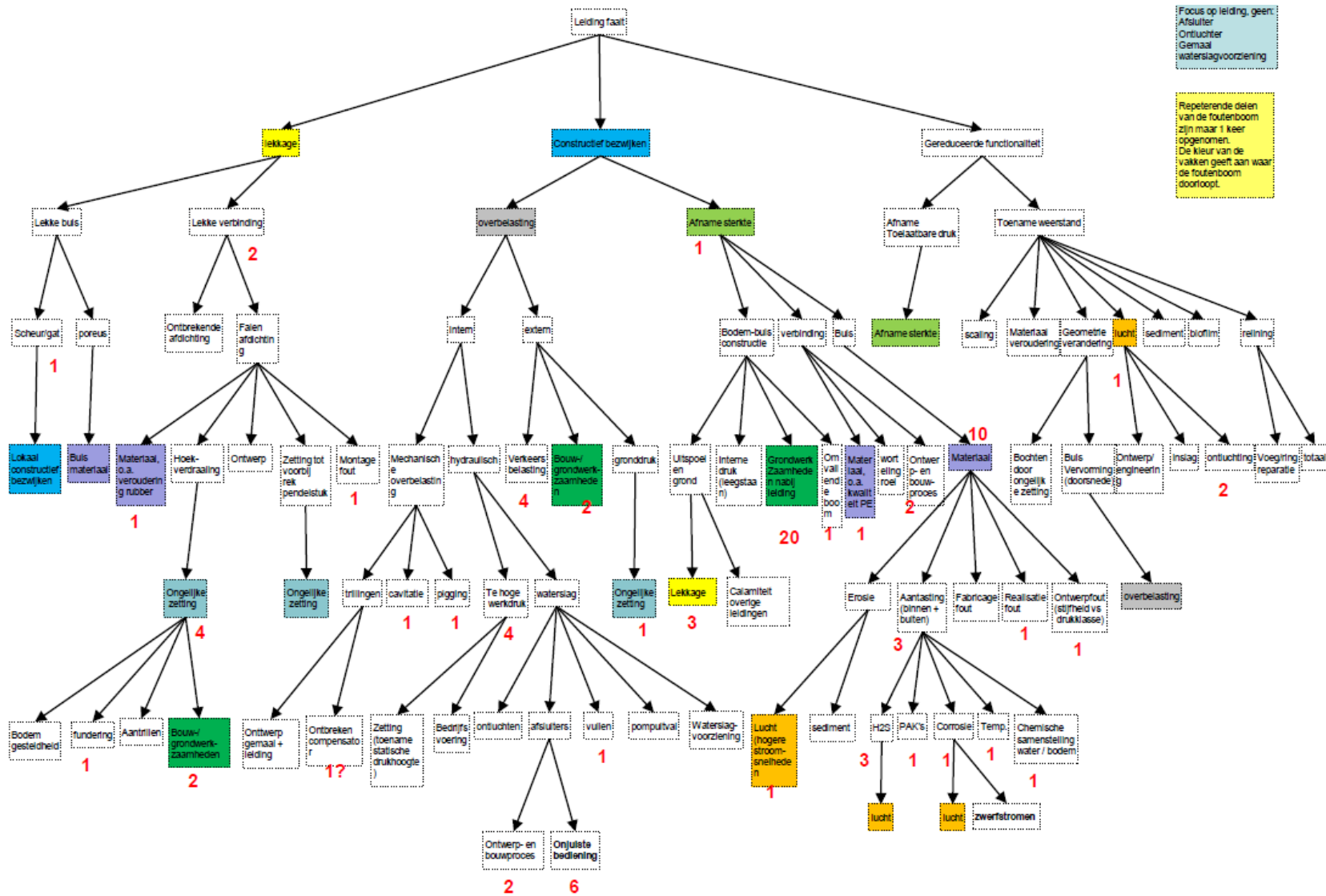
Dit heeft ertoe geleid dat in Fase 1 de volgende faalmechanismen (in combinatie) worden gemodelleerd:

- breuk leiding door zettingsverschillen;
- lekkage bij voegen door zettingsverschillen;
- breuk leiding door inwendige chemische aantasting.

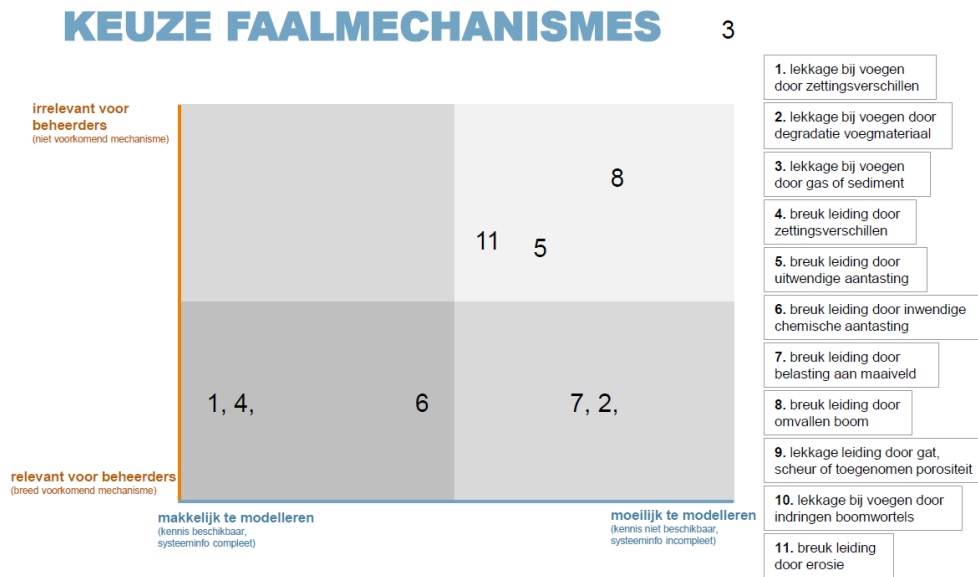
Het deelmodel zettingen wordt behandeld in paragraaf 4.2. Inwendige chemische aantasting, gemodelleerd als wanddikteafname wordt toegelicht in paragraaf 4.3. Breuk leiding en lekkage voegen zijn belastingeffecten en worden middels het constructief gedrag van de leiding gemodelleerd, zie paragraaf 4.4.

Focus op leiding, geeft:
Afslutter
Ontluchter
Gemaal
waterslagvoorziening

Repeterende delen van de foutenboom zijn maar 1 keer opgenomen. De kleur van de vakken geeft aan waar de foutenboom doorloopt.



Figuur 4.1: Foutenboom voor persleidingen; met falen van een leiding als topgebeurtenis, ref. [1].



Figuur 4.2: Positionering van faalmechanismen in keuze matrix “relevantie kennis” versus “beschikbare kennis”.

4.2 Deelmodel zettingen (onderdeel van stap [4] in Figuur 2.1)

4.2.1 Algemeen

De vervormingen van een persleiding veroorzaken aanvullende spanningen in de persleiding. Dit kan zowel een horizontale als een verticale grondvervorming zijn. In de praktijk is de verticale grondvervorming dominant, daarom is deze rapportage beperkt tot zettingen (verticale grondvervorming).

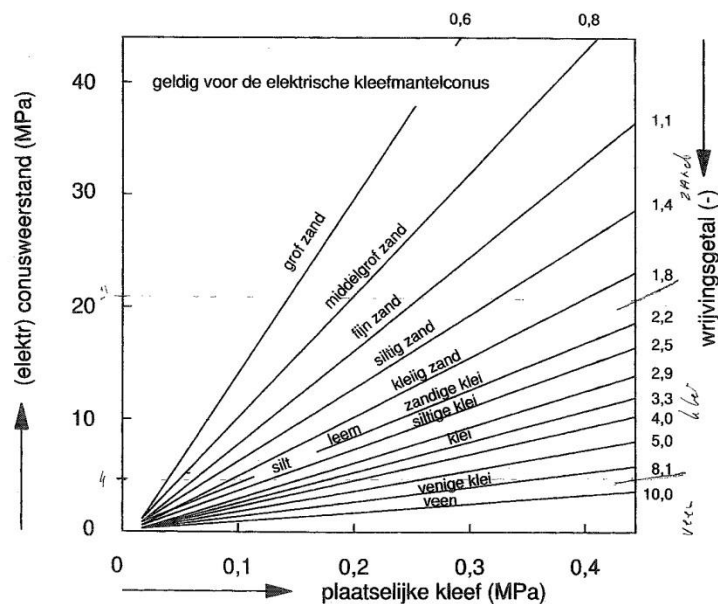
In de volgende paragrafen wordt de modellering van de zetting beschreven. Voorafgaand aan de berekening van de zetting en de beddingconstanten is eerst een schematisatie van de ondergrond gemaakt, waarbij de grond is geschematiseerd in grondlagen. Voor de vastgestelde grondlagen zijn de grondeigenschappen bepaald (§4.2.2). Vervolgens worden de zettingen (§4.2.3) en de z.g. grondveren (§4.2.4) berekend. In de daarop volgende paragrafen wordt het berekeningsproces beschreven (invoer §4.2.5, schema §4.2.6 en uitvoer §4.2.7).

4.2.2 Schematisatie grondlagen

De classificatie van de grondlagen heeft in eerste instantie plaatsgevonden op basis van de uitgevoerde sonderingen en boringen uit de databases van DINO. Het gebruik van de gemeten conusweerstand en wrijving (kleef) bij sonderingen is in Nederland een gangbare wijze om grondlagen te onderscheiden. Er is geen Nederlandse norm van het Nederlands Normalisatie Instituut (NEN) waarin de classificatie op basis van de meetresultaten van de sondering wordt gegeven. De nationale en internationale literatuur geeft diverse methoden om tot een classificatie te komen. Bij de keuze van de methode is rekening gehouden met de volgende eisen:

- Gepubliceerd in een Nederlandse richtlijn of handboek.
- Eenvoudige methode die leidt tot een algemene classificatie (hoofdbestanddeel en toevoegingen van grondsoorten).
- Aansluiting op de beschrijving in tabel 2b in NEN9997-1, ref. [2].

Op basis van deze eisen is gekozen om gebruik te maken van de methode van Begemann. Deze methode is gebaseerd op eenvoudige regels die leiden tot een classificatie van het grondmateriaal bestaande uit een hoofdbestanddeel (zand, klei, veen) en een bijmengsel (zandig, kleiig, venig of organisch). Als gevolg van de eenvoud resulteert toepassing van de regels in een overzichtelijk beeld van de grondopbouw. De classificatieregels van de methodiek zijn weergegeven in de onderstaande Figuur 4.3.



Figuur 4.3: Classificatie grondlagen uit sonderingen (methode van Begemann)

De grondwaterstand die bij de zettingsberekeningen is gebruikt, is een gemiddelde grondwaterstand. Deze gemiddelde waarde is ontleend aan het NHI. Het Nederlands Hydrologisch Instrumentarium (NHI) is de verzameling van software en data voor het ontwikkelen van grondwater- en oppervlaktewatermodellen voor Nederland op landelijke en regionale schaal. In een eventuele volgende fase van het project is het mogelijk om tijdelijke extremen in grondwaterstand (bijvoorbeeld langdurige droogte) ook mee te nemen in de modellering.

4.2.3 Berekening zetting

Er wordt bij zetting onderscheid gemaakt tussen de primaire spanningsafhankelijke zetting en de secundaire spannings- en tijdsafhankelijke zetting. Beide zettingscomponenten worden in de berekening meegenomen. De zettingsparameters van de grondlagen zijn ontleend aan tabel 2b van NEN EN 1997, ref. [3] (en NEN9997-1, ref. [2]).

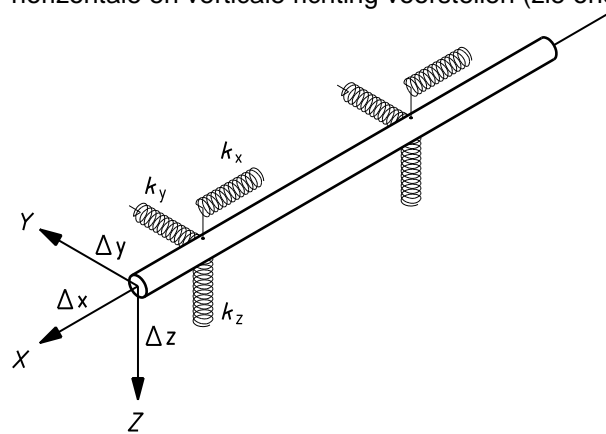
4.2.4 Berekening veerstijfheid

Relatieve beweging van de buisleiding ten opzichte van de omringende grond, bijvoorbeeld door grondzettingen, leidingzakkingen, thermische expansie of

expansie door inwendige druk, wordt door de grond tegengewerkt. Dit leidt tot buigende momenten en krachten in de leiding. 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 spanningen, gemaakt.

De berekende waarden van buigende- en torsiemomenten, normaal- en dwarskrachten, relatieve verplaatsingen en grondreacties bij ondergrondse buisleidingen zijn afhankelijk van de modellering van de interactie tussen de leiding en de omringende grond.

Voor de berekening van de buisleiding in de grond (systeemberekening) 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 ($\Delta x \times k_x$, $\Delta y \times k_y$ en $\Delta z \times k_z$) in axiale, horizontale en verticale richting voorstellen (zie onderstaande Figuur 4.4).



Figuur 4.4: Modellering grondveren

De grootte van de grondreacties vormen een niet-lineaire functie met de relatieve verplaatsingen (Δx , Δy , Δz) van de buis ten opzichte van de omringende grond. Deze functie kan worden geschematiseerd tot een samenstel van bilineaire veren in de drie hoofdrichtingen. 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 'evenwichtsdragvermogen' 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 NEN 3650 Bijlage C, ref. [4].

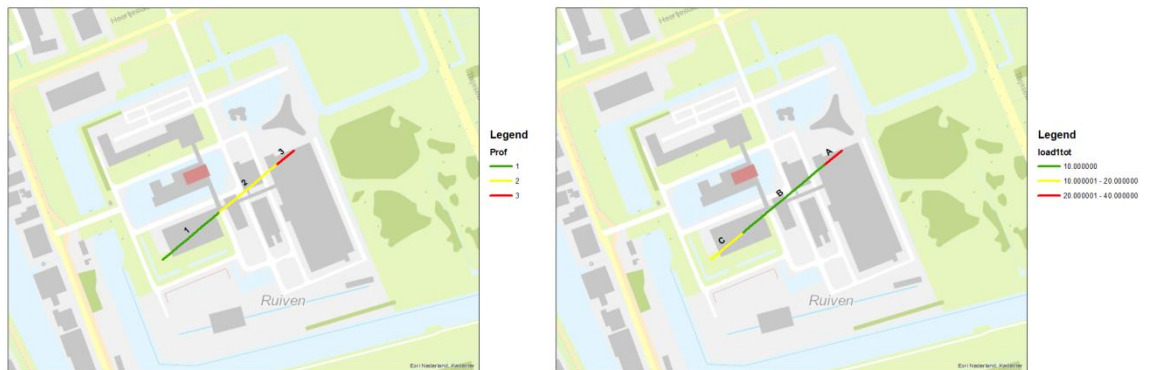
4.2.5 Invoer

Het doel van het project is om op termijn een via GIS ontsloten tool te hebben. Daarmee ligt een deel van de invoer al vast met de huidige GIS-bestanden van de beheerders. Voor dit project zal aanvullende informatie toegevoegd moeten worden aan de huidige GIS-bestanden om de leiding informatie voor de berekeningen compleet te maken. Vermoedelijk moeten de bestanden ook opgeschoond en aangevuld worden. Tenslotte zullen de beheerders waarschijnlijk verschillende formats gebruiken. Dit project lijkt een goede start om deze bestanden te uniformeren.

Een aanzet voor de extra velden in de attribute tabel van een GIS-bestand staat hieronder.

veld	omschrijving	type
DATUM_AAN	datum aanleg [dg-md-jr]	string
AANLEG	aanlegmethode ["sleuf"]	string
BUISLENGTE	lengte tussen 2 koppelingen [m]	real
KOPPELING	type koppeling ["mof1"/"las"/"mof2"]	string
MATERIAAL	["beton"/"staal"	string
EMODULUS	/"gietijzer"/"HDPE"/"pvc"]	real
	elasticiteits modulus [kPa]	real
NU	dwarscontractiecoëfficiënt [-]	real
DIAMETER	uitwendige diameter [m]	real
WANDDIKTE	wanddikte [mm]	real
VOL_GEW	volumieke gewicht buis [kN/m ³]	real
MIN_DRUK	minimale druk [kPa]	real
MAX_DRUK	maximale druk [kPa]	real
Q_DROOG	debiet zonder neerslag [m ³ /h]	real
Q_NEERSLAG	debiet bij neerslag [m ³ /H]	string
POMPSTURING	AANUIT / GESTUURD	integer
BELUCHTERS	1/0 [True/False]	string
ONDERHOUDSTATUS	filenaam	real
BOOGSTRAAL	straal [m]	real
Z1	diepte punt 1 leiding [m NAP]	real
Z2	diepte punt 2 leiding [m NAP]	real
(MV1)	maaiveldniveau punt 1 leiding [m NAP]	real
(MV2)	maaiveldniveau punt 2 leiding [m NAP]	real
VERKR	verkeer intensiteit/maximale belasting [ntb]	

De informatie voor de berekening van de zettingen zijn de grondopbouw en de belasting. Voor beide lijkt het niet wenselijk om deze informatie op te slaan in de attribute tabel van persleidingen. Zowel omdat dit geen leiding specifieke gegevens zijn, maar ook omdat de structuur van de grondopbouw zich slecht laat beschrijven in een GIS-omgeving (liever een database structuur). Een tegenargument is dat het niet onmogelijk is om deze informatie zo op te slaan en dat de informatie dan bijeen wordt gehouden. Als tijdelijke oplossing is de informatie voor dit project opgeslagen in een Excel spreadsheet. Voor de visualisatie is een vertaling naar twee GIS shapefiles gemaakt; de belasting en de ondergrond (zie onderstaande Figuur 4.5).



Figuur 4.5: Voorbeeld ondergrond resp. belasting

4.2.6 Berekeningsschema

De berekeningen voor de leiding worden gemaakt op basis van de shapefile voor de leiding zelf. Deze shapefile heeft hiervoor eerst een “voorbewerking” ondergaan. Om praktische redenen zijn de leidingstukken eerst op geografische volgorde gezet. Dit houdt in dat de volgorde is aangepast en soms ook de richting is aangepast (begin en eind verwisseld). Vervolgens zijn leidingdelen opgeknipt als deze de grenzen van een belastinggebied of van een ondergrondgebied doorsnijden. Hierdoor krijgt ieder leidingstuk een unieke belasting en ondergrond. De leiding wordt leidingstuk voor leidingstuk afgelopen waarbij steeds een berekening wordt uitgevoerd voor:

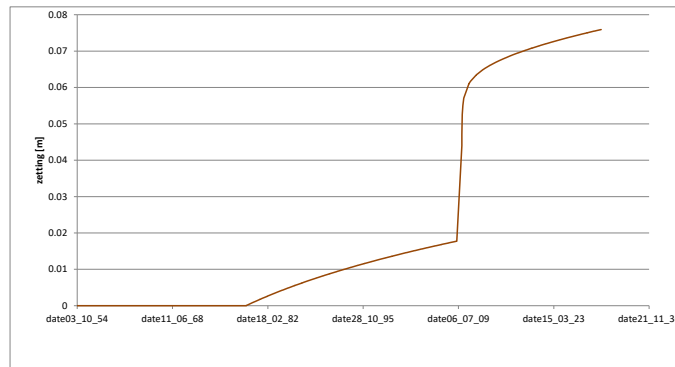
- Het begin- en eindpunt van het leidingdeel
- Alle mogelijke grondprofielcombinaties in het “ondergrondgebied” van het leidingdeel
- De grootste en kleinste belasting in het “belastinggebied” van het leidingdeel

De eigenlijke berekening bestaat uit twee delen:

- A. *Berekening grondzetting* De berekening van de grondzetting in de tijd op leiding-as niveau
- B. *Berekening grondveren* De berekening van de grondveren waarmee de ondersteuning van de leiding wordt beschreven

A Berekening grondzetting

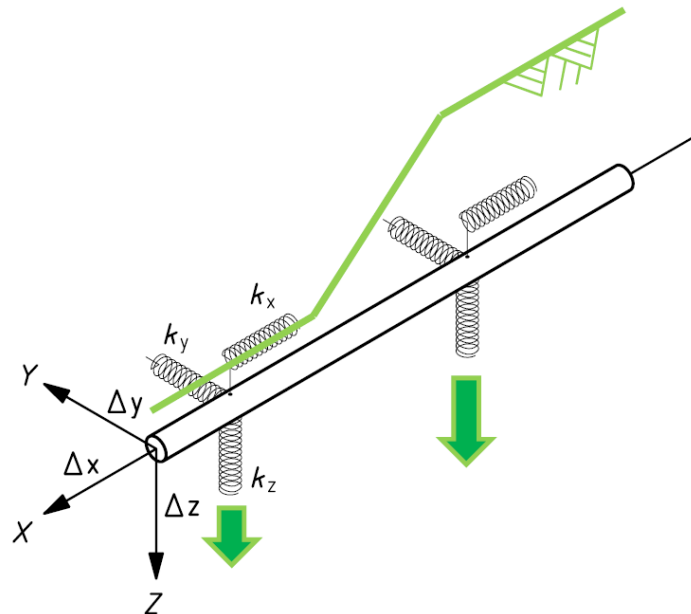
Het verloop van de zetting in de tijd wordt berekend. In de tijd neemt de zettingsnelheid van de grond af, de zogenaamde kruip. Als er een nieuwe ophoging is, neemt de zettingsnelheid weer toe. Voor de leiding is alleen de zetting op het niveau van de leiding-as van belang. Ook is alleen de zetting vanaf het moment dat de leiding is aangelegd van belang. Ter illustratie is hieronder in Figuur 4.6 een zettingsverloop weergegeven. Te zien is dat in dit voorbeeld alleen de zetting vanaf de aanleg op 1 januari 1979 is gebruikt. Ook is te zien dat er in 2010 een toename van de belasting is waardoor de zettingen vanaf dat moment weer (tijdelijk) sneller verlopen.



Figuur 4.6: Voorbeeld zettingsverloop (voor leidingberekening) in de tijd

B Berekening grondveren

De zetting van de ondergrond wil de leiding mee naar beneden trekken. De zettingen zijn echter niet constant van grootte langs de leiding. Zo zal de zetting onder de kruin van een talud groter zijn dan de zetting onder de teen van een talud. Ook zal de zetting bij een slappe ondergrond groter zijn. Dit effect van het meer of minder naar beneden trekken van de leiding door grondzettingen wordt tegengewerkt door de (stijfheid van) de leiding. Door de grond rondom de leiding te modelleren als veren (zie Figuur 4.7) ontstaat een compleet rekenmodel.



Figuur 4.7: Modelling grondveren en zetting grond

Het computerprogramma DGeoPipeline is gebruikt om de parameters van deze grondveren conform NEN 3650, ref. [4], uit te rekenen.

4.2.7 Uitvoer

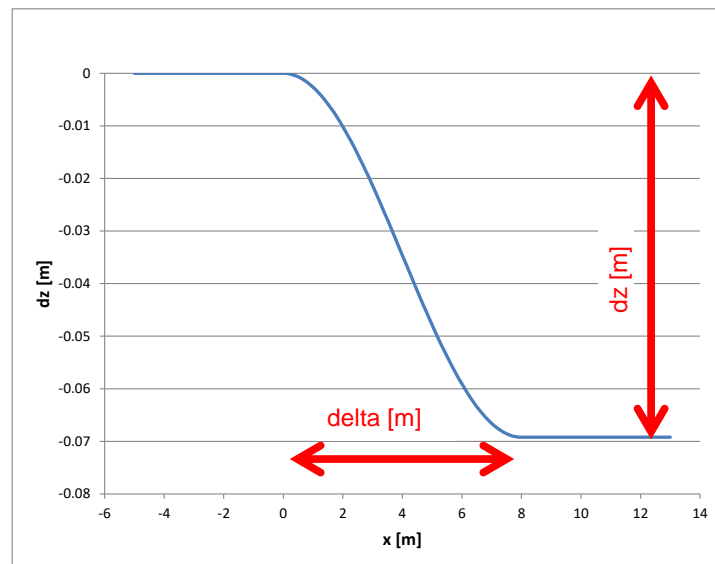
Analoog aan de berekeningen bestaat de uitvoer uit twee onderdelen:

- A. Uitvoer grondzetting
- B. Uitvoer grondveren

De uitvoer is weggeschreven in een z.g. csv-file. De is een bestands formaat dat is in te lezen door spreadsheet programma's en door GIS programma's. Deze csv-file is eenvoudig te koppelen aan de leiding shapefile. Hiervoor is in beide files dezelfde rij volgorde aangehouden. Ook zijn de indices van de leidingdelen uit de shapefile opgenomen in de csv-file.

A uitvoer grondzetting

Voor een leiding is de absolute zetting van de ondergrond eigenlijk niet van belang. Deze zetting kan de buis immers spanningsvrij volgen. Daarom is de berekende grondzetting uitgevoerd in een vorm die wel potentiële spanningen in de buis geeft en die eenvoudig visueel is weer te geven met begrijpelijke eenheden. Deze vorm is een sinusvorm zoals weergegeven in de onderstaande figuur. Op deze manier is het zettingsverloop met twee parameters beschreven: De verschilzetting "dz" en de lengte "delta" waarover de verschilzetting plaats heeft.



Figuur 4.8: Uitvoer zetting ondergrond

B uitvoer grondveren

De parameters van de grondveren worden berekend met DGeoPipeline. Deze berekeningsresultaten zijn direct weggeschreven naar de uitvoer met de benaming conform DGeoPipeline.

4.3 Deelmodel wanddikte afname (onderdeel van stap [4] in Figuur 2.1)

4.3.1 Algemeen

Bij persleidingen kan de wanddikte afnemen als gevolg van aantasting die zich manifesteert ter plaatse van locaties met langdurige gasophoppingen. De plekken waar een gasophopping ontstaat en de mate van aantasting volgen uit:

- hellingshoeken; dus uit de x, y en z-coördinaten in de leiding shapefile
- het debiet en debietverloop in de tijd
- stroomrichting
- het materiaal en de diameter van de leiding
- tijdsduur

Belangrijk in het corrosieproces is of de gasophopingen die ontstaan weer worden afgevoerd, ofwel of er sprake is van “geen transport”, “beperkt transport” of “volledig transport” van gasophopingen. De aantasting wordt bepaald in de vorm van een afname van de wanddikte in millimeters per jaar.

4.3.2 Invoer

Voor dit project waren er in eerste instantie nauwelijks gegevens beschikbaar voor een evaluatie van de wanddikte afname. In een later stadium kwamen voor de tweede locatie gegevens beschikbaar die een meer complete berekening mogelijk maakten. Wegens deze geschiedenis is er gekozen voor een semi handmatige verwerking van de gegevens. De gegevens worden dan ook niet opgeslagen in een “format”. De berekeningswijze is hierdoor ook afhankelijk van de locatie en is daarom uitgebreider beschreven bij de behandeling van de cases in hoofdstuk 6.

4.3.3 Uitvoer

Het berekeningsresultaat is de aantasting van de leiding op verschillende tijdstippen in millimeters. De aantasting heeft plaats inwendig bovenin de leiding.

4.4 Deelmodel constructief gedrag (stap [6.1] in Figuur 2.1)

De gekozen bezwijkmechanismen om in deze eerste fase te modelleren zijn gebaseerd op het constructief falen van de leiding door het gevolg van (een combinatie van) de faalmechanismen wanddikteafname en zettingsverschillen over de leiding. Zoals in paragraaf 4.2 beschreven leiden de zettingsverschillen tot vervormingen van en spanningen in de leiding. Om tot een faalkans te komen, dient daarom het constructieve gedrag van de leiding 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 twee deelmodellen zoals beschreven in paragraaf 4.2 en 4.3
2. de grond- en leidingeigenschappen

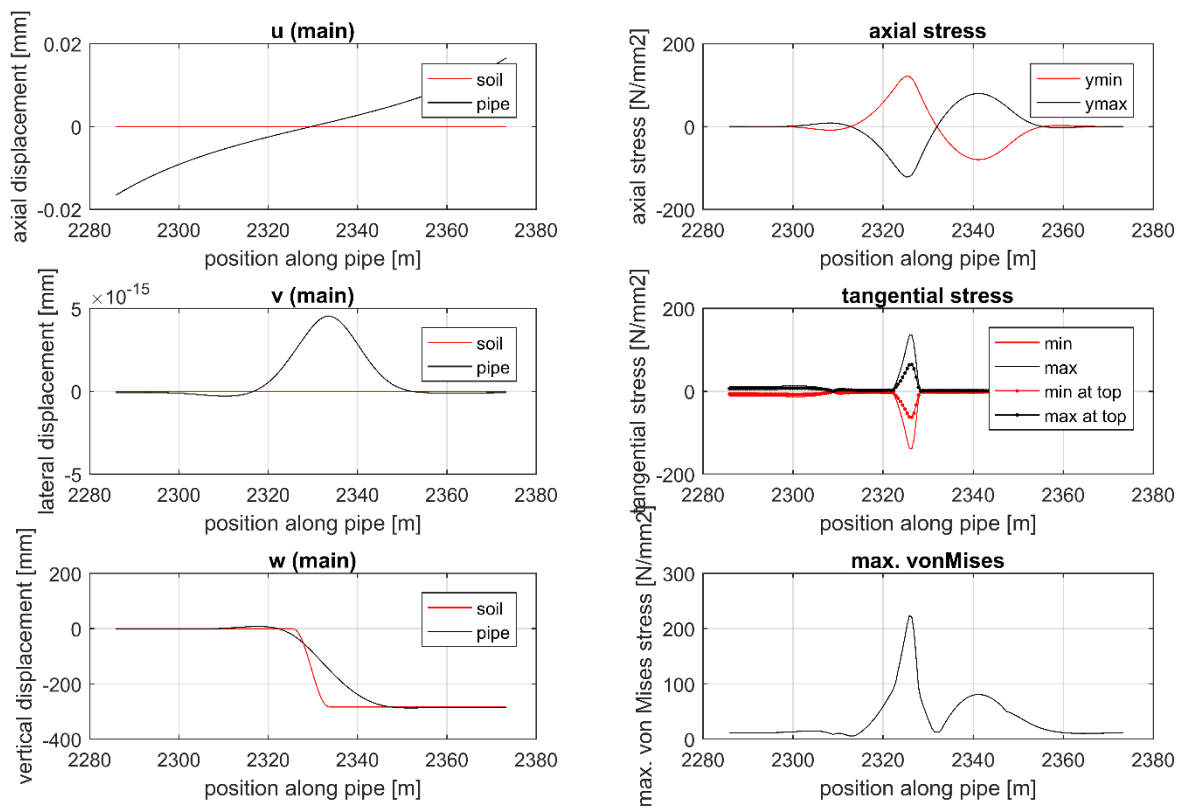
Een volledig overzicht van de benodigde input voor WTube is te vinden in Tabel 4.1.

Output van dit deelmodel zijn onder andere verplaatsingen, hoekverdraaiingen en krachtenverdelingen in de leiding, zoals spanningen in de langsrichting en doorsnede van de leiding. Een voorbeeld van deze output is gegeven in Figuur 4.9. In het faalkansmodel zullen uiteindelijk spanningen in de leiding en hoekverdraaiingen van de koppelingen gebruikt worden voor de faalkansberekening van de leiding.

Tabel 4.1: 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
<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>) afschuif coëfficiënt (<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



Figuur 4.9: Voorbeeld output door Wtube van een stalen leiding

5 Faalkansmodel

5.1 Dataflow faalkansmodel

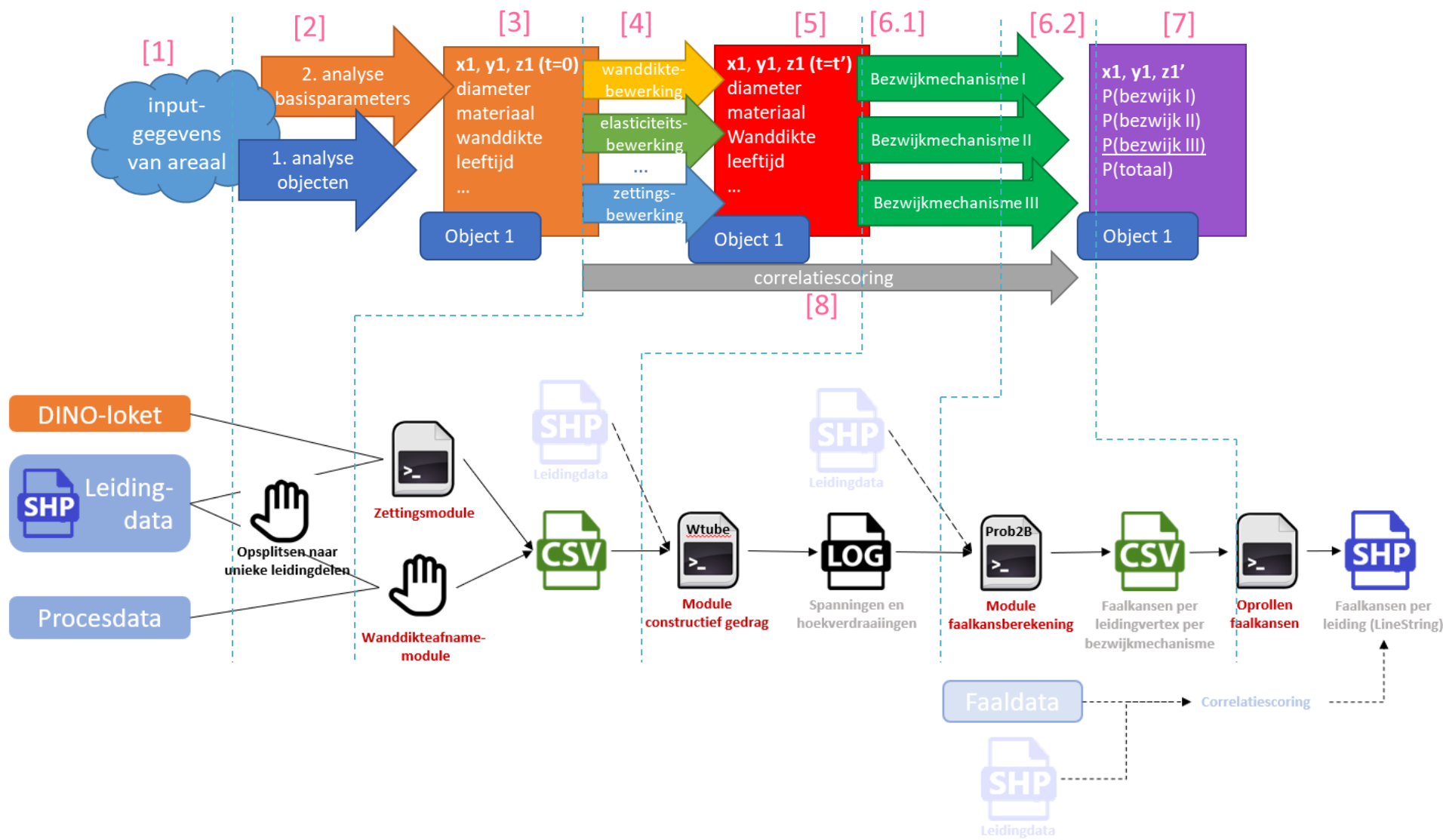
Ten behoeve van het realiseren van een kwantitatieve methode voor de betrouwbaarheidsbepaling (faalkansmodel) van persleidingen in het areaal van de beheerder waarin de complexe interacties tussen de verschillende deelmodellen is geborgd, is in dit project gebruik gemaakt van beschikbare probabilistische 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 5.1.

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 5.1). De deelmodules voor zettingen, wanddikteafname en constructief gedrag in deze dataflow zijn beschreven in hoofdstuk 0 ([4] – [6] in Figuur 2.1 en Figuur 5.1). De stappen in de rechterhelft van deze dataflow die betrekking hebben op de faalkansberekening, komen in dit hoofdstuk aan bod ([7] in Figuur 2.1 en Figuur 5.1).

In de module faalkansberekening worden per leidingdeel (gedefinieerd voor de zettingsmodule in paragraaf 4.2) en per bezwijkmechanisme (overschrijden van toegestane spanningen of hoekverdraaiingen) faalkansen bepaald. De hiervoor gebruikte methodiek wordt beschreven in paragraaf 5.2. De faalkansen voor deze individuele leidingdelen en per bezwijkmechanisme worden vervolgens gecombineerd (oprollen) tot totale faalkansen per leiding. Dit wordt beschreven in paragraaf 5.3. In paragraaf 5.4 is uiteengezet welke output volgt uit het faalkansmodel en in welke vorm dit beschikbaar is. Ten slotte is in paragraaf 5.5 geschetst op welke manier de kennis opgedaan uit het gedetailleerd modelleren van de leidingen in de verschillende deelmodellen, gebruikt kan worden voor de betrouwbaarheidsbepaling van niet gemodelleerde leidingen, aan de hand waarvan een beoordeling van het gehele areaal mogelijk is.

