

Filters voor
parallele gas-
en drinkwater-
leidingen in en
bij primaire
waterkeringen

**Vastgesteld door de
stuurgroep Project Overstijgende Verkenning
Kabels & Leidingen (POV K&L)
op donderdag 3 december 2020**

Peter Ouwendijk | Hoogheemraadschap van Delfland, *voorzitter*

Jos Teeuwen | Waterschap Limburg

Marjo van Maurik - de Graaff | Waterschap Hollandse Delta

Hennie Roorda | Waterschap Rivierenland

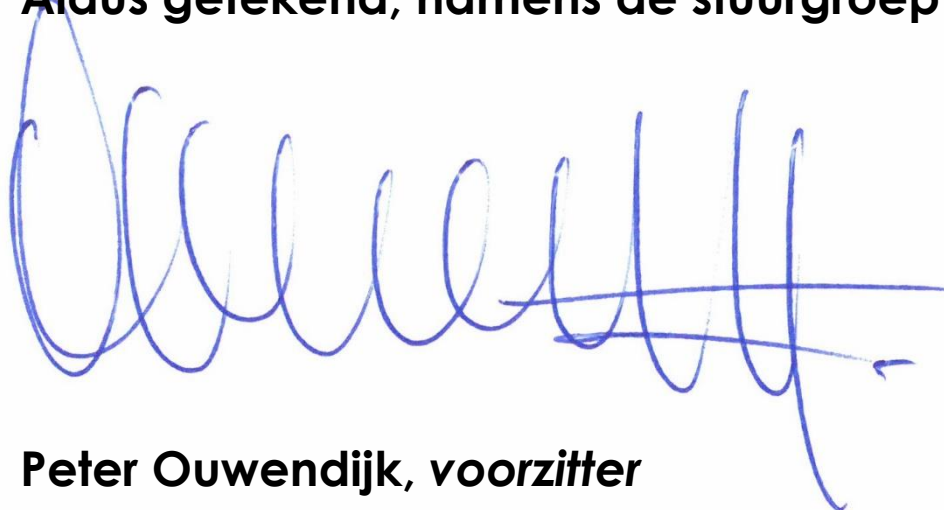
Adri Bom-Lemstra | Provincie Zuid-Holland, *namens IPO*

Ria Doedel | PWN

Han Slootweg | Platform Netbeheerders

Erik Wagener | Hoogwaterbeschermingsprogramma, *agendalid*

Aldus getekend, namens de stuurgroep POV K&L,

A handwritten signature in blue ink, consisting of a series of loops and a long horizontal stroke at the end.

Peter Ouwendijk, voorzitter

Voorwoord

Voor u ligt het rapport *Filters voor parallelle gas- en drinkwaterleidingen in en bij primaire waterkeringen*.

In het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) werken Rijkswaterstaat en de waterschappen samen aan veilige waterkeringen. In 2050 moeten alle primaire waterkeringen voldoen aan de nieuwe normering voor de waterveiligheid. Deze normering geldt vanaf 1 januari 2017. De ervaring leert dat kabels en leidingen hoog scoren als het gaat om risico op vertraging en aanvullende kosten. Binnen het HWBP is de Project Overstijgende Verkenning Kabels & Leidingen (POV K&L) in 2017 gestart met als belangrijkste doel om de risico's te minimaliseren.

Kernboodschap POV K&L

Verbinden van de werelden van waterkeringbeheerders en netbeheerders om samen kabels & leidingen zorgvuldig, toekomstbestendig en veilig in te passen in waterkeringen en bij dijkversterkingen tegen de laagste maatschappelijke kosten.

Kabels en leidingen hebben effect op de veiligheid van een waterkering. Het beoordelen van de veiligheid van een waterkering met kabels en leidingen vraagt dan ook om een integrale aanpak waarbij we zowel het gedrag van de kabels en leidingen als die van de waterkering beschouwen en de onderlinge beïnvloeding hiervan. Dat betekent dat inzicht nodig is in faalkansen van (met name) de leiding en het effect hiervan op de waterkering, in het bijzonder op de dijkfaalmechanismen en op de kans dat falen van een leiding leidt tot overstroming.

Het beoordelen of een waterkering met leiding voldoet aan de wettelijke eisen voor de overstromingskans is veelal complex en vergt veel inhoudelijke expertise en inzet. Voor een aantal leidingen blijkt dat deze niet altijd een substantiële bijdrage leveren aan de toelaatbare kans op overstroming. Het betreft hier met name parallel gelegen lagedruk gasdistributieleidingen en lagedruk drinkwaterleidingen. Voor deze categorie leidingen is een filtermethodiek uitgewerkt waarmee met een eenvoudige toets op basis van de ligging en de kenmerken van de leiding beoordeeld kan worden of een primaire waterkering met een daarin of daaraan gelegen parallelle lagedrukleiding aan de faalkanseis voldoet. Hiermee is een filter gecreëerd en is een nadere gedetailleerde analyse niet meer nodig. De resultaten zijn gebaseerd op een casus in het beheergebied van Waterschap Rivierenland in het boven- en benedenrivierengebied.

Disclaimer en doorontwikkeling

Met de opgeleverde filters kunnen primaire waterkeringen met de beschouwde parallelle leidingen op relatief eenvoudige wijze worden beoordeeld. In de uitgangspunten zijn conservatieve aannames gedaan. Dit betekent dat er meer marge aanwezig is voor de toepassing van de filters. Vanwege de beperkte looptijd van de casus is de hoeveelheid aan beschikbare dwarsprofielen ontoereikend gebleken om generieke filters af te leiden en minder conservatieve uitgangspunten te hanteren.

We adviseren om de filters enkel in het boven- en benedenrivierengebied onder deskundige begeleiding te gebruiken.

De inhoudelijke doorontwikkeling van filters voor parallelle lagedruk gasleidingen en meerdere soorten waterleidingen wordt ondergebracht bij De Innovatieversneller van het HWBP.

We zijn bijzonder trots op het resultaat wat er nu ligt. Dit was nooit gelukt zonder de bijdrage van alle betrokkenen. Hierbij willen we dan ook alle betrokkenen hartelijk bedanken voor de open houding, gedrevenheid en inzet om hier een succes van te maken!

Peter Ouwendijk,
voorzitter van de stuurgroep POV K&L

Filters voor parallelle gas- en drinkwaterleidingen in en bij primaire waterkeringen

POV Kabels en Leidingen



Filters voor parallelle gas- en drinkwaterleidingen in en bij primaire waterkeringen
POV Kabels en Leidingen

Auteur(s)

Geeralt van den Ham




Filters voor parallelle gas- en drinkwaterleidingen in en bij primaire waterkeringen

POV Kabels en Leidingen

Opdrachtgever	Hoogheemraadschap van Delfland
Contactpersoon	Harry Schelfhout
Trefwoorden	Parallele leidingen, primaire waterkering, filter, faalkans, waterveiligheid

Documentgegevens

Versie	1.2
Datum	3 december 2020
Projectnummer	11205513-002
Document ID	11205513-002-GEO-0004
Pagina's	41 + bijlagen
Status	definitief

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.1 (okt 2020)	Geeralt van den Ham	Henk Kruse	Harm Aantjes	
1.1 (nov 2020)	Geeralt van den Ham	Henk Kruse	Harm Aantjes	
1.2	Geeralt van den Ham 	Henk Kruse 	Harm Aantjes 	

Samenvatting

De POV Kabels en Leidingen (POV K&L) wordt uitgevoerd binnen het Hoogwater-beschermingsprogramma (HWBP) met het belangrijkste doel de risico's van kabels en leidingen bij de dijkbeoordeling of in dijkversterkingsprojecten te minimaliseren. De POV K&L bestaat uit meerdere referentieprojecten. De voorliggende studie betreft één van deze referentieprojecten. Het belangrijkste doel van dit project is het opstellen en nader uitwerken van een methodiek om zogenaamde filters vast te stellen, waarmee in het kader van een eenvoudige toets beoordeeld kan worden of een primaire waterkering met daarin of daaraan gelegen parallelle lagedrukleiding aan de wettelijke eisen voor de overstromingskans voldoet.

In en nabij de Nederlandse primaire waterkeringen zijn op sommige plaatsen leidingen aanwezig en zullen in de toekomst nog leidingen moeten worden aangelegd. Parallel gelegen leidingen in de veiligheidszone van de waterkering zijn in principe onwenselijk. Slechts in zeer uitzonderlijke gevallen mag daarvan worden afgeweken als daartoe dringende planologische redenen bestaan. De leidingen kunnen alleen worden toegestaan als de waterkering met de leiding aan de gestelde eis voor de overstromingskans voldoet.

Vanwege het grote aantal leidingen, vaak met lage druk en kleine diameters, is het gewenst om de leidingen die een verwaarloosbaar risico vormen voor het waterkerend vermogen van de dijken met een eenvoudige toets of filter goed te keuren. Waterkeringen met leidingen die niet met een eenvoudige toets kunnen worden goedgekeurd kunnen dan nader worden beschouwd.

De methode voor het bepalen van filters voor de parallelle lagedrukleidingen is opgezet op basis van integrale faalkansanalyses waar in eerder uitgevoerde POV K&L projecten ervaring mee is opgedaan. De toegepaste methodiek bestaat er op hoofdlijnen uit dat (geautomatiseerd) een groot aantal geïntegreerde faalkansanalyses van leidingfalen en dijkfalen is uitgevoerd voor een reeks leidingen en dijkdoorsneden. Deze integrale faalkansanalyses zijn uitgevoerd conform de methode beschreven in het Veiligheidsraamwerk K&L.

De hoofdconclusies met betrekking tot de ontwikkelde methodiek zijn dat het veiligheidsraamwerk als basis kan worden gebruikt om generieke faalpaden voor parallel gelegen leidingen af te leiden, die kwantitatief kunnen worden geanalyseerd door middel van een integrale faalkansanalyse. Voor specifieke leidingen is dit al in eerdere projecten van de POV K&L geïllustreerd. Het resultaat van de integrale faalkansanalyses is getoetst met de gedachte dat een bijdrage van leidingfalen aan de overstromingskans van 1% van de trajectnorm toelaatbaar is.

De lekfrequenties die in de databases Ustore voor de drinkwaterleidingen en Nestor voor de gasleidingen aanwezig zijn, zijn gebruikt voor de bepaling van de leidingfaalkansen, die gebruikt kunnen worden in een integrale faalkansanalyse. Hiertoe is een indeling gebruikt in diameter en leidingmateriaal en bij de gasleidingen ook in drukklasse. Bij de drinkwaterleidingen zijn geen drukklassen geregistreerd bij de lekincidenten, daarom zijn hier drukklassen aangenomen met conservatieve bovengrenzen.

Ondersteund door Machine Learning technieken zijn op basis van de beschikbare set resultaten uit de faalkansanalyses filters c.q. beslisbomen opgesteld met dijk- en leidingkenmerken, die door de beheerder redelijk eenvoudig bepaald kunnen worden. De resultaten van de geïntegreerde faalkansanalyses betreffen geen volledig probabilistische analyses en in meerdere gebeurtenissen in de beschouwde faalpaden zijn conservatieve inschattingen gedaan. Hiermee kunnen de via de methodiek afgeleide filters als conservatief worden beschouwd.

Het dient te worden opgemerkt dat de gepresenteerde beslisbomen voorbeelden zijn van de uitwerking van de ontwikkelde methodiek die semi-automatisch is toegepast. Door het ontbreken van voldoende variatie van eigenschappen van waterkeringen zijn de beslisbomen nog niet gereed voor gebruik in de praktijk.

Voor het afleiden van filters die als eenvoudige toetsregels kunnen worden gebruikt bij het beoordelen van de leidingen zullen nog aanvullende analyses moeten worden gedaan met een grotere variatie in de eigenschappen van de waterkeringen. Ook kan de mate van conservatisme bij met name de erosiekraters bij drinkwaterleidingen nader worden beschouwd en geoptimaliseerd.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
1.1	Inleiding	8
1.2	Probleemstelling	8
1.3	Doel en afbakening	8
1.4	Aanpak	9
1.5	Leeswijzer	9
2	Methoden en uitgangspunten	11
2.1	Toepassing van het veiligheidsraamwerk	11
2.1.1	Generieke gebeurtenissenboom	11
2.1.2	Beschouwde faalpaden	11
2.2	Leidingen	13
2.2.1	Categorieën leidingen	13
2.2.2	Leidingfaalkansen per type leiding en type leidingfalen	14
2.2.3	Gevolgen van leidingfalen	16
2.2.4	Dimensies erosiekraters	17
2.2.5	Schematisering ontgrondingskraters in berekeningen dijkfaalmechanismen	18
2.3	Dijkfaalmechanismen	18
2.3.1	Overzicht	18
2.3.2	GEKB	18
2.3.3	GEBU	19
2.3.4	STBI en STBU	19
2.3.4.1	Faaldefinitie	19
2.3.4.2	Bepaling additionele kans door leidingfalen	21
2.3.5	STPH	23
2.3.5.1	Faaldefinitie	23
2.3.5.2	Bepaling additionele kans door leidingfalen	23
2.3.6	Direct dijkfalen	24
2.4	Ligging leidingen in profiel en diepteligging	26
2.5	Integrale faalkansanalyse	26
2.5.1	Bepaling faalkansbijdrage door leidingfalen	27
2.5.2	Bepaling kans hoogwater binnen hersteltijd	28
2.6	Toetsing	28
2.7	Software	30
2.8	Geselecteerde dijkprofielen met grondopbouw	30
2.9	Overzicht doorgerekende combinaties	31
2.10	Bepaling filters	32
2.10.1	Vorm	32
2.10.2	Methode	32

3	Resultaten	33
3.1	Beslisbomen voor beheersgebied Waterschap Rivierenland	33
3.2	Discussie	35
3.3	Voorbeelden toepassing beslisboom	35
3.4	Gebruik methode en resultaten afgeleid filter	36
4	Conclusies en aanbevelingen	38
4.1	Algemeen	38
4.2	Conclusies	38
4.2.1	Methodiek	38
4.2.2	Filters voor waterkeringen in beheersgebied van Waterschap Rivierenland	39
4.3	Aanbevelingen	40
5	Referenties	42
A	Selectie dijkprofielen met grondopbouw	
A.1	Beschikbare gegevens	
A.2	Geselecteerde dijkprofielen	
A.2.1	Selectiecriteria	
A.2.2	Geselecteerde profielen	
A.3	Norm en eis per faalmechanisme op doorsnedeniveau	
A.4	Invoer voor faalmechanismen	
A.4.1	Belasting	
A.4.2	Erosie: GEKB	
A.4.3	Piping: STPH	
A.4.4	Stabiliteit: STBI en STBU	
A.5	Aanpassing cases op norm	
B	Decision tree analysis o.b.v. Machine Learning	
C	Bepaling ontgrondingskraters gas- en waterleidingen (rapport RoyalHaskoningDHV)	
D	Lekfrequenties van gasdistributieleidingen (rapport KIWA)	
E	Storingsfrequenties drinkwaterleidingen (rapport KWR)	
F	Beschouwing faalkansen distributieleidingen voor aardgas en water (notitie Vrouwenvelder & Spiekhout)	
G	Beschouwing referentielengte (notitie Spiekhout & Vrouwenvelder)	
H	Histogrammen resultaten faalkansanalyses	

1 Inleiding

1.1 Inleiding

In het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) werken Rijkswaterstaat en de waterschappen samen aan veilige dijken. In 2050 moeten alle primaire waterkeringen voldoen aan de nieuwe normering voor de waterveiligheid, die vanaf 1 januari 2017 geldt. Het verleggen van kabels en leidingen vormt een grote kostenpost bij dijkversterkingsprojecten. Uit vrijwel alle risicodossiers blijkt dat kabels en leidingen hoog scoren als het gaat om risico op vertraging en aanvullende kosten. Binnen het HWBP is in 2017 de Project Overstijgende Verkenning Kabels & Leidingen (POV K&L) gestart met als belangrijkste doel om de risico's te minimaliseren.

In het kader van de POV K&L is aan Deltares gevraagd om op basis van faalkansanalyses eenvoudige criteria, c.q. filters te ontwikkelen, ter beoordeling van gas- en drinkwaterleidingen die parallel langs of in waterkeringen liggen.

1.2 Probleemstelling

In en nabij de Nederlandse waterkeringen zijn op sommige plaatsen leidingen aanwezig en zullen in de toekomst nog leidingen moeten worden aangelegd. Parallel gelegen leidingen in het dijklichaam en nabij het dijklichaam in de veiligheidszone van de waterkering zijn in principe onwenselijk. Slechts in zeer uitzonderlijke gevallen mag daarvan worden afgeweken als daartoe dringende planologische redenen bestaan. De NEN 3651 bevat richtlijnen voor de beoordeling van leidingen in en nabij waterstaatswerken. Daarin worden veiligheidseisen gesteld aan het ontwerp en beheer van nieuwe leidingen en de beoordeling van bestaande leidingen. NEN3651;2020 voorziet ook in richtlijnen voor parallelle leidingen. De NEN 3650 serie met de NEN 3651 stelt in principe (deterministische) eisen aan de veiligheid van de leidingen zelf. Alhoewel in de NEN 3651 richtlijnen worden gegeven voor leidingen bij waterkeringen worden geen eisen gesteld aan de veiligheid van een waterkering of een ander waterstaatswerk. Voor leidingen met potentieel significant negatieve effecten op de waterkering zijn de eisen en richtlijnen dan ook niet afdoende. Voor dergelijke situaties biedt de NEN 3650 (paragraaf 6.5.1 NEN 3650, 2016a) wel de mogelijkheid om het vereiste veiligheidsniveau van een leiding te baseren op de bijdrage van de aanwezigheid van de leiding aan de totale 'disfunctiekans' van het desbetreffende waterstaatswerk.

Dit betekent dat de NEN 3650 serie niet goed aansluit op de veiligheidsbenadering op basis van overstromingskansen volgens het Wettelijke beoordelingsinstrumentarium (WBI2017) en Ontwerpinstrumentarium (OI2014) en zijn ook niet geijkt aan de waterveiligheidseisen. Daarnaast ontbreekt er een methodiek voor de bepaling van de verstoringszone bij een sluipend lek. Dit betekent dat herijking van de bestaande richtlijnen nodig is en dat filters gebaseerd op de eisen voor waterveiligheid moeten worden toegevoegd.

1.3 Doel en afbakening

Het primaire doel van deze studie is om een methodiek op te stellen om filters te kunnen ontwikkelen waarmee de beoordeling en het ontwerp van gas- en drinkwaterleidingen die in parallelle richting langs of in de waterkering liggen, op eenvoudige wijze mogelijk wordt. Het betreft hierbij distributieleidingen bij gas en distributie- en kleinere transportleidingen bij water. Het zijn kleinere diameters (om praktische redenen wordt een grens van 500 mm aangehouden) en lage druk leidingen. De filters moeten op eenvoudige wijze aantonen dat de combinatie van waterkering en leiding evident veilig is, zodat het uitvoeren van nadere analyses niet meer nodig is.

Bij het opstellen van de methodiek worden de filters gebaseerd op de resultaten van (integrale) faalkansanalyses waarin leidingfalen en dijkfalen tezamen worden beschouwd. Met leidingfalen wordt hier bedoeld het ontstaan van leidinglekage of leidingbreuk, met als gevolg het ontstaan van erosiekraters of, in geval van drinkwaterleidingen, verzadiging van het dijklichaam (sluipend lek).

Het secundaire doel is om naast het opstellen van de methodiek de filters zelf te ontwikkelen, althans voor een aantal waterkeringen in het beheersgebied van Waterschap Rivierenland.

Naast de hierboven beschreven doelstellingen wordt via deelproducten bij het opstellen van de filters inzicht verkregen in de faalkansen van de gas- en drinkwaterleidingen die in parallelle richting langs of in de waterkering liggen. Deze faalkansen worden bepaald op basis van in databases aanwezige casuïstiek met betrekking tot lekfrequenties van gas- en drinkwaterleidingen.

Aangezien de grote transportleidingen bij voorbaat niet geschikt zijn om met filters te beoordelen beperkt deze studie zich tot distributieleidingen bij gas en distributie- en kleinere transportleidingen bij water.

1.4 Aanpak

De methodiek bestaat er op hoofdlijnen uit dat (geautomatiseerd) een groot aantal geïntegreerde faalkansanalyses van leidingfalen en dijkfalen is uitgevoerd voor een reeks dijkdoorsneden. Deze faalkansanalyses zijn uitgevoerd conform de methode beschreven in het Veiligheidsraamwerk K&L (Deltares 2018a) zoals inmiddels toegepast in meerdere referentieprojecten van de POV K&L.

De dijkdoorsneden hebben een verschillende geometrie en samenstelling van de ondergrond en het dijklichaam. Er is bij het uitwerken van de methodiek en het opstellen van filters gebruik gemaakt van een set bestaande dijkdoorsneden in het beheergebied van Waterschap Rivierenland. Er zijn verschillende leidingtypen en posities van de leidingen ten opzichte van de dijk beschouwd. In totaal levert dit ruim 14.000 combinaties op.

Alle geselecteerde dijkdoorsneden voldoen zonder leidingfalen voor alle beschouwde dijkfaalmechanismen juist aan de toelaatbare faalkans volgens de norm (die varieert binnen het beheergebied). Per combinatie is getoetst of de toename van de overstromingskans door leidingfalen wel of niet verwaarloosbaar is. In deze studie is dat kleiner of groter dan 1% van de toelaatbare overstromingskans volgens de norm.

Ondersteund door Machine Learning technieken zijn op basis van de beschikbare set resultaten uit de faalkansanalyses filters c.q. beslisbomen opgesteld met dijk- en leidingkenmerken, die door de beheerder redelijk eenvoudig bepaald kunnen worden. De resultaten van de geïntegreerde faalkansanalyses betreffen geen volledig probabilistische analyses en in meerdere gebeurtenissen in de beschouwde faalpaden zijn conservatieve inschattingen gedaan. Hiermee kunnen de via de methodiek afgeleide filters als enigszins conservatief worden beschouwd.

1.5 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 worden de uitgangspunten en de verschillende stappen in de opgestelde methodiek, die in de vorige paragraaf op hoofdlijnen zijn beschreven in meer detail beschreven. Hoofdstuk 3 geeft een samenvatting van de complete set geïntegreerde faalkansanalyses en de op basis daarvan afgeleide beslisbomen. Hoofdstuk 4 bevat conclusies en aanbevelingen.