5.2 Faalkans berekening (stap [6.2] van Figuur 2.1 en Figuur 5.1)

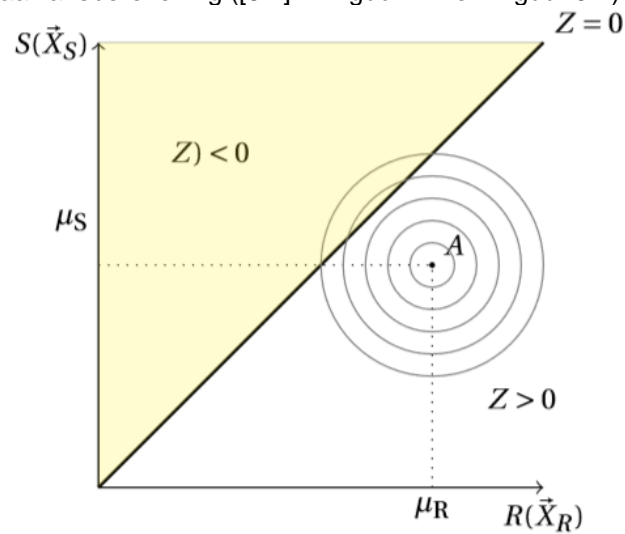
De probabilistische technieken om de faalkans voor constructief falen te bepalen worden toegepast op de individuele leidingstukken met unieke eigenschappen welke volgen uit de leidingdata van de beheerders (hoofdstuk 3) en de deelmodellen zettingen (paragraaf 4.2) en wanddikteafname (paragraaf 4.3). Voor de faalkansberekening is het bij TNO beschikbare model Prob2B toegepast. In deze paragraaf worden de aspecten van deze faalkansberekening verder uitgelicht.



Figuur 5.1: Dataflow faalkansmodel

5.2.1 Grenstoestandsfunctie

De faalkans wordt bepaald door het oppervlak onder de gezamenlijke kansdichtheidsfunctie van de weerstand van de leiding (zie Figuur 5.2, horizontale as – R (esistance)) en de belasting op de leiding (zie Figuur 5.2, verticale as S (olicitation)). De belastingeffecten op de leiding zijn de spanningen die volgen uit het deelmodel constructief gedrag ([6.1] in Figuur 2.1 en Figuur 5.1 en beschreven in paragraaf 4.4). De weerstand van de leiding tegen deze spanningen volgt uit de leidinggegevens ([3] in Figuur 2.1 en Figuur 5.1 en beschreven in hoofdstuk 3) en verschillende bekende sterktemodellen en wordt berekend in de module faalkansberekening ([6.2] in Figuur 2.1 en Figuur 5.1).



Figuur 5.2: Voorbeeld van een gezamenlijke kansdichtheidsfunctie van weerstand en belasting

Aan de belastingkant wordt gebruik gemaakt van discrete kansverdelingen op basis van mogelijke scenario's (laag, middel, hoog). Om tot een faalkans te komen en om de onzekerheden in de modellering te ondervangen is daarom een modelfactor gedefinieerd. Deze beschrijft de modelonzekerheid van het gehele faalkansmodel. De grenstoestandsfunctie welke gebruikt wordt voor de faalkansberekening wordt dan als volgt:

$$Z = R - m_s \cdot S \quad (1.1)$$

Hierin is R de weerstand van de leiding, m_s de modelonzekerheid en S de belasting volgend uit het deelmodel constructief gedrag. Hierin zijn R en m_s stochasten en S een deterministische variabele (uitkomst uit het deelmodel constructief gedrag voor een enkel scenario).

5.2.2 Te toetsen bezwijkmechanismen

Constructief falen van de leiding kan op meerdere manieren plaatsvinden. In het faalkansmodel zullen daarom al deze manieren getoetst worden. De maatgevende toetsing bepaald uiteindelijk de faalkans van de leiding. De volgende faalgebeurtenissen worden getoetst:

1. Het leidingmateriaal kan zelf falen doordat de toegestane spanningen worden overschreden. Dit heeft tot gevolg dat het leidingmateriaal

bijvoorbeeld breekt, wat leidt tot lekkage. Of het leidingmateriaal ondergaat zeer grote vervormingen (vloeit), wat uiteindelijk ook leidt tot draagkrachtverlies en leidingbreuk. In dit geval zullen de spanningen uit het deelmodel constructief gedrag (S) dus getoetst moeten worden aan de toegestane spanningen in het materiaal (R).

In het geval van homogene materialen, zoals staal, gietijzer en HDPE, wordt dit gedaan door middel van de von Mises spanningen. Dit zijn de totale spanningen in de leiding opgebouwd uit spanningen in verschillende richtingen. Deze worden getoetst aan de vloeispanning van het materiaal. In het geval van betonnen leidingen worden de snedekrachten in de doorsnede getoetst aan de moment- (en dwarskracht-) capaciteit van de betonnen buisdoorsnede.

Omdat de verschillende spanningen op verschillende locaties in de leiding onder hetzelfde zettingsverschil volledig met elkaar gecorreleerd zijn, wordt in dit geval slechts getoetst aan de maximaal optredende spanningen. In een latere fase van het faalkansmodel (zie paragraaf 5.3) wordt gecorrigeerd voor de kans dat deze maximale spanningen ook daadwerkelijk optreden in het betreffende leidingdeel. Dit is van toepassing omdat de opgedeelde leidingstukken uit het deelmodel zettingen soms korter zijn dan de lengte waarover het zettingsverschil optreedt.

2. Ten tweede kunnen de koppelingen tussen de (betonnen) leidingsegmenten falen doordat de toegestane hoekverdraaiing wordt overschreden. Dit leidt tot lekkage van de leiding en verlies van interne druk. In dit geval worden als belastingeffect de hoekverdraaiingen in de koppelingen uit het deelmodel constructief gedrag (S) getoetst aan de toegestane hoekverdraaiingen van deze koppelingen (R). Er is aangenomen dat stalen, gietijzeren en kunststof leidingsegmenten gelast of gelijmd zijn en deze daarom als continue leidingen kunnen worden beschouwd. In een volgende fase van het project kan worden nagegaan of dit voor gietijzer en kunststof de meest passende aanname is. Een gietijzeren leiding heeft namelijk een ander type verbinding dan staal, welke ook vrij stijf is, maar niet zo vast als bij een stalen leiding.

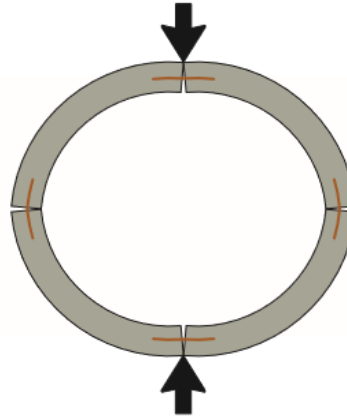
In de huidige fase wordt op dit faalmechanisme daarom alleen getoetst bij leidingen bestaande uit betonnen of asbestcement segmenten. Het is niet bekend waar de koppelingen tussen de leidingsegmenten zich precies bevinden over de leiding. Het is daarom ook onbekend welk zettingsverschil ze precies ondergaan. Daarom wordt er in dit geval gebruik gemaakt van een gemiddelde hoekverdraaiing uit het deelmodel constructief gedrag in plaats van een maximale hoekverdraaiing.

5.2.3 Weerstand leiding

De weerstand tegen breuk van de leiding hangt af van het materiaal van de leiding. In het geval van stalen, gietijzeren en HDPE-leidingen wordt de vloeigrens van het materiaal als weerstand genomen. Voor de waarde van de vloeigrens zijn aannames gedaan voor de gemiddelde waarde en variatiecoëfficiënt welke zijn weergegeven in Bijlage A.2.

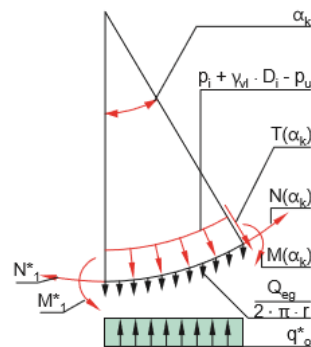
Voor betonnen leidingsegmenten is deze weerstand minder eenduidig. Conform CUR 122, ref. [5], dient in dit geval te worden getoetst op de volgende drie (volledig gecorreleerde) bezwijkmechanismen:

- 1 Overschrijden van de bezwijkmomenten in 4 punten in de doorsnede.



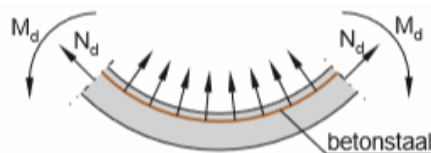
Figuur 5.3: Bezwijkmechanisme overschrijden momentcapaciteit in de betonnen doorsnede

- 2 Overschrijden van de dwarskrachtcapaciteit (T) in de doorsnede.



Figuur 5.4: Bezwijkmechanisme overschrijden dwarskrachtcapaciteit van de betonnen doorsnede

- 3 Bezwijken van het beton aan de binnenzijde van de doorsnede ten gevolge van radiale trekspanningen opgewekt door de rondlopende wapening.



Figuur 5.5: Bezwijkmechanisme overschrijden capaciteit van de betonnen doorsnede ten opzichte van radiale trekspanningen opgewekt door de rondlopende wapening

De faalkans van het leidingdeel wordt bepaald door het maatgevende bezwijkmechanisme. De beschrijving van de capaciteit van de betonnen doorsnede voor de drie bezwijkmechanismen is weergegeven in Bijlage A.1. Ook in dit geval zijn aannames gedaan voor gemiddelde waarden en variatiecoëfficiënten van de

verschillende parameters. Deze aannames zijn te vinden in Bijlage A.2. Het is mogelijk een aantal van deze aannames in een volgende fase van het project te verifiëren door middel van de leidingeigenschappen van de fabrikant.

Momenteel wordt in het faalkansmodel slechts getoetst op bezwijkmechanismen 1 en 3. Mechanisme 2 vraagt namelijk om extra uitvoer uit het deelmodel constructief gedrag. Daarnaast wordt voor mechanisme 1 alleen getoetst aan de maximale snedekracht in de doorsnede of deze de weerstand van de betonnen doorsnede overschrijdt en er daardoor een scharnier ontstaat (vanwege symmetrie ontstaan er altijd 2 scharnieren tegelijkertijd tegen over elkaar). Bij het ontstaan van twee scharnieren is de doorsnede eigenlijk nog niet volledig gefaald. Hier is het model dus conservatief. De verwachting is echter dat wanneer er twee scharnieren gevormd zijn, de derde en vierde scharnier vanwege herverdeling van de krachten relatief snel daarop volgen. Om te kunnen toetsen op vier scharnieren is extra uitvoer vanuit het deelmodel constructief gedrag nodig. Beide extra uitvoer zijn relatief eenvoudig toe te voegen in een eventuele volgende fase.

5.2.4 Onzekerheden aan de belastingkant

Aan de belastingkant wordt gebruik gemaakt van discrete kansverdelingen voor scenario gebaseerde parameters, met name omdat continue kansverdelingen lastig (dan wel onmogelijk) af te leiden zijn. Deze discrete kansverdelingen zijn door middel van expert judgement vastgesteld op basis van mogelijk te verwachten scenario's (zie paragraaf 4.2 en 4.3). Onzekerheden door deze methode van modellering worden gerepresenteerd door de modelonzekerheid (m_s) welke meegenomen wordt in de faalkansberekening. Deze modelfactor is afgeleid op basis van de voorgestelde modelfactoren in de JCSS Probabilistic Model Code voor zettingenmodellering en de modellering van het constructieve gedrag. De exacte afleiding van de modelfactor is te vinden in Bijlage B.

In deze fase van het project (Fase 1 – Proof of Principle) zijn onzekerheden in twee parameters aan de belastingkant meegenomen, namelijk het zettingsverschil en de wanddikteafname uit respectievelijk de twee deelmodellen zettingen en wanddikteafname. Hiervoor zijn een lage, een gemiddelde en een hoge waarde bepaald met respectievelijk de kansen van voorkomen p_1 , p_2 en p_3 . Voor elk van deze combinaties (scenario's) aan invoerparameters wordt een faalkansberekening uitgevoerd waarna deze vermenigvuldigd wordt met de kans van voorkomen van de combinatie. Het sommeren van deze kansen resulteert in een verwachtingswaarde voor de faalkans per leidingdeel waarin beide onzekerheden aan de belastingkant en in de weerstand van de leiding meegenomen zijn.

5.2.5 Faalkansontwikkeling over de jaren

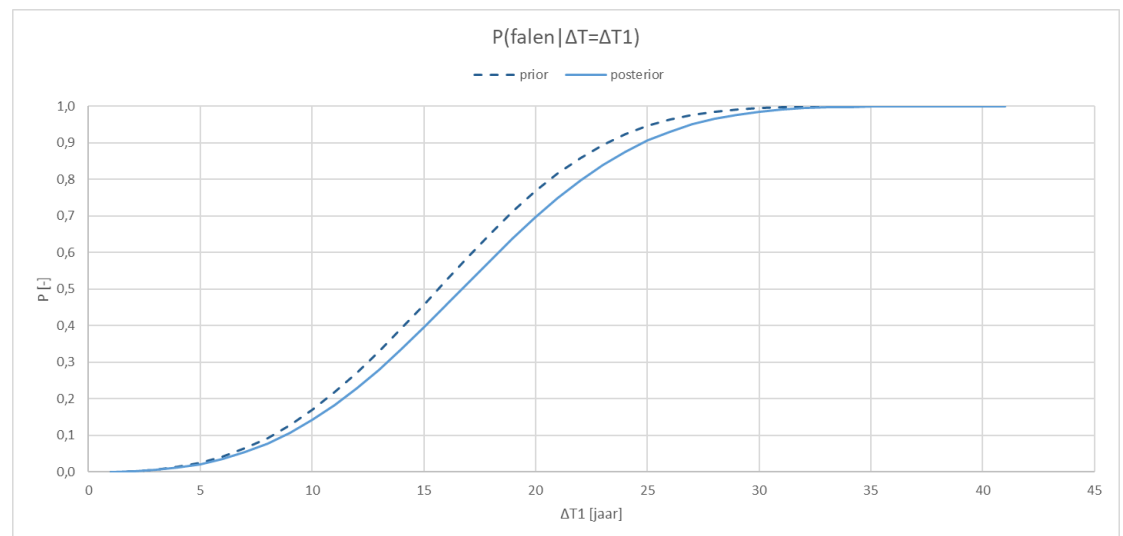
In de huidige fase is voor de beschouwde cases slechts een moment in de tijd doorgerekend, om tot een faalkans in dat betreffende jaar te komen. De deelmodellen zettingen en wanddikteafname zijn echter wel uitgewerkt voor meerdere momenten in de tijd (verleden en toekomst). Met het ontwikkelde faalkansmodel is het daarom ook mogelijk om de faalkans van de leiding voor een ander moment in de tijd te bepalen. Daarmee gaat het ook mogelijk zijn om de faalkans voor een gehele periode van de komende X aantal jaar (bijvoorbeeld een totale faalkans van de leiding voor de komende 10 jaar) af te geven. Dit vraagt nog een extra stap in de modellering en kan eenvoudig in de volgende fase worden uitgewerkt.

5.2.6 Aanpassen faalkans na bewezen sterkte

Berekende/gemodelleerde faalkansen zijn gebaseerd op het samenbrengen van verschillende informatie en kennis(modellen). Dit levert uiteindelijk waarden en spreidingen op voor de faalkansen. Spreidingen zijn afkomstig uit de onzekerheid die er bestaat over de juistheid van de modellen, scenario's en modelparameters (modelinvoer). De onzekerheden kunnen echter, met bijvoorbeeld Bayesiaanse technieken, bijgesteld worden op basis van waarnemingen. Een voorbeeld hiervan is bewezen sterkte.

Ofschoon niet uitgevoerd binnen de huidige fase van het onderzoek, volgt hieronder ter illustratie een voorbeeld.

Stel er is voor een leiding een jaarlijkse faalkans berekend (telkens voor de condities - zetting, wanddikte - die in dat jaar gelden). Over de jaren heen kan dan voorspeld worden wat de faalkans zal zijn binnen een bepaalde periode (paragraaf 5.2.5). Stel nu dat gebleken is dat de leiding binnen een periode niet is gefaald (bijvoorbeeld tot en met heden) dan kan deze waarneming gebruikt worden om de faalkansen gewogen bij te stellen zodat een consistenter beeld ontstaat. Figuur 5.6 illustreert een dergelijke bijstelling. Hierbij is het berekende (initiële) verloop eerst geparameteriseerd met een stochast en zijn de waarden voor deze stochast bijgesteld op basis van de waarneming. Andere wegen zijn om de (oorspronkelijke) stochasten in de modellering direct bij te stellen. Net als het gestelde in paragraaf 5.2.5, zijn deze procedures tijdens de Proof of Principle fase nog niet operationeel gemaakt, maar deze kunnen in de navolgende fase wel worden meegenomen.



Figuur 5.6: Voorbeeld van bijstelling van faalkansverloop na bewezen sterkte (prior: initieel verloop; posterior: verloop na bijstelling)

5.3 Oprollen faalkans

De faalkans wordt bepaald voor elk individueel leidingdeel op basis van informatie welke aangeleverd wordt vanuit de leidingdata [1] en de deelmodellen zettingen en wanddikteafname [4] (zie Figuur 2.1 en Figuur 5.1), gegeven dat een bepaalde zetting en/of wanddikteafname aanwezig is. 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 zijn wel met zekerheid aanwezig. Het falen van (een deel van) de leiding vindt dus plaats ten gevolge van zettingen gedomineerd door:

- **Bovenbelasting**

Een van de leidingstukken welke belast wordt door een zettingsverschil ten gevolge van de bovenbelasting, faalt. In dit geval is er sprake van een (mogelijk aan de weerstandkant gecorreleerd) seriesysteem: óf leidingdeel (i) óf leidingdeel (j) etc. faalt eerst. In dit geval is de berekende faalkans ook daadwerkelijk de faalkans van het beschouwde leidingstuk. Er dient nog wel een correctie te worden uitgevoerd wanneer de lengte van het beschouwde leidingdeel veel kleiner is dan de lengte waarover het zettingsverschil plaatsvindt. De kans dat het meest kritische punt van het zettingsverschil zich precies in dit kleine stuk leiding bevindt, is maar klein. Daarmee wordt de faalkans van het leidingdeel ook kleiner.

- **Overgang in grondprofiel**

Een van de leidingstukken welke belast wordt door een zettingsverschil ten gevolge van een overgang in grondprofiel, faalt, gegeven dat deze overgang slechts op een beperkt aantal plaatsen in (het deel van) de leiding aanwezig is. In dit geval is er sprake van een (mogelijk aan de weerstandkant en volledig aan de belastingkant gecorreleerd) seriesysteem: óf leidingdeel (i) óf leidingdeel (j) etc. faalt, gecorrigeerd voor de kans dat de overgang aanwezig is ter plaatse van dit leidingdeel. In dit geval is de berekende faalkans door de module faalkansberekening [6.2] een conditionele faalkans. Gegeven dat het zettingsverschil zich daar bevindt, dan is de faalkans de berekende faalkans P_f . Het enige dat bekend is, is dat er ergens in het leidingdeel een (of meerdere) zettingsverschil(len) aanwezig zijn. Er kan nu alleen een verwachtingswaarde voor het gehele leidingdeel afgegeven worden, waarin zich ten minste één zettingsverschil bevindt. Het afgeven van faalkansen voor kleinere stukken leiding, is alleen mogelijk op basis van de conditionele faalkansen (gegeven dat zich daar een zettingsverschil bevindt, dan is de faalkans P_f).

Het oprollen van de faalkansen van een seriesysteem gebeurt op de volgende manier:

$$P_{f, \text{stelsel}} = 1 - \prod_{i=N_{\text{elementen}}} (1 - P_{f, \text{element}; i}) \quad (1.2)$$

Op deze zelfde manier kan ook de faalkans voor een gehele leiding, wijk, netwerk etc. afgeleid worden.

5.4 Output

Het faalkansmodel levert verschillende soorten output. Naast een kwantitatieve betrouwbaarheidsbepaling in de vorm van een faalkans, levert het faalkansmodel ook de belangrijkste invloedsparameters in de bepaling van deze faalkans. Daarnaast levert het model een indicatie van de onzekerheid, ofwel bandbreedte, van de faalkans, afhankelijk van de onzekerheden in de invoer.

5.4.1 *Faalkans indexering*

Zoals in paragraaf 5.3 al is toegelicht zal wanneer zettingen gedomineerd worden door een overgang van grondprofiel, alleen een verwachtingswaarde voor de faalkans voor een leidingdeel waarin zich ten minste één zettingsverschil bevindt afgegeven kunnen worden. Bij een opsplitsing naar kleinere stukken leiding is er sprake van een conditionele kans gegeven een grondprofielovergang ter plekke van het stuk leiding. Wanneer de zettingen gedomineerd worden door de bovenbelasting, kan er wel een verwachtingswaarde per leidingstuk worden afgegeven.

Er worden per case daarom verschillende kaarten afgegeven; één met de verwachtingswaarden van de faalkans voor de stukken leiding waarbij zetting gedomineerd wordt door een bovenbelasting, één met de verwachtingswaarden van de faalkans voor de stukken leiding waarbij zetting niet gedomineerd wordt door een bovenbelasting, en één met de conditionele faalkansen voor beide stukken leidingen gegeven een zettingsverschil op de meest ongunstige locatie voor elk stukje leiding. De verwachtingswaarden kunnen worden gebruikt wanneer er gekeken wordt naar (een groter deel van) de gehele leiding(netwerk). Er is hier namelijk gecorrigeerd voor de geringe kans in het gelijktijdig voorkomen van de meest kritische scenario's op meerdere plekken in de leiding. Wanneer er wordt ingezoomd op kleinere stukken van de leiding moet ook gekeken worden naar de conditionele kansen. Het beschouwen van slechts de gecorrigeerde faalkansen is dan niet voldoende.

De conditionele faalkansen zeggen alleen iets over het leidingstukje zelf, niet over de gehele leiding. Bijvoorbeeld: wanneer we weten waar de overgang in grondprofiel zich bevindt, kunnen we daar de faalkans bepalen. Echter gaat (modelmatig) op datzelfde moment in alle andere stukken leiding (waarbij de zetting niet gedomineerd wordt door een bovenbelasting) de faalkans nagenoeg naar 0, omdat zich daar dan geen zettingsverschil bevindt. De faalkans voor de gehele leiding (waarbij de zetting niet gedomineerd wordt door een bovenbelasting) is dan gelijk aan de faalkans van het stuk leiding waarover zich dit zettingsverschil voordoet. Deze laatste kaart biedt inzicht in welke stukken leiding het meest gevoelig zijn voor deze overgang in grondprofiel, mocht deze zich daar bevinden. Bij het extra inwinnen van informatie over de exacte locatie van deze overgang, zullen deze stukken leiding bijvoorbeeld eerder geïnspecteerd moeten worden, dan leidingstukken die hiervoor minder gevoelig zijn. Ook voor de stukken leiding waarbij de zetting wel gedomineerd wordt door een bovenbelasting geven deze conditionele kansen extra informatie. Wanneer het zettingsverschil over het meest ongunstige punt van het leidingdeel staat, is de faalkans mogelijk hoger dan eerder afgeleid in de verwachtingswaarde.

Wanneer de wanddikteafname het maatgevende faalmechanisme is, moet er in principe toch altijd sprake zijn van een zetting wanneer de leiding faalt. Alleen wanneer de leiding over de volledige dikte van de wand is aangetast, kan deze constructief falen zonder andere externe invloeden (zoals zettingen). Dit is in deze fase van het project echter niet beschouwd.

5.4.2 *Belangrijkste parameters*

Doordat gebruik wordt gemaakt van verschillende scenario's van input parameters aan de belastingkant in de vorm van de discrete kansverdelingen, volgt direct welke

parameters de grootste invloed hebben op de faalkans. Daarnaast kan op een zeer eenvoudige manier een gevoeligheidsstudie uitgevoerd worden ten opzichte van de overige modelinvoer. In deze fase zijn aan de belastingkant slechts de onzekerheden in het zettingsverschil en wanddikteafname meegenomen. Het is echter mogelijk ook andere parameters op deze manier te modelleren. Het faalkansmodel geeft op die manier naast een faalkans(indexering) ook de belangrijkste parameters als output.

5.4.3 *Bandbreedte in faalkans*

Op eenzelfde manier kan ook de onzekerheid in de berekende faalkans inzichtelijk gemaakt worden. Afhankelijk van de discrete kansverdelingen in de invoer volgt een verwachtingswaarde of gemiddelde conditionele waarde van de faalkans. Er wordt echter ook een worst en best case scenario bepaald die de bandbreedte van de faalkansberekening aangeven. Wanneer er meer zekerheid is over de invoer, bijvoorbeeld doordat er metingen zijn uitgevoerd voor de wanddikteafname, kan de onzekerheid in de faalkans, en daarmee deze bandbreedte, verkleind worden.

De kaart met conditionele kansen resulteert in een bandbreedte van de faalkans van de gehele leiding. Voor de gehele leiding waar zettingen niet gedomineerd worden door de bovenbelasting is de ondergrens aan de faalkans gelijk aan de best case conditionele kans op falen van het stukje leiding welke het minst gevoelig is voor dit soort zettingen en de bovengrens aan de faalkans gelijk aan de worst case conditionele kans van het stukje leiding die het meest gevoelig is voor dit soort zettingen. Voor de stukken leiding waar zettingen wel gedomineerd worden door bovenbelasting volgen de worst en best case faalkansen direct uit de scenario's en kunnen deze per leidingstukje afgegeven worden.

5.4.4 *Toegevoegde waarde ten opzichte van huidige methodiek*

Vervangingsbeslissingen zoals nu in praktijk zouden omschreven kunnen worden als het doen van een uitspraak op basis van beperkte gegevens of iets wat nu goed is over 10 jaar ook nog goed is (ja/nee in bovenste diagram van Figuur 5.7), zonder expliciet te maken wat hierin de onzekerheid is, c.q. wat de kans is dat dit gebeurt. Dit staat risico gebaseerde en objectieve beslissingen in de weg.

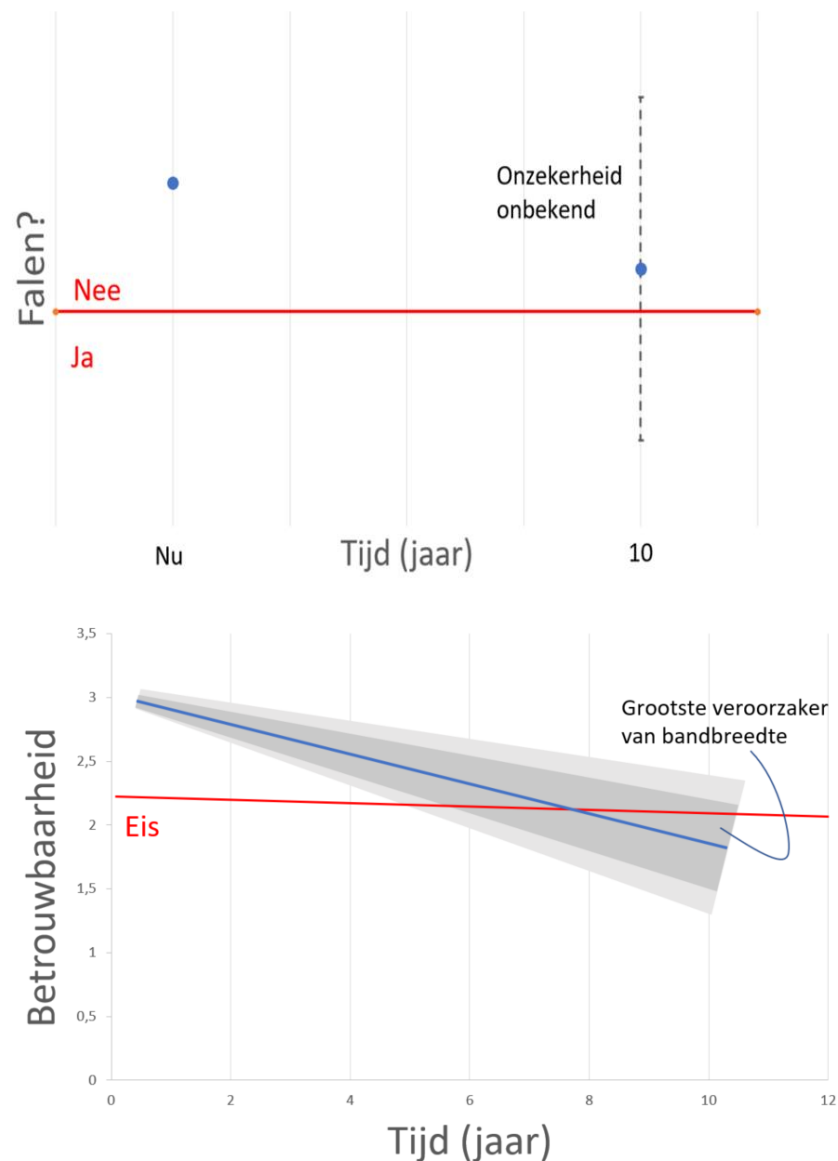
Met de huidige faalkans methodiek is het streven om deze faalkansen juist wel concreet te kwantificeren, dat wil zeggen uit te drukken in getallen, en deze kwantificering zo objectief mogelijk en op basis van zoveel als mogelijk beschikbare informatie te realiseren.

Het kwantificeren en dit op een uniforme en objectieve wijze uitvoeren zal kunnen leiden tot een goede kalibratie van acceptabele en op risico's gebaseerde faalkans niveaus binnen de gezamenlijke branche (onderste diagram van Figuur 5.7).

Naast het kwantificeren van de faalkansen als één getal (zgn. puntschatting), wordt met de methodiek ook de onzekerheid omtrent dit getal in kaart gebracht. Dit biedt de partijen ook de mogelijkheid om hun strategieën aan te passen. Bijvoorbeeld het gebruik van ondergrenzen voor de betrouwbaarheid in geval van risico mijdend beleid, zie Figuur 5.7 (onder).

Puntschattingen, maar met name ook de bandbreedtes zijn interessant om te relateren aan oorzaken. Bevindingen hieruit volgend kunnen dan richting wijzend zijn voor eventueel te nemen maatregelen. Maatregelen betekenen dan niet per

definitie versterking of vervanging, maar kunnen ook inhouden dat meer/betere informatie moet worden ingewonnen voor de situatie ter plekke door bijvoorbeeld een inspectie.



Figuur 5.7: Puntchattingen voor faalkansen (boven) en afname van de betrouwbaarheid over de tijd, inclusief onzekerheidsbandbreedte (onder).

5.5 Correlatiescore

Het toepassen van het faalkansmodel zal uiteindelijk ook leiden tot “lessons learned” en het kunnen leggen van logische verbanden tussen factoren en faalgedrag. Globale trends zullen zichtbaar worden in de invloed van bijvoorbeeld leiding/appendage eigenschappen (materiaal, geometrie, leeftijd, ...), operationele grootheden (debeten, medium, drukverschillen, ...) en omgevingsfactoren (vervuiling, grondwaterstanden, grondeigenschappen, verkeer,). En dit natuurlijk ook voor de trends/relaties van deze factoren met waargenomen faalgebeurtenissen. Het in kaart brengen van deze relatie – zowel via de

faalkansmodellen alsook via data - kan uiteindelijk leiden tot een correlatie score: clusters van eigenschappen kunnen worden gerelateerd aan risico's op falen.

Binnen de huidige fase van het onderzoek zijn slechts 2 cases beschouwd en zijn de zettingen maatgevend gebleken voor het faalgedrag. Natuurlijk speelden ook andere factoren een rol (materiaal, diameter, wanddikte), maar dit conditioneel op de zettingen. Met slechts 2 cases en bij gebrek aan volledige areaal gegevens (met name grondgebieden en zettingsgevoeligheden) is het nog niet mogelijk gebleken een correlatie score in de huidige fase uit te voeren.

6 Cases

In deze Proof-of-Principle fase zijn twee cases uitgewerkt met de (deel)modellen en methodiek, zoals beschreven in hoofdstuk 0 en 5. Deze cases zijn aangedragen door de Gemeente Rotterdam en Waternet, waarna de data is verzameld, zoals beschreven in hoofdstuk 3. Het gaat om de persleiding Holwinde in Rotterdam (paragraaf 6.1) en persleiding Ducaton in Mijdrecht (Waternet) (paragraaf 6.2). In dit hoofdstuk worden de (deel)modelresultaten voor beide persleidingen behandeld.

6.1 Rotterdam – Holwinde

6.1.1 Beschrijving

De eerste gekozen case is de persleiding Holwinde in Rotterdam. Het gebied rond deze persleiding is gevoelig voor zettingen. De gemodelleerde persleiding door middel van het ontwikkelde faalkansmodel is in Figuur 6.1 weergegeven. Het gehele persleidingenlichaam waar dit stuk deel van uitmaakt is weergegeven in Figuur 6.2 waarin het stuk dat gemodelleerd is, is aangegeven in lichtblauw. De rode pijlen geven de stroomrichting aan. De verdelingsfuncties van de debieten in de verschillende tracédelen zijn te vinden in Figuur 6.3.

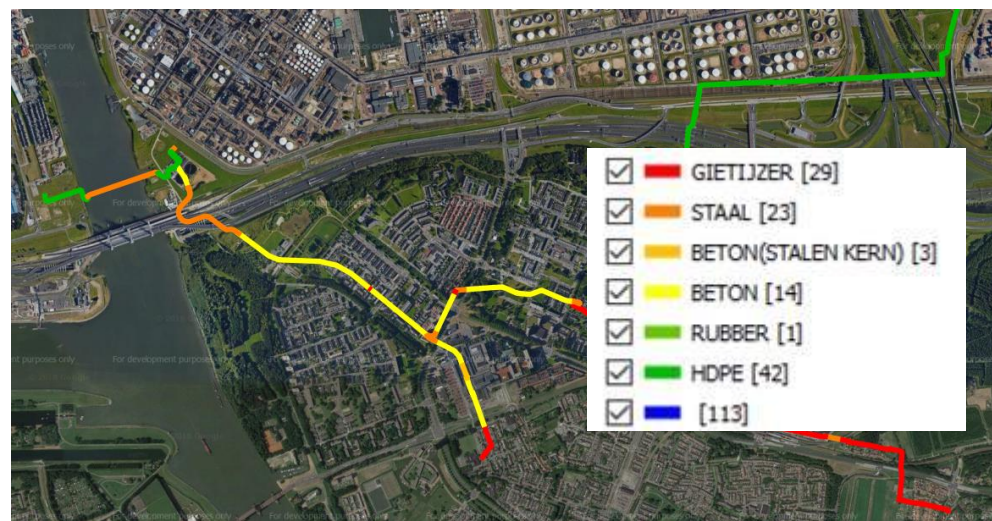


Figuur 6.1: Ligging leiding Holwinde Rotterdam



Figuur 6.4: Aanlegjaren persleiding Holwinde

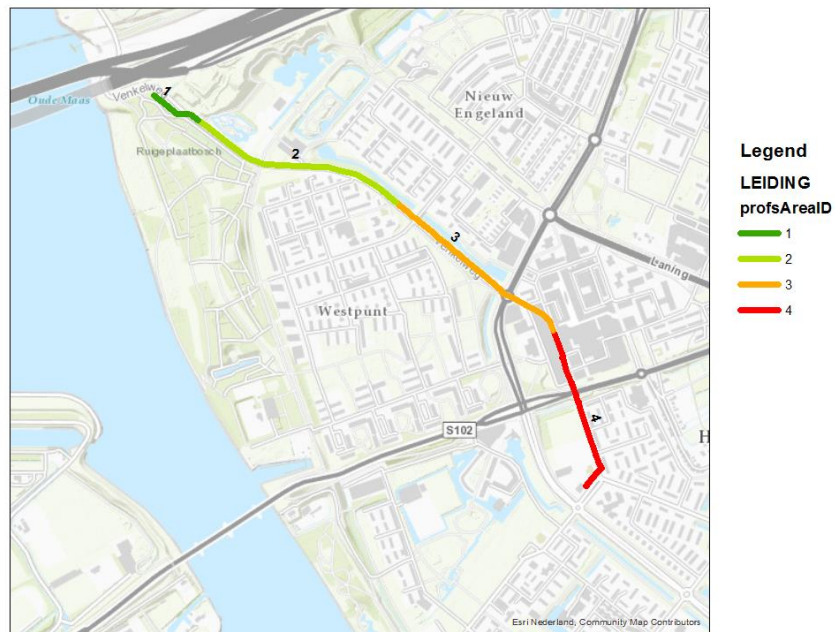
De materialen die zijn terug te vinden in de persleiding zijn weergegeven in Figuur 6.5. In de betreffende leiding hebben we voornamelijk te maken met betonnen leidingsegmenten. Daarnaast is er een klein deel van gietijzer (voornamelijk in het zuiden) en een aantal stukken van staal.



Figuur 6.5: Materialen persleiding Holwinde

6.1.2 Resultaten deelmodule zettingen

De grondeigenschappen veranderen aanzienlijk langs de leiding. De gemiddelde persleiding ligt onder bewoond gebied en in relatief slappe grond wat resulteert in aanzienlijke zettingen (en zettingsverschillen). Er kunnen 4 algemene grondgebieden aangewezen worden langs de beschouwde persleiding. Deze zijn weergegeven in Figuur 6.6.