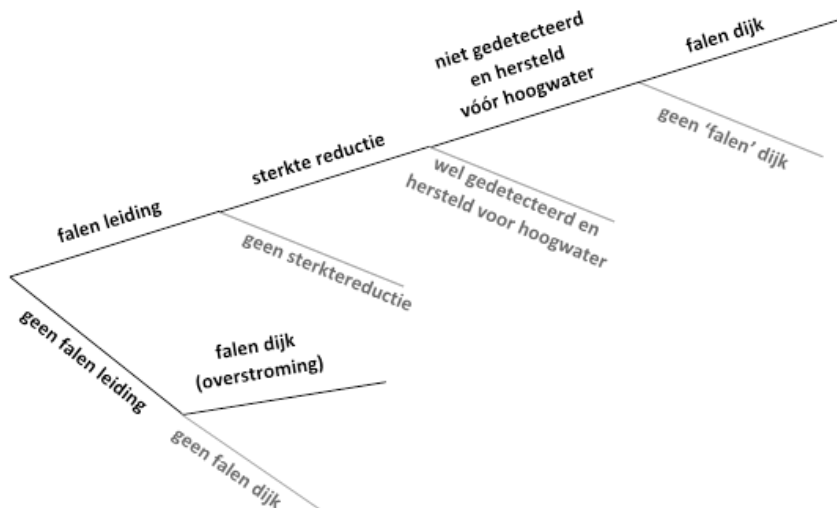
In de bijlagen een aantal onderliggende memo's en rapporten, waaronder die van KIWA en KWR met leidingfaalkansen voor respectievelijk gasleidingen en drinkwaterleidingen en het rapport van RoyalHaskoningDHV en Deltares over de erosiekraters.

2 Methoden en uitgangspunten

2.1 Toepassing van het veiligheidsraamwerk

2.1.1 Generieke gebeurtenissenboom

De generieke gebeurtenissenboom, d.w.z. de verzameling van faalpaden, uit het Veiligheidsraamwerk (Deltares, 2018) in Figuur 2.1 vormt de basis voor de uitgevoerde faalkansanalyses.



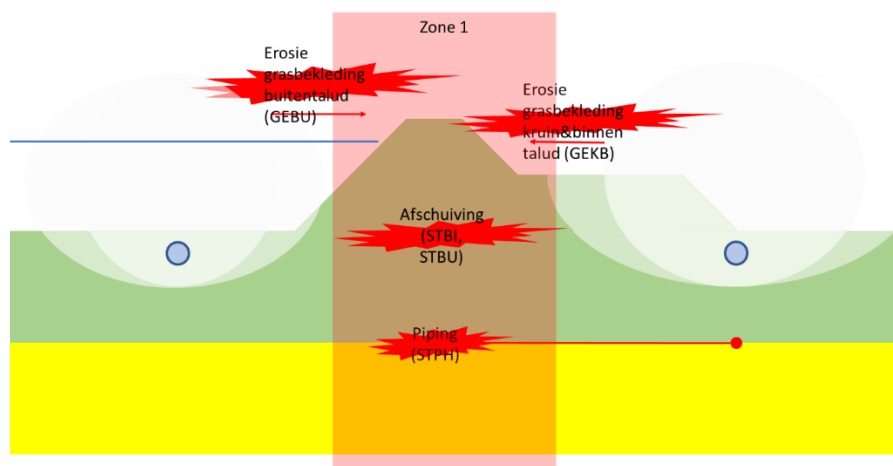
Figuur 2.1 Generieke gebeurtenissenboom voor het beoordelen van een waterkering met invloed van een falende leiding en beschouwing van gelijktijdigheid van leidingfalen en hoogwater, conform Veiligheidsraamwerk (Deltares, 2018)

2.1.2 Beschouwde faalpaden

De leidingfaalmechanismen en gevolgen daarvan worden in de detail beschreven in paragraaf 2.2. De dijkfaalmechanismen, inclusief faaldefinities zonder en met leidingfalen, worden beschreven in paragraaf 2.3. Voor beschrijving van de faalpaden wordt in deze paragraaf alleen een korte opsomming van de dijkfaalmechanismen en de gevolgen van leidingfalen gegeven.

De volgende faalmechanismen van de dijk zijn beschouwd, schematisch weergegeven in Figuur 2.2:

- a. Golfoverslag, erosie kruin en binnentalud (GEKB)
- b. Graserosie buitentalud (GEBU)
- c. Macro-instabiliteit binnenwaarts (STBI)
- d. Macro-instabiliteit buitenwaarts (STBU)
- e. Piping (STPH)
- f. Direct dijkfalen

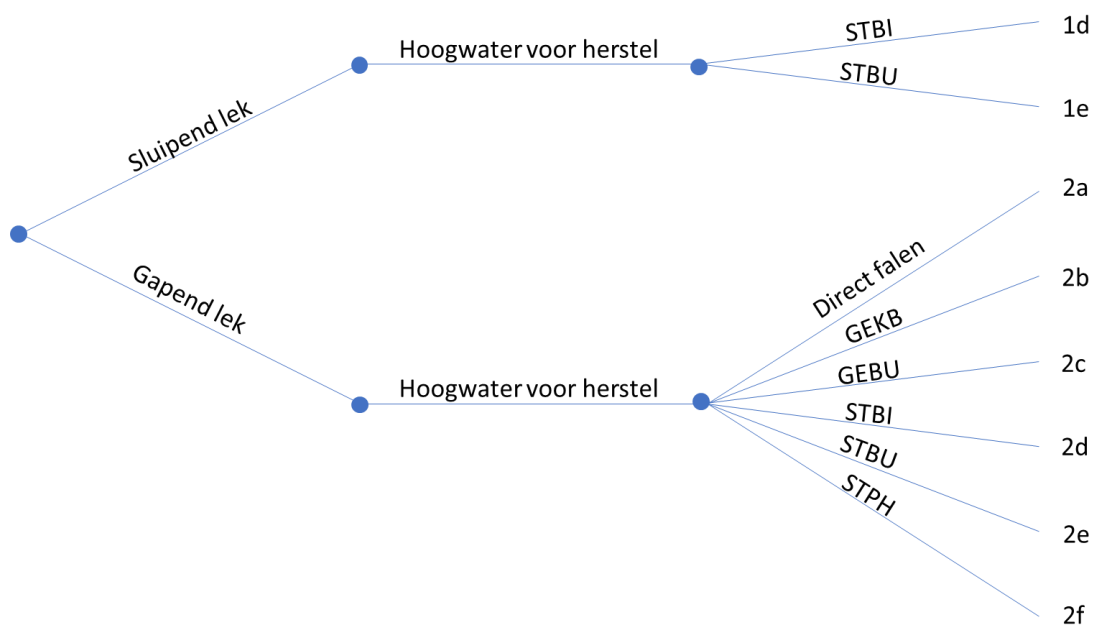


Figuur 2.2 Schematische weergave van beschouwde dijffaalmechanismen en gevolgen van leidingfalen

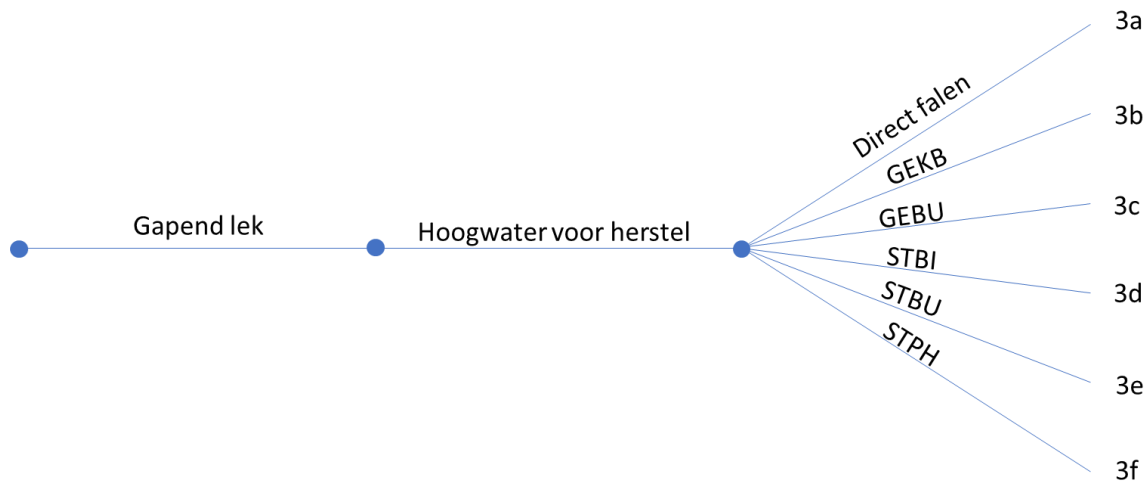
Daarnaast zijn de volgende gevolgen van leidingfalen beschouwd (voor definities zie paragraaf 2.2.3):

- Bij waterleidingen: sluipend lek en gapend lek
- Bij gasleidingen: gapend lek

In figuur 2.3 zijn de beschouwde faalpaden na falen van een waterleiding weergegeven, in Figuur 2.4 die na falen van een gasleiding.



Figuur 2.3 Faalpaden waterleiding



Figuur 2.4 Faalpaden gasleiding

In integrale faalkansanalyses zijn de volgende faalpaden kwantitatief uitgewerkt:

- sluipend lek (vloeistofleiding), resulterend in een verhoging van de freatische lijn in de dijk, geen herstel voor het hoogwater en vervolgens het dijkfaalmechanisme d) STBI of e) STBU. Alleen relevant als de leiding ligt tussen de binnenkruin en binnenteen van de dijk (in overige gevallen wordt al met volledige verzadiging van grondlagen rondom de leiding gerekend).
- gapend lek, resulterend in een erosiekrater, geen herstel voor het hoogwater en vervolgens één van de hierboven genoemde dijkfaalmechanismen: a) direct falen, b) GEKB, c) GEBU, d) STBI, e) STBU, f) STPH.

Voor vloeistofleidingen zijn er in totaal 8 faalpaden: 1d, 1e, 2a, 2b, 2c, 2d, 2e, 2f.

Voor gasleidingen zijn er in totaal 6 faalpaden: 3a, 3b, 3c, 3d, 3e, 3f.

Uit de analyse van incidenten van gasleidingen (netbeheer Nederland 2019) is gebleken dat een erosiekrater bij een falende lagedrukgasleiding (zoals bij distributie wordt toegepast) maatgevend is. Bij de lagedrukleidingen is de fysische explosie zeer beperkt en heeft die geen impact op de sterkte van de grond. Er worden geen significante plastische zones en effecten van verweking geconstateerd. Explosies bij lekkende gasleidingen, met als gevolg het ontstaan van plastische zones of verweking, zijn dus niet beschouwd.

De hierboven beschreven dijkfaalmechanismen worden ook beschreven in WBI/BOI, behalve "direct dijkfalen". Direct dijkfalen treedt op als het zogenaamde restprofiel wordt aangetast door de erosiekrater én het hoogwater vindt plaats binnen de herstelperiode.

2.2 Leidingen

2.2.1 Categorieën leidingen

In deze studie worden lagedrukleidingen beschouwd. Dit zijn leidingen met een inwendige druk kleiner of gelijk aan 1 MPa (10 bar). De beschouwde gasleidingen behoren tot het distributienet. Bij drinkwaterleidingen is er geen strikte scheiding tussen transport- en distributieleidingen. Zoals eerder vermeld wordt om praktische redenen een grens van 500 mm aangenomen voor toepassing van de filters. Voor distributiegasleidingen geldt dat er geen leidingen groter dan 500 mm voorkomen. Bij de waterleidingen wordt voor de bepaling van de faalkansen een leidingenklasse tot 700 mm beschouwd (zie tabel 5.1).

In overleg met het POV-team en met de projectpartners KIWA en KWR zijn de drinkwaterleidingen en gasdistributieleidingen ingedeeld in categorieën. Deze categorie-indeling is gehanteerd voor zowel bepaling van de leidingfaalkansen als de ontgrondingskraters bij gapend lek. De uiteindelijke keuze van categorieën is in hoofdzaak gebaseerd op de voldoende beschikbaarheid van gegevens per categorie, het voldoende vaak voorkomen in Nederland van leidingen per categorie en het verwachte verschil in impact op de bijdrage van leidingfalen aan de overstromingskans per categorie, waarbij zowel de leidingfaalkans als de consequenties van leidingfalen (dimensies van de ontgrondingskrater) van belang zijn. Voor zowel drinkwaterleidingen als gasdistributieleidingen is een indeling gebaseerd op leidingmateriaal, leidingdiameter en leidingdruk gebruikt:

- Drinkwaterleidingen:
 - Materiaal: AC, Grijs Gietijzer, Nodulair Gietijzer, Staal, PE, PVC;
 - Diameter: 0-90 mm, 90-125 mm, 125-200 mm, 200-400 mm en 400-700 mm;
 - Druk [bar] <3 bar, 3-4 bar en 4-6 bar.
- Gasdistributieleidingen:
 - Materiaal: AC, Grijs Gietijzer, Nodulair Gietijzer, Staal, PE, PVC;
 - Diameter: <125 mm, 125-200 mm en 200-315 mm;
 - Druk: <0.1 bar, 0.1-1 bar, 1-4 bar en 4-8 bar.

In totaal leidt dit tot 90 combinaties van drinkwaterleidingen en 72 combinaties van gasdistributieleidingen.

2.2.2 Leidingfaalkansen per type leiding en type leidingfalen

Aan de hand van de gegevens in de databases hebben Kiwa en KWR per type leiding de kans op leidingfalen per jaar per meter leidinglengte berekend. De kans op leidingfalen per jaar ergens in de leiding wordt berekend door deze kans te vermenigvuldigen met de leidinglengte.

$$P_{leiding,j} = P_{leiding \text{ per meter},j} \cdot L_{leiding} \quad Eq.(1)$$

waarin:

- $P_{leiding,j}$ kans op leidingfalen per leidingfaaltipe j , bv. gapend of sluipend lek (per jaar);
- $P_{leiding \text{ per meter}}$ kans op leidingfalen per leiding type j , per eenheid lengte leiding (/jaar/m);
- $L_{leiding}$ lengte van leiding (m).

De kansen op leidingfalen per jaar en per meter, $P_{leiding \text{ per meter}}$, zijn gebaseerd op de resultaten van aparte studies naar storingsfrequenties in gasdistributieleidingen, uitgevoerd door KIWA, en lekfrequenties in drinkwaterleidingen, uitgevoerd door KWR. Daarbij is gebruik gemaakt van databases met gegevens van lekincidenten. Voor de gasleidingen is door Kiwa gebruik gemaakt van de database Nestor en voor de waterleidingen heeft KWR gegevens ontleend uit de database Ustore. De beschrijving van de databases is opgenomen in de rapporten van KWR en Kiwa zijn opgenomen in respectievelijk Bijlagen D en E.

De kans op leidingfalen, of de kans op lekkage, kan gelijk worden gesteld aan de lekfrequentie (bij kleine frequenties is dat geoorloofd). In onderstaande tabellen zijn de leidingfaalkansen $P_{leiding \text{ per meter}}$ (inclusief externe oorzaken) samengevat voor respectievelijk de drinkwaterleidingen en gasdistributieleidingen. De eenheid is (/m/jaar). Zowel diameter als druk (in geval van gasleidingen) zijn weergegeven in ranges.

In de casuïstiek van de lekincidenten bij waterleidingen wordt geen druk geregistreerd. Voor bepaling van de erosiekraters (paragraaf 2.2.3) is de druk echter wel van belang. Bij het opstellen van de filters voor het beheersgebied van Waterschap Rivierenland wordt uitgegaan van de volgende drukranges in de leiding:

- 0-3 bar waterdruk
- 3-4 bar waterdruk
- 4-6 bar waterdruk

In de casuïstiek van de lekincidenten bij gasleidingen wordt wel een druk geregistreerd en deze is van invloed op zowel de leidingfaalkans als de erosiekraters.

Tabel 2-1 Leidingfaalkansen per leidingtype voor drinkwaterleidingen (/m/jaar)

Materiaal	Diameter ranges [mm]				
	0-89	90-124	125-200	201-400	401-700
AC	1.10E-04	9.00E-05	9.00E-05	4.00E-05	1.00E-05
Grijs Gietijzer	1.20E-04	8.00E-05	5.00E-05	2.00E-05	1.00E-05
Nodulair Gietijzer	4.00E-05	4.00E-06	1.00E-05	4.00E-06	3.00E-06
Staal	2.40E-04	2.50E-04	1.70E-04	9.00E-05	2.00E-06
PE	1.00E-05	2.00E-05	2.00E-05	1.00E-05	2.00E-06
PVC	3.00E-05	2.00E-05	3.00E-05	2.00E-05	1.00E-05

Tabel 2-2 Leidingfaalkansen per leidingtype voor gasdistributieleidingen (/m/jaar)

Materiaal	Diameter ranges [mm]	Druk* [bar]			
		<0.1	0.1-1	1-4	4-8
AC	0 – 124	1.40E-04			
	125 -200	1.60E-04			
	201 - 315	1.70E-04			
Grijs Gietijzer	0 – 124	1.80E-04	5.90E-04		
	125 -200	2.30E-04	2.40E-04		
	201 - 315	3.00E-04	3.50E-04		
Nodulair Gietijzer	0 – 124	1.20E-04	2.60E-04	5.00E-05	2.00E-05
	125 -200	1.80E-04	8.00E-05	3.00E-05	2.00E-05
	201 - 315	2.20E-04	2.10E-04	2.00E-05	4.00E-05
Staal	0 – 124	1.10E-04	2.30E-04	3.00E-05	1.00E-05
	125 -200	9.00E-05	6.00E-05	2.00E-05	1.00E-05
	201 - 315	1.70E-04	1.00E-04	2.00E-05	1.00E-05
PE	0 – 124	2.00E-05	4.00E-05	3.00E-05	1.00E-05
	125 -200	5.00E-05	3.00E-05	3.00E-05	1.00E-05
	201 - 315	1.10E-04	3.00E-05	1.00E-05	5.00E-05
PVC	0 – 124	3.00E-05			
	125 -200	3.00E-05			
	201 - 315	5.00E-05			

* Betreft overdruk in de leiding zonder de atmosferische druk

Hieronder volgt een korte beschouwing op de leidingfaalkansen, met name ten aanzien van de mate van conservatisme. In Bijlage F is een uitgebreide beschouwing gegeven door Vrouwenvelder en Spiekhout.

De kans op leidinglekkage in een waterkering wordt afgeleid uit de geconstateerde (gedetecteerde) lekfrequentie. Doordat de lekfrequentie bestaat uit waarnemingen over alle in Nederland voorkomende leidingstrekkingen bij gasleidingen en iets meer dan de helft van de waterleidingstrekkingen, kan worden aangenomen dat dit een overschatting is voor waterkeringen (zeer conservatief). De kleinste lekken worden niet altijd direct gedetecteerd (dit geldt voor water en voor gas), bij het groter worden van een lek worden deze lekken overigens wel gedetecteerd, maar mogelijk kunnen er enkele kleine lekken blijven bestaan zonder dat deze worden opgemerkt.

De kleinste lekken van gasleidingen zijn niet van belang zijn voor de waterveiligheid. Hierbij komt een geringe hoeveelheid gas vrij die niet leidt tot verandering van de grondmechanische omstandigheden. Bij geringe lekkage bij waterleidingen is de hoeveelheid water die in de grond terecht komt gering en is de opbouw van waterspanningen (die afhankelijk is van de doorlatendheid van de grond) eveneens gering. In kleigronden is verzadiging van de grond bij een sluipend lek een conservatieve aanname omdat uit diverse praktijkgevallen blijkt dat afstroming via preferente stroombanen optreedt. Met betrekking tot de mogelijkheid dat enkele kleine lekken niet in de lekfrequenties zijn geregistreerd mag worden geconcludeerd dat gebruik van lekfrequenties uit heel Nederland tot een overschatting van de faalkans van parallelle leidingen in en bij waterkeringen leidt.

De in de faalkansanalyses gebruikte leidingfaalkansen mogen gezien bovenstaande beschouwing als conservatief beschouwd worden. Doordat ter plaatse van waterkeringen de kans op graafschade kleiner is dan elders, zou conform de BEVB (Besluit Externe Veiligheid Buisleidingen) handleiding een reductie kunnen worden toegepast op de leidingfaalkans voor dit leiding faalmechanisme. Vanwege de conservatieve aanpak zijn er geen BEVB-reductiefactoren toegepast (niet voor het mechanisme externe beschadigingen en niet voor andere mechanismen).

Uit de rapportage van KWR (Bijlage E) blijkt dat het grootste deel van de lekken bij waterleidingen sluipend lek betreft, dat in tegenstelling tot gapend lek niet leidt tot een erosiekrater rondom het lek, maar wel tot verzadiging van het grondlichaam (zie volgende paragraaf). Voor de waterleidingmaatschappij Vitens is het aandeel van sluipend lek in het totaal aantal lekken orde 90%. Bij andere waterleidingbedrijven is de verdeling mogelijk iets anders, maar een grote verschuiving wordt niet verwacht, zodat de toepassing van de BEVB-verdeling (handleiding besluit externe veiligheid buisleidingen) 25% gapend - 75% sluipend lek (bij eerdere POV projecten gehanteerd) gerechtvaardigd is. Een groot aandeel gapend lek is in de meeste gevallen ongunstig, waardoor de BEVB-verdeling als licht conservatief kan worden gezien.

Hierbij is het uitgangspunt dat de beschouwde leidingen conform de geldende voorschriften ten tijde van leidingaanleg zijn ontworpen en er ter plaatse van de leiding geen afwijkingen aan de orde zijn zoals bijvoorbeeld grote verschilvormingen over een korte afstand.

2.2.3 Gevolgen van leidingfalen

De gevolgen van leidingfalen verschillen per type leiding. In NEN 3651 wordt zowel het effect van falen van gasleidingen als van vloeistofleidingen op waterkeringen beschreven. In NEN 3650 wordt aangegeven dat er bij drinkwaterleidingen een ontgrondingskrater kan ontstaan. Bij gasleidingen kan naast een erosiekrater door het uitstromend gas ook een explosiekrater met een plastische zone ontstaan. In Deltares (2020) is beschreven dat de erosiekrater maatgevend is en dat modelleren van de explosiekrater met plastische zone niet nodig is. Tevens wordt beschreven

dat bij extreme explosies ook een verwekingszone met wateroverspanning in granulaire grondsoorten mogelijk is. Bij lagedrukgasleidingen is dit niet aan de orde.