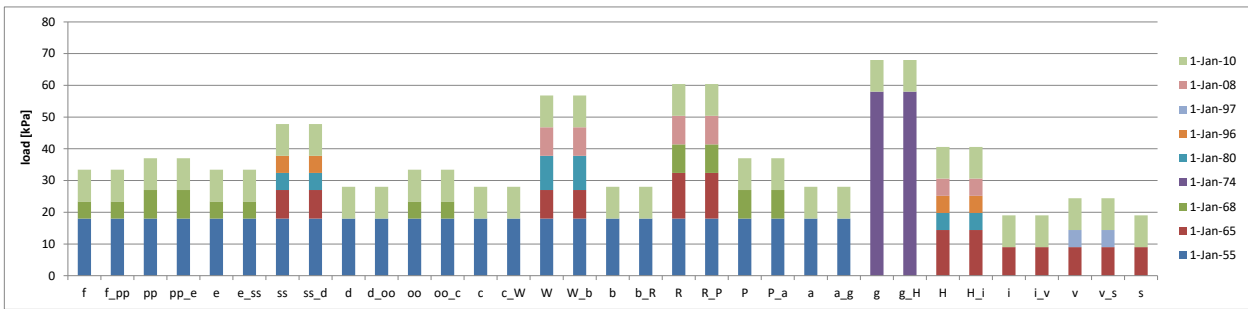


Figuur 6.6: Geïdentificeerde grondgebieden langs persleiding Holwinde

Ook de mate van bovenbelasting verloopt over de leiding. Dit is aangegeven in Figuur 6.7, waarin de mate van bovenbelasting verloopt in grootte van groen naar rood. De verschillende bovenbelasting gebieden zijn aangegeven met de lettercoderingen. Met name bij de kruisingen met een weg zijn hoge bovenbelastingen te vinden door ophogingen ter plaatse. Deze bovenbelastingen zijn cumulatieve belastingen ontstaan over de tijd. In Figuur 6.8 is de bovenbelasting per gebied over de tijd aangegeven. De gebieden zijn hier met dezelfde codering aangegeven als in Figuur 6.7.



Figuur 6.7: Opdeling in bovenbelasting gebieden langs persleiding Holwinde. Bovenbelasting in kPa.



Figuur 6.8: Ontwikkeling van bovenbelasting over de tijd per bovenbelasting gebied langs persleiding Holwinde.

De zettingsverschillen afgeleid door deze deelmodule zijn weergegeven in Figuur 6.9. Deze zettingsverschillen vinden plaats over verschillende lengten. Deze lengten (lengte delta) zijn aangegeven in Figuur 6.10. In deze figuren is voor elk stuk leiding een waarde voor het zettingsverschil en de lengte waarover deze plaatsvindt gegeven. In de faalkansmodellering zijn drie waarden gebruikt; laag, middel (in figuren) en hoog. Deze waarden hebben elk een kans van voorkomen, respectievelijk; 40%, 40% en 20%.



Figuur 6.9: Totale zettingsverschillen uit het deelmodel zettingen voor het gemodelleerde deel van persleiding Holwinde op 1 januari 2019; eenheid [m]



Figuur 6.10: Berekende lengte “delta” voor persleiding Holwinde; eenheid [m]

6.1.3 Resultaten deelmodule wanddikteafname

Tijdens het bepalen van de wanddikte afnames waren (nog) geen gegevens bekend over het debiet in de leiding. De aanname van een gangbare stroomsnelheid in combinatie met de relatief grote inwendige diameter maakt dat een redelijke veronderstelling is dat over de volledige lengte gasophoppingen mogelijk zijn. Dit geeft onderstaande Tabel 6.1 voor de wanddikte afname en het beeld uit Figuur 6.11 voor de wanddikteafname over de leiding. In Tabel 6.1 zijn drie waarden gegeven: laag, middel en hoog. Deze waarden hebben elk een kans van voorkomen, respectievelijk; 40%, 40% en 20%. Deze kansen worden gebruikt in de faalkansberekening.

Tabel 6.1: Wanddikte afname Holwinde Rotterdam inclusief kansen van optreden

Materiaal	Wanddikteafname [mm/jaar]		
	Laag (p = 0,4)	Middel (p = 0,4)	Hoog (p = 0,2)
Gietijzer	0,08	0,1	0,12
Beton	0,15	0,2	0,25
Gewapend beton	0,15	0,2	0,25
Staal	0,08	0,1	0,12



Figuur 6.11: berekende aantasting op 1 jan 2030; eenheid [mm]

6.1.4 Invoer deelmodule constructief gedrag en faalkansberekening

Naast de verzamelde leidinggegevens uit hoofdstuk 3 en de uitvoer van de deelmodellen aantasting en zettingen, is additionele invoer noodzakelijk voor het deelmodel constructief gedrag (Wtube) en voor de faalkansberekening. Deze benodigde invoer (en aangenomen waarden) zijn weergegeven in Tabel 6.2 tot en met Tabel 6.5 voor de verschillende materialen aanwezig in het gemodelleerde deel van persleiding Holwinde. Deze waarden zijn voornamelijk gebaseerd op expert judgement en zijn waar mogelijk getoetst aan beschikbare informatie.

Tabel 6.2: Algemene invoer en aannames constructief gedrag

Parameter	Waarde	Opmerkingen
Interne druk	0,1 bar	Extreem laag gekozen. Alleen stationaire druk, geen drukgolven
Grondwaterniveau	-10 m	Extreem op -10 gezet; geen opdrijf effecten
Vulgraad	100 %	
Dichtheid medium	999 kg/m ³	

Tabel 6.3: Invoer en aannames stalen leiding

Parameter	Waarde	Opmerkingen
Segmentlengte	∞	
Koppelingen	Volledig vast (rotaties en x,y,z)	aangenomen gelaste verbindingen
E-modulus	2,10E11 N/m ²	
G-modulus	8,08E10 N/m ²	
Dichtheid	7850 kg/m ³	
Vloei grens f_{yk}	290 N/m ²	5% onderschrijdingskans ¹
Poisson-ratio ν	0,3	

¹ Zie bijlage A.2

Tabel 6.4: Invoer en aannames gietijzeren leiding

Parameter	Waarde	Opmerkingen
Segmentlengte	∞	
Koppelingen	Volledig vast (rotaties en x,y,z)	Dit is een kleine overschatting voor gietijzeren leidingen
E-modulus	1,40E11 N/m ²	
G-modulus	5,69E10 N/m ²	
Dichtheid	7200 kg/m ³	
Vloegrens f_{yk}	275 N/m ²	5% overschrijdingskans ¹
Poisson-ratio ν	0,23	

Tabel 6.5: Invoer en aannames betonnen leiding

Parameter	Waarde	Opmerkingen
Segmentlengte	6 m	
Koppelingen betonnen leidingen	Scharnierend en niet trekvast (langs leiding)	
Wapeningspercentage	1%	
Vloegrens wapening f_{yk}	400 N/m ²	5% overschrijdingskans ¹
Locatie wapening	Halverwege wanddikte	Alleen langswapening aangenomen
E-modulus	3,00E9 N/m ²	
G-modulus	1,25E9 N/m ²	
Dichtheid	2500 kg/m ³	
Treksterkte beton f_{tk}	1,96 N/m ²	5% overschrijdingskans ¹
Druksterkte beton f_{ck}	35 N/m ²	5% overschrijdingskans ¹
Poisson-ratio ν	0,2	
Toegepaste hoekverdraaiing	600/D _{inwendig}	Vuistregel

6.1.5 Resultaten deelmodule faalkansberekening

De hoogste faalkansen worden gevonden voor de leidingdelen waar zettingen gedomineerd worden door bovenbelasting. Op deze locaties zijn de zettingsverschillen relatief groot en verlopen deze vaak over een relatief korte afstand (lengte delta). De faalkansen voor de leidingdelen waar zettingen niet gedomineerd worden door de bovenbelasting, kunnen slechts per grondgebied gegeven worden. Deze zijn getoond in Figuur 6.12.

Deze faalkansen zijn ook getoond in Tabel 6.6 met een boven- en ondergrens. De bandbreedte is zeker voor grondgebied 3 en 4 groot, omdat de faalkans van de gehele leiding zeer afhankelijk is van de exacte locatie van het zettingsverschil. De faalkans varieert hierdoor mogelijk tussen nihil voor niet zettingsgevoelige locaties en niet kwetsbare leidingdelen en 40% voor wel gevoelige leidingdelen. Dit onderscheid komt later nog uitgebreider aan bod.

Tabel 6.6: Faalkansindexering en bandbreedte voor grondgebieden van persleiding Holwinde

Grondgebied	Faalkansindexering		
	Ondergrens	Verwachtingswaarde	Bovengrens
1	10 ⁻¹²	10 ⁻⁸	10 ⁻⁵
2	10 ⁻¹²	10 ⁻⁶	10 ⁻⁴
3	10 ⁻¹²	0,02	0,4
4	10 ⁻¹²	0,06	0,4

De faalkansen voor de stukken leiding waar de zetting wel gedomineerd wordt door de bovenbelasting zijn te vinden in Figuur 6.13. De boven- en ondergrens zijn

steeds in de labels aangegeven. Ook hier zijn de bandbreedtes soms groot. Dit wordt grotendeels veroorzaakt door het zettingsscenario uit deelmodel zettingen (laag, middel of hoog). De bovengrens wordt bepaald door het hoogste zettingsscenario. Hierbij moet worden opgemerkt dat dit scenario wel de kleinste waarschijnlijkheid van optreden heeft (20% t.o.v. 40% en 40%). Het effect van de aantastingsscenario's op deze bandbreedte is net als voor de algemene faalkansberekening zeer gering.

In Figuur 6.14 zijn daarnaast de conditionele faalkansen getoond voor alle leidingdelen. Dit zijn de faalkansen gegeven een zettingsverschil over het stuk leiding en gegeven dat het meest kritische deel van deze zetting zich bevindt in het leidingstuk. Om die reden zijn ook de faalkansen voor de leidingstukken waarbij de zetting gedomineerd wordt door de bovenbelasting hier anders dan in Figuur 6.13. Dit zijn vaak kleine stukken leiding ten opzichte van de afstand waarover de zetting plaatsvindt. De kans dat het meest kritische deel zich precies bij het stuk leiding bevindt, is dus zeer gering. Om deze reden zijn dan ook hier de verwachtingswaarden van de faalkans (Figuur 6.13) lager dan de berekende conditionele faalkansen (Figuur 6.14).

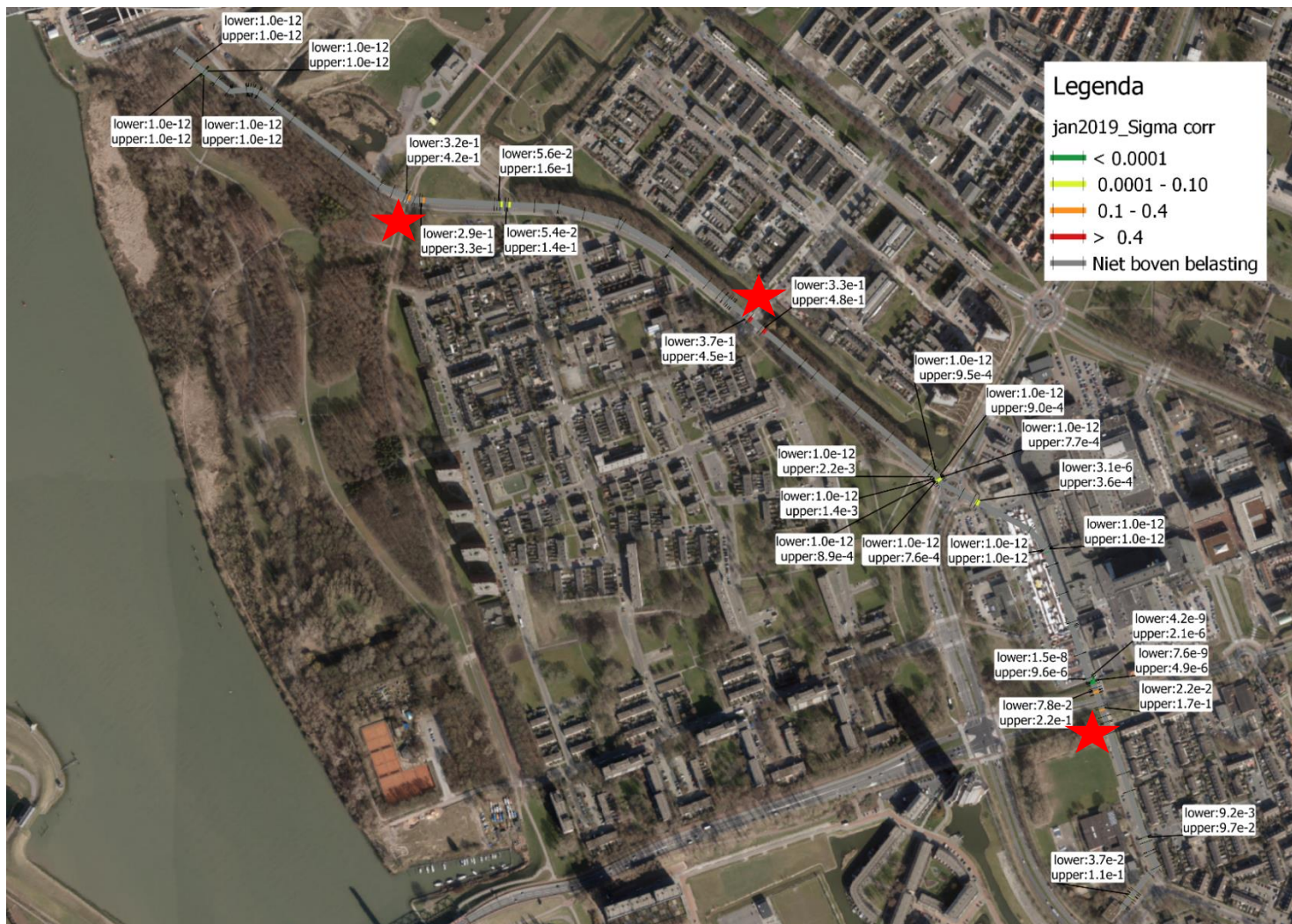
Ten eerste kan in Figuur 6.14 worden opgemerkt dat de hoogste faalkansen worden gevonden op drie punten in de leiding waar een talud-vormige bovenbelasting dominant is ter plaatse van een wegovergang (rode sterren in de figuren). De conditionele faalkansen gegeven het meest ongunstige zettingsscenario gaan hier zelfs richting 1 (of 100%). Hierbij moet wel vermeld worden dat de kans op dit scenario slechts klein is. Ten tweede volgt uit deze figuur dat voor grondgebied 4 (rechtsonder) langs de gehele leiding relatief hoge faalkansen berekend worden. De faalkans van de leiding wordt hier dan ook niet bepaald door met name een klein deel van de leiding (zoals in grondgebied 2, blauwe ster), maar door het gehele leidingdeel.

De zettingsverschillen in Figuur 6.9 en de conditionele faalkansen in Figuur 6.14 vertonen een duidelijke relatie. Daar waar de faalkansen hoog zijn, zijn over het algemeen de zettingsverschillen ook groot. Er valt hieruit af te leiden dat deze verhouding (dz/dL) een van de grootste (zo niet grootste) invloedparameters is op de faalkans.

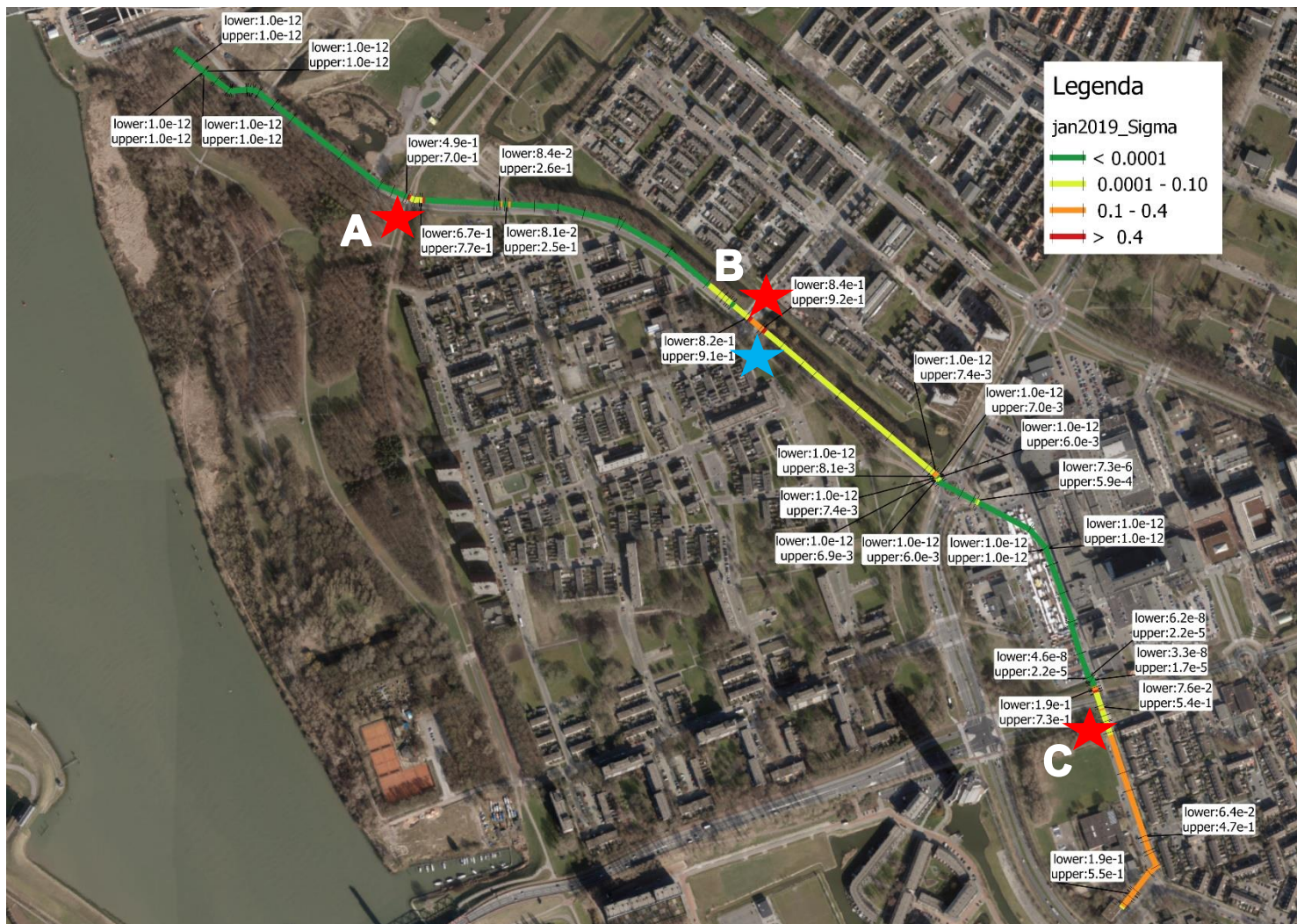
Op een aantal locaties zijn de zettingsverschillen zo groot dat de conditionele faalkans een zeer grote waarde aanneemt (gaat richting 1 ofwel 100%). Voor de betonnen leidingen waarbij dit speelt worden ook grote hoekverdraaiingen gevonden. De faalkansen voor deze koppelingen zijn weergegeven in Figuur 6.15.



Figuur 6.12: Faalkansen voor leidingdelen waar zettingen niet gedomineerd worden door de bovenbelasting voor het gemodelleerde deel van persleiding Holwinde. Faalkansen worden afgegeven per grondgebied (zie Figuur 6.6).



Figuur 6.13: Faalkansen voor leidingdelen waar zettingen gedomineerd worden door de bovenbelasting voor het gemodelleerde deel van persleiding Holwinde. Ter hoogte van de rode sterren worden de hoogste faalkansen berekend.



Figuur 6.14: Conditionele faalkansen voor alle leidingdelen gegeven een (kritisch deel van het) zettingsverschil over de leiding voor het gemodelleerde deel van persleiding Holwinde. Ter hoogte van de rode sterren worden de hoogste faalkansen berekend.



Figuur 6.15: Faalkansen voor de koppelingen van de betonnen leidingdelen afgeleid uit de gemiddelde hoekverdraaiing per leidingdeel voor het gemodelleerde deel van persleiding Holwinde

6.1.6 Validatie

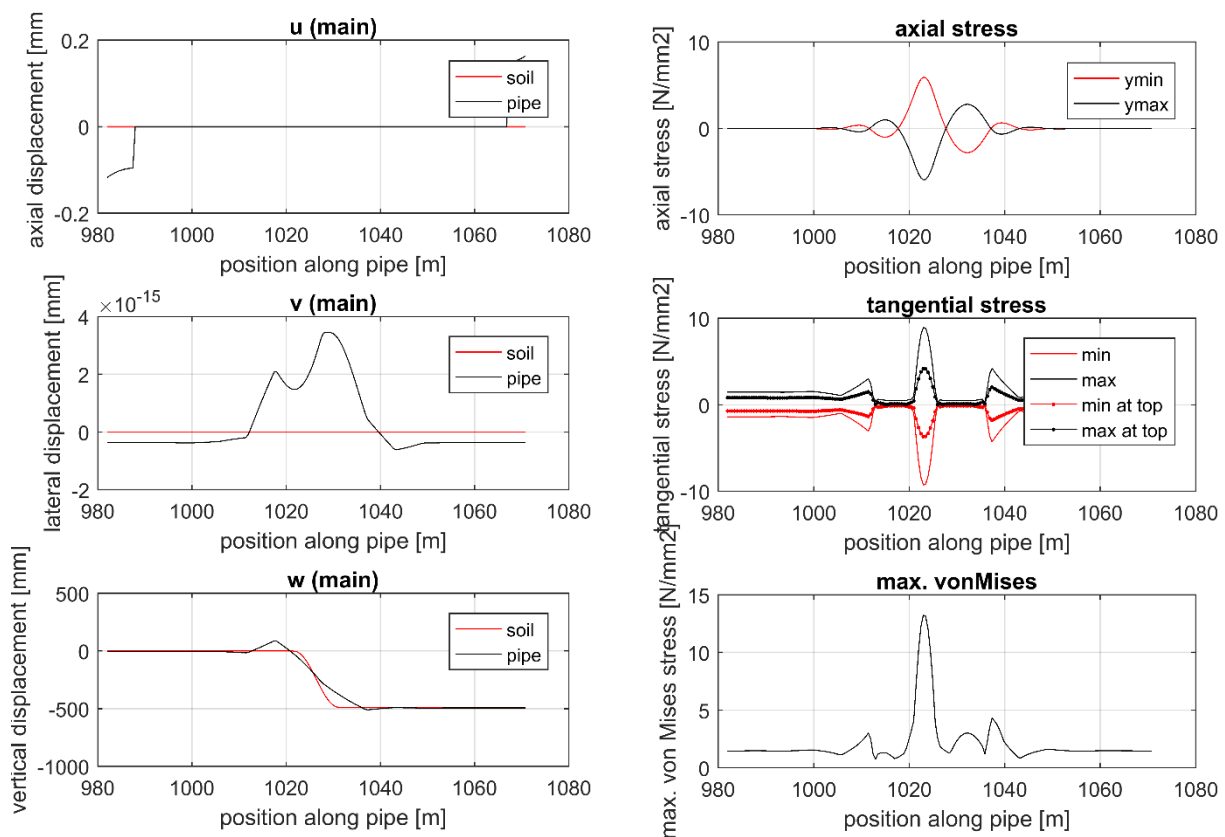
Ter validatie is in eerste instantie voor een aantal leidingstukken nader gekeken naar de uitvoer van Wtube (deelmodel constructief gedrag) en of deze in lijn is met de verwachtingen, gegeven de invoer. Voor een van de betonnen leidingen zijn in Figuur 6.16 de vervormingen en optredende spanningen inzichtelijk gemaakt. In de figuur linksonder is duidelijk te zien dat de koppelingen van de leiding aanzienlijke hoekverdraaiingen ondergaan. Ook valt te zien dat er een oplegging ontstaat daar waar de leiding verder wil zakken dan de onderliggende grond. Uit de spanningen (rechts) is af te leiden dat de hoogste spanningen worden gevonden juist in dit punt van de leiding. Aan de andere kant van het zettingsverschil zakt de grond juist verder dan de leiding wil volgen. Daar ontstaat dan ook lege ruimte onder de leiding.

In Figuur 6.17 zijn de vervormingen en optredende spanningen voor een gietijzeren leiding weergegeven waarvoor geldt dat de conditionele faalkansen zeer groot zijn. Hier valt hetzelfde verschijnsel op te merken. Aan de ene zijde ontstaat een oplegging en aan de andere kant een lege ruimte onder de leiding. Ook bij deze leiding (en alle overige leidingen) worden de hoogste spanningen op het punt van de ontstane oplegging gevonden. De maximale spanning die gevonden is (260 N/mm^2), ligt dicht in de buurt van de karakteristieke waarde voor de vloeispanning van gietijzer (275 N/mm^2). Dat de faalkans hier relatief hoog is, past dan ook bij deze observatie.

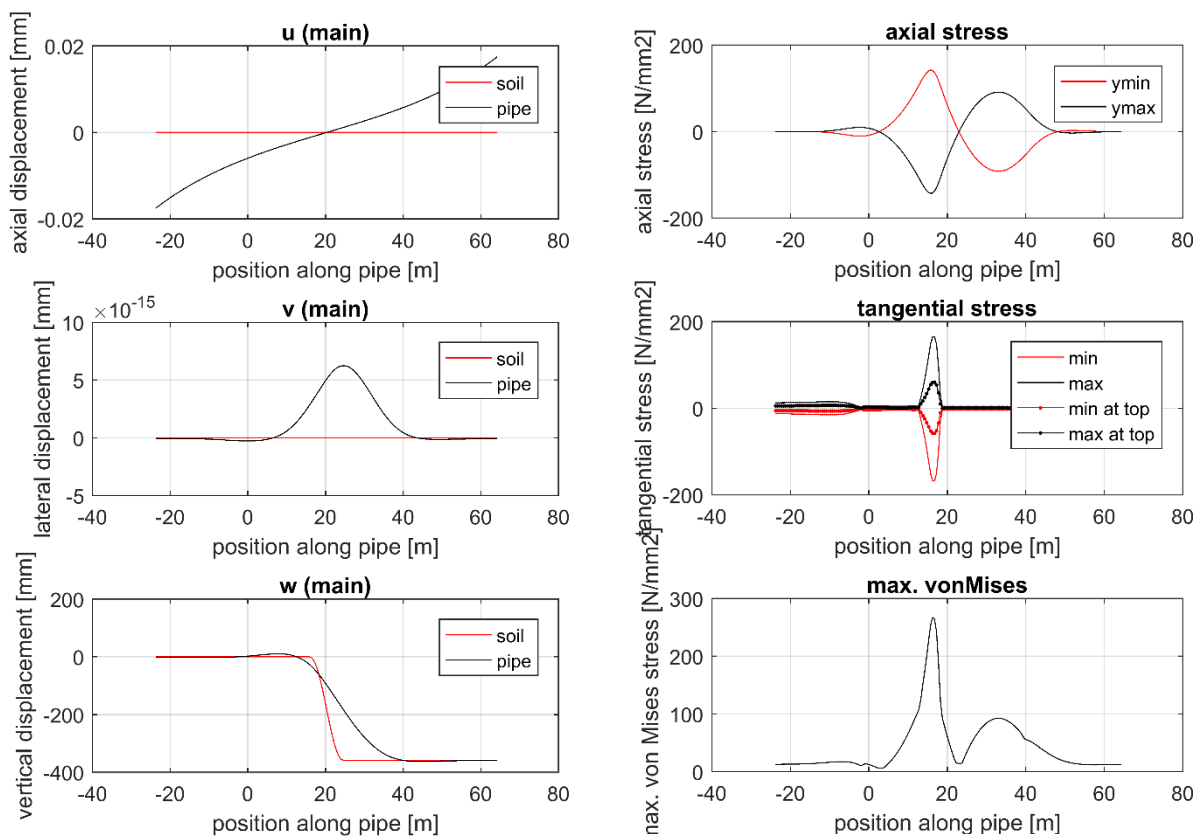
Voor beide leidingen geldt, dat gegeven de zettingsverschillen, de vervormingen en hoekverdraaiingen die in de leiding gevonden worden niet onrealistisch zijn. Ze volgen de zetting goed. Om ook de hoogte van de spanningen na te gaan, zijn deze voor een aantal leidingen vergeleken met de waarde zoals deze volgt uit de

formules gegeven in NEN3650, ref. [4], voor het berekenen van deflecties (ovalisaties) en tangentiële spanningen. In Tabel 6.7 zijn de resultaten weergegeven. Ook de mate van ovalisatie is hierin opgenomen. De spanningen en ovalisatie zijn vergeleken bij de maatgevende locatie in de leiding, dus bij de ontstane oplegging en aan het uiteinde van de leiding. Dit uiteinde wordt belast door eigen gewicht, gronddruk en interne druk ter plekke en daarnaast ook indirect door de buigende momenten en verticale reactie krachten ten gevolge van de zettingen (en ontstane lege ruimte onder de leiding naast het uiteinde).

Uit de resultaten valt op te merken dat de spanningen uit Wtube voor de maatgevende punten in de leiding goed overeenkomen (tot zeer goed voor de stalen leiding) met de waarden die volgen uit NEN3650 met dezelfde input. De waarden voor de ovalisatie wijken iets meer af, maar aangezien getoetst wordt op spanningen, is dit niet van belang.



Figuur 6.16: Resultaten Wtube voor een betonnen leidingdeel onderhevig aan zettingsverschillen gedomineerd door bovenbelasting



Figuur 6.17: Resultaten Wtube voor een gietijzeren leidingdeel onderhevig aan zettingsverschillen gedomineerd door bovenbelasting

Tabel 6.7: Vergelijking output deelmodel constructief gedrag (Wtube) en NEN3650 berekeningsmethode voor een stalen en een betonnen leidingdeel

Leidingtype	Grootheid	Wtube	NEN3650	Afwijking
Staal	Spanning (maximaal) [N/mm ²]	234	232	1%
	Ovalisatie (maximaal) [mm]	32	31	4%
Beton	Spanning (maximaal) [N/mm ²]	4,8	4,3	11%
	Ovalisatie (maximaal) [mm]	4,5	3,4	33%

6.1.7 Waarnemingen in de praktijk

Er worden ook incidenten waargenomen in de praktijk. Hoewel deze database nog niet zodanig op orde is dat deze waarnemingen kunnen dienen als statistisch model, geven ze wel een indicatie van de orde-grootte van de faalkansen over het areaal. Daarnaast is na te gaan of de kwetsbare locaties die volgen uit het faalkansmodel in het verleden ook al eens tot problemen hebben geleden. Hierbij moet de faalwijze wel overeenkomen met de gemodelleerde faalmechanismen in het huidige model.

Uit de sessie met de beheerder van de betreffende persleiding (besproken in hoofdstuk 7) is gebleken dat bij locatie C (rode ster) in Figuur 6.14 in 2013 een lekkage is opgetreden. Als reden is hiervoor opgegeven; lokale aantasting door luchtopsluiting. Er is ook bekend dat zich in de buurt van de lekkage een mangat

bevindt. De modellering zoals voor de case Holwinde houdt echter (nog) geen rekening met extra gevoelige locaties voor aantasting, omdat ten tijde van deze modellering (nog) geen gegevens bekend waren over het debiet in de leiding. Wel kon worden aangenomen dat over de gehele leiding luchtopsluitingen mogelijk zouden zijn. Met betrekking tot alleen aantasting kunnen we geen conclusies verbinden aan de relatie tussen het incident en de modelresultaten. Wel is uit het model gebleken dat deze locatie extra gevoelig is voor zettingsverschillen. De aanwezigheid van een mangat vergroot deze gevoeligheid ter plekke van het incident. Het zou daarom wel goed mogelijk zijn dat deze combinatie van lokale aantasting en zettingen heeft kunnen leiden tot de lekkage.

6.1.8 Gevoeligheidsstudie en belangrijkste parameters

Er zijn in de deelmodules meerdere aannames gedaan om de berekeningen mogelijk te maken. Daarom is voor persleiding Holwinde ook nagegaan wat de invloed is van een aantal van deze aannames. Met dit doel is een viertal andere scenario's doorgerekend:

- 1 Geen zettingen
- 2 Geen aantasting
- 3 Geen aantasting en vulgraad = 0%
- 4 Geen aantasting en interne druk = 10 bar

Voor deze vier scenario's zijn de faalkansen vergeleken met de eerder berekende faalkansen. Uit scenario's 2 t/m 4 kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- 2 De wanddikteafname heeft weinig tot geen invloed op de berekende faalkans.
- 3 Een vulgraad van 0% (geen medium aanwezig) heeft een zeer grote invloed op de faalkansen. Bij een lagere vulgraad wordt de faalkans kleiner. Een vulgraad van 0% is een extreme (ongebruikelijke) situatie en resulteert in sommige gevallen in een halvering van de berekende faalkans.
- 4 De waarde voor de interne druk heeft weinig tot geen invloed op de berekende faalkans.

Voor het draaien van scenario 1 zijn in plaats van de zettingen uit het deelmodel zettingen zeer geringe dummy-waarden als invoer gebruikt voor het deelmodel constructief gedrag en de faalkansberekening. Dit resulteert (zoals verwacht uit scenario 2) in niet significante faalkansen (10^{-12}). Het blijkt daardoor dat de aantasting voor de gemodelleerde bezwijkmechanismen (vervorming van de leiding zelf) van verwaarloosbare invloed is. Dit zegt echter niets over de invloed van de aantasting op de faalkans van de leiding voor niet gemodelleerde bezwijkmechanismen, bijvoorbeeld falen door aantasting van ontluchters.

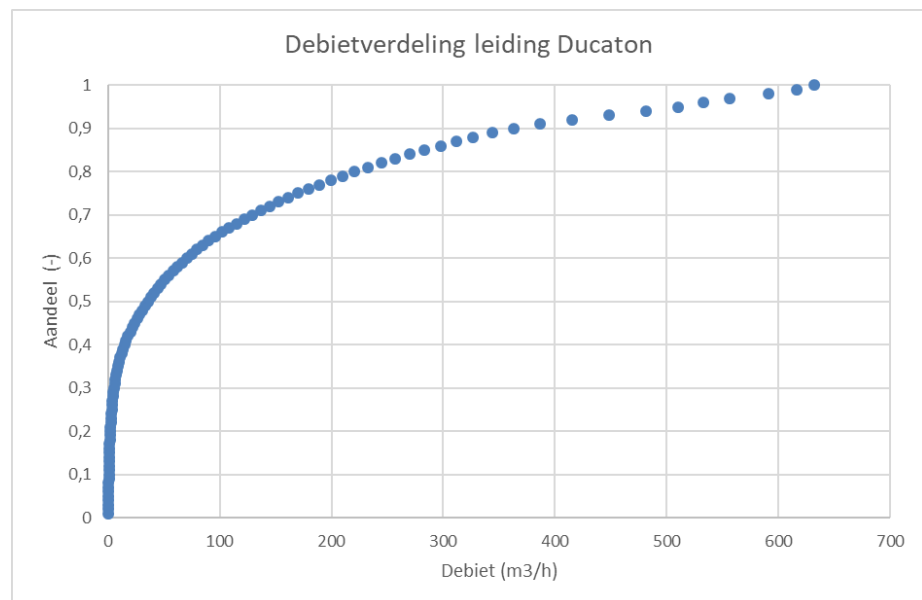
6.2 Waternet – Ducaton

6.2.1 Beschrijving

De tweede gekozen case is de persleiding Ducaton in Amsterdam. Het gebied rond deze persleiding is ook gevoelig voor zettingen, maar er is daarnaast ook bekend dat deze leiding gevoelig is (geweest) voor aantasting. De gemodelleerde persleiding door middel van het ontwikkelde faalkansmodel is in Figuur 6.18 weergegeven. De verdelingsfuncties van de debieten in de leiding zijn te vinden in Figuur 6.19.

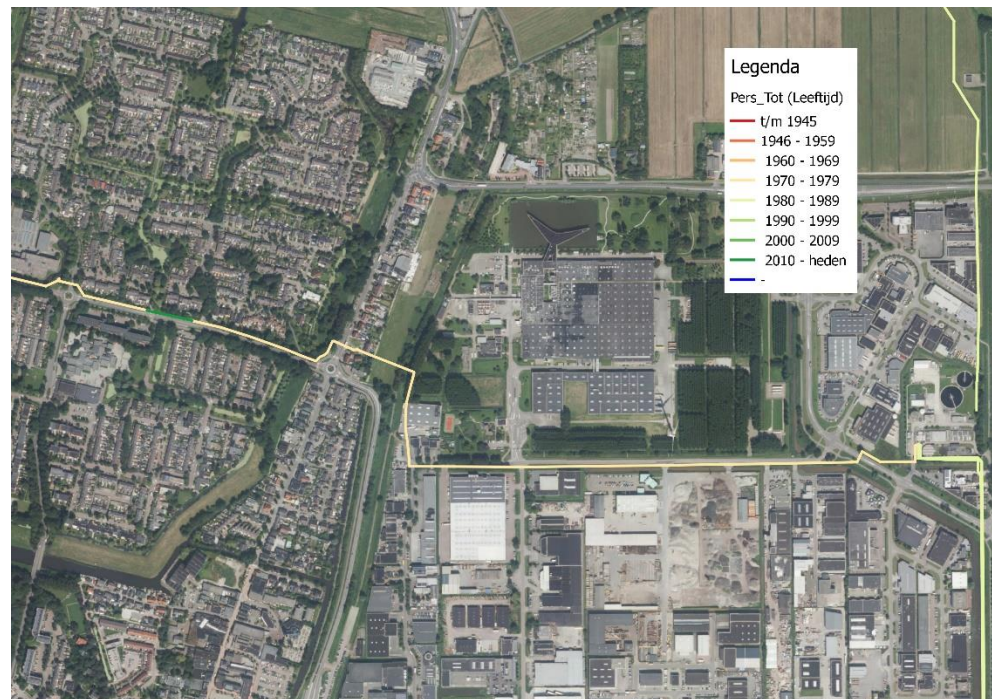


Figuur 6.18: Ligging leiding Ducaton Waternet



Figuur 6.19: Cumulatieve verdelingsfunctie van de debieten in persleiding Ducaton

Dit leidingdeel kent niet zo veel verschillende leidingeigenschappen en is relatief jong. De verschillende aanlegjaren zijn te zien in Figuur 6.20. De aanlegjaren die zijn terug te vinden binnen de betreffende leiding zijn; 1979 en 2017.