Bij deze studie worden dus de volgende gevolgen van leidingfalen beschouwd:

- Bij een sluipend lek in een vloeistofleiding die ligt tussen de binnen- en buitenteen van de dijk wordt aangenomen dat dit tot volledige verzadiging van de dijk leidt, d.w.z. dat de freatische lijn aan het oppervlak ligt. Dit is alleen relevant voor de dijkfaalmechanismen STBI en STBU.
- Bij een gapend lek in een vloeistofleiding of bij een lek in een gasleiding ontstaat een erosiekrater (ontgrondingskuil). Zie volgende paragraaf.

2.2.4 Dimensies erosiekraters

De formules voor de berekening van de kraters zijn gegeven in de gemeenschappelijke rapportage van Royal HaskoningDHV en Deltares in Bijlage C. Deze formules zijn afgeleid aan de hand van proeven die in de vorige eeuw bij het Waterloopkundig Laboratorium zijn uitgevoerd. De formules zijn door Deltares in 2012 geoptimaliseerd en in NEN 3651 opgenomen.

In Bijlage C staan ook tabellen met diameters voor ontgrondingskuilen die zijn gebruikt voor de geïntegreerde faalkansberekeningen.

Hieronder volgt een korte beschouwing op de berekende kraterafmetingen, met name ten aanzien van de mate van conservatisme.

De kraterafmeting wordt bepaald door het vermogen P ($Q \cdot h$) (waarin Q het uitstromend debiet is en h de drukhoogte) bij waterleidingen en door de impulsflux I (Q, p, A) (waarin p de leidingdruk is en A de gatdoorsnede) en de tijdsduur t bij gasleidingen. Bij de bepaling van de debieten is voor de gatdiameter uitgegaan van 100% van de diameter van de leiding, hetgeen een conservatief uitgangspunt is.

Voor de kraterafmeting wordt door toepassing van een factor in de formules een karakteristieke waarde gevonden, d.w.z., de kans op nog grotere afmetingen is 5%, ervan uitgaande dat de variabelen bij het lek bekend zijn¹. Omdat bij de gebruikte methodiek een groot aantal leidingen wordt beschouwd, zijn niet bij elke leklocatie de variabelen bekend. Dit betekent dat een aantal aanvullende, voorzichtige aannames zijn gedaan, waarmee feitelijk een krater met een nog lagere overschrijdingskans dan 5% wordt berekend:

- Vermogen P bij een lek in een waterleiding wordt zeer conservatief ingeschat door een maximaal debiet en constante druk te veronderstellen (het maximaal debiet is extreem hoog en de drukval van de uitstroom wordt niet meegenomen).
- Impulsflux I is deterministisch bepaald bij een bovengrens van de druk uit de leidingklasse en wordt constant in de tijd verondersteld voor de tijdsduur wordt 2 uur genomen (zie NEN3651, hier wordt dit als conservatieve waarde geadviseerd als geen inschatting van kleppen en afsluiters wordt gemaakt).

Daarmee is voor gasleidingen de kans op grotere afmetingen dan berekend waarschijnlijk 5% tot 1%. Voor waterleidingen is de benadering praktisch een bovengrensbepaling, d.w.z. grotere afmetingen kunnen eigenlijk niet voor komen, maar binnen de projectrandvoorwaarden is verdere optimalisatie niet mogelijk. De kraters zijn afgeleid voor fijn zand. In andere grondsoorten is de kraterafmeting nog conservatiever, d.w.z. de daadwerkelijke kraterafmeting zal kleiner zijn.

¹ Het gebruik van een karakteristieke waarde in de faalkansanalyses is een conservatieve schatting als ervan uit wordt gegaan dat dit een niet-dominante variabele betreft. Er zijn geen probabilistische berekeningen gedaan met erosiekrater als stochast, dus een harde onderbouwing voor deze aanname is er niet. Het beeld is wel dat de kraterafmeting voor veel leidinglocaties een beperkte invloed heeft.

De diepte ligging van de leidingen is eveneens van belang bij de omvang van de kraters. In deze studie is een conservatieve diepteligging gebruikt van 1.25 m (zie verdere toelichting in paragraaf 2.4).

In geval van leidingen in de waterkering zelf wordt bij een sluipend lek in waterleidingen 100 % verzadiging aangenomen. Ook dit is een conservatief uitgangspunt.

2.2.5 Schematisering ontgrondingskraters in berekeningen dijffaalmechanismen

In de berekeningen zijn de kraters als volgt geschematiseerd:

- Daar waar het maaiveld 1.25 m (paragraaf 2.4) of minder boven de bovenkant van de leiding ligt, heeft de krater de vorm van een ellips (zie ook rapport RoyalHaskoningDHV en Deltares in Bijlage C).
- Daar waar het maaiveld meer dan 1.25 m boven de bovenkant van de leiding ligt (bijvoorbeeld in de dijk, als de leiding aan de teen van de dijk ligt), loopt de kraterwand vanaf de bovenkant van de ellips onder een hoek van 30 graden verder omhoog tot aan het maaiveld. In werkelijkheid zal de helling van de kraterwand ergens liggen tussen vrijwel verticaal (in geval van klei, vlak na het ontstaan van de krater) en de hoek van interne wrijving (in geval van zand). Een hoek van 30 graden lijkt derhalve een realistische schatting.

2.3 Dijffaalmechanismen

2.3.1 Overzicht

De volgende dijffaalmechanismen zijn beschouwd:

- Macro-instabiliteit binnenwaarts (STBI)
- Macro-instabiliteit buitenwaarts (STBU)
- Piping (STPH)
- Golfoverslag, erosie kruin en binnentalud (GEKB)
- Graserosie buitentalud (GEBU)
- Direct dijffalen

Al deze faalmechanismen zijn beschreven in het WBI/BOI, behalve “direct dijffalen”. Zoals in paragraaf 2.1.2 reeds aangegeven treedt direct dijffalen op als het zogenaamde restprofiel (dat in de hieronder volgende paragrafen zal worden beschreven) wordt aangetast door de erosiekrater én het hoogwater vindt plaats binnen de herstelperiode. Direct dijffalen is beschreven in eerdere rapporten van de POV K&L (zie Deltares 2020).

De in de volgende paragrafen beschreven faaldefinitie horend bij bovenstaande faalmechanismen hebben betrekking op initiële (‘directe’) faalmechanismen. Er wordt geen rekening gehouden met reststerkte of vervolgmecanismen. Dit is een conservatief uitgangspunt.

2.3.2 GEKB

De additionele kans op erosie van de kruin en het binnentalud door overslag (GEKB) ten gevolge van leidingfalen wordt als volgt berekend:

$$P_{GEKB,A} = P_{GEKB,leiding} - P_{GEKB,\overline{leiding}} \quad Eq.(2)$$

Waarin:

- $P_{GEKB,A}$ additionele kans op erosie kruin en binnentalud door overslag (per jaar);
- $P_{GEKB,leiding}$ kans op erosie grasbekleding door overslag gegeven leidingfalen (per jaar);
- $P_{GEKB,\overline{leiding}}$ kans op erosie grasbekleding door overslag gegeven geen leidingfalen (per jaar);

Aangenomen is dat alleen een gapend lek invloed heeft op de kans op GEKB.

$P_{GEKB,leiding}$ en $P_{GEKB,\overline{leiding}}$ zijn op zeer pragmatische wijze bepaald. $P_{GEKB,leiding}$ is gelijk aan de kans op een overslagdebiet van 10 l/s/m. Verondersteld wordt dat de aanwezigheid van een krater in de kruin of het binnentalud van de dijk ertoe leidt dat het kritieke overslagdebiet gereduceerd wordt. Aangenomen is dat $P_{GEKB,\overline{leiding}}$ gelijk is aan de kans op een overslagdebiet van 0.1 l/s/m.

Dit geldt alleen voor leidingen die zich bevinden tussen de buitenkruin en binnenteen van de dijk (zie paragraaf 2.4). Zowel $P_{GEKB,leiding}$ als $P_{GEKB,\overline{leiding}}$ zijn berekend met Hydra-NL.

2.3.3 GEBU

De additionele kans op erosie van de grasbekleding van het buitentalud (GEBU) ten gevolge van leidingfalen wordt als volgt berekend:

$$P_{GEBU,A} = P_{GEBU,leiding} - P_{GEBU,\overline{leiding}} \quad Eq.(3)$$

Waarin:

- $P_{GEBU,A}$ additionele kans op erosie van de grasbekleding van het buitentalud (per jaar);
- $P_{GEBU,leiding}$ kans op erosie van de grasbekleding van het buitentalud gegeven leidingfalen (per jaar);
- $P_{GEBU,\overline{leiding}}$ kans op erosie van de grasbekleding van het buitentalud gegeven geen leidingfalen (per jaar);

Voor bepaling van $P_{GEBU,A}$ is een vergelijkbaar pragmatische aanpak gevolgd als voor GEKB. Aangenomen is dat als de leiding zich bevindt tussen de binnenteen en buitenkruin van de dijk $P_{GEBU,\overline{leiding}}$ gelijk is aan 1. Praktisch gezien betekent dit dat elke leiding in de binnenteen of buitenkruin van de dijk tot een ontoelaatbaar grote additionele bijdrage aan de overstromingskans leidt.

2.3.4 STBI en STBU

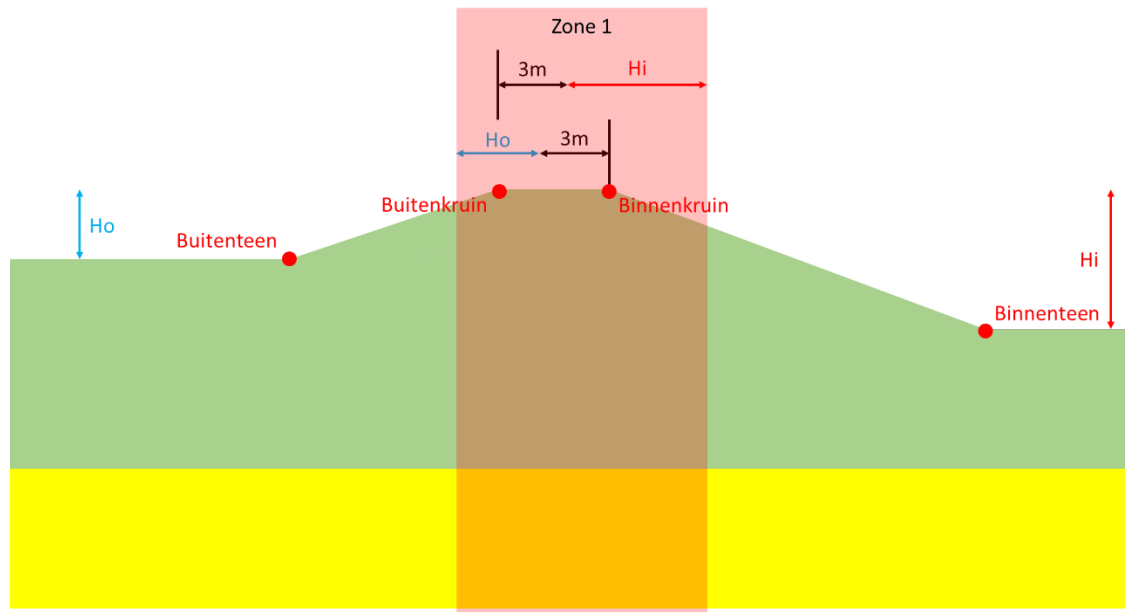
2.3.4.1 Faaldefinitie

Voor wat betreft afschuiven binnentalud (STBI) en afschuiven buitentalud (STBU) wordt de zoneringsregel uit de Handreiking Constructief ontwerpen gehanteerd, waar ook in het Technisch Rapport Actuele Sterkte (TRAS) (ENW, 2009) naar wordt gerefereerd.

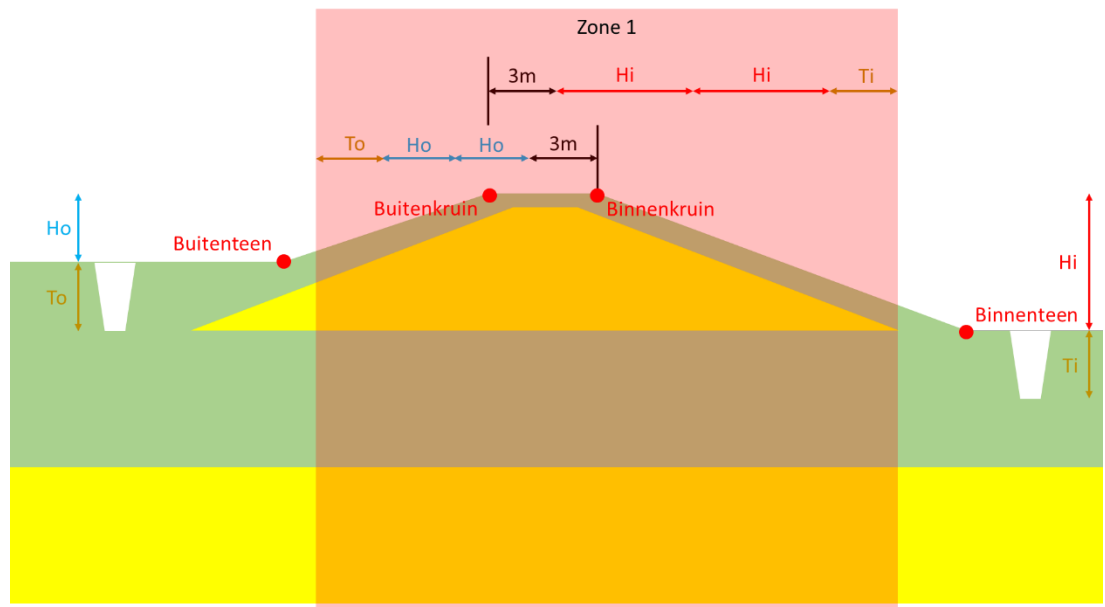
Dit houdt in dat voor bepaling van de kans op STBI of STBU alleen glijcirkels worden beschouwd waarvan het intredepunt zich bevindt in zone 1, en rivierwaarts daarvan in geval van STBI; en landwaarts daarvan in geval van STBU. Zone 1 is gedefinieerd in Figuren 2.5 en 2.6 voor dijken met respectievelijk een klei- en zandkern. In Figuur 2.7 is voor STBI schematisch een glijcirkel weergegeven² die tot falen leidt.

Er is niet gekozen voor de gedetailleerde of geavanceerde "Restbreedte-bij-Overhoogte" methode uit het TRAS, omdat deze lastig te implementeren is en alleen voor dijken met een significante overhoogte significant voordeel zal opleveren ten opzichte van de gebruikte zoneringsregel. In de in de faalkansanalyse doorgerekende dwarsprofielen is geen sprake van significante overhoogte.

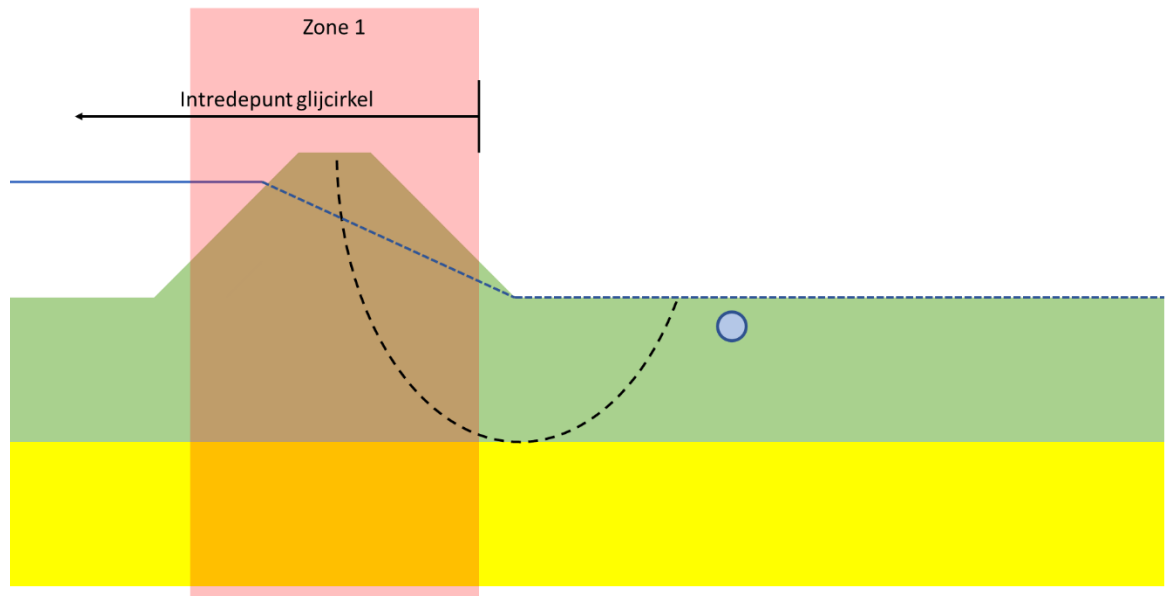
² Dit is een iets andere faaldefinitie dan in WBI2017: daarin worden alleen glijcirkels beschouwd met het intredepunt in de bovenste helft of kruin van de dijk.



Figuur 2.5 Definitie zone 1 voor een kleidijk



Figuur 2.6 Definitie zone 1 voor een zanddijk



Figuur 2.7 Voorbeeld glijvlak afschuiven binnentalud (STBI) waarbij sprake is van falen

In het KPR memo (KPR 2018) wordt een werkwijze gegeven voor macrostabiliteit bij golfoverslag. Deze werkwijze is hier niet toepast, omdat verwacht wordt dat het effect op de additionele bijdrage van leidingfalen op de overstromingskans beperkt is.

De stabiliteitsberekeningen zijn met D-Stability uitgevoerd (zie paragraaf 2.7). Voor STBI is het UpliftVan model gebruikt, voor STBU het Bishop model.

2.3.4.2 Bepaling additionele kans door leidingfalen

De additionele kans op STBI ten gevolge van leidingfalen wordt als volgt berekend:

$$P_{STBI,A} = P_{STBI,leiding} - P_{STBI,\overline{leiding}} \quad Eq.(4)$$

Waarin:

- $P_{STBI,A}$ additionele kans op STBI (per jaar);
- $P_{STBI,leiding}$ kans op STBI gegeven leidingfalen (per jaar);
- $P_{STBI,\overline{leiding}}$ kans op STBI gegeven geen leidingfalen (per jaar);

De kans op STBI (en ook STBU) wordt berekend uit de veiligheidsfactor met:

$$P = 1 - \phi \left(\frac{\left(\frac{SF}{\gamma_n} - 0.41 \right)}{0.15} \right) \quad Eq.(5)$$

Waarin:

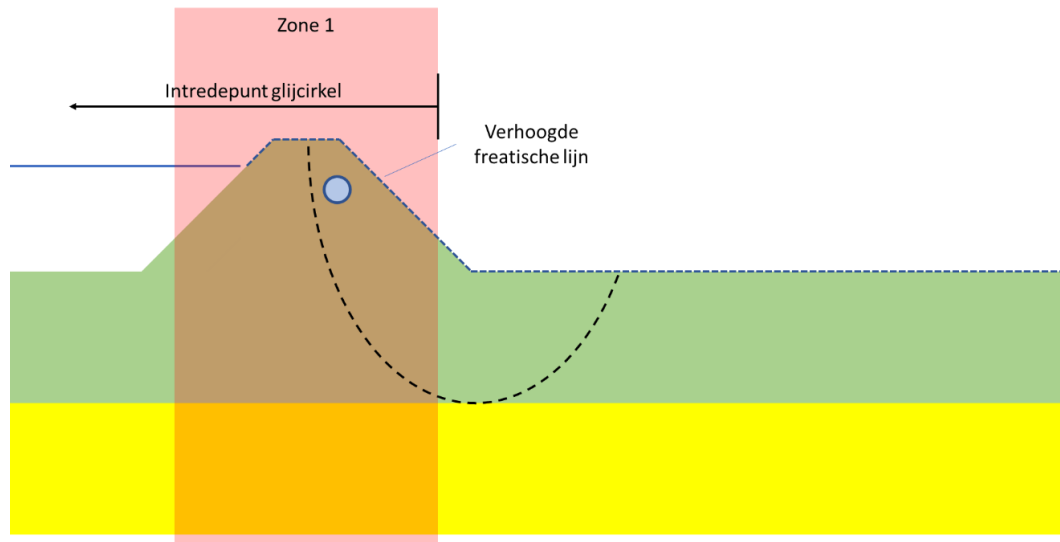
- P kans, $P_{STBI,leiding}$, $P_{STBI,\overline{leiding}}$, $P_{STBU,leiding}$ or $P_{STBU,\overline{leiding}}$ (per jaar);
- γ_n model factor van het glijvlakmodel (-);
- SF veiligheidsfactor berekend met D-Stability $SF_{STBI,leiding}$, $SF_{STBI,\overline{leiding}}$, $SF_{STBU,leiding}$ of $SF_{STBU,\overline{leiding}}$ (-).

Aanname is dat bovenstaande kalibratieformule ook toepasbaar is voor situaties met een gefaalde leiding (erosiekrater of volledige verzadiging van het dijklichaam).

$SF_{STBI,\overline{leiding}}$ wordt berekend met een "standaard" D-Stability berekening. Dit is de basisberekening.

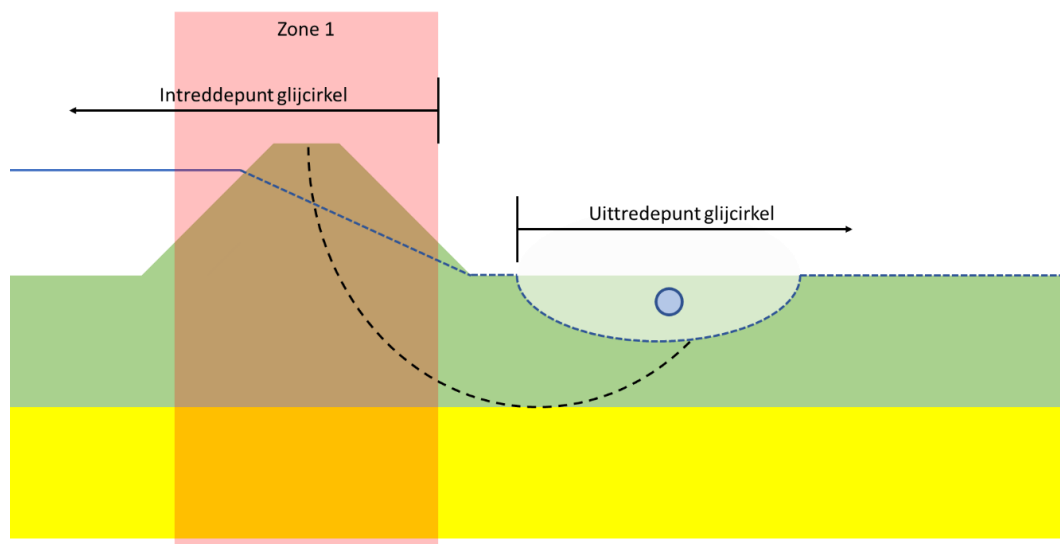
De kans op STBI en STBU wordt beïnvloed door zowel sluipend als gapend lek. In geval van gapend lek, worden leidingen in de kruin niet beschouwd, aangezien kraters bovenin de dijk tot een afname van de kans op afschuiven leiden.