Figuur 6.20: Aanlegjaren persleiding Ducaton

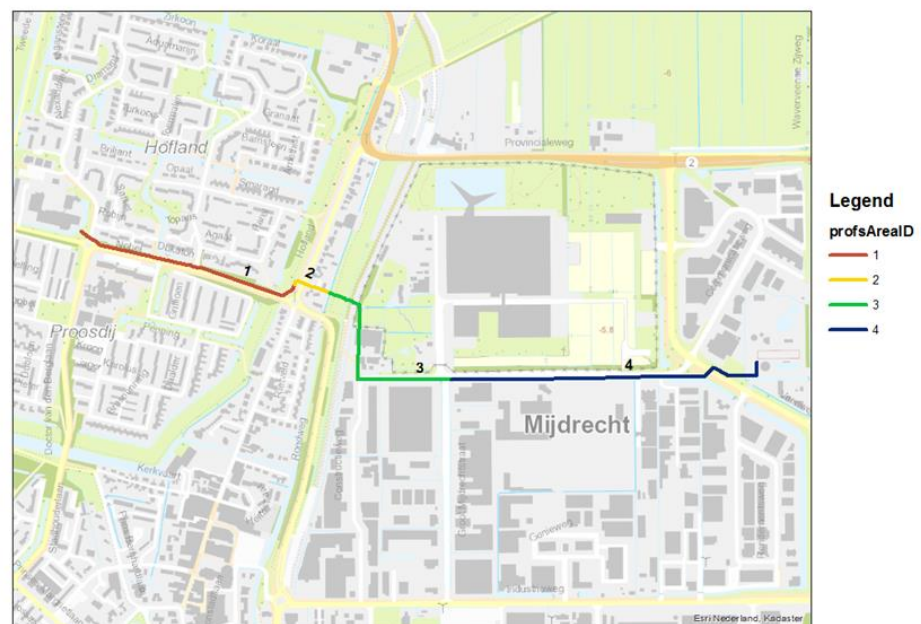
De materialen die zijn terug te vinden in de persleiding zijn weergegeven in Figuur 6.21. In de betreffende leiding hebben we voornamelijk te maken met PE-leidingsegmenten. Daarnaast is er een klein deel van asbestcement en van staal ter plaatse van een wegoevergang.



Figuur 6.21: Materialen persleiding Ducaton

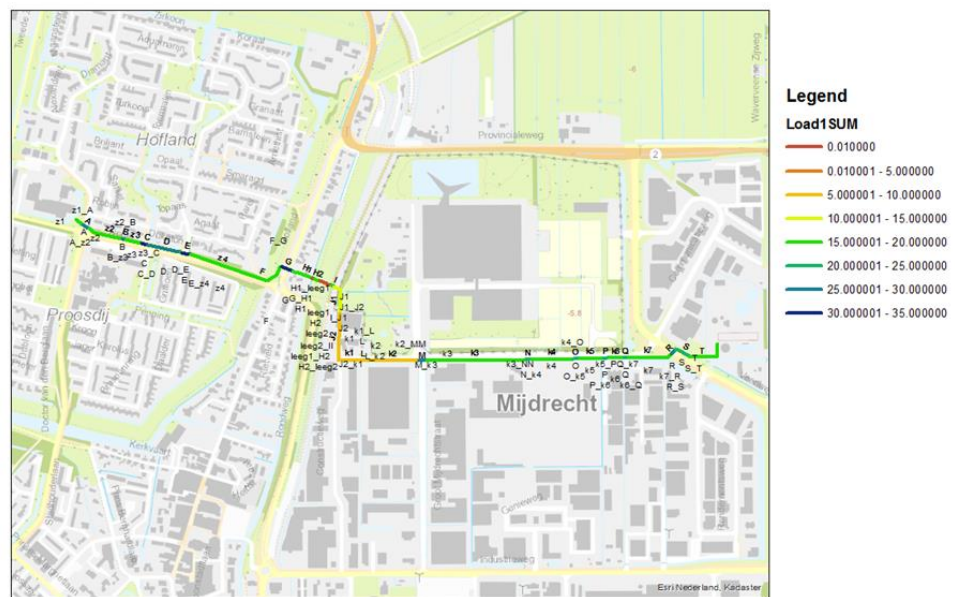
6.2.2 Resultaten deelmodule zettingen

Ook hier veranderen de grondeigenschappen aanzienlijk langs de leiding. De gemodelleerde persleiding ligt onder bebouwd gebied en in relatief slappe grond wat resulteert in aanzienlijke zettingen (en zettingsverschillen). Er zijn 4 algemene grondgebieden aangewezen langs de beschouwde persleiding. Deze zijn weergegeven in Figuur 6.22.

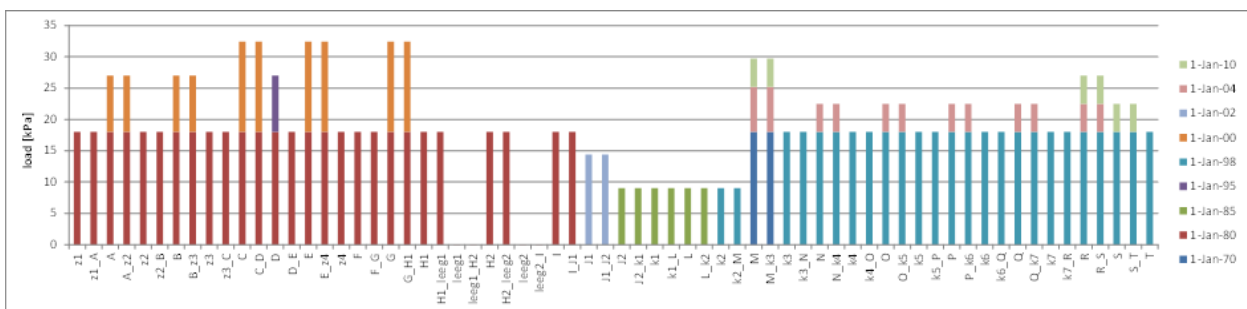


Figuur 6.22: Geïdentificeerde grondgebieden langs persleiding Ducaton

Ook de mate van bovenbelasting varieert over de leiding. Dit is aangegeven in Figuur 6.23, waarin de mate van bovenbelasting verloopt in grootte van rood naar blauw. De verschillende bovenbelasting gebieden zijn aangegeven met de lettercoderingen. Met name bij de kruisingen met een weg zijn hoge bovenbelastingen te vinden door ophogingen ter plaatse. Deze bovenbelastingen zijn cumulatieve belastingen ontstaan over de tijd. In Figuur 6.24 is de bovenbelasting per gebied over de tijd aangegeven. De gebieden zijn hier met dezelfde codering aangegeven als in Figuur 6.23.

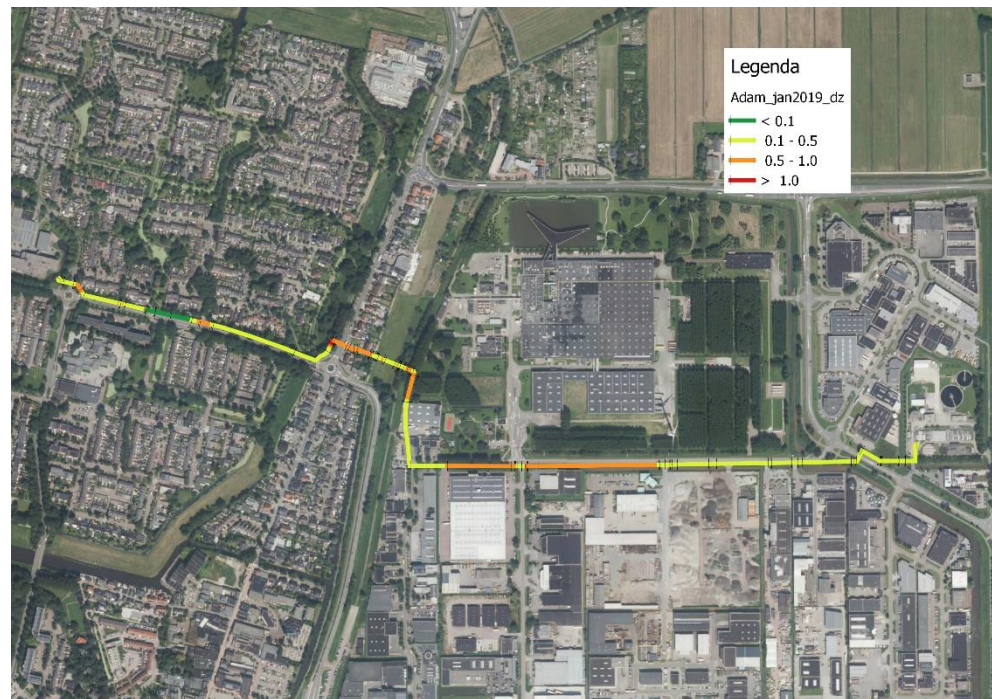


Figuur 6.23: Opdeling in bovenbelasting gebieden langs persleiding Ducaton. Bovenbelasting in kPa.



Figuur 6.24: Ontwikkeling van bovenbelasting over de tijd per bovenbelasting gebied langs persleiding Ducaton

De zettingsverschillen afgeleid door deze deelmodule zijn weergegeven in Figuur 6.25. Deze zettingsverschillen vinden plaats over vrijwel dezelfde lengten. Alleen bij leidingdelen waarbij de zetting gedomineerd wordt door bovenbelastingen vindt deze zetting plaats over een andere (vaak kleinere) lengte. Deze lengten (lengte delta) zijn aangegeven in Figuur 6.26. In de faalkansmodellering zijn drie waarden voor de zettingen gebruikt; laag, middel (in figuren) en hoog. Deze waarden hebben elk een kans van voorkomen, respectievelijk; 40%, 40% en 20%.



Figuur 6.25: Totale zettingsverschillen uit het deelmodel zettingen voor het gemodelleerde deel van persleiding Ducaton op 1 januari 2019; eenheid [m]



Figuur 6.26: Berekende lengte "delta" voor persleiding Ducaton; eenheid [m]

6.2.3 Resultaten deelmodule wanddikteafname

Voor Amsterdam waren er ten tijde van de wanddikte afname berekeningen meer gegevens beschikbaar.

In Figuur 6.27 is per (inwendige) diameter, zoals deze voorkomen in de Ducaton leiding, en stromingsgetal F weergegeven of er een risico bestaat op gasophopingen.

Het stromingsgetal is gedefinieerd als:

$$F = \frac{u}{\sqrt{gD}} \quad (\text{eq. 6.1})$$

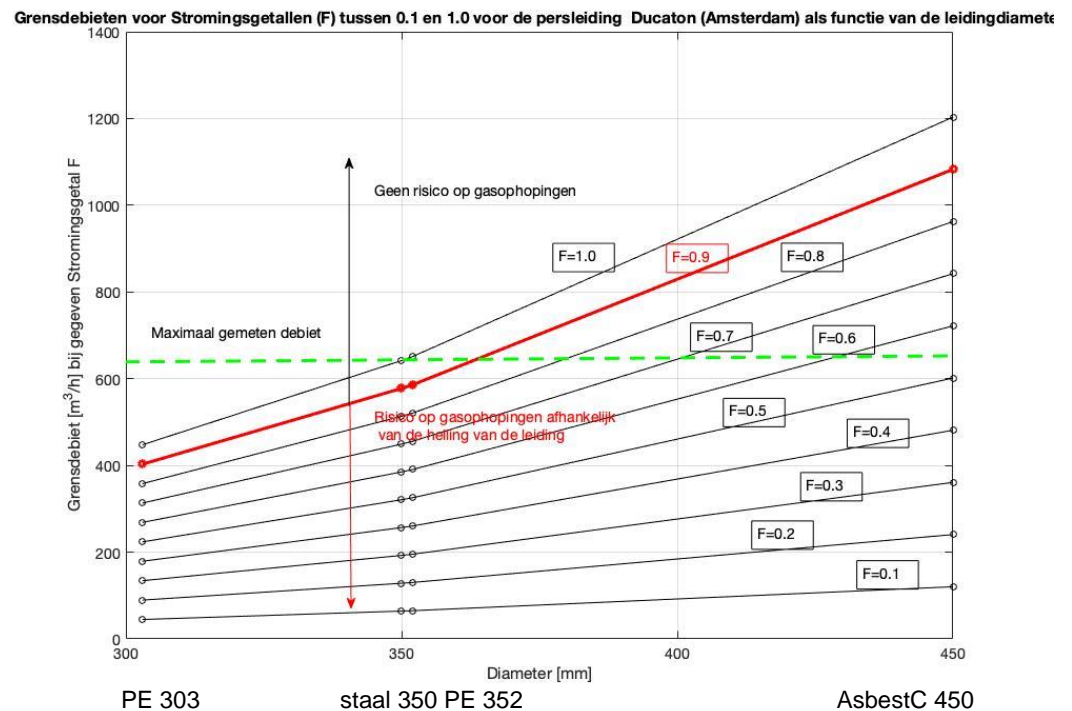
waarin:

u stroomsnelheid [m/s]

g zwaartekrachtversnelling [m/s²]

D inwendige leidingdiameter [m]

Zoals uit de figuur is op te maken geldt dat voor leidingen met een diameter van 450 mm dat bij de opgegeven maximaal optredende debieten er altijd een risico bestaat op gasophoping (en dus op corrosie) ongeacht de bodemhelling van de leiding. Naarmate de helling kleiner wordt en het debiet lager neemt dit risico toe. Voor leidingen met een diameter kleiner dan 350 mm is dit risico lager, maar nog wel aanwezig. In de Ducaton leiding zijn slechts twee leidingsecties die uit materiaal bestaan die aantastingsgevoelig zijn (staal en asbestcement), het overgrote deel van de leiding bestaat uit kunststof waarvan wordt aangenomen dat dit niet vatbaar is voor zwavelzure aantasting.



Figuur 6.27: Stromingsgetallen voor de Ducaton leiding

Op basis van het CAPWAT-onderzoek kan de helling van de leiding vertaald worden naar een grenswaarde voor het stromingsgetal. Er zijn 3 klassen gemaakt van de mate van transport van de gasophopingen: volledig, beperkt en geen. Voor deze drie klassen is gesteld dat:

- Bij volledig transport is de kans op gasophopingen nihil

- bij beperkt transport is de kans op ophopingen 50% (de werkelijke waarde is sterk afhankelijk van het pompbedrijf, omdat deze gegevens ontbreken is dit niet verder uitgewerkt)
- bij beperkt transport is de kans op de aanwezigheid van gasophopingen 100%.

Als de helling van de buis in stroomrichting neergaand is, neemt de kans op gasophoping toe. Voor een opgaande helling zal de kans afnemen. Aangezien dit altijd over een beperkte lengte is, is voor deze delen de waarde zonder helling aangehouden.

Uit (beperkt aanwezige) waarnemingen is de aantastingssnelheid van asbest cement voor zwavelzure aantasting gesteld op 0,2 mm/jaar bij volledige blootstelling. Voor staal is analoog aan Rotterdam 0,1 mm/jaar aangehouden. Het verlies aan wanddikte is als volgt bepaald:

$$Dd = DT \sum_{i=1}^{i=3} P_{i,f} P_{i,c} r_m \quad (\text{eq. 6.2})$$

Waarin:

Δd actueel wanddikteverlies [mm]

ΔT periode in jaren [jaar]

$P_{i,c}$ kans op gasophopingen als functie van de range van het stromingsgetal (categorieën $i=1,2,3$, afhankelijk van de hellingshoek van de leiding).

$P_{i,f}$ fractie van de tijd waarin het stromingsgetal in categorie i valt.

r_m wanddikteverlies bij gasophoping [mm/jr]

Voor de leiding delen uit staal en asbestcement gelden de volgende gegevens en resultaten:

Tabel 6.8: Berekening en resultaten aantasting persleiding Ducaton

Materiaal	Hellingshoek	Berekening	Afname [mm/jr]
Staal (D = 350 mm)	50 graden	Geen transport tot debiet = 193 m ³ /h (F=0.3), beperkt transport tussen 193 en 481 m ³ /h (F=0.75) en boven de 481 m ³ /h volledig transport	0,086
	0-7 graden	Geen transport tot debiet = 417 m ³ /h (F=0.65), en boven de 417 m ³ /h volledig transport	0,092
Asbestcement (D = 450 mm)	0 – 0,2 graden	Het maximaal optredende stromingsgetal voor deze leiding is 0,55	0,2

Dit geeft onderstaande Tabel 6.9 voor de wanddikte afname en het beeld uit Figuur 6.28 voor de wanddikteafname over de leiding. In Tabel 6.9 zijn drie waarden gegeven; laag, middel en hoog. Deze waarden hebben elk een kans van voorkomen, respectievelijk; 40%, 40% en 20%. Deze kansen worden gebruikt in de faalkansberekening.

Tabel 6.9: Wanddikte afname Ducaton (Waternet)

Materiaal	Wanddikteafname [mm/jaar]		
	Laag	Middel	Hoog
Staal	0,065	0,086	0,108
	0,069	0,092	0,115
Asbestcement	0,15	0,2	0,25



Figuur 6.28: Berekende aantasting op 1 jan 2030 voor de leiding Ducaton; eenheid [mm]

6.2.4 Invoer deelmodule constructief gedrag en faalkansberekening

Naast de verzamelde leidinggegevens uit hoofdstuk 3 en de uitvoer van de deelmodellen aantasting en zettingen, is additionele invoer noodzakelijk voor het deelmodel constructief gedrag (Wtube) en voor de faalkansberekening. Deze benodigde invoer (en aangenomen waarden) zijn weergegeven in Tabel 6.10 tot en met Tabel 6.13 voor de verschillende materialen aanwezig in het gemodelleerde deel van persleiding Ducaton. Deze waarden zijn voornamelijk gebaseerd op expert judgement en zijn waar mogelijk getoetst aan beschikbare informatie.

Tabel 6.10: Algemene invoer en aannames

Parameter	Waarde	Opmerkingen
Interne druk	0,1 bar	Extreem laag gekozen. Alleen stationaire druk, geen drukgolven
Grondwaterniveau	-10 m	Extreem op -10 gezet; geen opdrijf effecten
Vulgraad	100 %	
Dichtheid medium	999 kg/m ³	

Tabel 6.11: Invoer en aannames stalen leiding

Parameter	Waarde	Opmerkingen
Segmentlengte	∞	
Koppelingen	Volledig vast (rotaties en x,y,z)	gelaste verbindingen
E-modulus	2,10E11 N/m ²	
G-modulus	8,08E10 N/m ²	
Dichtheid	7850 kg/m ³	
Vloeigrens f_{yk}	290 N/m ²	5% overschrijdingskans ²
Poisson-ratio ν	0,3	
Wanddikte	8 mm	Niet in aangeleverde database

Tabel 6.12: Invoer en aannames asbestcement leiding

Parameter	Waarde	Opmerkingen
Segmentlengte	6 m	
Koppelingen	Scharnierend en niet trekvast (langs leiding)	
E-modulus	1,40E10 N/m ²	
G-modulus	5,83E9 N/m ²	
Dichtheid	4000 kg/m ³	
Treksterkte f_{tk}	31 N/m ²	5% overschrijdingskans ³
Druksterkte f_{ck}	31 N/m ²	5% overschrijdingskans ³
Poisson-ratio ν	0,2	
Wanddikte	25 mm	Niet in aangeleverde database

Tabel 6.13: Invoer en aannames PE-leidingen

Parameter	Waarde	Opmerkingen
Segmentlengte	∞	
Koppelingen	Volledig vast (rotaties en x,y,z)	
E-modulus	2,50E8 N/m ²	lange duur waarden
G-modulus	8,93E7 N/m ²	lange duur waarden
Dichtheid	950 kg/m ³	
Trek- en druksterkte f_{yk}	24 N/m ²	5% overschrijdingskans ³ (lange duur waarden)
Poisson-ratio ν	0,4	

6.2.5 Resultaten deelmodule faalkansberekening

In Figuur 6.29 zijn de berekende faalkansen weergegeven voor de stukken leiding waar de zettingen niet gedomineerd worden door de bovenbelasting. Deze verwachtingswaarden kunnen afgegeven worden per grondgebied. Er valt te zien dat de faalkansen zeer gering zijn over het grootste deel van de leiding. In het midden van de leiding komen de hoogste faalkansen voor. Dit volgt ook uit **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** voor de leidingdelen die wel gedomineerd worden door bovenbelasting. In deze figuur zijn ook een boven- en ondergrens voor de faalkans getoond in de labels. Daar waar de berekende faalkans nihil is, zijn deze labels niet getoond (dit zijn de zwarte lijnen zonder bijbehorend label in de grafiek).

² Zie bijlage A.2

De faalkansen voor de grondgebieden zijn ook getoond in Tabel 6.14 met een boven- en ondergrens. De bandbreedte is zeker voor grondgebied 2 en 3 groot, omdat de faalkans van de gehele leiding zeer afhankelijk is van de exacte locatie van het zettingsverschil. De faalkans varieert hierdoor mogelijk tussen nihil voor niet zettingsgevoelige locaties en niet kwetsbare leidingdelen en 40% voor wel gevoelige leidingdelen.

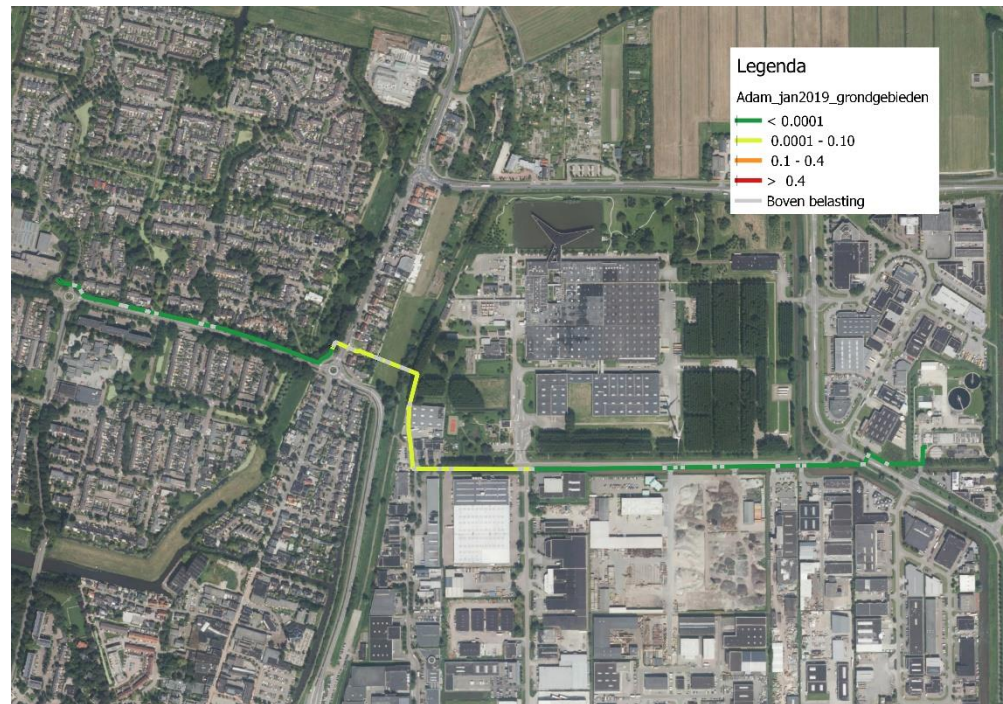
Tabel 6.14: Faalkansindexering en bandbreedte voor grondgebieden van persleiding Holwinde

Grondgebied	Faalkansindexering		
	Ondergrens	Verwachtingswaarde	Bovengrens
1	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}
2	10^{-12}	0,03	0,6
3	10^{-12}	10^{-3}	0,5
4	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}

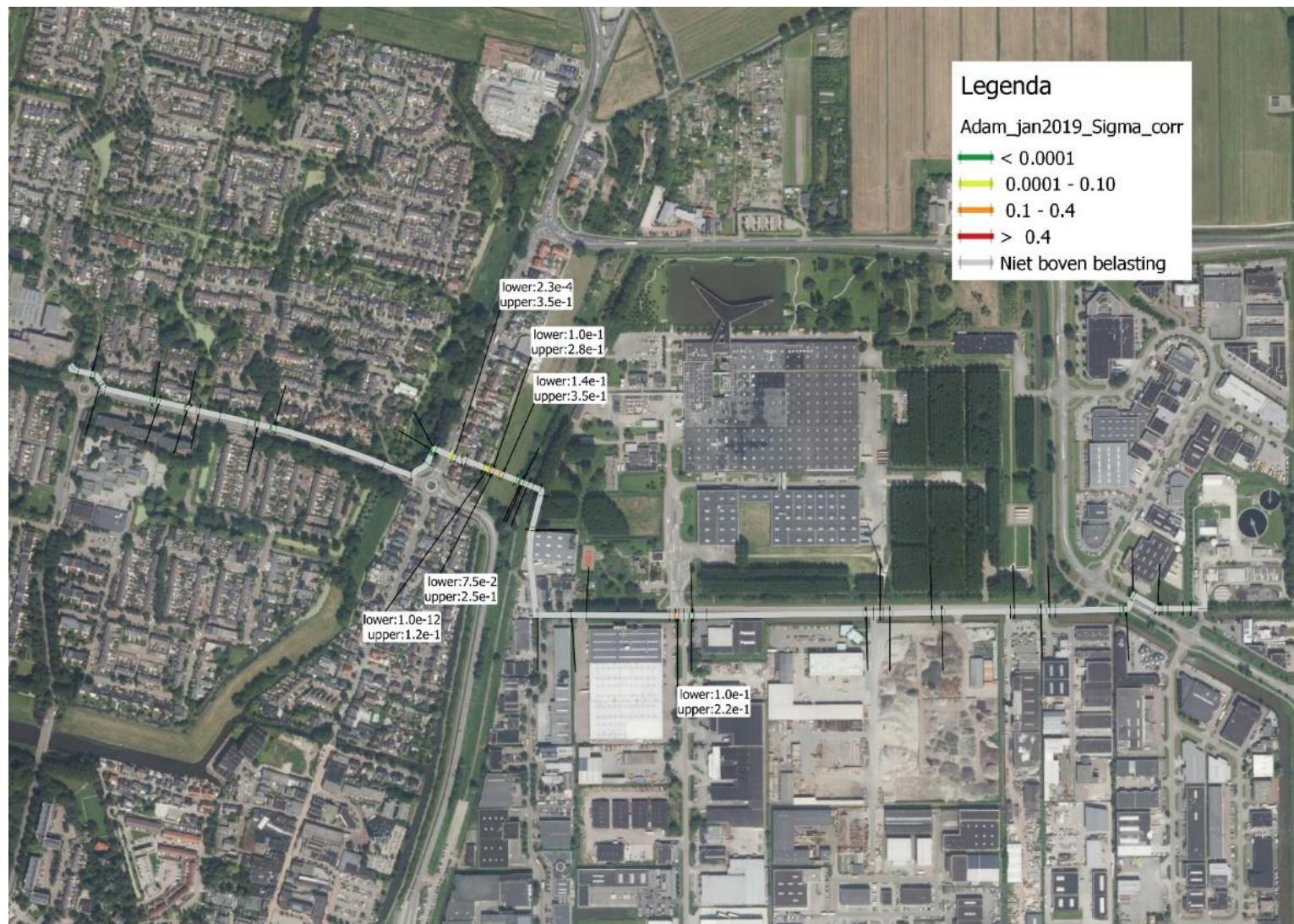
Wanneer de conditionele faalkansen beschouwd worden in Figuur 6.31 (dus gegeven dat een zettingsverschil zich hier voordoet op het meest kritische punt van de leiding), valt op te merken dat slecht een beperkt aantal leidingdelen de faalkans domineren. Dit blijken het stalen en asbestcement leidingdeel te zijn (rode sterren). Zoals verwacht zijn de berekende faalkansen voor de PE-leidingdelen door gevolg van zettingen nihil (wanddikteafname speelt voor dit materiaal geen rol).

De zettingsverschillen in Figuur 6.25 en de conditionele faalkansen in Figuur 6.31 tonen hier dan ook een minder duidelijke relatie dan bij persleiding Holwinde, doordat het materiaal van het grootste deel van de leidingen niet gevoelig is voor deze zettingsverschillen. Om dezelfde reden toont voor persleiding Ducaton juist het materiaal in Figuur 6.21 de grootste relatie met de berekende faalkansen.

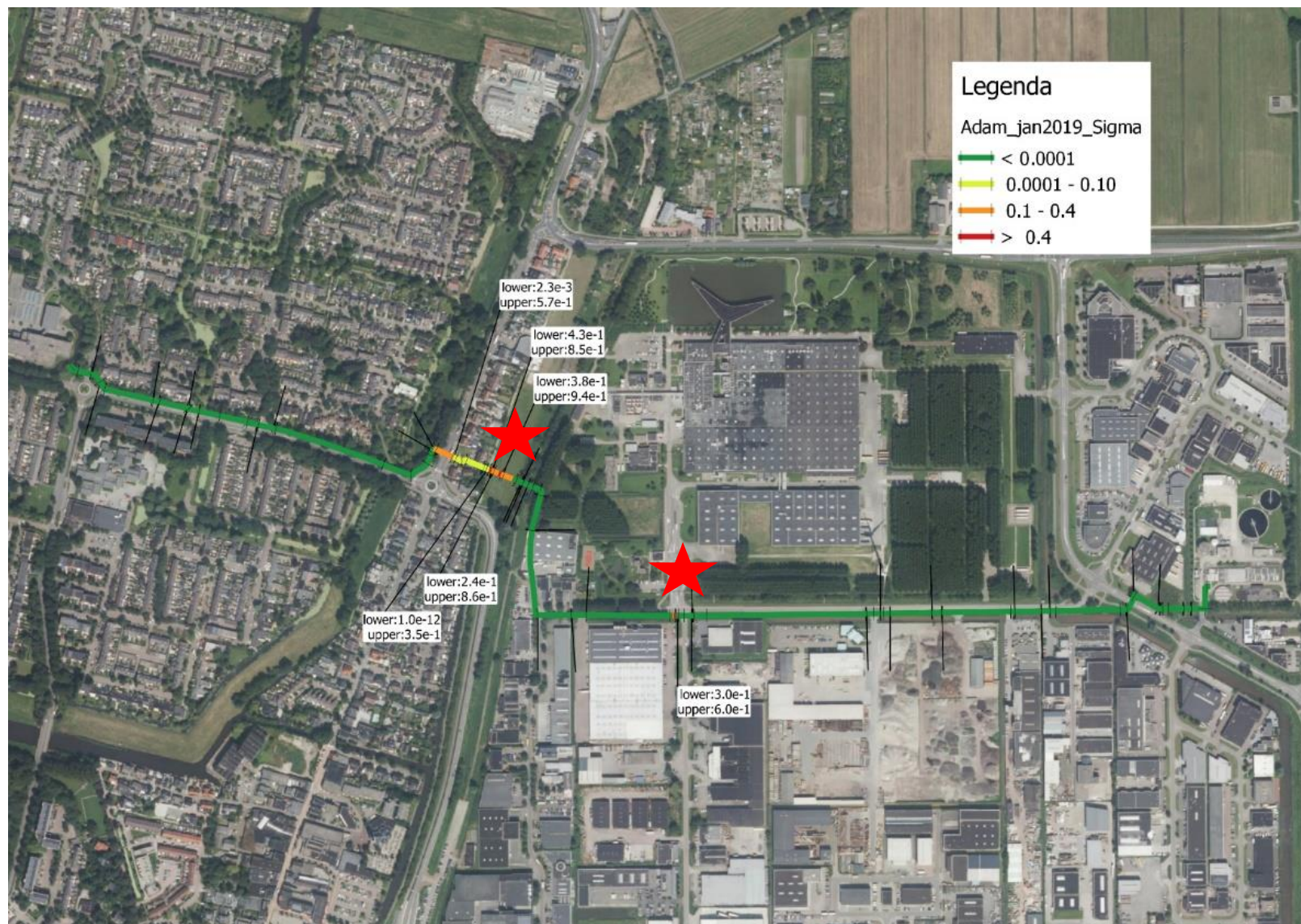
Ten slotte zijn in Figuur 6.32 de faalkansen voor de koppelingen ten gevolge van zettingen getoond. In persleiding Ducaton bestaat slechts het asbestcement leidingdeel uit segmenten, waardoor alleen hier faalkansen berekend worden (de rest is groen). De berekende (gemiddelde) faalkansen voor de koppelingen van de asbestcement leiding blijken gering.



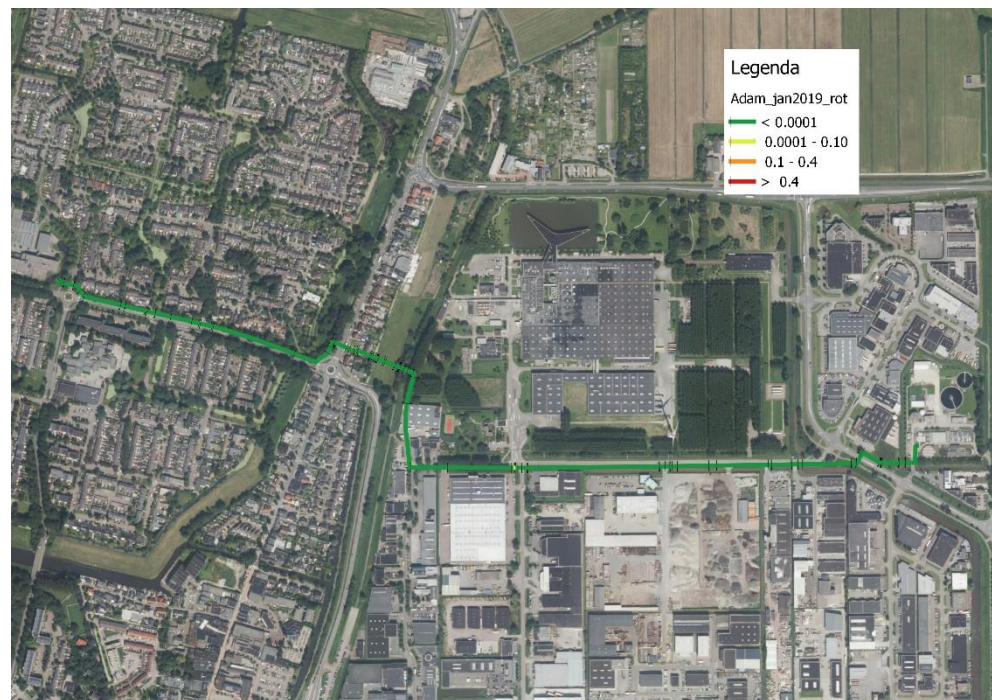
Figuur 6.29: Faalkansen voor leidingdelen waar zettingen niet gedomineerd worden door de bovenbelasting voor het gemodelleerde deel van persleiding Ducaton. Faalkansen worden afgegeven per grondgebied (zie Figuur 6.22).



Figuur 6.30: Faalkansen voor leidingdelen waar zettingen gedomineerd worden door de bovenbelasting voor het gemodelleerde deel van persleiding Ducaton



Figuur 6.31: Conditionele faalkansen voor alle leidingdelen gegeven een (kritisch deel van het) zettingsverschil over de leiding voor het gemodelleerde deel van persleiding Ducaton. De hoogste faalkansen worden berekend ter hoogte van de rode sterren (stalen en asbestcement leidingdelen).



Figuur 6.32: Faalkansen voor de koppelingen van de asbestcement leidingdelen afgeleid uit de gemiddelde hoekverdraaiing per leidingdeel voor het gemodelleerde deel van persleiding Ducaton

6.2.6 Validatie

Ter validatie zijn een aantal leidingen nader bekeken. Uit de resultaten is gebleken dat er binnen de stalen leidingdelen opvallende faalkansen berekend zijn. Dit houdt in; er zijn een aantal leidingdelen waar hogere zettingsverschillen (over een kortere lengte) gevonden worden, terwijl de berekende faalkans hier lager is dan in soortgelijke leidingdelen met kleinere zettingsverschillen. Om deze reden is van twee van deze leidingdelen de output van de deelmodule constructief gedrag (Wtube) bekeken. De verplaatsingen (grond; input en leiding; output) en de spanningsverlopen (output) zijn getoond in Figuur 6.33 (kleinere zettingen, relatief hoge faalkans) en Figuur 6.34 (grotere zettingen, relatief lage faalkans).