$SF_{STBI,leiding,sluipend}$ wordt berekend met een D-Stability berekening met een verhoogde freatische lijn (faalpad 1d), d.w.z. de basis berekening wordt zodanig veranderd dat de freatische lijn tussen de binnen- en buitenteen van de dijk aan het maaiveld ligt, zie Figuur 2.8. Dit geldt alleen voor leidingen die in de dijk liggen (zie paragraaf 2.4). Voor leidingen buiten de dijk zal het effect van sluipend lek op de freatische lijn en daarmee de kans op STBI beperkt zijn.



Figuur 2.8 Schematische weergave berekening STBI met sluipend lek na falen leiding in dijk (alleen relevant voor leidingen die in de dijk liggen)

$SF_{STBI,leiding,krater}$ wordt berekend met een D-Stability berekening waarin een erosiekrater is opgenomen (faalpaden 2d en 3d), d.w.z. de basisberekening inclusief een erosiekrater, waarbij de freatische lijn zodanig wordt aangepast dat er zich geen water in de erosiekrater bevindt, en waarbij het uitredepunt van de glijcirkel gedwongen wordt in de erosiekrater te liggen, zie Figuur 2.9.



Figuur 2.9 Schematische weergave berekening STBI met krater door leidingfalen

Voor STBU wordt dezelfde aanpak als voor STBI gevolgd.

$SF_{STBU,leiding}$ wordt berekend met een “standaard” D-Stability berekening. Dit is de basisberekening.

$SF_{STBU,leiding,sluipend}$ wordt berekend met een D-Stability berekening met een verhoogde freatische lijn (faalpad 1e), d.w.z. de basis berekening wordt zodanig veranderd dat de freatische lijn tussen de binnen- en buitenteen van de dijk aan het maaiveld ligt. Dit geldt ook hier alleen voor leidingen die in de dijk liggen (zie paragraaf 2.4).

$SF_{STBU,leiding,krater}$ wordt berekend met een D-Stability berekening, waarin een erosiekrater is opgenomen, d.w.z. de basisberekening inclusief een erosiekrater, waarbij de freatische lijn zodanig wordt aangepast dat er zich geen water in de erosiekrater bevindt, en waarbij het uittredepunt van de glijcirkel gedwongen wordt in de erosiekrater te liggen. De afwezigheid van water in de krater is een conservatief uitgangspunt.

De straal van de erosiekrater die in de D-Stability berekeningen is geschematiseerd, is de conservatieve waarde van de straal zoals beschreven in paragraaf 2.2.3.

Opgemerkt wordt dat bij het hanteren van de hierboven beschreven methodiek bij STBI en STBU met leidingfalen geen 3D-effecten zijn beschouwd. Afschuiven wordt alleen op doorsnedeniveau beschouwd (net als in WBI/BOI overigens). Met name bij STBI en STBU is dit waarschijnlijk een conservatief uitgangspunt, aangezien de breedte van een afschuiving vaak veel groter zal zijn dan de breedte van de erosiekrater of de breedte van de zone waarin volledige verzadiging optreedt.

2.3.5 STPH

2.3.5.1 Faaldefinitie

Het optreden van een zandmeevoerende wel c.q. piping (STPH) bestaat uit drie deelmechanismen: opbarsten, heave en piping. Er kan pas sprake zijn van falen door piping als alle drie deelmechanismen optreden (mits relevant). Dat betekent dat de kans op piping bepaald wordt door het deelmechanisme met de kleinste kans (P) of hoogste betrouwbaarheidsindex (B):

$$P_{STPH} = \min(P_{f_{opbarsten}}, P_{f_{heave}}, P_{f_{piping}})^3 \quad \text{of} \quad \beta_{STPH} = \max(\beta_{opbarsten}, \beta_{heave}, \beta_{piping}) \quad \text{Eq.(6)}$$

Leidingfalen kan invloed hebben op alle drie de deelmechanismen. Dit betekent dat met leidingfalen de kans op piping door een ander deelmechanisme bepaald kan worden dan zonder leidingfalen.

2.3.5.2 Bepaling additionele kans door leidingfalen

De additionele kans op piping ten gevolge van leidingfalen wordt als volgt berekend:

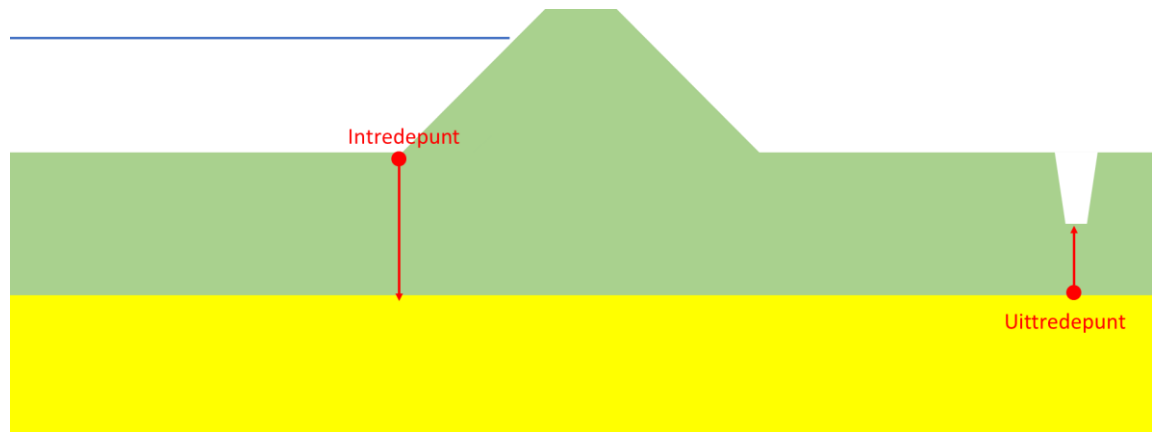
$$P_{STPH,A} = P_{STPH,leiding} - P_{STPH,\overline{leiding}} \quad \text{Eq.(7)}$$

Voor de vergelijkingen wordt verwezen naar de gedetailleerde toets in Bijlage III van de Ministeriele Regeling (WBI2017). Hierin wordt ook de vergelijking gegeven waarmee de veiligheidsfactor tegen opbarsten, heave en piping wordt omgerekend in de kans op piping, d.w.z. $P_{STPH,\overline{leiding}}$ of $P_{STPH,leiding}$. Net als bij STBI en STBU is ook hier aangenomen dat deze kalibratieformule ook toepasbaar is voor situaties met een gefaalde leiding.

Aangenomen is dat alleen gapend lek invloed heeft op de kans op piping.

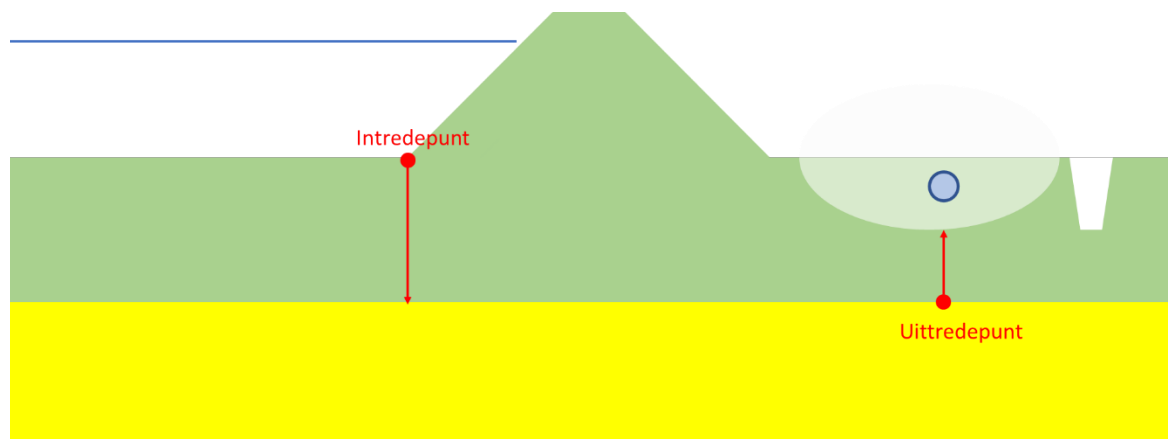
³ Dit is onder de conservatieve aanname dat de drie deelmechanismen volledig gecorreleerd zijn. In werkelijkheid zal er echter geen volledige correlatie zijn.

In de berekeningen zonder leidingfalen is aangenomen dat het intredepunt altijd bij de buitenteen van de dijk ligt, zie Figuur 2.10. In veel gevallen is dit een conservatieve aanname. Hierna wordt (stapsgewijs) het uittredepunt bepaald, d.w.z. de locatie waarin $P_{STPH,leiding}$ het grootst is.



Figuur 2.10 Schematisering zonder leidingfalen = $P_{STPH,leiding}$

Voor leidingen aan landzijde van de dijk wordt bij falen van de leiding het uittredepunt eveneens (stapsgewijs) bepaald, d.w.z. de locatie waarin $P_{STPH,leiding}$ maximaal is, zie Figuur 2.11. De krater hoeft niet noodzakelijk de pipinggevoelige zandlaag te bereiken. Ook de reductie van de dikte van de deklaag kan leiden tot een toename van de kans op STPH.



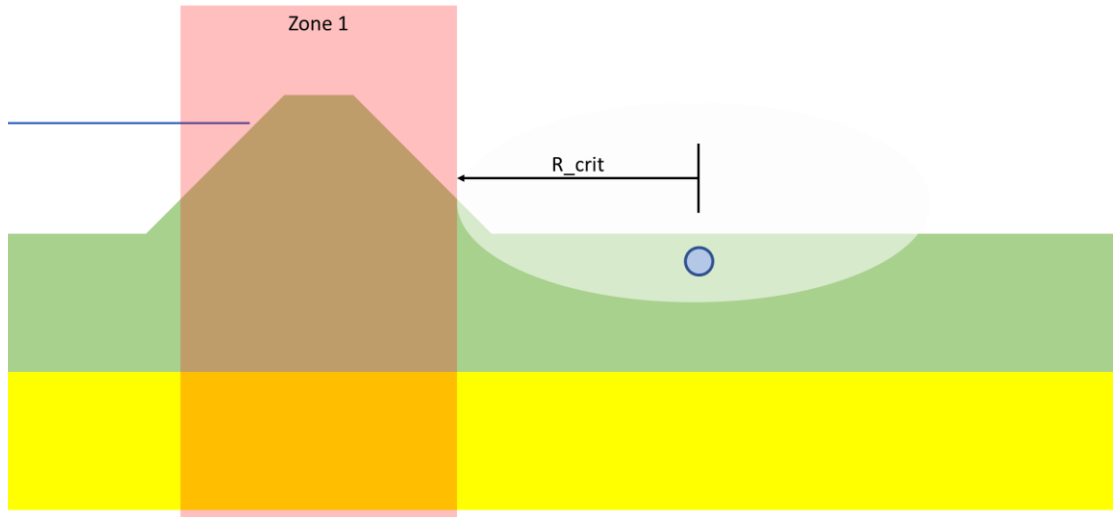
Figuur 2.11 Schematisering met erosiekrater aan landzijde van de dijk = $P_{STPH,leiding}$.