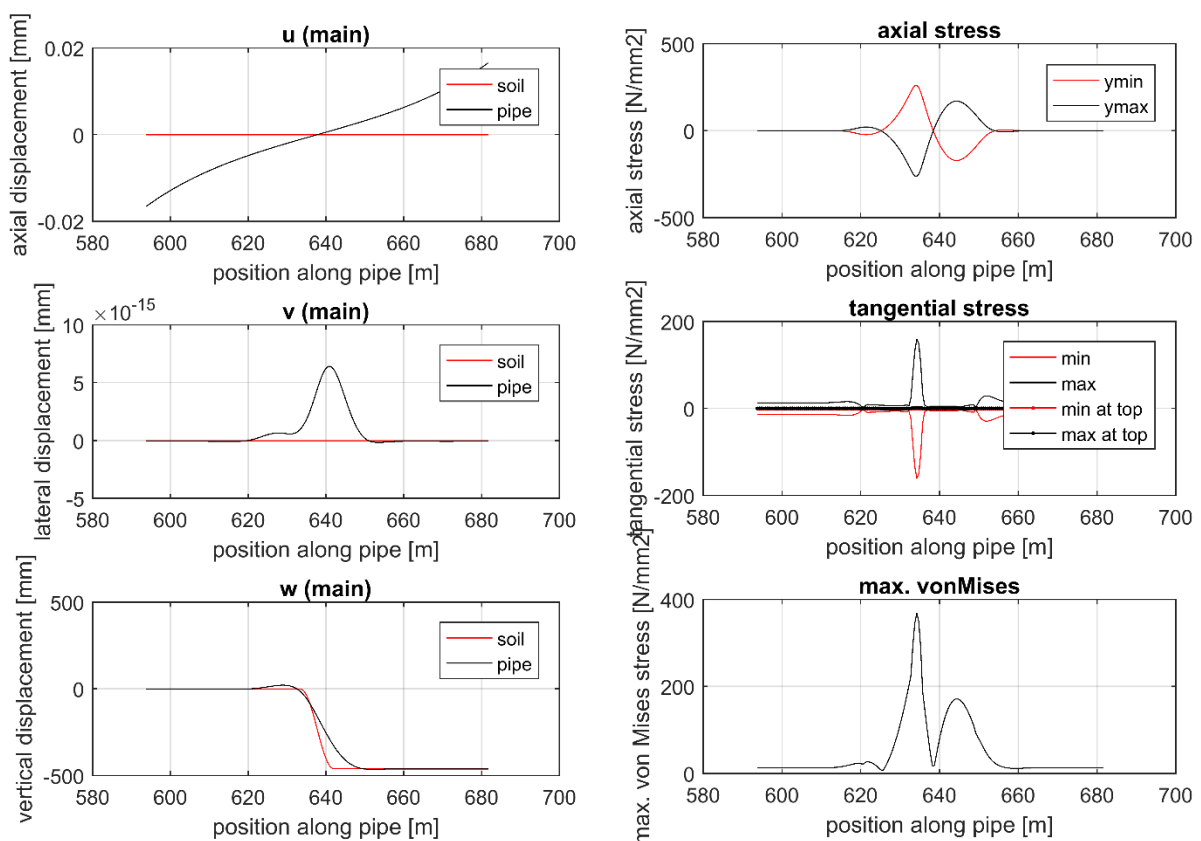
Het blijkt dat beide leidingdelen in een ander type grond liggen. Het leidingdeel in Figuur 6.33 ligt in relatief stijve grond waardoor de zettingen kleiner zijn, maar de leiding ook meer tegengehouden wordt om zijn eigen gewenste vorm aan te nemen en de reactiekracht van de grond daarmee ook groter is. Dit valt ook op te merken uit beide linker figuren met de verplaatsingen. De leiding in Figuur 6.33 volgt de verplaatsingen van de grond vrij nauwkeurig, terwijl de leiding in Figuur 6.34 meer zijn eigen weg kan volgen.

Voor beide leidingen geldt, dat gegeven de zettingsverschillen, de vervormingen en hoekverdraaiingen die in de leiding gevonden worden niet onrealistisch zijn. Ze volgen de zetting goed. Om ook de hoogte van de spanningen na te gaan, zijn deze voor een aantal leidingen vergeleken met de waarde zoals deze volgt uit de formules gegeven in NEN3650, ref. [4], voor het berekenen van deflecties (ovalisaties) en tangentiële spanningen. In Tabel 6.15 zijn de resultaten

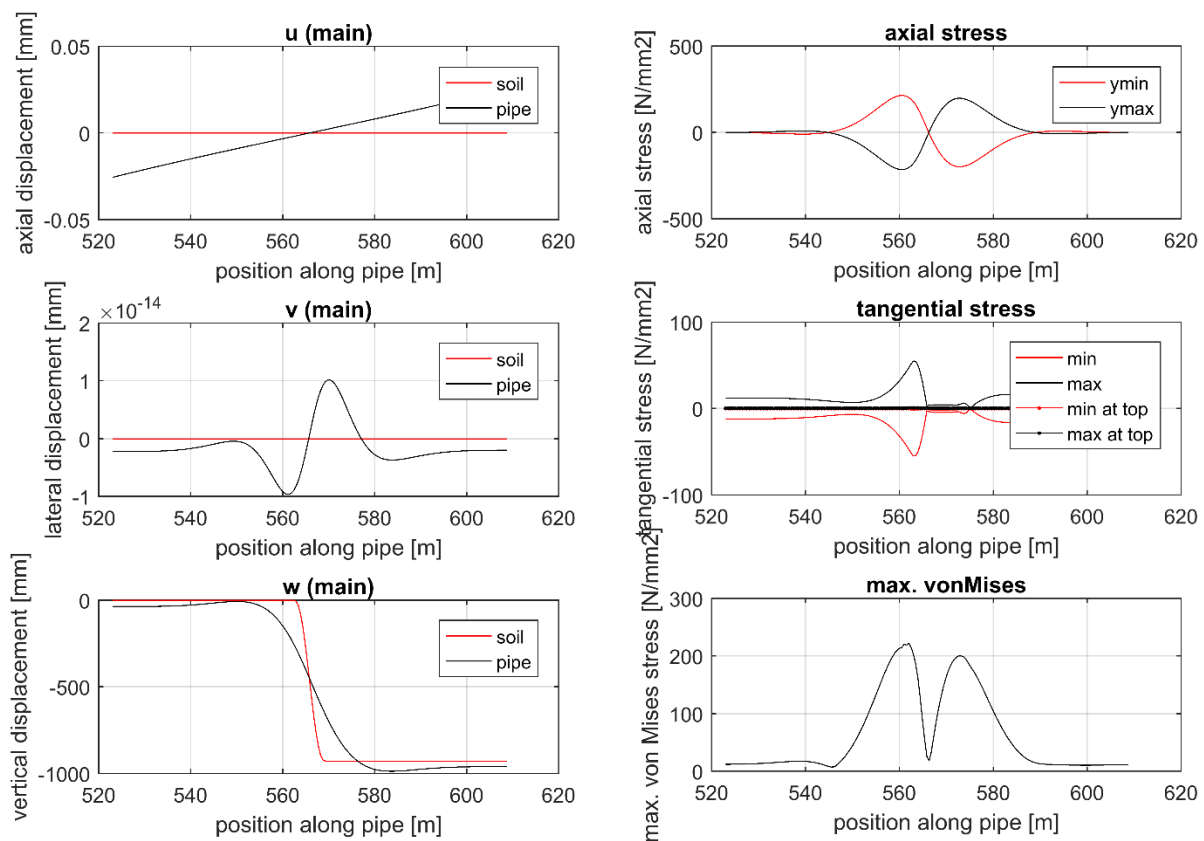
weergegeven. Ook de mate van ovalisatie is hierin opgenomen. De spanningen en ovalisatie zijn vergeleken bij de maatgevende locatie in de leiding, dus bij de ontstane oplegging.

Uit de resultaten valt op te merken dat de verschillen tussen de resultaten uit Wtube en de brekende waarden volgens de NEN3650 groter zijn dan bij persleiding Holwinde. Een groot verschil tussen de norm en het faalkansmodel, is dat de norm geen rekening houdt met een wanddikteafname. Daarom is Wtube nogmaals gedraaid voor het leidingdeel in grondgebied 2 (waarden tussen haakjes). De verschillen tussen de gemodelleerde spanningen en de spanningen uit de norm zijn in dit geval (geen wanddikte afname) vergelijkbaar als bij persleiding Holwinde en zijn zeer klein. De resultaten uit het deelmodel Wtube passen dus bij de verwachtingen gegeven de belasting door zettingen.

Het blijkt dat bij persleiding Ducaton de invloed van deze wanddikteafname op de maximale spanningen in het materiaal groot is. Dit is te verklaren doordat hoewel de wanddikteafname per jaar voor de stalen leidingen vergelijkbaar is, de oorspronkelijke wanddikte bij de stalen leiding in Ducaton significant kleiner is dan bij persleiding Holwinde (de diameter bij Ducaton is ook kleiner dan bij Holwinde).



Figuur 6.33: Resultaten Wtube voor een stalen leidingdeel in grondgebied 3



Figuur 6.34: Resultaten Wtube voor een stalen leidingdeel in grondgebied 2

Tabel 6.15: Vergelijking output deelmodel constructief gedrag (Wtube) en NEN3650 berekeningsmethode voor de twee stalen leidingdelen

Leidingtype	Grootheid	Wtube (incl. aantasting)	Wtube (excl. aantasting)	NEN3650	Afwijking
Staal in grondgebied 3	Spanning (maximaal) [N/mm ²]	180	(154)	145	24% (6%)
	Ovalisatie (maximaal) [mm]	7,0	(3,5)	3,4	51% (3%)
Staal in grondgebied 2	Spanning (maximaal) [N/mm ²]	74	(58)	57	30% (1%)
	Ovalisatie (maximaal) [mm]	2,7	(1,3)	1,3	50% (3%)

6.2.7 Belangrijkste faalmechanisme

Ook voor de leiding Ducaton is het scenario zonder zettingen doorgerekend. Daarom zijn in plaats van de zettingen uit het deelmodel zettingen zeer geringe dummy-waarden als invoer gebruikt voor het deelmodel constructief gedrag en de faalkansberekening. Dit resulteert overal in niet significante faalkansen (10^{-12}). Het blijkt daardoor dat slechts de aantasting voor de gemodelleerde bezwijkmechanismen (vervorming van de leiding zelf) van verwaarloosbare invloed is. Uit paragraaf 6.2.6 volgde wel dat in combinatie met de zettingsverschillen de aantasting wel degelijk een grote invloed heeft op de berekende spanningen en daarmee dus de faalkans. Ook kan de invloed van de aantasting op de faalkans

van de leiding voor niet gemodelleerde bezwijkmechanismen, bijvoorbeeld falen door aantasting van ontluichters, wel groot zijn.

7 Valorisatie van Proof-of-Principle

De nu uitgevoerde eerste fase in het opstellen van het faalkansmodel betreft een Proof of Principle:

Het aantonen dat de voorziene methodiek en de resultaten werkbaar en van waarde zijn voor het assetbeheer van persleidingen.

Dit wordt in dit hoofdstuk valorisatie van de Proof of Principle van het faalkansmodel genoemd.

7.1 Aanpak valorisatie Proof-of-Principle

Om dit te beoordelen zijn 2 workshops georganiseerd met betrokkenen, te weten:

- de kennispartners,
- beheerders Gemeente Rotterdam en beheerders Waternet,
- diverse beheerders vanuit het RIONED en STOWA netwerk.

Deelnemers vanuit de kennispartners niet meegerekend, zijn deze workshops bezocht door in totaal 11 beheerders van persleidingen.

Beide workshops waren gelijk qua opzet, maar met verschillende deelnemers. De opzet was:

- Deels informatief:
 - werkwijze en resultaten werden toegelicht
- Deels toetsend:
 - de deelnemers is gevraagd hun inschattingen over faalkansen bij de cases te geven. Dit gebeurde via een herhaaldelijk in te vullen vragenlijst, waarbij de hoeveelheid informatie over de cases in een aantal stappen werd uitgebreid.
- Deels discussiërend:
 - gegeven de resultaten, werkwijze en de bevindingen van de vragenlijsten, een discussie met de deelnemers over de waarde van de methodiek en hoe het gebruik in hun processen past, c.q. te passen is.

Het Proof of Principle wordt beschouwd als aangetoond, wanneer er uit het oordeel van de beheerders blijkt dat de gekozen kwantitatieve en objectieve methode in het faalkansmodel toepasbaar geacht wordt in de toekomstige beheerderspraktijk en waarde toe kan voegen ten opzichte van de huidige methode op basis van beperkte informatie en expert judgement. De twee laatste onderdelen van de workshop worden in respectievelijk paragrafen 7.2 en 7.3 kort toegelicht en besproken, waarna in paragraaf 7.4 een eindoordeel inzake het Proof of Principle wordt samengevat.

7.2 Inschattingen van de faalkansen door beheerders

Tijdens de workshops is aan de beheerders/deelnemers gevraagd om voor een case (hetzij Holwinde (Rotterdam), hetzij Ducaton (Mijdrecht)) inschattingen te geven van faalkansen van leidingdelen op basis van aangereikte informatie over deze leidingdelen en omgevingsfactoren. Deze informatie werd in stappen steeds uitgebreider en na elk stukje nieuwe informatie werden de vragen “herhaald” om te

zien hoe hierop inschattingen kunnen veranderen: dit in termen van faalkans, bandbreedtes op faalkans en “meest risicovolle leidingdeel”.

De stapsgewijze verrijking van de informatie bestond uit successievelijk:

- “luchtfoto van tracé”, materiaal, leeftijd, diameter en wanddikte van leidingdelen,
- talud hoogtes (indicatoren van lokale bovenbelasting) van specifieke leidingdelen,
- grondgebieden (als indicator van zettingsgevoeligheid) waarin de leidingdelen zich bevinden,
- de orde grootte van door de leidingdelen ondervonden zettingsverschillen,
- de debieten in de leidingen (als indicator voor risico op gas-/luchtbellen en wanddikte afname).

De betreffende vragenlijsten voor de twee cases zijn opgenomen in Bijlagen C en D voor respectievelijk Holwinde en Ducaton.

De antwoorden van de deelnemers en de berekende waarden volgens het faalkansmodel zijn uitgewerkt in figuren. Uit deze figuren is op te maken

- hoe de orde grootte van de ingeschatte faalkansen zich verhouden tot de berekende faalkansen,
- hoe de orde grootte van de ingeschatte bandbreedtes op de faalkansen zich verhouden tot de berekende bandbreedtes,
- hoe deelnemers van “mening veranderen”/“inschattingen bijstellen” naarmate meer info beschikbaar komt,
- hoe groot de variaties zijn in de meningen van de deelnemers onderling.

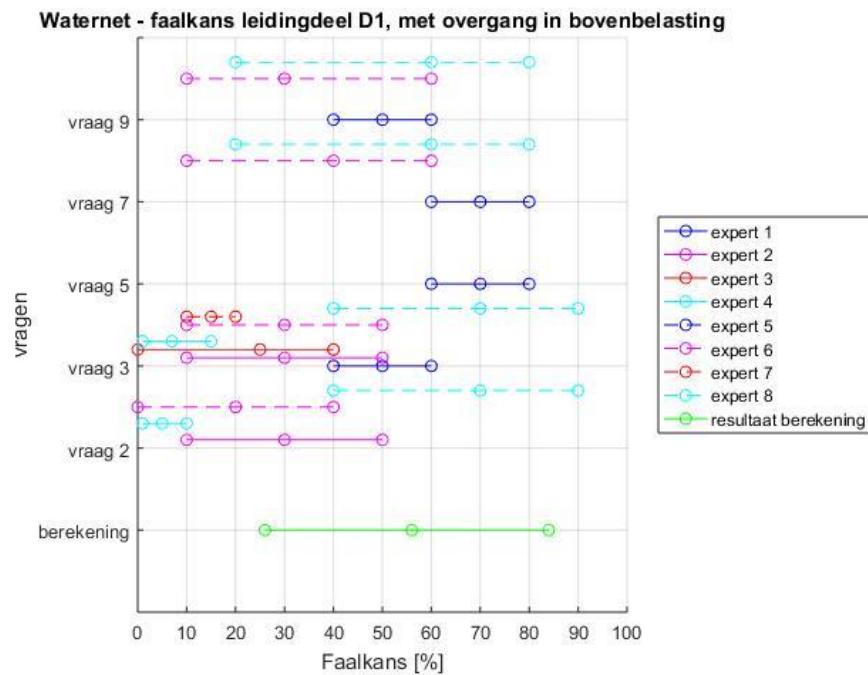
De figuren zijn gemaakt per leiding deel, c.q. specifieke locatie en bevatten op de horizontale as de ingeschatte waarden voor de faalkansen en bandbreedtes hierop. Op de verticale as staat de herkomst van de waarden: hetzij de berekeningen, hetzij ten tijde van een van de vragen (hoeveelheid informatie). De beheerders is eerst gevraagd een inschatting te maken van het meest risicovolle leidingdeel, waarna voor dit leidingdeel faalkansen en bandbreedtes zijn ingeschat. De inschattingen per beheerder hebben dus slechts plaats gekregen in dat figuur dat zij als meest risicovol bestempelden. Niet alle leidingbeheerders hebben hetzelfde leidingdeel gekozen wat resulteert in dat de inschatting van de beheerders verdeeld is over verschillende leidingdelen. Beheerders zijn in de loop van de vragenlijst ook geswitched van leidingdeel waardoor hun inschatting voor verschillende vragen ook in verschillende figuren teruggevonden kan worden.

Als voorbeeld twee figuren uit de case Ducaton (Waternet), zie Figuur 7.1 en Figuur 7.2. Beide figuren betreffen specifieke leidingdelen waarvoor vanaf vraag 3 specifieke informatie bekend wordt over daar lokaal aanwezige ophogingen.

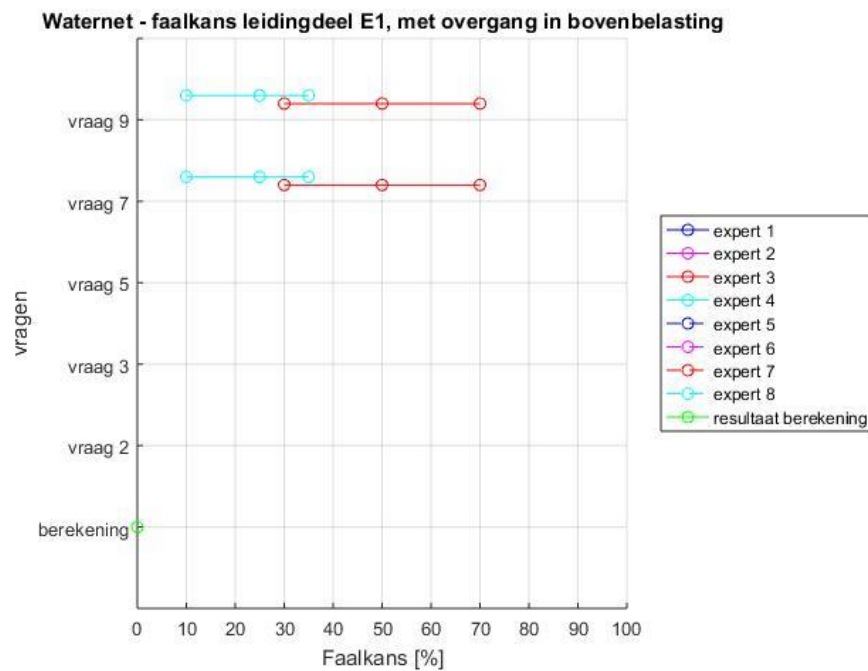
Figuur 7.1 geeft een beeld hoe de orde grootte van de faalkansen en bandbreedtes overeen kunnen komen met de modelberekeningen (bijvoorbeeld lichtblauw gestreept), maar ook hoe hier en daar afwijkingen aanwezig zijn (bijvoorbeeld lichtblauw doorgetrokken). Ook is te zien hoe experts van mening kunnen veranderen naarmate de informatie verandert: men is redelijk consequent bij leidingdeel D1 (bijvoorbeeld donkerblauw doorgetrokken), dan wel men switched tussentijds naar een ander leidingdeel (bijvoorbeeld lichtblauw en roze gestreept vraag 5 – 6), of de grootte van faalkans en bandbreedte kan veranderen

(bijvoorbeeld roze gestreept). Verder is er ook sprake van een behoorlijke variabiliteit tussen de experts.

In Figuur 7.2 een ander beeld: 2 experts komen (nadat de beschikbare informatie nagenoeg volledig bekend gemaakt is) alsnog met een significante faalkans uit bij leidingdeel E1, waarvoor het faalkansmodel een te verwaarlozen kans kwantificeert. Deze berekende faalkans wordt (ook na bespreking met experts) realistisch geacht aangezien het hier gaat om een HDPE persleiding welke de zettingen van de grond relatief zonder problemen kan volgen.



Figuur 7.1: Berekende faalkanswaarden en expert inschattingen voor leidingdeel D1 (case Ducaton).



Figuur 7.2: Berekende faalkanswaarden en expert inschattingen voor leidingdeel E1 (case Ducaton).

7.3 Discussie met betrekking tot valorisatie

Na afloop van de presentatie van werkwijze en resultaten van het faalkansmodel en een korte presentatie van de resultaten van de verkregen antwoorden uit de vragenlijsten, heeft een plenaire discussie plaatsgevonden met de deelnemers over de waarde van de werkwijze en het toekomstbeeld dat men hiervoor ziet binnen hun organisaties.

De werkwijze en het doel om faalkansen te kwantificeren in absolute en (onderling) relatieve zin wordt als waardevol gezien. Zowel Rotterdam als Waternet geven aan stappen te maken van een reactief naar een proactief management, hetgeen ook door overige deelnemers wordt beaamd.

Als resultaat heeft men – net als in het voorgestelde faalkansmodel – een kaart/GIS-applicatie voor ogen met faalkans indicaties. Hieraan wordt een grote toegevoegde waarde toegekend voor het strategisch asset management.

Ook het feit dat automatiseringen plaatsvinden, vindt bijval en dat kennis en informatie van andere beheerders gebruikt wordt.

Als verdere opmerkingen/verbeteringen zijn de volgende zaken naar voren gekomen:

- de berekende faalkansen zijn in een aantal situaties zeer hoog. Dit wordt door de deelnemers aangekaart, maar ook door de kennispartners zelf onderkend. Veel kansen op falen zijn nu sterk conditioneel op de vermeende aanwezige belastingen (zettingen). Voor de Proof of Principle is dit geen bezwaar, maar bij

- verdere fases moeten realistische orde groottes en onderbouwingen beschikbaar komen,
- er moet samen met de beheerders goed overlegd worden hoe de presentatie eruit moet zien (bijvoorbeeld ook een overzicht met planjaren voor vervanging in blokken van 5 jaar),
 - achter (eventueel opgerolde) faalkanswaarden moet informatie beschikbaar blijven en toegankelijk zijn met betrekking tot de verschillende mechanismen, onderliggende oorzaken, data en omstandigheden,
 - een branche breed gedragen definitie van systeem componenten moet worden gedefinieerd en gebruikt. Met duidelijke uitwisselingsformaten en de nood aan version control van programma's en interfaces,
 - een goede wisselwerking en communicatie over specifieke data die voor het faalkansmodel nodig is en data en kennis die bij de beheerders aanwezig is of gaat zijn,
 - men ziet het model en de resultaten als een nuttig in te kopen dienst, anders dan een systeem dat bij de beheerders zelf operationeel gemaakt gaat worden,
 - onderkend wordt dat de modellen dynamisch zijn en moeten blijven: nieuwe informatie (bijvoorbeeld inspecties) moet een (gedeeltelijke) rerun en update van faalkansen leveren. Hierbij hoort ook het dan bijhouden van de geschiedenis van veranderingen in informatie en berekeningen,
 - men wil voorbereid kunnen zijn op onverwachte ontwikkelingen; bijvoorbeeld extreem weer (de droogte vorig jaar),
 - twee opvallende en case specifieke observaties zijn:
 - Case Ducaton: ten behoeve van wanddikte afname berekening is luchtophopping beschouwd. Dit betreft een sterke relatie met schade opgetreden aan ontluchters, die uit te werken is in de volgende fase,
 - Case Holwinde: na afloop bleek in een van de drie geïdentificeerde locaties met hoge faalkans in het recente verleden ook daadwerkelijk een faalgebeurtenis te hebben plaatsgevonden (zie paragraaf 6.1.7),
 - het faalkansmodel helpt bij het onderbouwen van:
 - inspanningen om data op orde te krijgen richting management,
 - te reserveren budgetten voor vervangingsbeleid

7.4 Conclusie met betrekking tot Proof of Principle

De bereikte resultaten in deze fase en de ontvangst van de werkwijze door de beheerders en branche onderbouwen de conclusie dat het Proof of Principle voldoende is aangetoond om vervolgfases te initiëren.

In het huidige Fase 1 deel van het ontwikkelen van een faalkansmodel is tot doel gesteld om voor een beperkt aantal mechanismen faalkansen te kwantificeren van persleidingen. Dit met een werkwijze die beschikbare data, informatie en kennis zoveel mogelijk samenbrengt, die mogelijkheden tot automatisering biedt en leidt tot een tijdsbeeld van zich, qua risico (met betrekking tot faalkans), onderscheidende leidingdelen. Deze faalkanskwantificering is mogelijk gebleken met de data die beschikbaar is, ofwel beschikbaar kan komen en leidt tot een beeld van, qua faalkans, onderscheidende leidingdelen. Hoewel de berekende waarden van de faalkansen nog als te hoog worden ingeschat, is gebleken dat de meest risicovolle leidingdelen wel kunnen worden onderscheiden en dat dit beeld past bij in werkelijkheid opgetreden incidenten.

Uit de workshops met de beheerders is gebleken dat het faalkansmodel toepasbaar geacht wordt in de toekomstige beheerpraktijk.

8 Conclusie en aanbevelingen

In een Proof of Principle studie is een eerste fase faalkansmodel voor persleidingen opgesteld. Het onderzoek heeft plaatsgevonden binnen TKI Deltatechnologie met kennispartners TNO, Deltares, en Partners4UrbanWater en met financiering en commitment van beheerders Gemeente Rotterdam en Waternet en branche organisaties STOWA, RIONED.

Het faalkansmodel geeft een voorspelling van de betrouwbaarheid van een leidingsegment op basis van de maximaal aanwezige kennis en informatie over de sterkte van, belasting op en slijtage van de leiding. Een tweede belangrijk principe van de aanpak gaat zijn dat technische informatie over de leiding verkregen door de ene beheerder (leidingkenmerken, in combinatie met metingen en incidentenregistratie) op basis van overeenkomsten/correlaties benut wordt door de andere beheerders. Het model gaat uit van een modulaire architectuur waarbinnen een decompositie plaatsvindt naar leidingdelen en naar (vooralsnog constructieve) faalmechanismen waarbij per deel en mechanisme faalkansen worden gekwantificeerd. Middels systeembeschouwingen kunnen deze dan naar believen worden gecombineerd over mechanismen en leidingdelen naar totale faalkansen op een grotere schaal. Vice versa faciliteert het model om vanaf deze grotere schaal informatie te krijgen over de onderliggende oorzaken en meest kritische delen.

Voor het Proof of Principle traject is het faalkansmodel uitgewerkt voor

- breuk leiding door zettingsverschillen;
- lekkage bij voegen door zettingsverschillen;
- breuk leiding door inwendige chemische aantasting,

Vervolgens wordt het faalkansmodel ook toegepast in twee cases, zoals aangedragen door de Gemeente Rotterdam (persleiding Holwinde) en Waternet (persleiding Ducaton in Mijdrecht). Hiermee zijn een varia aan materialen (staal, gietijzer, beton, AC, PE) en afmetingen (diameters, wanddikten) beschouwd. Bovendien zijn verschillende grondgebieden te onderscheiden en daarnaast ook lokale bovenbelastingen geïdentificeerd.

Voor beide cases zijn overzichtskaarten opgesteld met resulterende faalkansen voor een gegeven tijdstip.

De berekende faalkansen zijn over het algemeen hoog, waarbij wordt opgemerkt dat dit grotendeels conditioneel is op de aanwezig geachte zettingen. In verdere ontwikkelstappen moet hier zeker aandacht aan worden besteed om deze te onderbouwen dan wel te verbeteren tot waarden die overeenkomen met waarnemingen uit de praktijk. Het totale beeld in termen van oorzaak en gevolg voldoet prima aan de verwachtingen. Bovendien blijken de meest kritische locaties ook als zodanig door de beheerders te worden herkend.

Dit laatste is gebleken tijdens twee workshops die zijn gehouden met de beheerders. Doel van deze workshops was – naast het communiceren van de werkwijze en de resultaten – om inzicht te krijgen in de inschattingen van faalkansen door de beheerders zelf en met name feedback van hen te krijgen over de toegevoegde waarde van een faalkansmodel.

De feedback heeft geleid tot een positieve conclusie met betrekking tot het behalen van de Proof of Principle. Ook is de relatie tot de praktijk positief bekrachtigd, specifiek op de punten:

- Case Ducaton: ten behoeve van wanddikte afname berekening is luchtophopping beschouwd. Deze locaties hebben een sterke relatie met schade opgetreden aan ontluchters, een en ander is nader uit te werken in de volgende fase,
- Case Holwinde: van de drie geïdentificeerde locaties met hoge faalkans bleek in het recente verleden ook daadwerkelijk een faalgebeurtenis te hebben plaatsgevonden (dit was de onderzoekers tijdens uitwerking van de case niet bekend).

De werkwijze en het doel om faalkansen te kwantificeren in absolute en (onderling) relatieve zin wordt hierbij als waardevol gezien. Zowel Rotterdam als Waternet geven aan stappen te maken van een reactief naar een proactief management, hetgeen ook door overige deelnemers wordt beoogd.

Als resultaat heeft men – net als in het voorgestelde faalkansmodel – een kaart/GIS-applicatie voor ogen met faalkans indicaties, welke dan goed aansluit bij hun werkwijze. Hieraan wordt een grote toegevoegde waarde toegekend voor het strategisch asset management.

De bereikte resultaten in deze fase en de ontvangst van de werkwijze door de beheerders en branche onderbouwen de conclusie dat het Proof of Principle voldoende is aangetoond om vervolgfases te initiëren.

De voorziene vervolgfase betreft dan een Proof of Concept als voorloper op de laatste fase: Proof of Producibility. Bij een Proof of Producibility kan men denken aan het vormgeven van de koppeling van het faalkansmodel aan de bestaande systemen bij de asset-eigenaren en beheerders met uitwerkingen richting risico's (kans en effect).

Met dit in het achterhoofd ligt een aantal richtingen in het verschieft voor de fase Proof of Concept:

- Verdieping:
 - Verfijnen en verder uitwerken van het raamwerk voor de faalkansen (inbrengen van data uit inspecties, bewezen sterkte, beschouwingen over tijd, oprollen van faalkansen),
 - Onderzoek naar gedrag en eigenschappen van koppelingen/voegopeningen.
- Verbreding:
 - Toevoegen van operationele component (hydraulische modellen en gegevens),
 - Toevoegen van andere mechanismen,
 - Toevoegen van andere componenten (appendages),
 - Gebruik van satelliet beelden (zetting),
- Automatisering en versnelling,
- Uitwerking van de correlatiemodellen.

In de Proof of Concept fase wordt ook onderzocht op welke wijze het FKM geïmplementeerd zal worden. Denk daarbij aan het feit dat het FKM verbonden

moet zijn met de leidingdata, de modellen, andere data en er moet rekenkracht zijn om de berekeningen te maken, binnen randvoorwaarden van tijd en geld. Implicaties hiervan voor het FKM moeten worden geadresseerd.

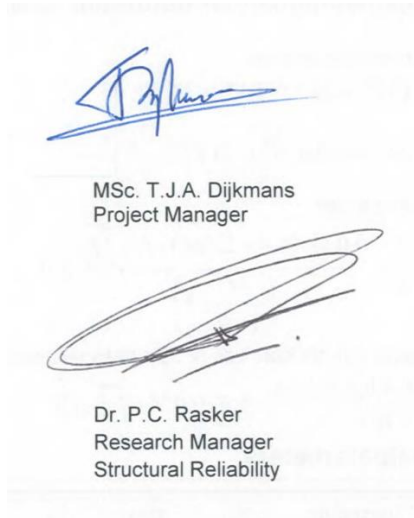
9 Referenties

- [1] Gemeente Rotterdam, Stichting RIONED, STOWA. Ontwikkeling van een beoordelingsmodel voor de hoofdpersleidingen van gemeente Rotterdam, 2013.
- [2] NEN 9997-1+C1 (nl) Geotechnisch ontwerp van constructies – Deel 1: Algemene regels. Nederlands Normalisatie Instituut, 2012.
- [3] 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.
- [4] NEN 3650-1 (nl) Eisen voor buisleidingsystemen - Deel 1: Algemene eisen. Nederlands Normalisatie Instituut, 2012.
- [5] CUR rapport 122: Buizen in de grond, berekening van ongewapende en gewapende betonnen buizen; 1985.
- [6] JCSS Probabilistic Model Code, Section 3.7: Soil Properties. Joint Committee of Structural Safety, 2006.
- [7] JCSS Probabilistic Model Code, Section 3.9: Model Uncertainties. Joint Committee of Structural Safety, 2006.

10 Ondertekening

Delft, 25 juli 2019

TNO



A Weerstand leiding

A.1 Beschrijving bezwijkmechanismen betonnen leiding

A.1.1 Overschrijden momentcapaciteit doorsnede

$$(M_{1u}^* + M_{2u}^*) - (M_1 + M_2) \geq 0 \quad (1.3)$$

$$M_u^* = \omega_0 b d f_y d \left(1 - 0.52 \omega_0 \frac{f_y}{f_c} \right) \quad (1.4)$$

A.1.2 Overschrijden dwarskrachtcapaciteit

$$f_c \cdot f_N \cdot \frac{T}{h} - \frac{0.074 \cdot (4.4 + 2.5 \omega_0) \cdot f_y \cdot \sqrt{f_c'}}{\left(\frac{M}{T \cdot h} + 1 \right)} \leq 0 \quad (1.5)$$

A.1.3 Overschrijden capaciteit beton ten opzichte van radiale trekspanningen

$$\frac{M \cdot 10^3 + 0.45 \cdot N \cdot h}{h \cdot r_s} - 1.2 \cdot 0.074 \cdot \sqrt{f_c'} \leq 0 \quad (1.6)$$

A.2 Aannames materiaalparameters

Materiaal	Parameter	Verdeling	X _k	CoV	μ	Eenheid
Staal	f _y	Lognormaal	290	0,07	325	N/mm ²
Gietijzer	f _y	Lognormaal	275	0,08	314	N/mm ²
Beton	f _c	Lognormaal	35	0,1	41	N/mm ²
	f _c '	Lognormaal	1,96	0,1	2,3	N/mm ²
	f _y	Lognormaal	400	0,07	449	N/mm ²
	ω ₀	Det	0,01	-	0,01	[-]

De gemiddelde waarde wordt op de volgende manier afgeleid, als wordt uitgegaan dat de karakteristieke waarde van de sterkteparameter gedefinieerd is als de waarde met 5% onderschrijdingskans.

$$\mu_R = R_k \exp(1.64 \cdot CoV) \quad (1.7)$$

B Afleiding model factor

In de JCSS Probabilistic Model Code, ref. [6], is de volgende tabel gegeven met modelonzekerheden voor geotechnische modellering:

Type of problem	Type of calculation model	Expected mean	Standard deviation
Embankment slope stability Homogeneous soils	Failure arc analysis (e.g. Bishop, Spencer, etc.), 2-D FEM	1.1	0.05
Non homogeneous soils		1.1	0.10
Stability of retaining (sheetpiled) walls	Brinch Hansen, Blum, Elastic/plastic spring supported beam model	1.0	0.10
Shallow Foundations Stability: Homogeneous soil profile	Brinch Hansen	1.0	0.15
Non homogeneous soil profile		1.0	0.20
Settlement:prediction		1.0	0.20- 0.30
Foundation piles (driven) Point bearing capacity	CPT based empirical design rules	1.0	0.25
Shaft resistance		1.0	0.15
Embankment settlement prediction		1.0	0.20

Table 3.7.5.1: Indicative computation model uncertainty factors

In dit geval is gebruik gemaakt van de modelfactor voor 'Embankment settlement prediction', oftewel de zettingsmodellering on invloed van ophogingen (lognormaal verdeeld met $\mu=1,0$ en $\sigma = 0,2$). De standaarddeviaties van de modelfactoren voor de geotechnische modellering zijn vrij hoog. Deze zal dan ook redelijk van invloed zijn in de bepaling van de faalkans.

In het JCSS document, ref. [7], worden ook modelfactoren voor de modellering van het constructieve gedrag (bijvoorbeeld via eindige elementen berekeningen) gegeven. Deze zijn weergegeven in de volgende tabel:

	Model type	Distr	mean	CoV	correlation
	load effect calculation				
	moments in frames	LN	1.0	0.1	
	axial forces in frames	LN	1.0	0.05	
	shear forces in frames	LN	1.0	0.1	
	moments in plates	LN	1.0	0.2	
	forces in plates	LN	1.0	0.1	
	stresses in 2D solids	N	0.0	0.05	
	stresses in 3D solids	N	0.0	0.05	
	resistance models steel (static)				
	bending moment capacity ⁽¹⁾	LN	1.0	0.05	
	shear capacity	LN	1.0	0.05	
	welded connectio capacity	LN	1.15	0.15	
	bolted connection capacity	LN	1.25	0.15	
	resistance models concrete (static)				
	bending moment capacity ⁽¹⁾	LN	1.2	0.15	
	<u>buckling</u>	LN	1.4	0.25	
	shear capacity	LN	1.0	0.1	
	connection capacity				

(1) including the effects of normal and shear forces.

In dit geval is gebruik gemaakt van een gemiddelde modelfactor voor het berekenen van het belastingeffect (lognormaal verdeeld met $\mu=1,0$ en $\sigma = 0,1$).

C Proof of Principle workshop 25 februari 2019

Op 25 februari 2019 is een workshop gehouden waarbij de case Holwinde, Rotterdam is behandeld. In deze bijlage worden de resultaten gepresenteerd van de ingevulde vragenlijsten door de deelnemers.

Allereerst is de vragenlijst zelf in deze bijlage opgenomen. Daarna volgen figuren waaruit op te maken is:

- hoe de orde grootte van de ingeschatte faalkansen zich verhouden tot de berekende faalkansen,
- hoe de orde grootte van de ingeschatte bandbreedtes op de faalkansen zich verhouden tot de berekende bandbreedtes,
- hoe deelnemers van “mening veranderen”/”inschattingen bijstellen” naarmate meer info beschikbaar komt,
- hoe groot de variaties zijn in de meningen van de deelnemers onderling

De figuren worden gemaakt per leiding deel, c.q. specifieke locatie en bevatten op de horizontale as de ingeschatte waarden voor de faalkansen en bandbreedtes hierop. Op de verticale as staat de herkomst van de waarden: hetzij de berekeningen, hetzij van een van de experts ten tijde van een van de vragen.

Aan
deelnemers workshop

Van
Ir. L.M. Abspoel-Bukman
Ir. L.C. la Gasse

Onderwerp
Valorisatie project 'Proof of principle faalkansmodel persleidingen'

Inleiding

Graag maken we van de workshop waar u vandaag aan deelneemt gebruik om de resultaten van het project 'Proof of Principle faalkansmodel voor persleidingen' te valoriseren. Onderstaande vragen helpen ons bij het valoriseren van de projectresultaten, ten aanzien van de waarde van de voorgestelde aanpak ten opzichte van huidige aanpak.

Toelichting

In onderstaande vragen wordt gebruik gemaakt van termen en begrippen welke hieronder zijn toegelicht:

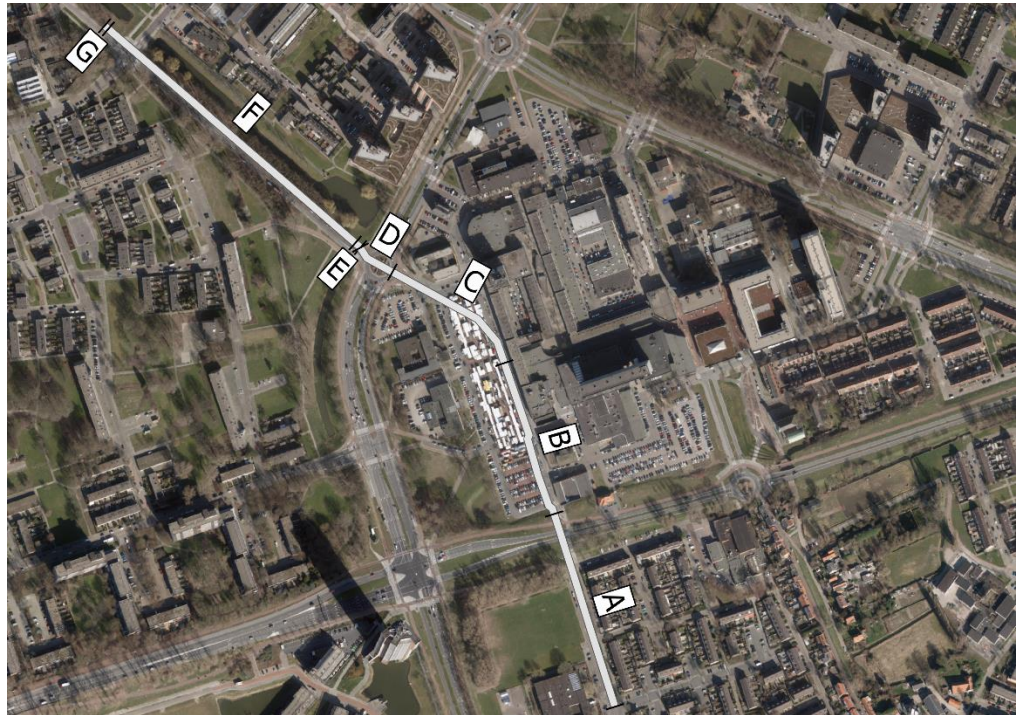
ondergrens	waarde waarvan u vermoedt dat het onwaarschijnlijk is dat het resultaat onder deze waarde ligt
verwachtingswaarde	(gewogen) gemiddelde, waarde waarvan u vermoedt dat dit het meest waarschijnlijk resultaat is
bovengrens	waarde waarvan u vermoedt dat het onwaarschijnlijk is dat het resultaat boven deze waarde ligt

Case Holwinde

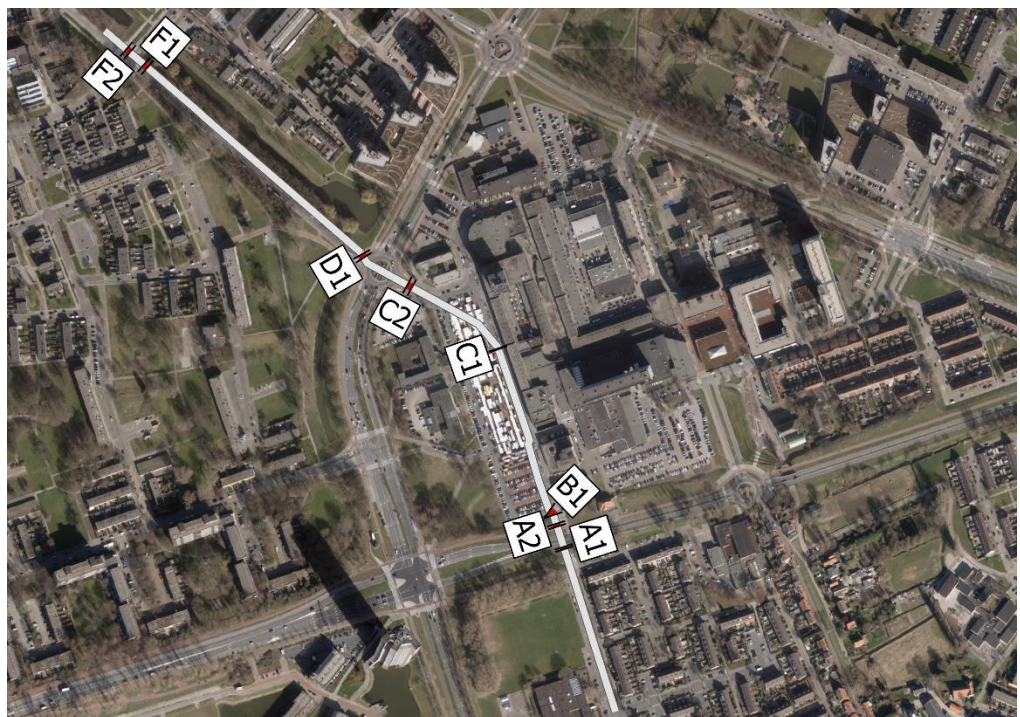
Informatie



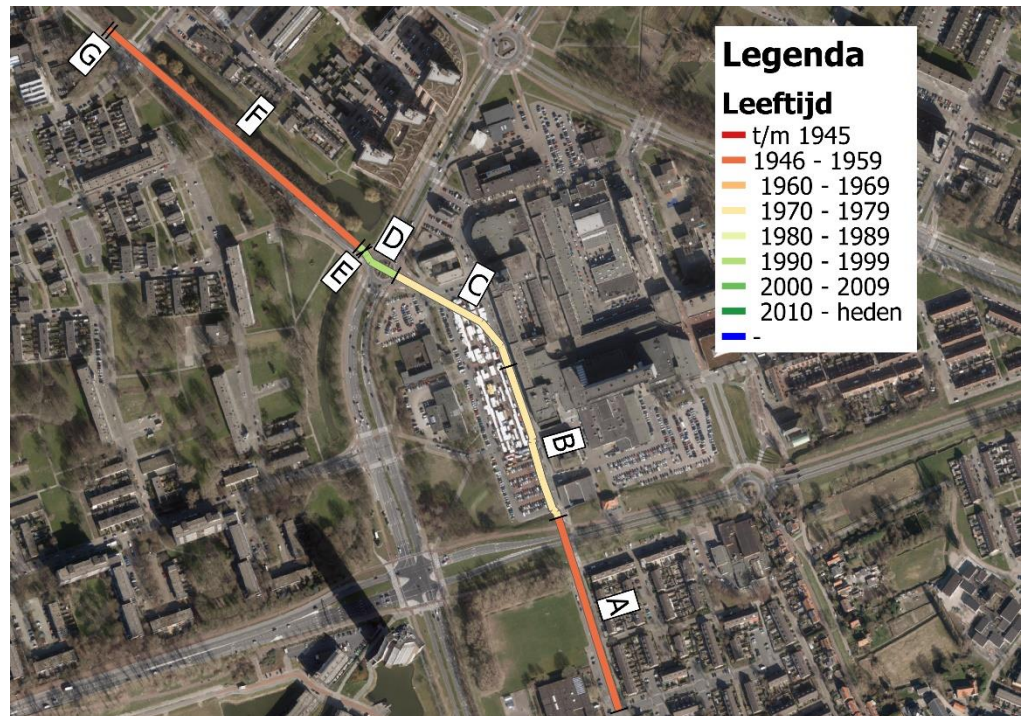
Figuur 10.1 – beschouwde persleidingstracés case Holwinde



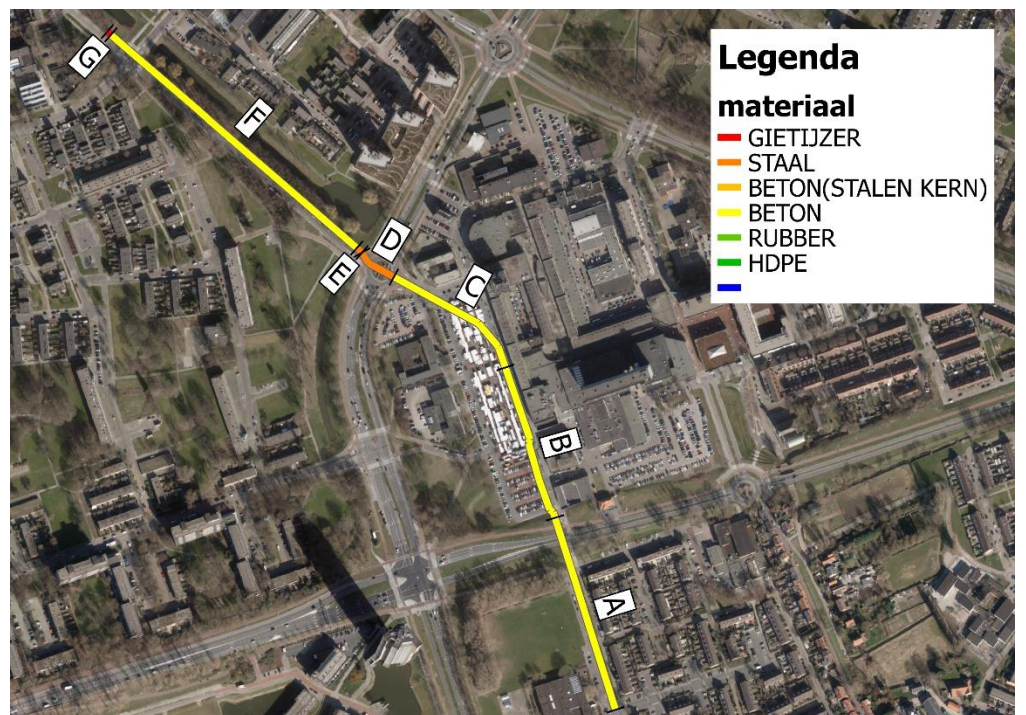
Figuur 2 - indeling leidingdelen A t/m G



Figuur 3 – Specifieke leidinglocaties A1 t/m F2



Figuur 4 – aanlegjaren persleiding Holwinde inclusief indeling leidingdelen



Figuur 5 – materialen persleiding Holwinde inclusief indeling leidingdelen

Tabel 16 - Totale informatie leidingdelen stap 1

Leidingdeel [-]	Materiaal [-]	Jaar van aanleg [-]	Diameter (inwendig) [mm]	Wanddikte [mm]
A	Beton	1958	850	92,5
B	Beton	1978	800	95
C	Beton	1978	850	92,5
D	Staal	1995	787,4	12,7
E	Staal	1995	1016	9,4
F	Beton	1959	1200	110
G	Gietijzer	1959	1200	28

Vraag 1:

Gegeven:

- de leeftijd van de leidingen
- het materiaal van de leidingen
- diameter en wanddikte van de leidingen

In welk leidingdeel verwacht u de hoogste faalkans?

A – B – C – D – E – F – G

Geef uw inschatting van de faalkans in het jaar 2021 van dit leidingdeel ten gevolge van:

- wanddikteafname en/of;
- zettingsverschillen

Ondergrens [%]	Verwachtingswaarde [%]	Bovengrens [%]

Vraag 2:

Gegeven:

- de leeftijd van de leidingen
- het materiaal van de leidingen
- diameter en wanddikte van de leidingen

In welk specifiek leidingdeel verwacht u de hoogste faalkans?

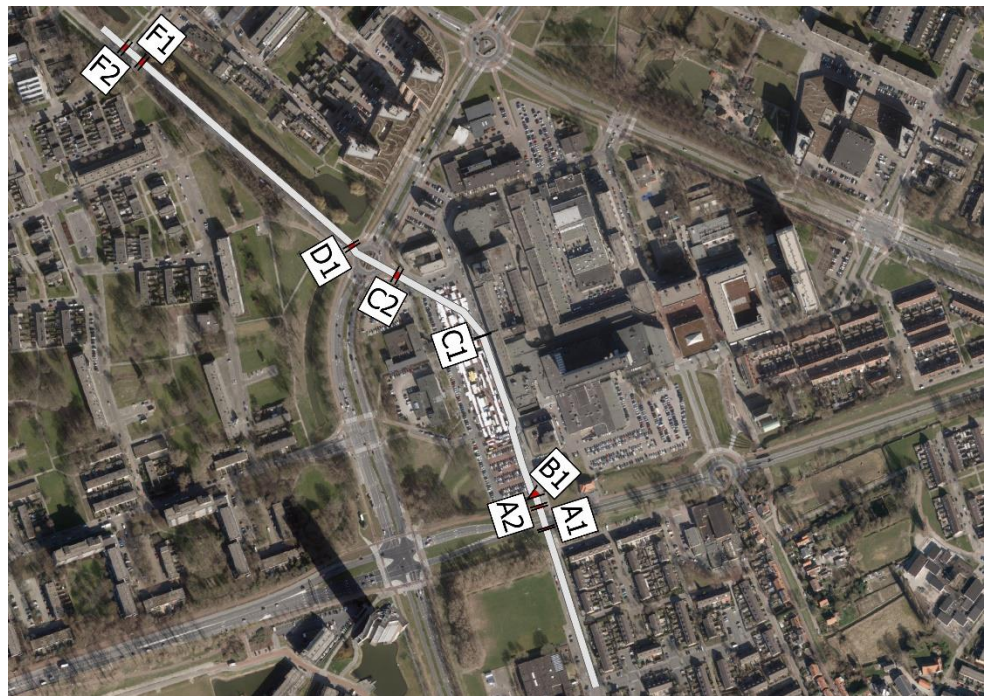
A1 – A2 – B1 – C1 – C2 – D1 – F1 – F2

Geef uw inschatting van de faalkans in het jaar 2021 van dit leidingdeel ten gevolge van:

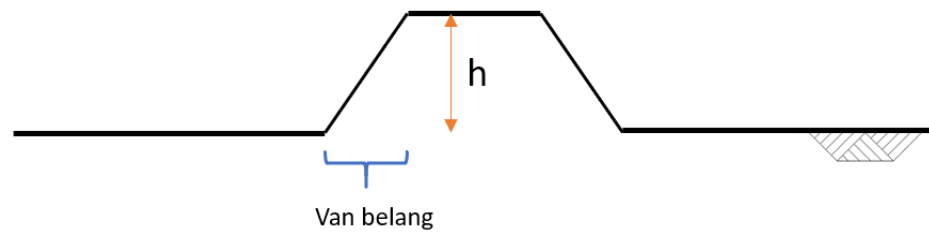
- wanddikteafname en/of;
- zettingsverschillen

Ondergrens [%]	Verwachtingswaarde [%]	Bovengrens [%]

Aanvullende informatie 1 – overgang in bovenbelasting



Figuur 6 – kaart van overgang in bovenbelasting (talud) incl opdeling leidingdelen



Figuur 7 – Voorbeeld situatieschets overgang in bovenbelasting (talud)

Tabel 2 – Extra informatie leidingdelen A1 – F2 stap 2

Leidingdeel	Hoogte talud [m]
A1	2,5
A2	2,5
B1	3,5
C1	2,0
C2	3,5
D1	3,5
F1	3,0
F2	3,0

Vraag 3:

Gegeven:

- de leeftijd van de leidingen
- het materiaal van de leidingen
- diameter en wanddikte van de leidingen
- aanwezigheid van overgang in bovenbelasting

In welk leidingdeel verwacht u de hoogste faalkans?

A1 – A2 – B1 – C1 – C2 – D1 – F1 – F2

Geef uw inschatting van de faalkans in het jaar 2021 van dit leidingdeel ten gevolge van:

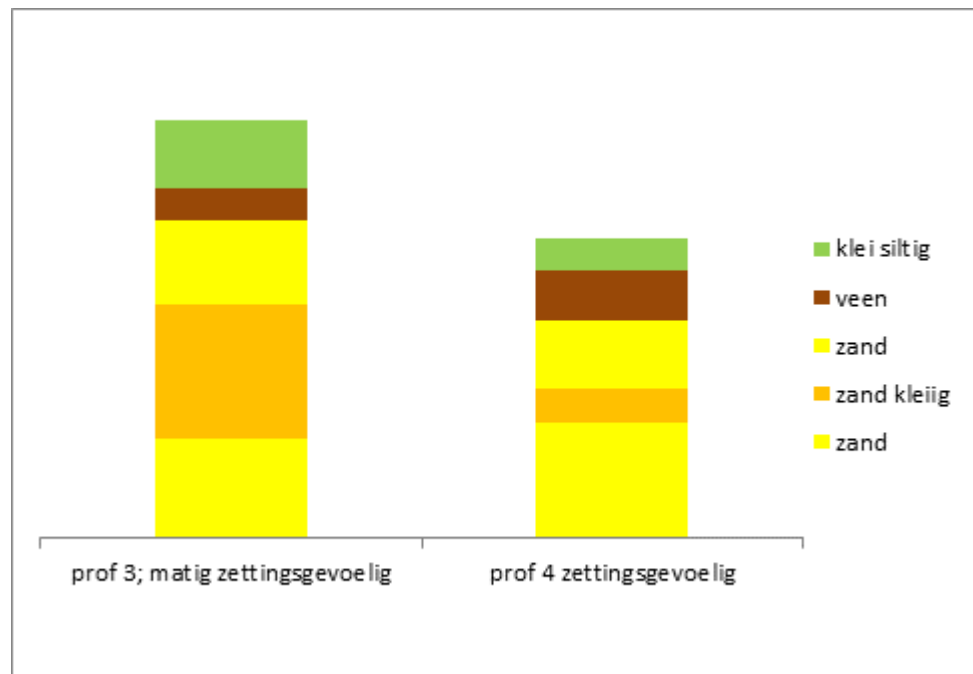
- wanddikteafname en/of;
- zettingsverschillen

Ondergrens [%]	Verwachtingswaarde [%]	Bovengrens [%]

Aanvullende informatie 2 – grondgebied



Figuur 8 – geïdentificeerde grondgebieden langs persleiding Holwinde:
grondgebied 3 = matig zettingsgevoelig
grondgebied 4 = zettingsgevoelig



Figuur 9 – grondopbouw grondgebieden 3 en 4

Tabel 3 – Totale informatie leidingdelen stap 3

Leidingdeel [-]	Materiaal [-]	Jaar van aanleg [-]	Diameter (inwendig) [mm]	Wanddikte [mm]	Grondsoort
A	Beton	1958	850	92,5	Zettingsgevoelig
B	Beton	1978	800	95	Zettingsgevoelig
C	Beton	1978	850	92,5	Matig zettingsgevoelig
D	Staal	1995	787,4	12,7	Matig zettingsgevoelig
E	Staal	1995	1016	9,4	Matig zettingsgevoelig
F	Beton	1959	1200	110	Matig zettingsgevoelig
G	Gietijzer	1959	1200	28	Matig zettingsgevoelig

Vraag 4:

Gegeven:

- de leeftijd van de leidingen
- het materiaal van de leidingen
- diameter en wanddikte van de leidingen
- het grondgebied

In welk leidingdeel verwacht u de hoogste faalkans?

A – B – C – D – E – F – G

Geef uw inschatting van de faalkans in het jaar 2021 van dit leidingdeel ten gevolge van:

- wanddikteafname en/of
- zettingsverschillen ten gevolge van grondovergangen

Ondergrens [%]	Verwachtingswaarde [%]	Bovengrens [%]

Vraag 5:

Gegeven:

- de leeftijd van de leidingen
- het materiaal van de leidingen
- diameter en wanddikte van de leidingen
- overgang in de bovenbelasting
- het grondgebied

In welk leidingdeel verwacht u de hoogste faalkans?

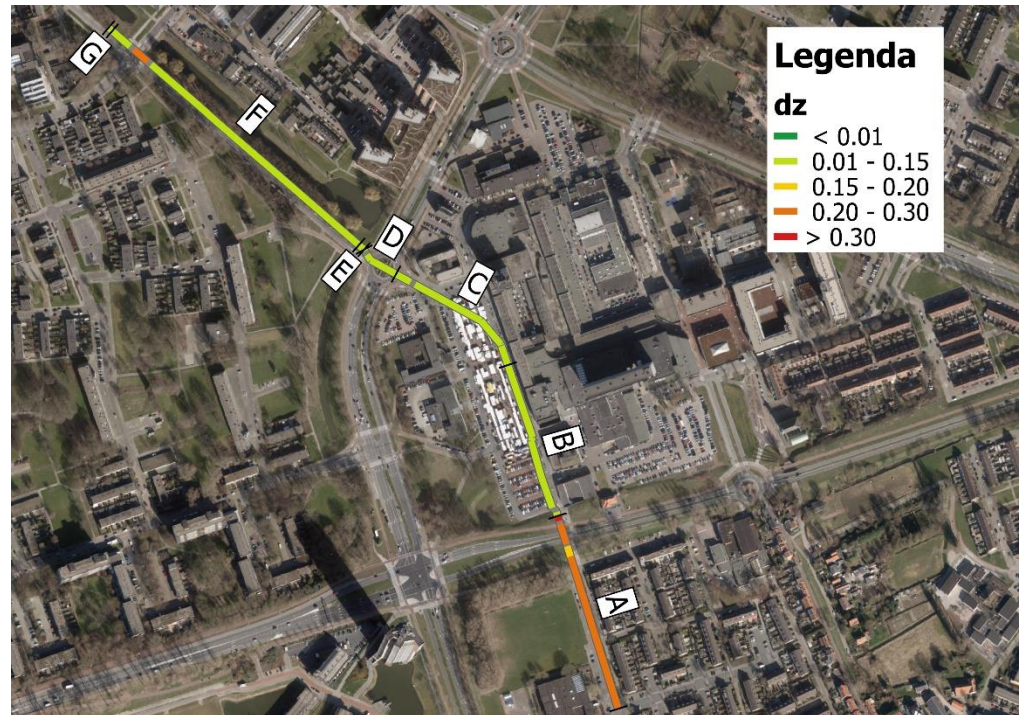
A1 – A2 – B1 – C1 – C2 – D1 – F1 – F2

Geef uw inschatting van de faalkans in het jaar 2021 van dit leidingdeel ten gevolge van:

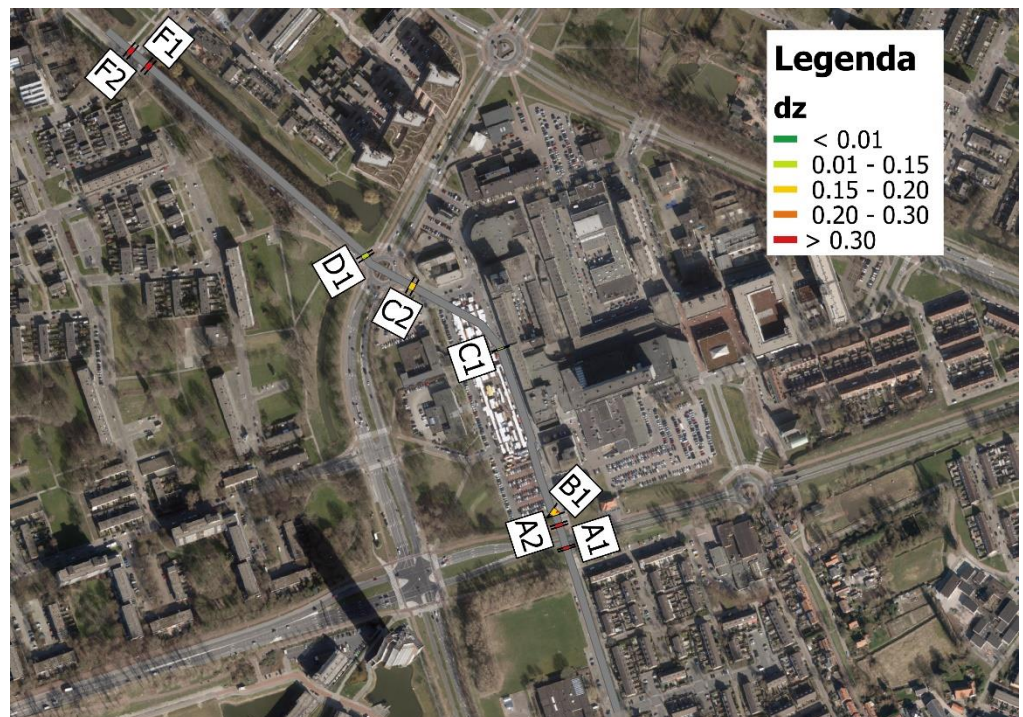
- wanddikteafname en/of
- zettingsverschillen ten gevolge van overgang in bovenbelasting

Ondergrens [%]	Verwachtingswaarde [%]	Bovengrens [%]

Aanvullende informatie 3 – zettingen



Figuur 10 - Zettingsverschillen ontstaan tot 2021 voor persleiding Holwinde voor leidingdelen A-G. Zettingsverschillen vinden plaats over een afstand van 9,5 m.



Figuur 11 - Zettingsverschillen ontstaan tot 2021 voor persleiding Holwinde voor leidingdelen A1 – F2

Tabel 3 – Totale informatie leidingdelen stap 4

Leiding-deel [-]	Materiaal [-]	Jaar van aanleg [-]	Diameter (inwendig) [mm]	Wanddikte [mm]	Grond-soort	Maximale zetting (verschil) [m]
A	Beton	1958	850	92,5	Zettings-gevoelig	> 0.3
B	Beton	1978	800	95	Zettings-gevoelig	0.01 – 0.15
C	Beton	1978	850	92,5	Matig zettings-gevoelig	0.01 – 0.15
D	Staal	1995	787,4	12,7	Matig zettings-gevoelig	0.01 – 0.15
E	Staal	1995	1016	9,4	Matig zettings-gevoelig	0.01 – 0.15
F	Beton	1959	1200	110	Matig zettings-gevoelig	0.2 – 0.3
G	Gietijzer	1959	1200	28	Matig zettings-gevoelig	0.01 – 0.15

Tabel 4 – Extra informatie leidingdelen A1 – F2 stap 4

Leidingdeel	Hoogte talud [m]	Zetting [m]	dL [m]
A1	2,5	> 0.30	11
A2	2,5	> 0.30	11
B1	3,5	0.15 – 0.20	11
C1	2,0	0.15 – 0.20	9,5
C2	3,5	0.15 – 0.20	9,5
D1	3,5	0.01 – 0.15	10
F1	3,0	> 0.30	10
F2	3,0	> 0.30	10

Vraag 6:

Gegeven:

- de leeftijd van de leidingen
- het materiaal van de leidingen
- diameter en wanddikte van de leidingen
- grondgebied
- zettingsverschillen

In welk leidingdeel verwacht u de hoogste faalkans?

A – B – C – D – E – F – G

Geef uw inschatting van de faalkans in het jaar 2021 van dit leidingdeel ten gevolge van:

- wanddikteafname en/of;
- zettingsverschillen ten gevolge van grondovergangen, gegeven dat het zettingsverschil in Figuur 10 zich voordoet

Ondergrens [%]	Verwachtingswaarde [%]	Bovengrens [%]

Vraag 7:

Gegeven:

- de leeftijd van de leidingen
- het materiaal van de leidingen
- diameter en wanddikte van de leidingen
- overgang in de bovenbelasting
- grondgebied
- zettingsverschillen

In welk leidingdeel verwacht u de hoogste faalkans?

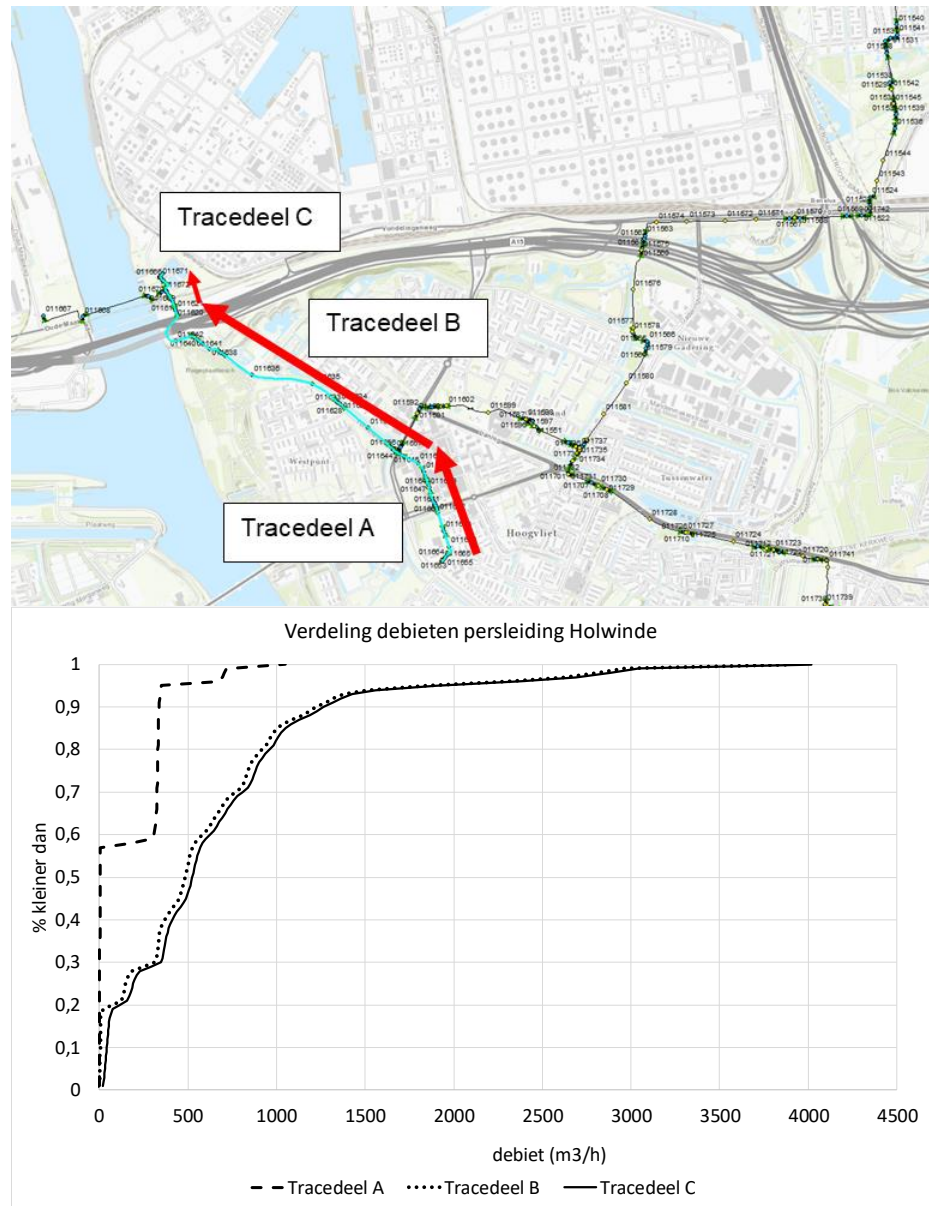
A1 – A2 – B1 – C1 – C2 – D1 – F1 – F2

Geef uw inschatting van de faalkans in het jaar 2021 van dit leidingdeel ten gevolge van:

- wanddikteafname en/of
- zettingsverschillen ten gevolge van overgang in bovenbelasting (uit Figuur 11 en Tabel 2)

Ondergrens [%]	Verwachtingswaarde [%]	Bovengrens [%]

Aanvullende informatie 4 – debieten



Figuur 12 – cumulatieve verdelingsfunctie van de debieten in persleiding Holwinde

Tabel 5 – Totale informatie leidingdelen stap 5

Leiding-deel [-]	Materiaal [-]	Jaar van aanleg [-]	Diameter (inwendig) [mm]	Wanddikte [mm]	Grond-soort	Maximale zetting (verschil) [m]	Debiet
A	Beton	1958	850	92,5	Zettings-gevoelig	> 0.3	Laag
B	Beton	1978	800	95	Zettings-gevoelig	0.01 – 0.15	Laag
C	Beton	1978	850	92,5	Matig zettings-gevoelig	0.01 – 0.15	Middel
D	Staal	1995	787,4	12,7	Matig zettings-gevoelig	0.01 – 0.15	Middel
E	Staal	1995	1016	9,4	Matig zettings-gevoelig	0.01 – 0.15	Middel
F	Beton	1959	1200	110	Matig zettings-gevoelig	0.2 – 0.3	Middel
G	Gietijzer	1959	1200	28	Matig zettings-gevoelig	0.01 – 0.15	Middel

Vraag 8:

Gegeven:

- de leeftijd van de leidingen
- het materiaal van de leidingen
- diameter en wanddikte van de leidingen
- grondgebied
- zettingsverschillen
- verdeling debieten

In welk leidingdeel verwacht u de hoogste faalkans?

A – B – C – D – E – F – G

Geef uw inschatting van de faalkans in het jaar 2021 van dit leidingdeel ten gevolge van:

- wanddikteafname en/of
- zettingsverschillen ten gevolge van grondovergangen, gegeven dat het zettingsverschil in Figuur 10 zich voordoet

Ondergrens [%]	Verwachtingswaarde [%]	Bovengrens [%]

Vraag 9:

Gegeven:

- de leeftijd van de leidingen
- het materiaal van de leidingen
- diameter en wanddikte van de leidingen
- overgang in de bovenbelasting
- grondgebied
- zettingsverschillen
- verdeling debieten

In welk leidingdeel verwacht u de hoogste faalkans?

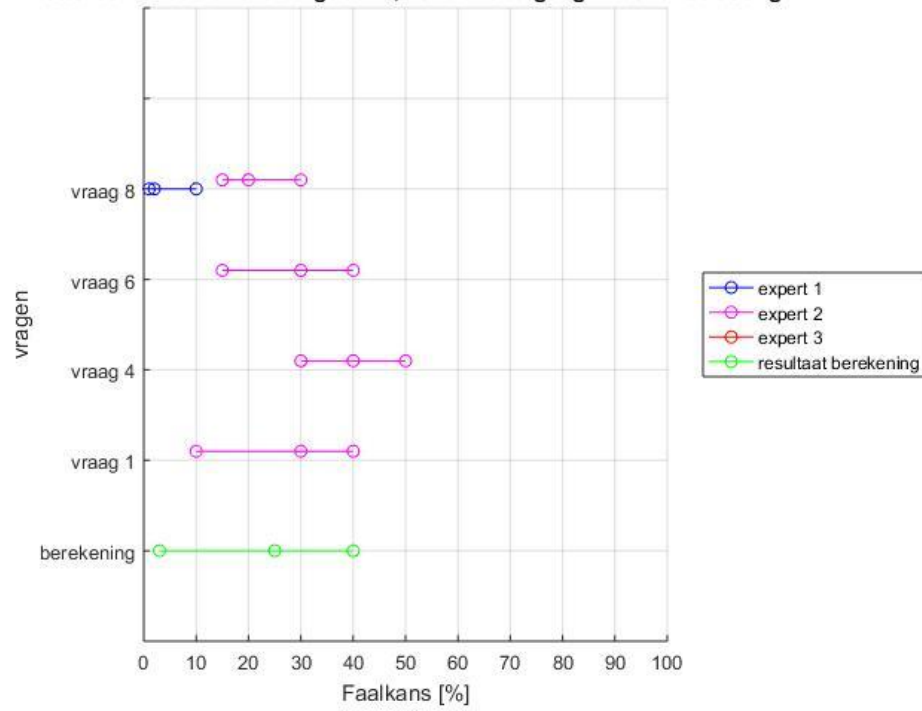
A1 – A2 – B1 – C1 – C2 – D1 – F1 – F2

Geef uw inschatting van de faalkans in het jaar 2021 van dit leidingdeel ten gevolge van:

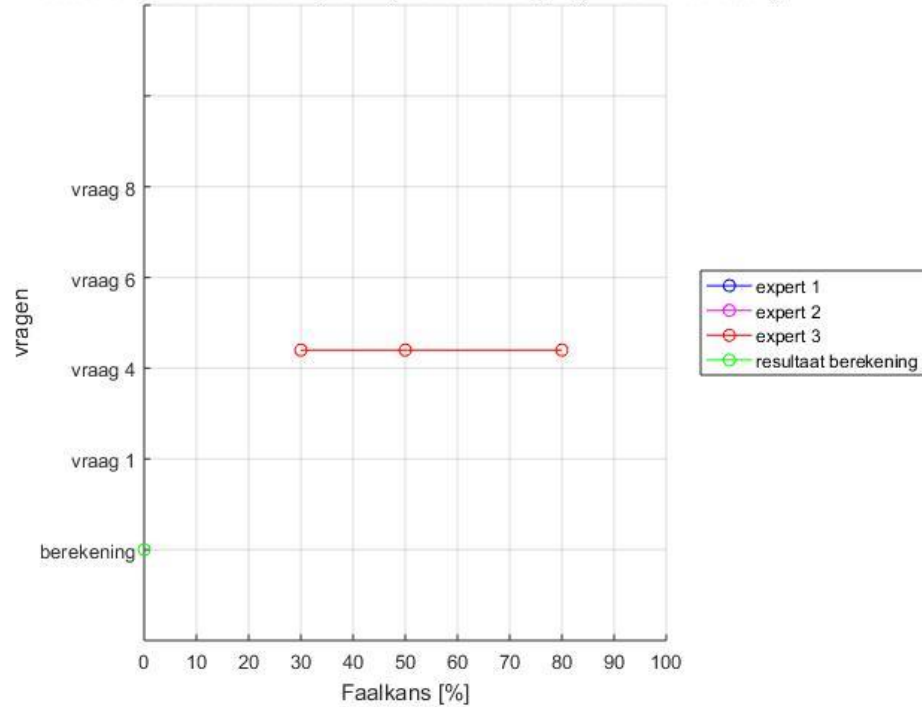
- wanddikteafname en/of
- zettingsverschillen ten gevolge van overgang in bovenbelasting (uit Figuur 11 en Tabel 2)

Ondergrens [%]	Verwachtingswaarde [%]	Bovengrens [%]

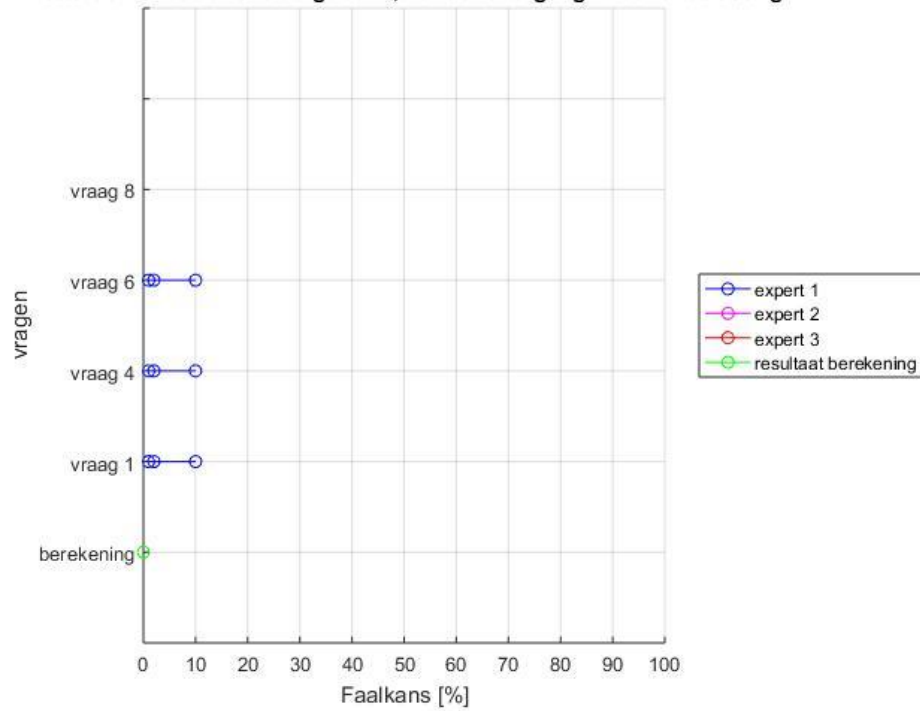
Rotterdam - faalkans leidingdeel A, zonder overgang in bovenbelasting



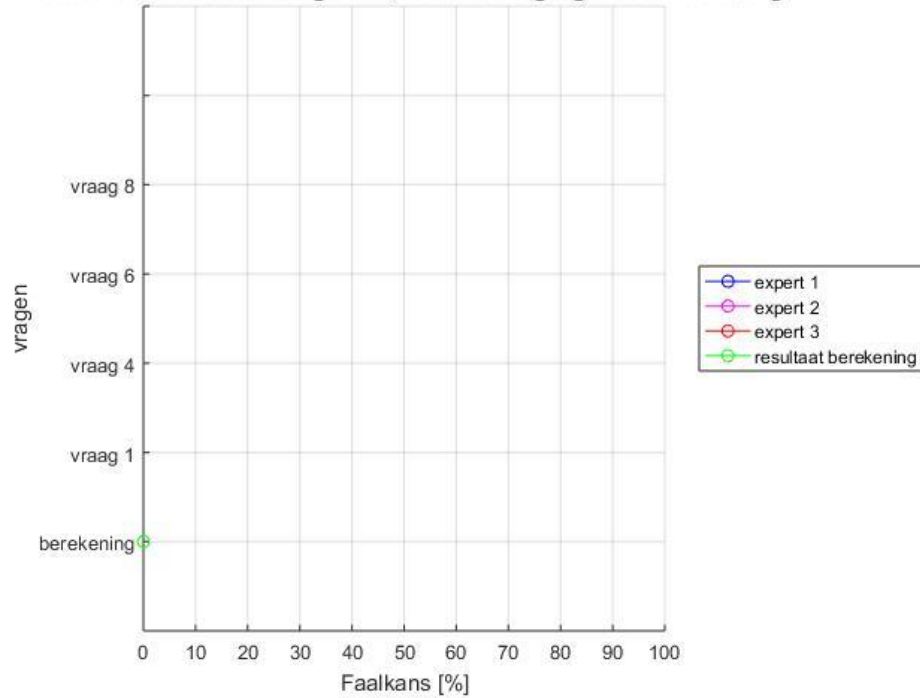
Rotterdam - faalkans leidingdeel B, zonder overgang in bovenbelasting



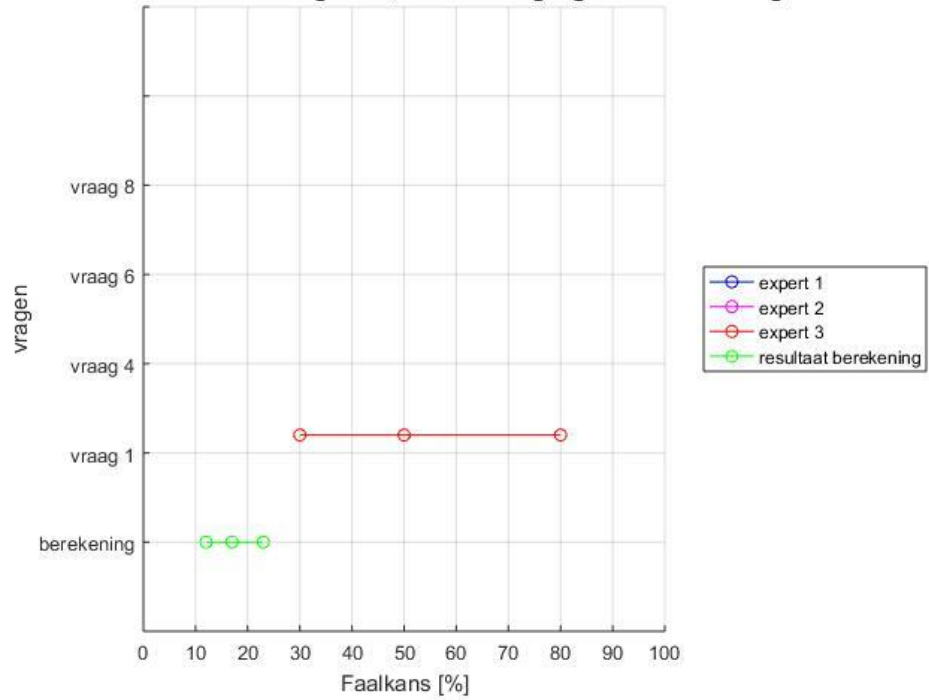
Rotterdam - faalkans leidingdeel C, zonder overgang in bovenbelasting



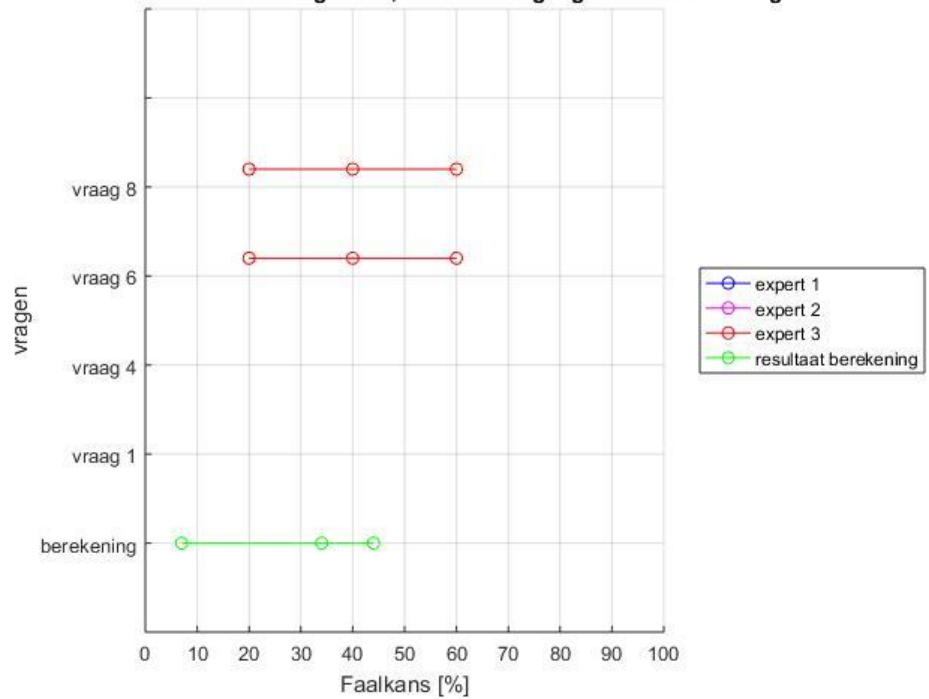
Rotterdam - faalkans leidingdeel D, zonder overgang in bovenbelasting



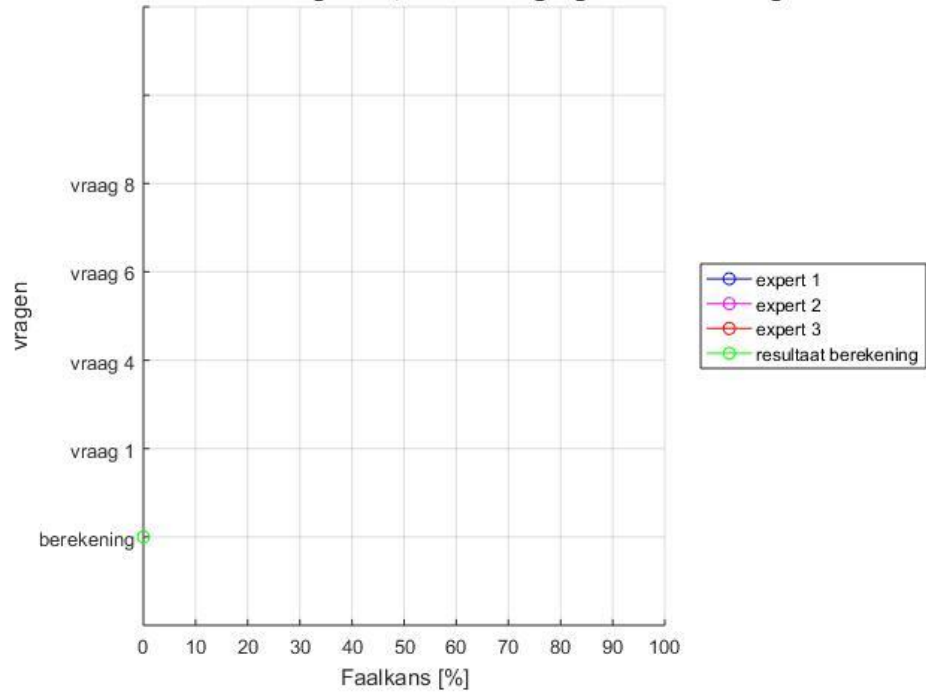
Rotterdam - faalkans leidingdeel E, zonder overgang in bovenbelasting



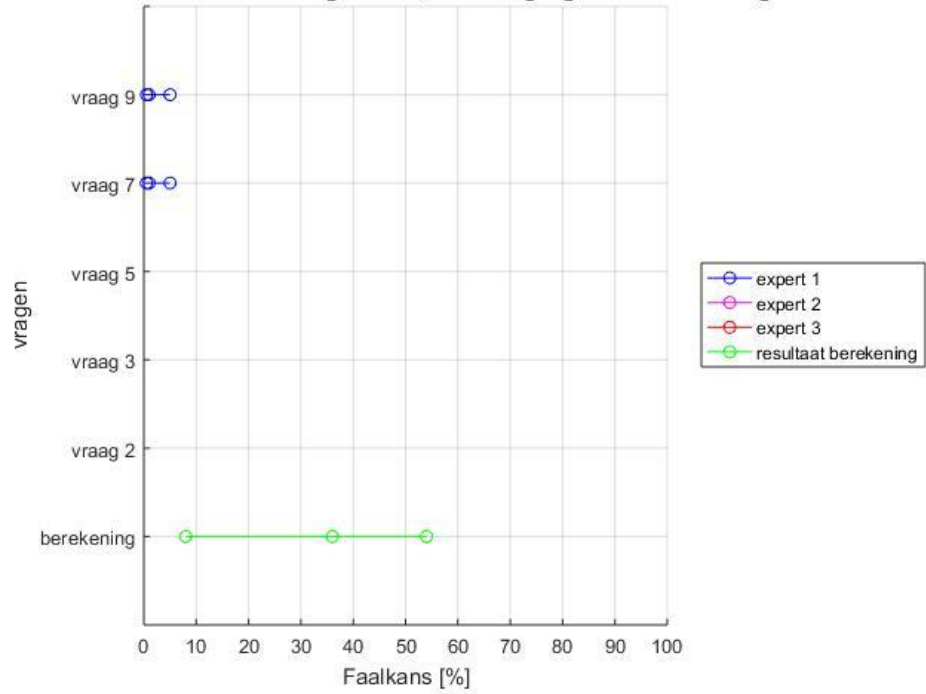
Rotterdam - faalkans leidingdeel F, zonder overgang in bovenbelasting

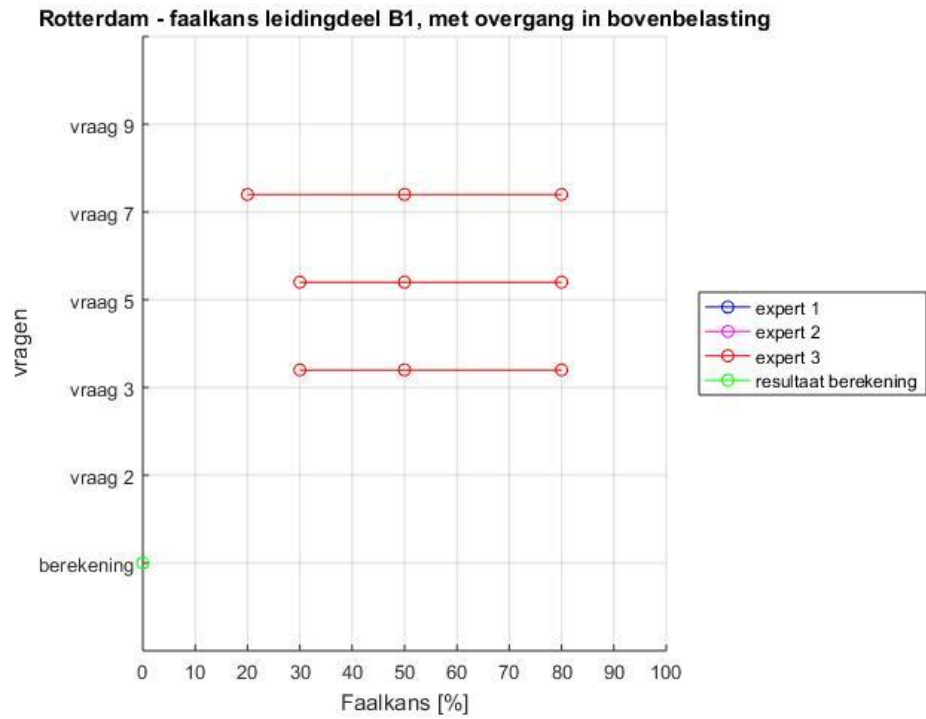
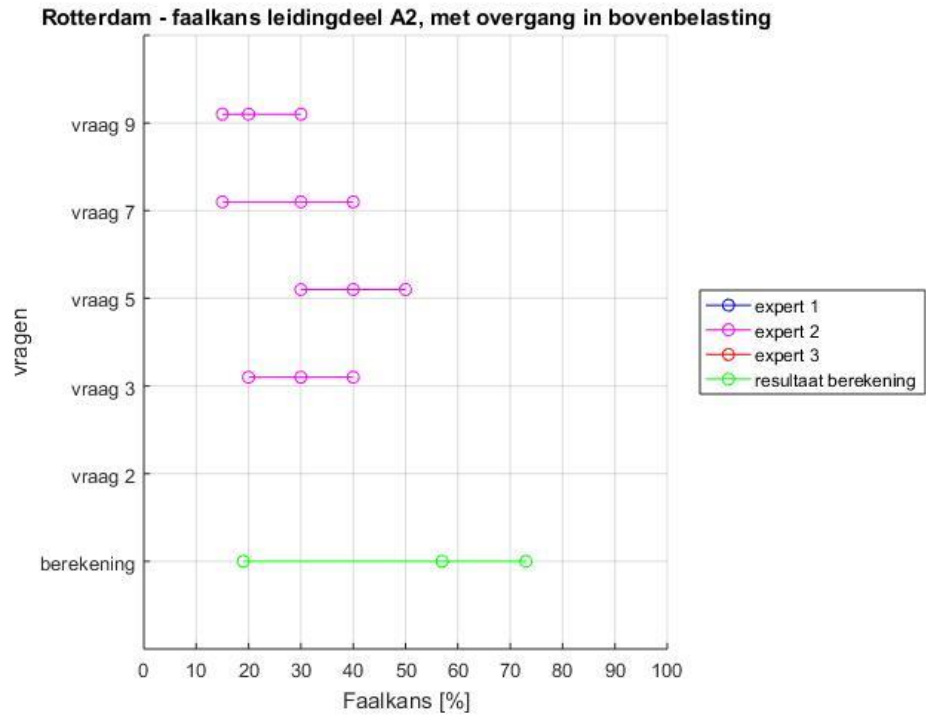


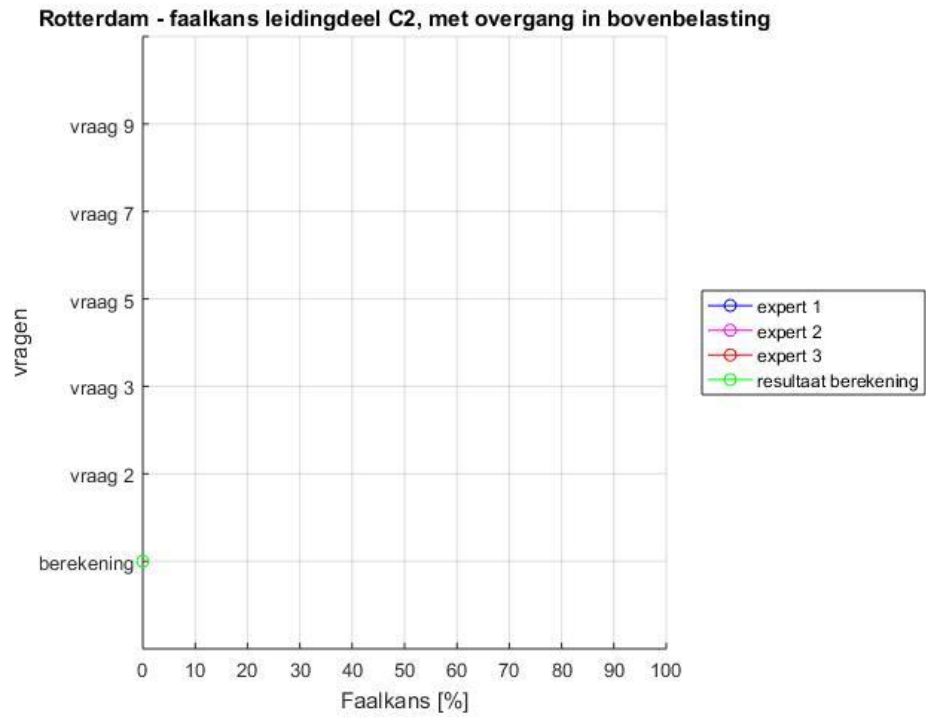
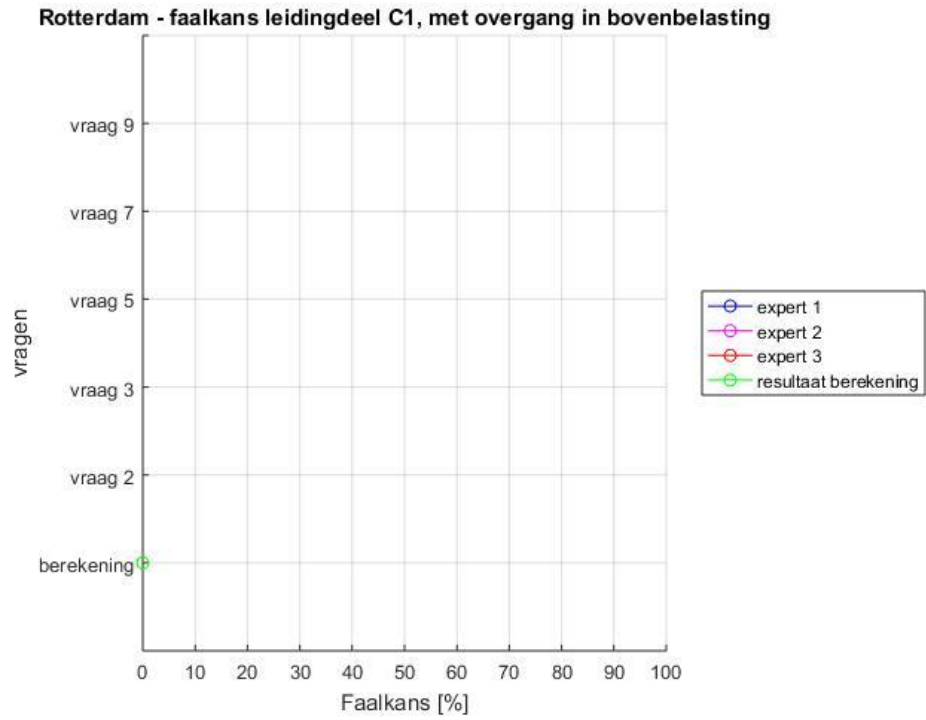
Rotterdam - faalkans leidingdeel G, zonder overgang in bovenbelasting



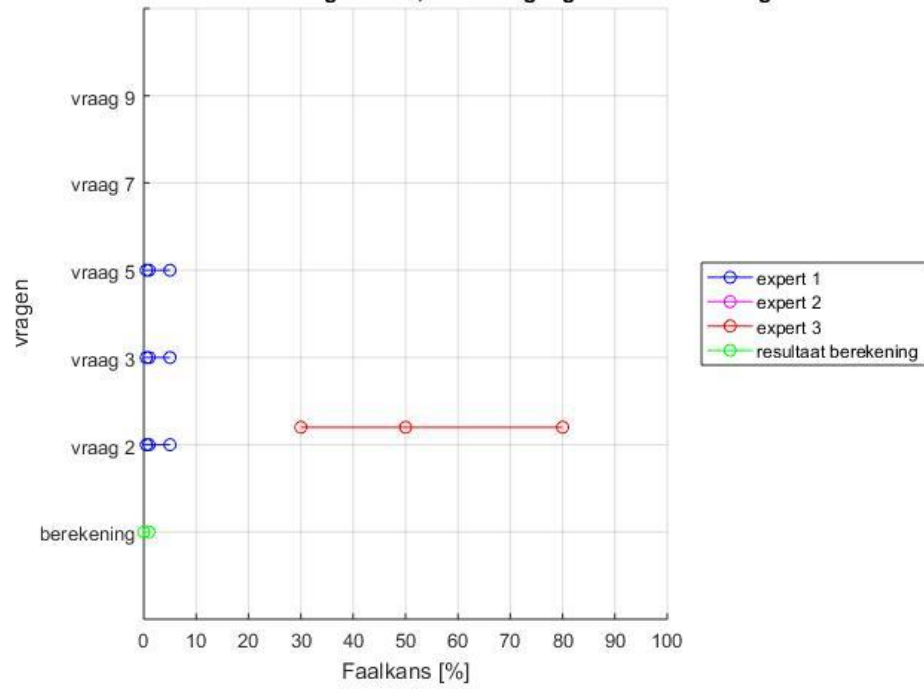
Rotterdam - faalkans leidingdeel A1, met overgang in bovenbelasting



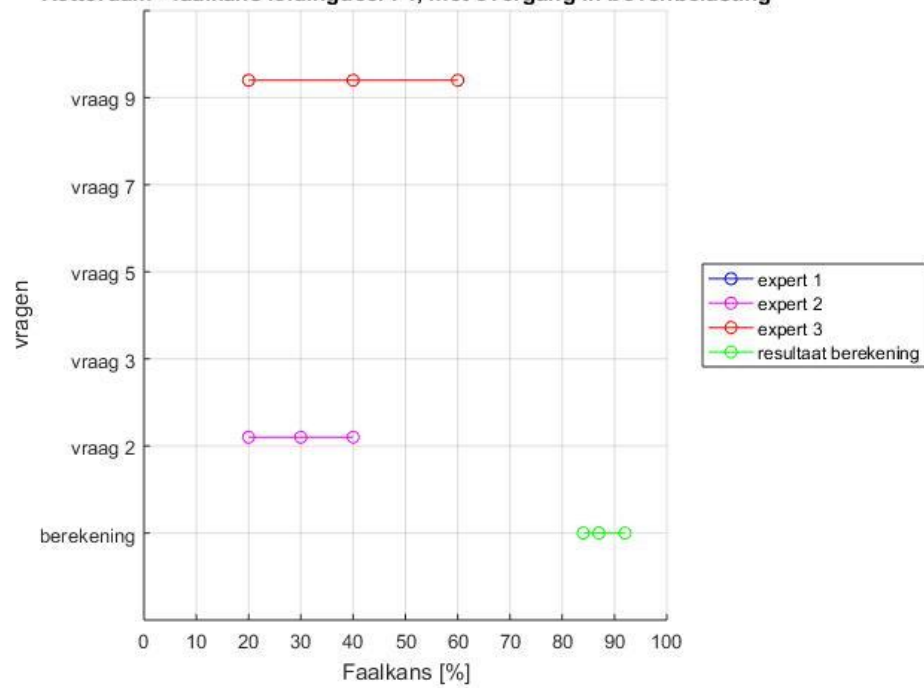


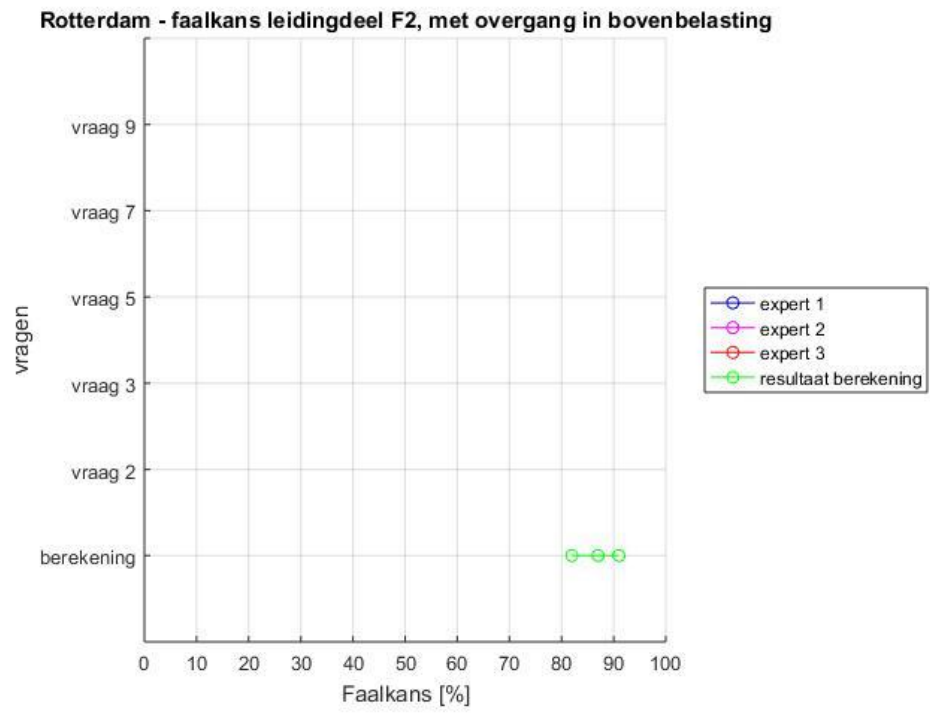


Rotterdam - faalkans leidingdeel D1, met overgang in bovenbelasting



Rotterdam - faalkans leidingdeel F1, met overgang in bovenbelasting





D Proof of Principle workshop 6 maart 2019

Op 6 maart 2019 is een tweede workshop gehouden waarbij de case Ducaton, Mijdrecht is behandeld. In deze bijlage worden de resultaten gepresenteerd van de ingevulde vragenlijsten door de deelnemers.

Allereerst is de vragenlijst zelf in deze bijlage opgenomen. Daarna volgen figuren waaruit op te maken is:

- hoe de orde grootte van de ingeschatte faalkansen zich verhouden tot de berekende faalkansen,
- hoe de orde grootte van de ingeschatte bandbreedtes op de faalkansen zich verhouden tot de berekende bandbreedtes,
- hoe deelnemers van “mening veranderen”/”inschattingen bijstellen” naarmate meer info beschikbaar komt,
- hoe groot de variaties zijn in de meningen van de deelnemers onderling

De figuren worden gemaakt per leiding deel, c.q. specifieke locatie en bevatten op de horizontale as de ingeschatte waarden voor de faalkansen en bandbreedtes hierop. Op de verticale as staat de herkomst van de waarden: hetzij de berekeningen, hetzij van een van de experts ten tijde van een van de vragen.

Aan
deelnemers workshop

Van

Onderwerp
Valorisatie project 'Proof of principle faalkansmodel persleidingen'

Inleiding

Graag maken we van de workshop waar u vandaag aan deelneemt gebruik om de resultaten van het project 'Proof of Principle faalkansmodel voor persleidingen' te valoriseren. Onderstaande vragen helpen ons bij het valoriseren van de projectresultaten, ten aanzien van de waarde van de voorgestelde aanpak ten opzichte van huidige aanpak.

Toelichting

In onderstaande vragen wordt gebruik gemaakt van termen en begrippen welke hieronder zijn toegelicht:

ondergrens	waarde waarvan u vermoedt dat het onwaarschijnlijk is dat het resultaat onder deze waarde ligt
verwachtingswaarde	(gewogen) gemiddelde, waarde waarvan u vermoedt dat dit het meest waarschijnlijk resultaat is
bovengrens	waarde waarvan u vermoedt dat het onwaarschijnlijk is dat het resultaat boven deze waarde ligt

Case Ducaton

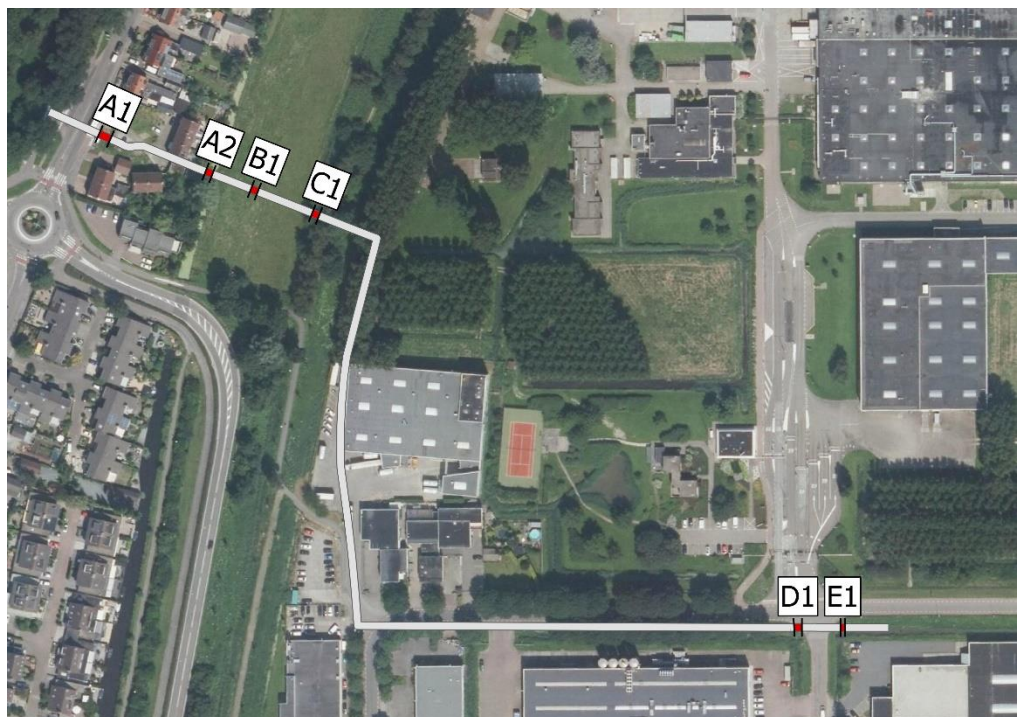
Informatie



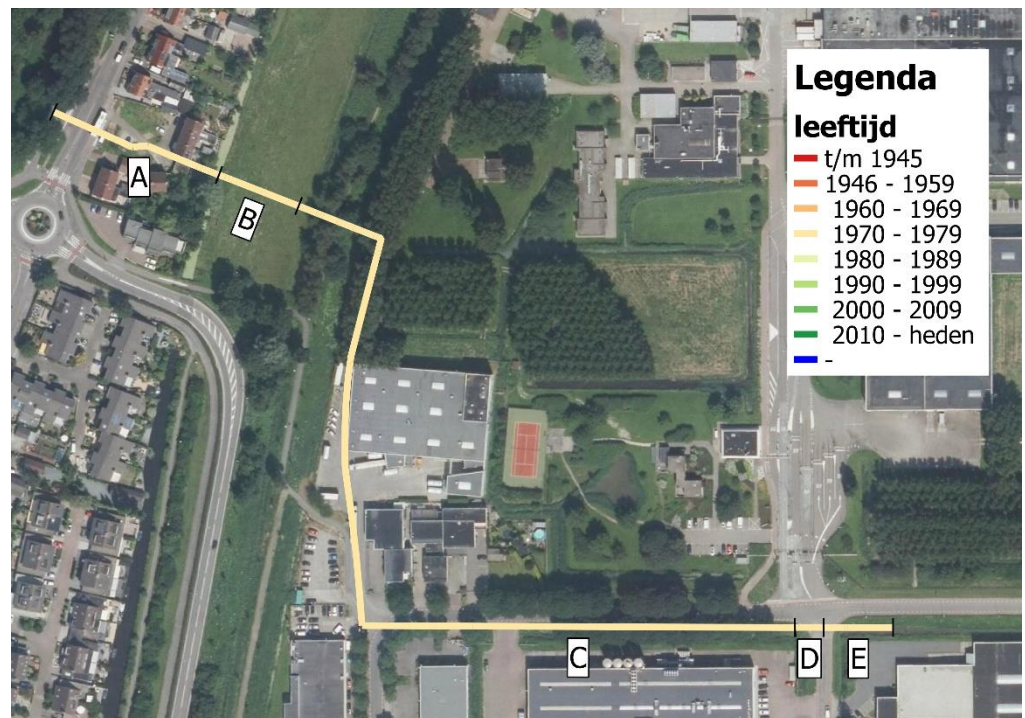
Figuur 10.2 – beschouwde persleidingtracés case Ducaton



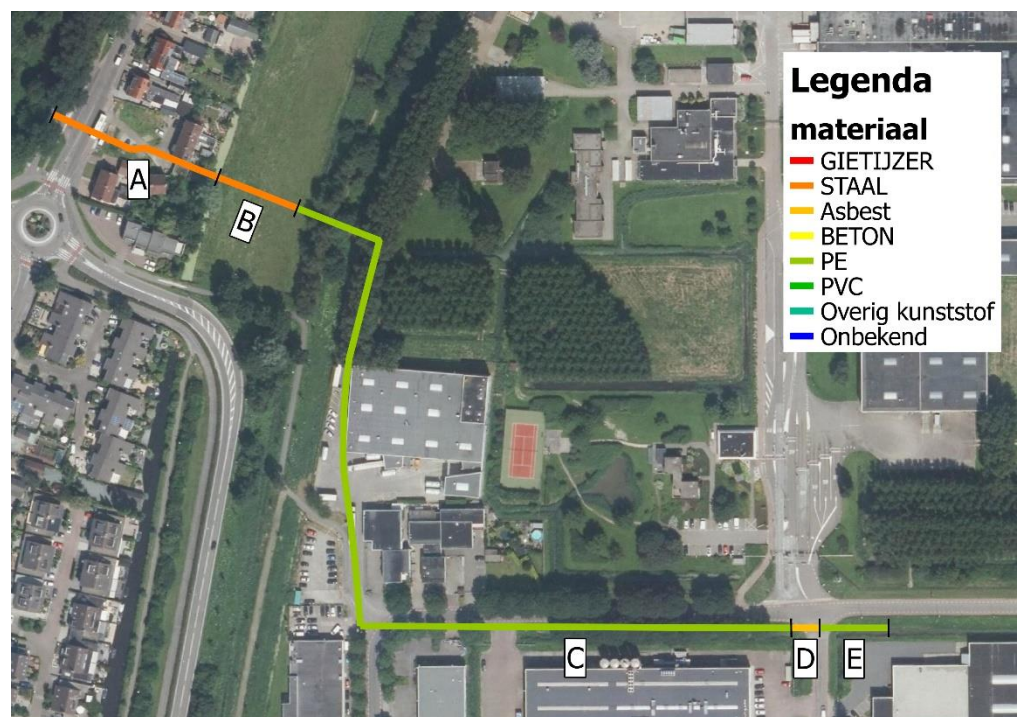
Figuur 2 - indeling leidingdelen A t/m E



Figuur 3 – Specifieke leidinglocaties A1 t/m E1



Figuur 4 – aanlegjaren persleiding Ducaton inclusief indeling leidingdelen



Figuur 5 – materialen persleiding Ducaton inclusief indeling leidingdelen

Tabel 17 - Totale informatie leidingdelen stap 1

Leiding-deel	Materiaal	Jaar van aanleg	Diameter (inwendig) [mm]	Wanddikte [mm]
A	Staal	1979	350	8
B	Staal	1979	350	8
C	PE	1979	303	20,7
D	Asbest-cement	1979	450	25
E	PE	1979	303	20,7

Vraag 1:

Gegeven (Tabel 1):

- de leeftijd van de leidingen
- het materiaal van de leidingen
- diameter en wanddikte van de leidingen

In welk leidingdeel verwacht u de hoogste faalkans ten gevolge van:

- wanddikteafname en/of;
- zettingsverschillen

A – B – C – D – E

Geef uw inschatting van de faalkans in het jaar 2021 van dit leidingdeel.

Ondergrens [%]	Verwachtingswaarde [%]	Bovengrens [%]

Vraag 2:

Gegeven (Tabel 1):

- de leeftijd van de leidingen
- het materiaal van de leidingen
- diameter en wanddikte van de leidingen

In welk leidingdeel verwacht u de hoogste faalkans ten gevolge van:

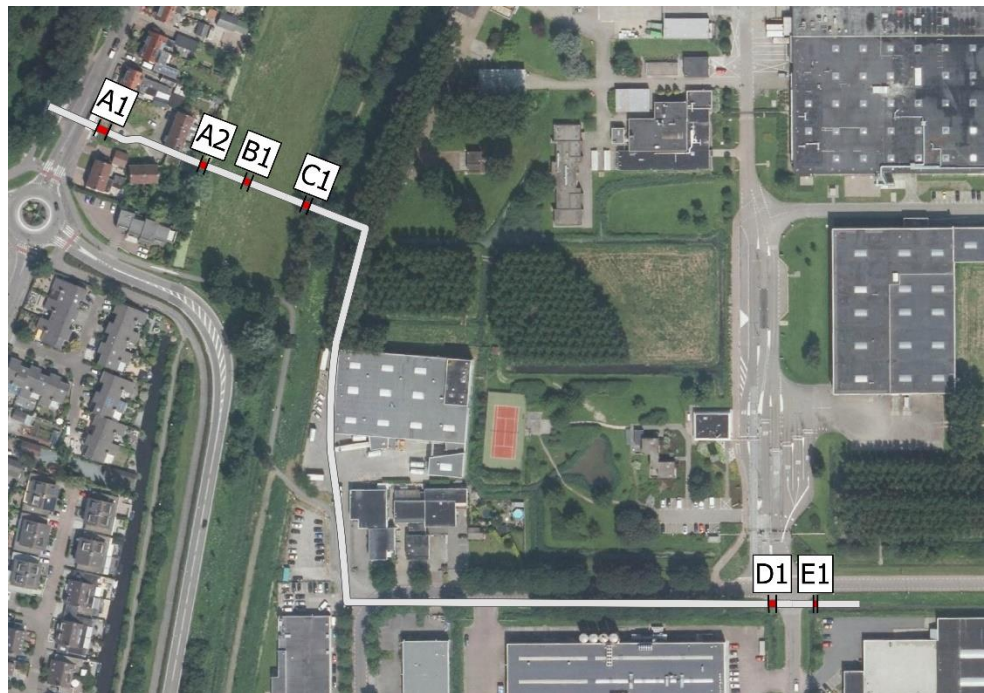
- wanddikteafname en/of;
- zettingsverschillen

A1 – A2 – B1 – C1 – D1 – E1

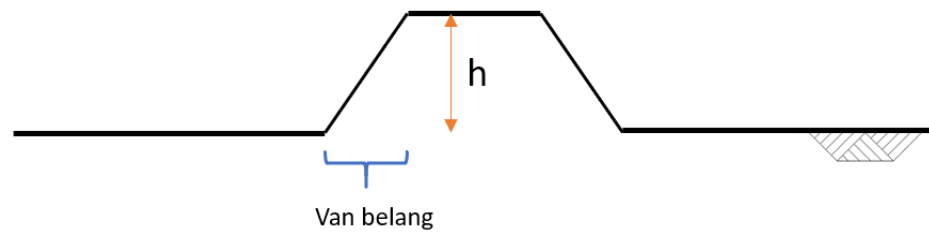
Geef uw inschatting van de faalkans in het jaar 2021 van dit leidingdeel.

Ondergrens [%]	Verwachtingswaarde [%]	Bovengrens [%]

Aanvullende informatie 1 – overgang in bovenbelasting



Figuur 6 – kaart van overgang in bovenbelasting (talud) incl opdeling leidingdelen



Figuur 7 – Voorbeeld situatieschets overgang in bovenbelasting (talud)

Tabel 2 – Extra informatie leidingdelen A1 – E1 stap 2

Leidingdeel	Hoogte talud [m]
A1	1,75
A2	1,0
B1	1,0
C1	1,0
D1	1,5
E1	1,0

Vraag 3:

Gegeven (Tabel 1 en Tabel 2):

- de leeftijd van de leidingen
- het materiaal van de leidingen
- diameter en wanddikte van de leidingen
- aanwezigheid van overgang in bovenbelasting

In welk leidingdeel verwacht u de hoogste faalkans ten gevolge van:

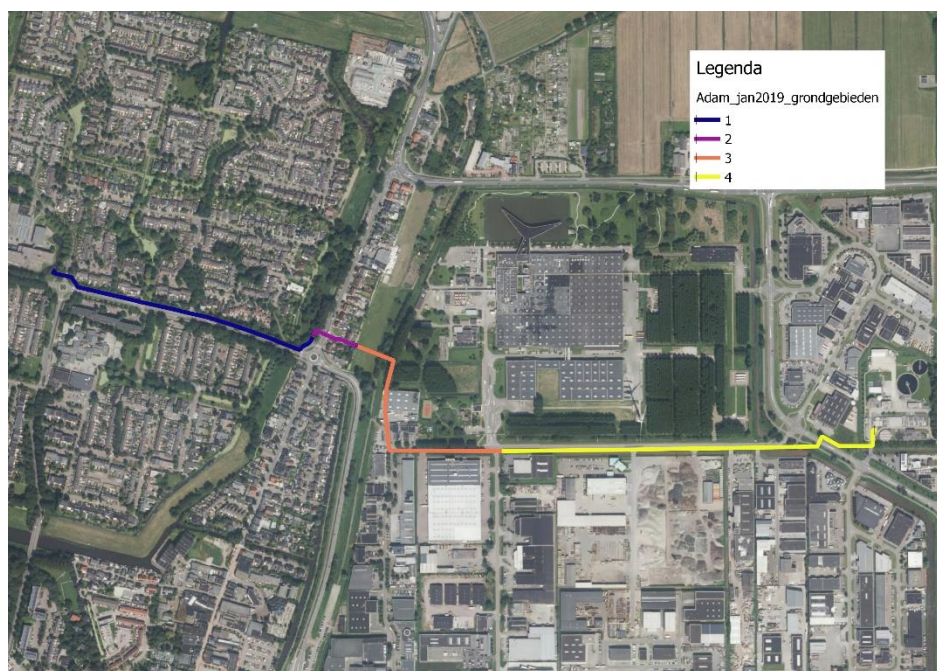
- wanddikteafname en/of;
- zettingsverschillen

A1 – A2 – B1 – C1 – D1 – E1

Geef uw inschatting van de faalkans in het jaar 2021 van dit leidingdeel.

Ondergrens [%]	Verwachtingswaarde [%]	Bovengrens [%]

Aanvullende informatie 2 – grondgebied



Figuur 8 – geïdentificeerde grondgebieden langs persleiding Ducaton:
 grondgebied 2 = zeer zettingsgevoelig
 grondgebied 3 = zettingsgevoelig

Tabel 3 – Totale informatie leidingdelen stap 3

Leiding-deel	Materiaal	Jaar van aanleg	Diameter (inwendig) [mm]	Wanddikte [mm]	Grondsoort
A	Staal	1979	350	8	Zeer zettingsgevoelig
B	Staal	1979	350	8	Zettingsgevoelig
C	PE	1979	303	20,7	Zettingsgevoelig
D	Asbest-cement	1979	450	25	Zettingsgevoelig
E	PE	1979	303	20,7	Zettingsgevoelig

Vraag 4:

Gegeven (Tabel 3):

- de leeftijd van de leidingen
- het materiaal van de leidingen
- diameter en wanddikte van de leidingen
- het grondgebied

In welk leidingdeel verwacht u de hoogste faalkans ten gevolge van:

- wanddikteafname en/of;
- zettingsverschillen

A – B – C – D – E

Geef uw inschatting van de faalkans in het jaar 2021 van dit leidingdeel.

Ondergrens [%]	Verwachtingswaarde [%]	Bovengrens [%]

Vraag 5:

Gegeven (Tabel 2 en Tabel 3):

- de leeftijd van de leidingen
- het materiaal van de leidingen
- diameter en wanddikte van de leidingen
- overgang in de bovenbelasting
- het grondgebied

In welk leidingdeel verwacht u de hoogste faalkans ten gevolge van:

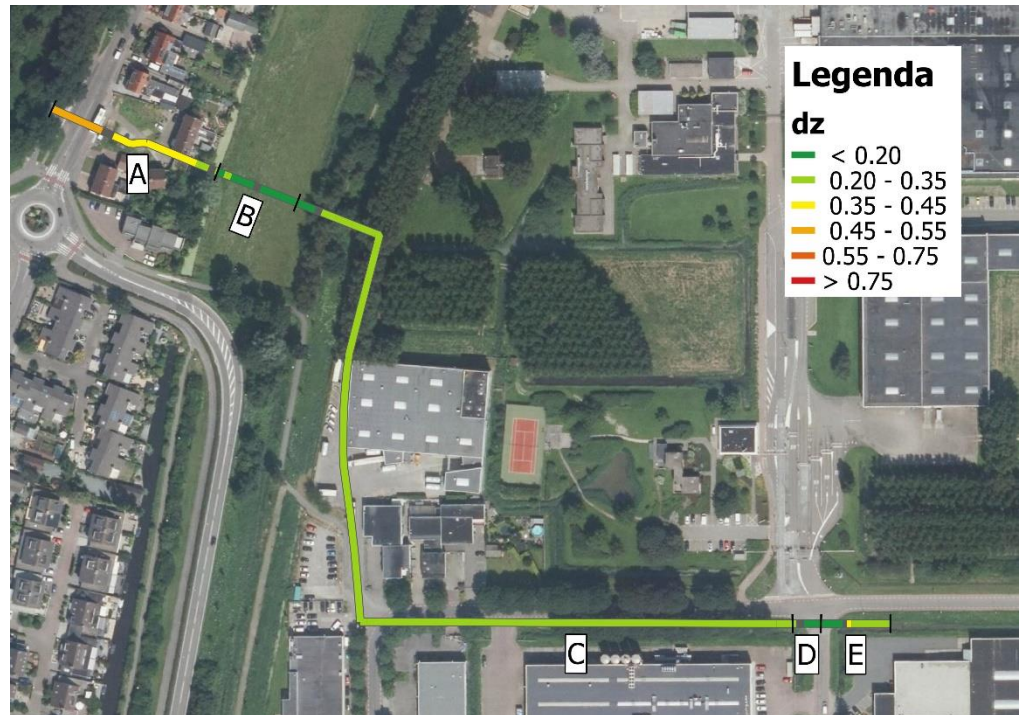
- wanddikteafname en/of;
- zettingsverschillen

A1 – A2 – B1 – C1 – D1 – E1

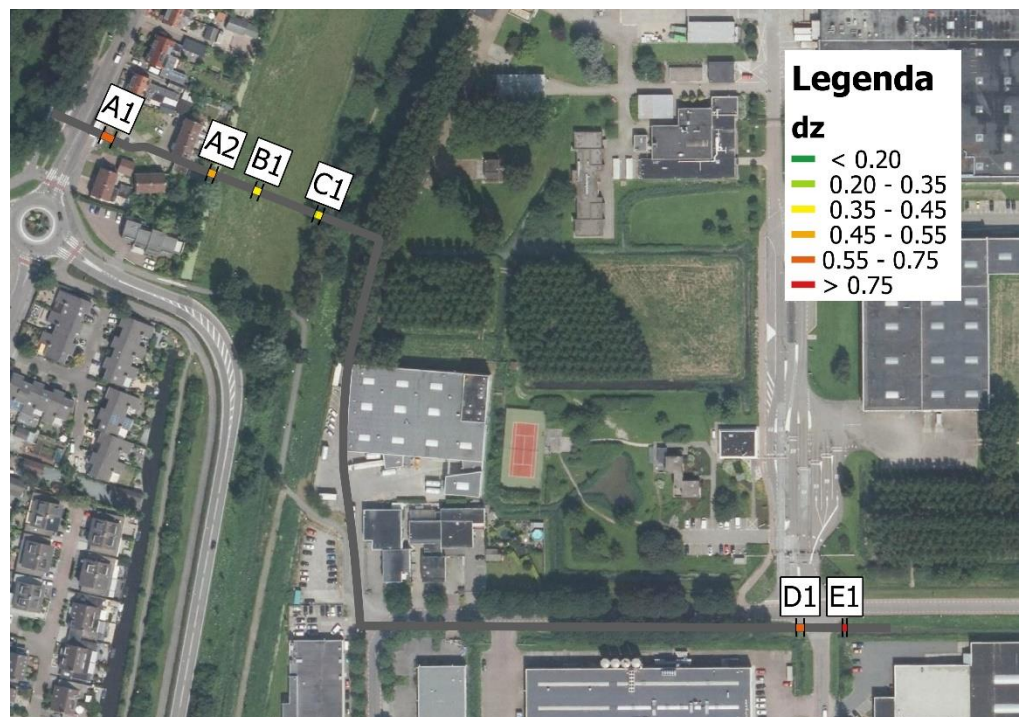
Geef uw inschatting van de faalkans in het jaar 2021 van dit leidingdeel.

Ondergrens [%]	Verwachtingswaarde [%]	Bovengrens [%]

Aanvullende informatie 3 – zettingen



Figuur 10 - Zettingsverschillen ondervonden in 2021 door persleiding Ducaton voor leidingdelen A-E. Zettingsverschillen vinden plaats over een afstand van 8,8 m.



Figuur 11 - Zettingsverschillen ondervonden in 2021 door persleiding Ducaton voor leidingdelen A1 – E1. Zettingsverschillen vinden plaats over een afstand van 6,5 of 8,8 m (Tabel 5).

Tabel 4 – Totale informatie leidingdelen stap 4

Leiding-deel	Materiaal	Jaar van aanleg	Diameter (inwendig) [mm]	Wanddikte [mm]	Grond-soort	Maximale zetting (verschil) [m] (dL = 8,8 m)
A	Staal	1979	350	8	Zeer zettings-gevoelig	0,45 – 0,55
B	Staal	1979	350	8	Zettings-gevoelig	0,20 – 0,35
C	PE	1979	303	20,7	Zettings-gevoelig	0,20 – 0,35
D	Asbest-cement	1979	450	25	Zettings-gevoelig	0,20 – 0,35
E	PE	1979	303	20,7	Zettings-gevoelig	0,35 – 0,45

Tabel 5 – Extra informatie leidingdelen A1 – E1 stap 4

Leidingdeel	Hoogte talud [m]	Zetting [m]	dL [m]
A1	1,75	0,55 – 0,75	6,5
A2	1,0	0,45 – 0,55	6,5
B1	1,0	0,35 – 0,45	8,8
C1	1,0	0,35 – 0,45	8,8
D1	1,5	0,55 – 0,75	8,8
E1	1,0	> 0,75	6,5

Vraag 6:

Gegeven (Tabel 4):

- de leeftijd van de leidingen
- het materiaal van de leidingen
- diameter en wanddikte van de leidingen
- grondgebied
- zettingsverschillen

In welk leidingdeel verwacht u de hoogste faalkans ten gevolge van:

- wanddikteafname en/of;
- zettingsverschillen ten gevolge van grondovergangen, gegeven dat het zettingsverschil in Figuur 10 (en Tabel 4) zich voordoet.

A – B – C – D – E

Geef uw inschatting van de faalkans in het jaar 2021 van dit leidingdeel.

Ondergrens [%]	Verwachtingswaarde [%]	Bovengrens [%]

Vraag 7:

Gegeven (Tabel 4 en Tabel 5):

- de leeftijd van de leidingen
- het materiaal van de leidingen
- diameter en wanddikte van de leidingen
- overgang in de bovenbelasting
- grondgebied
- zettingsverschillen

In welk leidingdeel verwacht u de hoogste faalkans ten gevolge van:

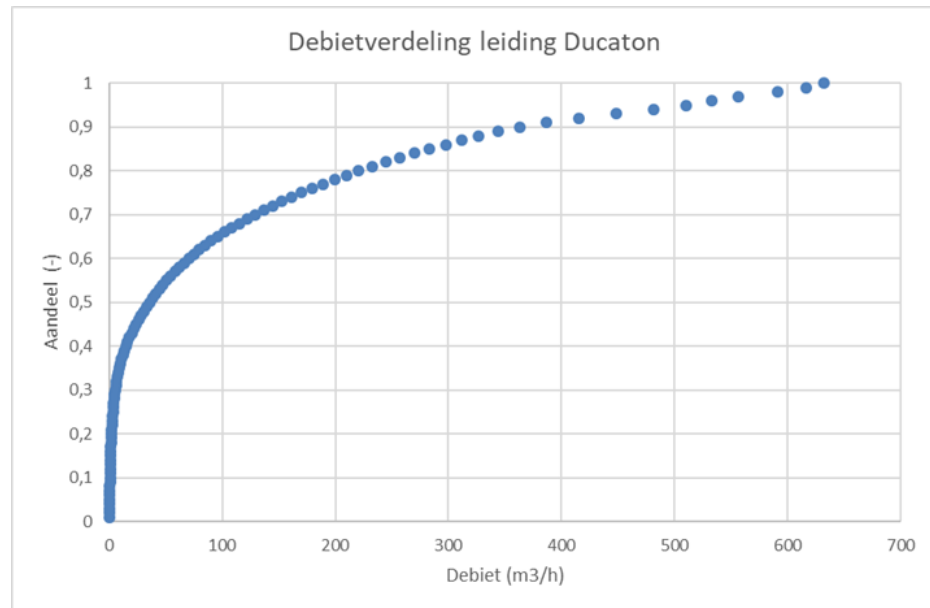
- wanddikteafname en/of;
- zettingsverschillen ten gevolge van overgang in bovenbelasting (uit Figuur 11 en Tabel 5)

A1 – A2 – B1 – C1 – D1 – E1

Geef uw inschatting van de faalkans in het jaar 2021 van dit leidingdeel.

Ondergrens [%]	Verwachtingswaarde [%]	Bovengrens [%]

Aanvullende informatie 4 – debieten



Figuur 12 – cumulatieve verdelingsfunctie van de debieten in persleiding Ducaton

Tabel 6 – Totale informatie leidingdelen stap 5

Leiding-deel	Materiaal	Jaar van aanleg	Diameter (inwendig) [mm]	Wanddikte [mm]	Grondsoort	Maximale zetting (verschil) [m] (dL = 8,8 m)	Debiet
A	Staal	1979	350	8	Zeer zettingsgevoelig	0,45 – 0,55	Figuur 12
B	Staal	1979	350	8	Zettingsgevoelig	0,20 – 0,35	Figuur 12
C	PE	1979	303	20,7	Zettingsgevoelig	0,20 – 0,35	Figuur 12
D	Asbest-cement	1979	450	25	Zettingsgevoelig	0,20 – 0,35	Figuur 12
E	PE	1979	303	20,7	Zettingsgevoelig	0,35 – 0,45	Figuur 12

Vraag 8:

Gegeven (Tabel 6):

- de leeftijd van de leidingen
- het materiaal van de leidingen
- diameter en wanddikte van de leidingen
- grondgebied
- zettingsverschillen
- verdeling debieten

In welk leidingdeel verwacht u de hoogste faalkans ten gevolge van:

- wanddikteafname en/of;
- zettingsverschillen ten gevolge van grondovergangen, gegeven dat het zettingsverschil in Figuur 10 (en Tabel 6) zich voordoet.

A – B – C – D – E

Geef uw inschatting van de faalkans in het jaar 2021 van dit leidingdeel.

Ondergrens [%]	Verwachtingswaarde [%]	Bovengrens [%]

Vraag 9:

Gegeven (Tabel 5 en Tabel 6):

- de leeftijd van de leidingen
- het materiaal van de leidingen
- diameter en wanddikte van de leidingen
- overgang in de bovenbelasting
- grondgebied
- zettingsverschillen
- verdeling debieten

In welk leidingdeel verwacht u de hoogste faalkans ten gevolge van:

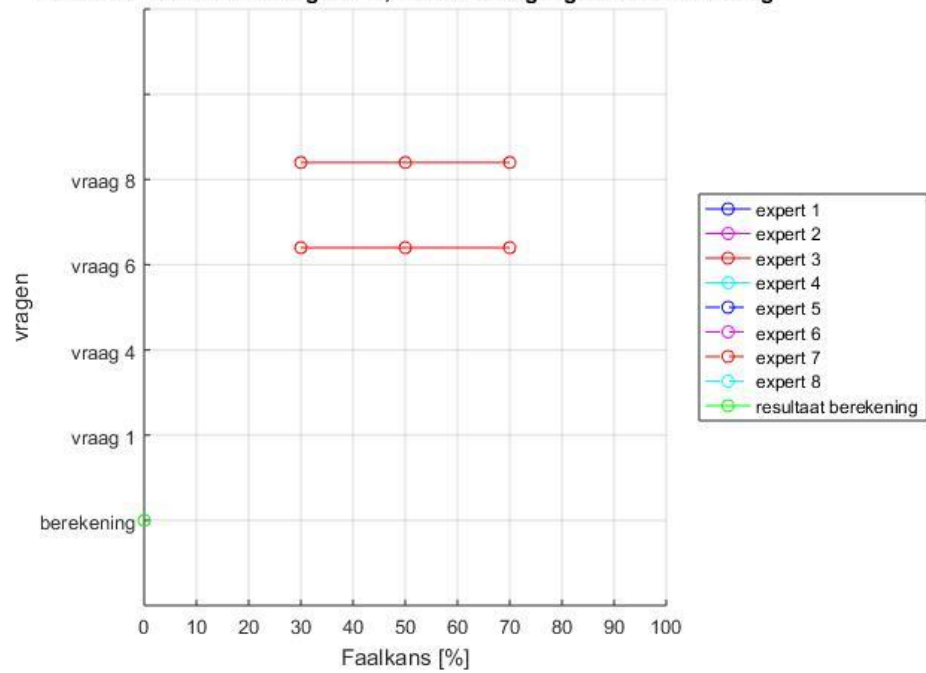
- wanddikteafname en/of;
- zettingsverschillen ten gevolge van overgang in bovenbelasting (uit Figuur 11 en Tabel 5).

A1 – A2 – B1 – C1 – D1 – E1

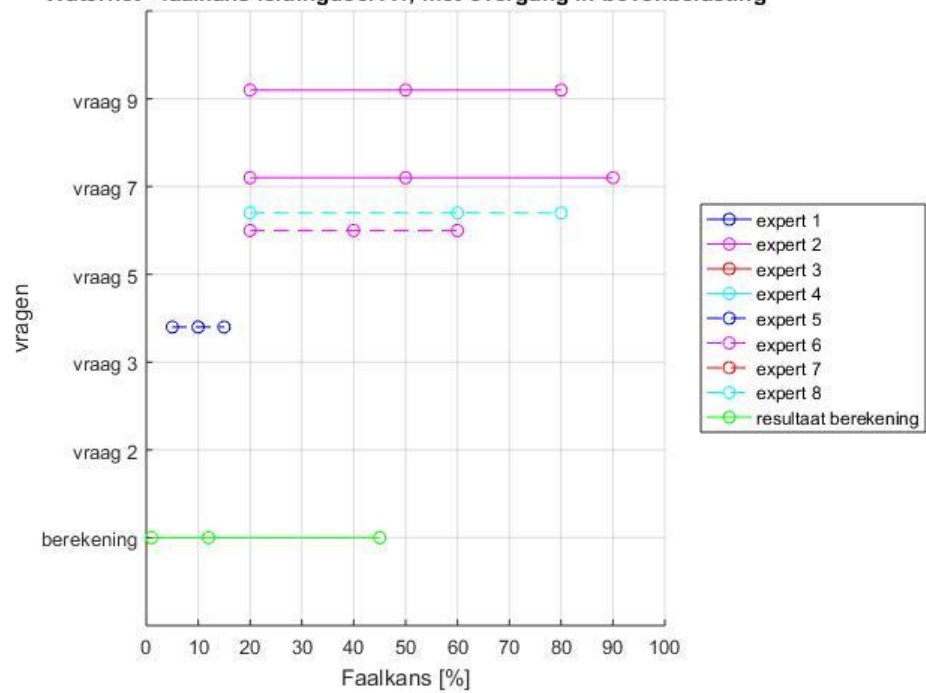
Geef uw inschatting van de faalkans in het jaar 2021 van dit leidingdeel.

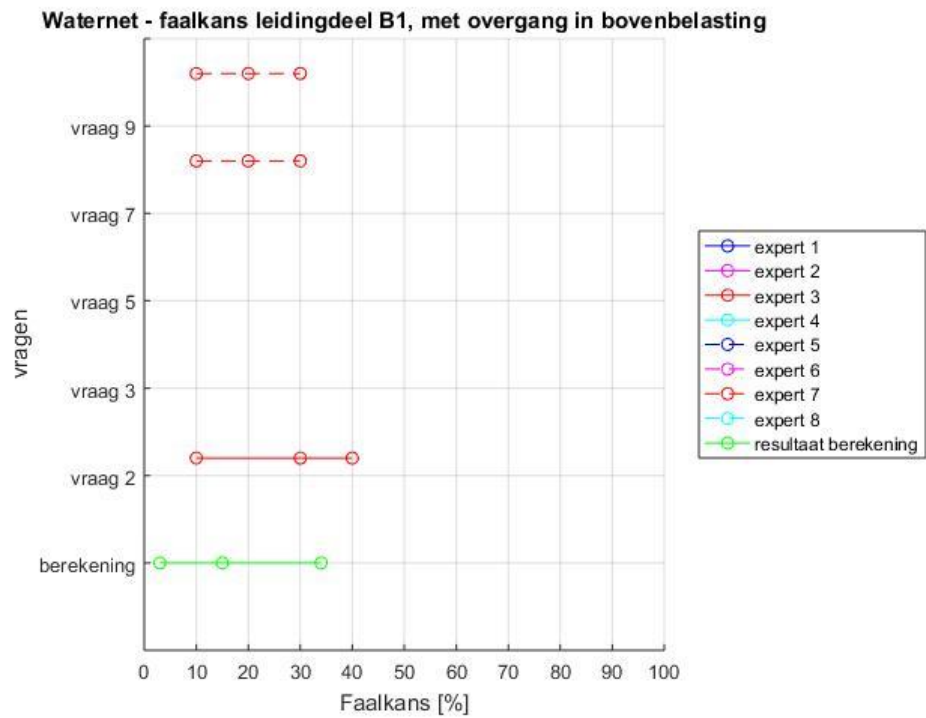
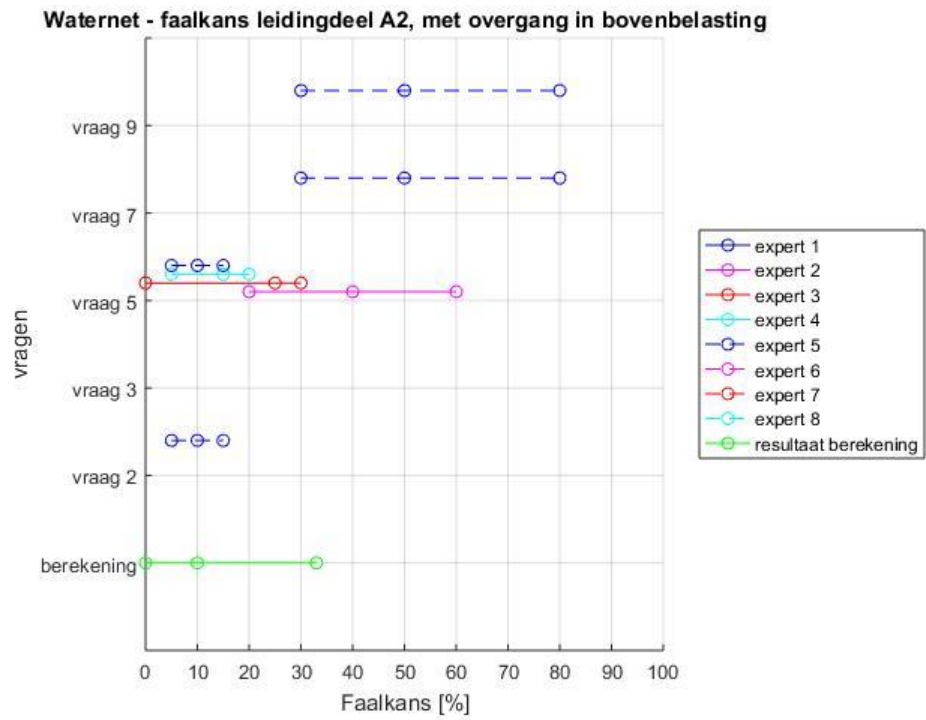
Ondergrens [%]	Verwachtingswaarde [%]	Bovengrens [%]

Waternet - faalkans leidingdeel E, zonder overgang in bovenbelasting



Waternet - faalkans leidingdeel A1, met overgang in bovenbelasting





E Programma van eisen

Versie 21 november 2016

Scope en afbakening

Het faalkansmodel (FKM) geeft informatie over betrouwbaarheid en restlevensduur van persleidingsegmenten en -netwerken onder invloed van degradatie en aantasting, in combinatie met belastingen van binnenuit en van buitenaf. Het mogelijk optreden van schade veroorzaakt door graafwerkzaamheden en onjuiste bediening valt buiten de scope.

Eisencategorie 0: Algemeen

0.1 Het FKM is toekomstbestendig m.b.t veranderingen in het netwerk, modellen en meet- en inspectietechnieken.

Eisencategorie 1: Gebruikers – Voor wie en waartoe?

1.1 *Waartoe* - Het FKM levert ondersteunende informatie voor inspectie-, onderhouds- en vervangingsbeslissingen, in het bijzonder gericht op veilige inspectie- en vervangingstermijnen en verwachte restlevensduur van leiding(segment)en.

1.2 *Functies/Rollen* - Het model ondersteunt met die informatie de technische beheerder en de budgetverantwoordelijke voor deze beslissingen.

1.3 *Organisaties* - Het FKM is onafhankelijk van de organisatie en de gevolgde processen. Daardoor kunnen in principe alle beheerders gebruik maken van het model.

1.4 Het FKM is onafhankelijk van de gevolgde processen in een organisatie en daardoor bestendig tegen veranderingen van deze processen

Eisencategorie 2: Implementatie – Hoe is de tool benaderbaar?

2.1 Het FKM is compatibel met de tools en systemen die nu al gebruikt worden door de verschillende beheerorganisaties.

2.2 De gebruiker heeft rechtstreeks toegang tot de data van enkel de eigen netwerken.

2.3 Kennisontwikkeling op basis van de meet-, inspectie- en incidentgegevens van gebruikers wordt verdisconteerd in het FKM voor alle gebruikers.

Eisencategorie 3: Assets – Waar gaat het FKM over?

3.1 Het FKM is gebaseerd op een relevante decompositie van het netwerk. De decompositie bestaat uit de relevante³;

- 1) leiding segmenten, nader te bepalen uit o.a consequentie van falen
- 2) onderdelen, uit interviews volgt; leidingen, afsluiters, ontluchters, mangaten,

3.2 In het FKM worden de volgende leidingmaterialen meegenomen en de relevante sub-materialen; beton, asbestcement, PVC, coatings,..

Eisencategorie 4: Content – Waar is het FKM op gebaseerd?

³ Nader uitwerken

- 4.1 Het FKM is gebaseerd op state-of-the-art degradatiemodellen van de relevante materialen onder in persleidingen toepasselijke condities.
- 4.2 De resultaten van het FKM worden voortdurend op de eigen meetgegevens, inspecties en incidentanalyses, van de participerende organisatie gekalibreerd.
- 4.3 De modellen van het FKM worden periodiek gekalibreerd met behulp van de meetgegevens, inspecties en calamiteitanalyses van alle participerende beheerders.
- 4.4 Het FKM maakt gebruik van gegevens over de grondsamenstelling bij de leiding.
- 4.5 Hydraulische gegevens worden benut.
- 4.6 Informatie over (gemiddelde) belastingen uit de omgeving, zoals grond- en verkeersbelastingen, wordt gebruikt.
- 4.7 Invoer van de gebruiker met betrekking tot kwaliteit en onderhoudstoestand wordt gebruikt.
- 4.8 Een efficiënte koppeling met bestaande modellen en informatie wordt gezocht.

Eisencategorie 5: Output – Welke informatie wordt verstrekt en hoe?

- 5.1 Basis voor de output is decompositie van het netwerk in relevante elementen/segmenten.
- 5.2 Per segment/element wordt een lijst informatie beschikbaar gesteld die, samen met de faalkans, beslissingondersteunend is; Deze lijst volgt uit de door de beheerder gebruikte instrumenten en is een combinatie van basisgegevens en door het faalkansmodel geproduceerde output:
 - 1. basisgegevens: onderdelen in segment (ontluchters, leidingen e.d.), materiaal, aanlegjaar, etc.
 - 2. output FKM: dominant faalmechanisme, faalkans en onzekerheid
 - 3. gegevens over effect: consequentie van falen, etc.⁴

Ook wordt een inspectietermijn voorgesteld indien relevant.

- 5.3 Het is mogelijk het effect op de faalkansen van scenario's te testen.
- 5.4 Het FKM is zodanig interactief dat voor bepaalde grootheden zijn te parametriseren, bijvoorbeeld hydraulische drukken.
- 5.5 Het FKM houdt aansluiting bij gangbare methoden zoals het Beoordelingsmodel Persleidingen van Rioned.

Eisencategorie 6: Beheer – Hoe wordt het faalkansmodel verbeterd in de tijd?

- 6.1 Meetgegevens, inspecties en calamiteitanalyses van alle participerende beheerders worden periodiek verwerkt in het FKM, waardoor het verbeterd wordt.

⁴ Gegevens over het effect worden door de beheerder ingevoerd, bijvoorbeeld vanuit een bedrijfswaardematrix. Hier genoemd, omdat ook gegevens over effect nodig zijn voor asset managementbeslissing. De faalkans is slechts 1 kant van de medaille, maar wel de meest ingewikkelde.