Omdat het intredepunt aan de buitenteen van de dijk is aangenomen, kan een krater aan rivierzijde van de dijk niet leiden tot een toename van de kans op STPH, tenzij de krater tot voorbij de buitenteen van de dijk komt. Die laatste situatie is echter niet beschouwd. Dat betekent dat aangenomen is dat leidingen aan rivierzijde van de dijk geen invloed hebben op de kans op STPH. Dit betekent dat de filters optimistisch kunnen zijn als in de beoordeling of bij het ontwerp het uittredepunt verder richting rivier is aangenomen.

2.3.6

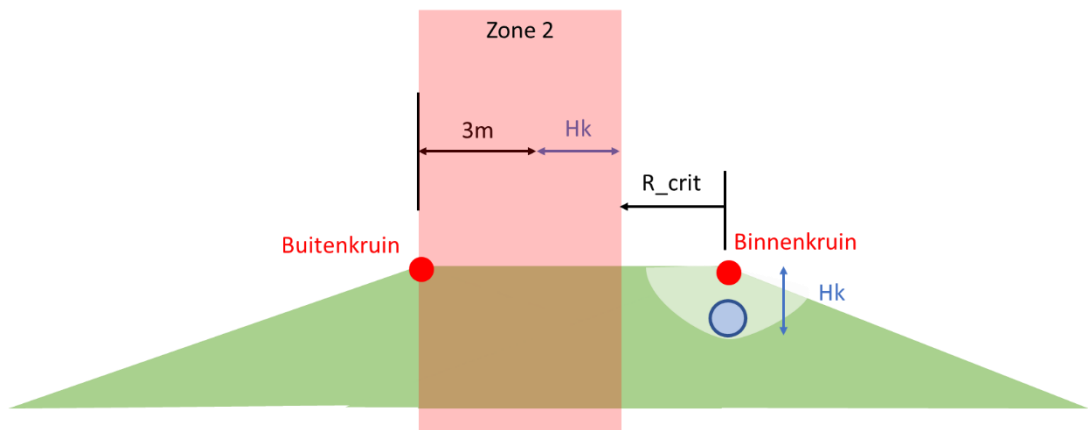
Direct dijkfalen

Van direct falen is sprake als, in geval van gapend lek, de erosiekrater zone 1 aantast, zoals gedefinieerd in paragraaf 2.3.4 en weergegeven in Figuur 2.12, waarin R_{crit} de kritieke afstand tussen de leiding en zone 1 is.



Figuur 2.12 Definitie zone 2 en direct falen door erosiekrater bij gapend lek in leiding in (binnen)kruin die zone 2 snijdt

In geval van een leiding in de binnenkruin is daarnaast sprake van direct falen als de erosiekrater zone 2 aantast, zoals weergegeven Figuur 2.13. Hierin is H_k de diepte van de krater. De breedte van zone 2 is dus afhankelijk van de kraterdiepte.



Figuur 2.13 Definitie zone 2 en direct falen door erosiekrater bij gapend lek in leiding in (binnen)kruin die zone 2 snijdt

De kans dat de erosiekrater zone 1 of 2 snijdt, is gelijk aan:

$$Z_{DF} = R - R_{crit} \quad \text{Eq.(8)}$$

Waarin:

- R is de straal van de erosiekrater (m), die bepaald is zoals beschreven in paragraaf 2.2.4;
- R_{crit} is de kritieke afstand tussen de leiding en zone 1 of 2 (m).

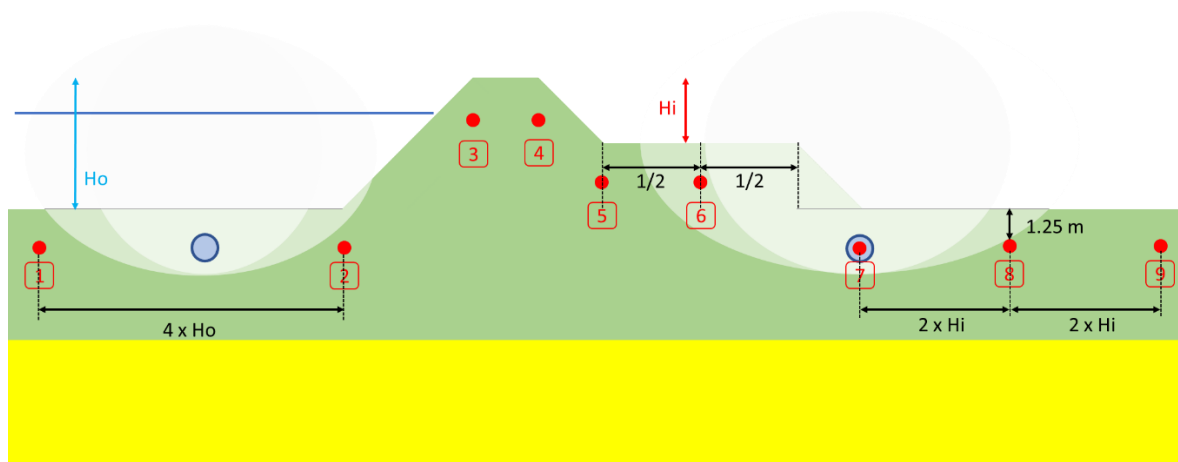
Er geldt het volgende:

Als $Z_{DF} < 0$, dan $P_{DF} = 1$

Als $Z_{DF} > 0$, dan $P_{DF} = 0$

2.4 Ligging leidingen in profiel en diepteligging

Figuur 2.14 geeft de 9 leidinglocaties die in de geïntegreerde faalkansanalyses zijn gebruikt. In cases waar geen binnenberm aanwezig is, vervallen locaties 5 en 6.



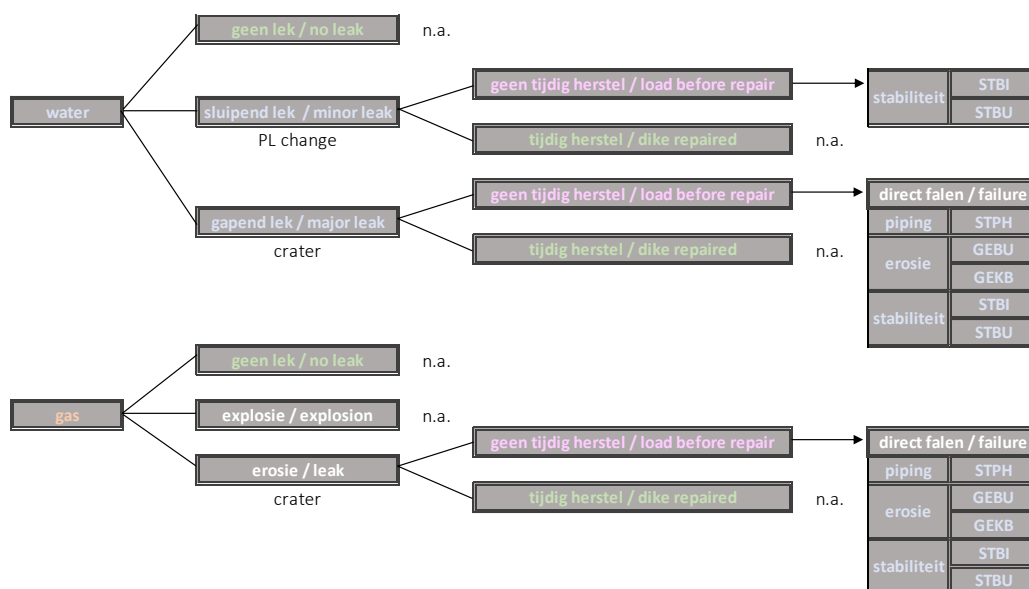
Figuur 2.14 De 9 beschouwde leidinglocaties in het profiel en diepteligging (alleen voor locatie 8 weergegeven)

Uit praktijkervaring is gebleken dat de diepteligging van de leiding bijna altijd meer is dan 0,8 m en gemiddeld iets meer dan een meter bedraagt. In de berekeningen is aangenomen dat de gronddekking op de leiding 1.25 m bedraagt. Dit kan beschouwd worden als een 95% bovengrenswaarde.

2.5 Integrale faalkansanalyse

Per combinatie van profiel, ligging van de leiding en leidingkenmerken is een integrale faalkansanalyse uitgevoerd. Dit komt neer op een kwantitatieve uitwerking van alle faalpaden die zijn beschreven in paragraaf 2.1 en vervolgens het combineren van de kansen per faalpad tot een overstromingskans, zowel met als zonder leidingfalen.

Figuur 2.15 geeft een iets meer gedetailleerde uitwerking van de gebeurtenissenboom in paragraaf 2.1.



Figuur 2.15 Specifieke gebeurtenissenbomen voor vloeistof- en gasleidingen

Bij aanvang van het project was het de intentie om de faalkansanalyses getrappt uit te voeren en te beginnen met een grove analyse, en daar waar nodig een meer gedetailleerde analyse. In de grove analyse ("stap 1: klassiek") worden geen faalkansen van de leiding meegenomen (leidingfaalkans = 1) en wordt ook geen hersteltijd meegenomen (kans op hoogwater binnen herstel tijd = 1). In de gedetailleerde analyse ("stap 2: probabilistisch grof") worden leidingfaalkansen en hersteltijd wel meegenomen.

Gedurende het project bleek dat de extra analyses in de gedetailleerde analyse geheel geautomatiseerd konden worden doorgevoerd. Daarom is ervoor gekozen om de grove analyse geheel achterwege te laten en de methode voor de bepaling van de filters volledig te baseren op de gedetailleerde analyse.

2.5.1 Bepaling faalkansbijdrage door leidingfalen

De faalkansbijdrage door leidingfalen (bijdrage aan de overstromingskans) wordt bepaald als som van de kans van optreden van de verschillende dijkfaalmechanismen die potentieel ongunstig worden beïnvloed door leidingfalen.

Per faalpad wordt de faalkansbijdrage door leidingfalen (dus de additionele kans op overstromen) als volgt berekend, waarbij voorkomen wordt dat de faalkans zonder leidingfalen wordt meegerekend (dubbeltelling):

$$P_i = P_{leiding} \cdot P_{hw} \cdot P_{dijkfaalmechanisme,A} \quad Eq.(9)$$

met:

P_i	kans op faalpad i (per jaar);
$P_{leiding}$	kans op leidingfalen (per jaar);
P_{hw}	kans op hoogwater binnen herstelperiode (per leidingfaalgeval);
$P_{dijkfaalmechanisme,A}$	additionele conditionele kans op dijkfaalmechanisme ten gevolge van leidingfalen (per jaar). Omdat we één hoogwater per jaar aannemen, is "per jaar" gelijk aan "per hoogwater".

$$P_{dijkfaalmechanisme,A} = P_{dijkfaalmechanisme,leiding} - P_{dijkfaalmechanisme,\overline{leiding}}$$

met:

$P_{dike\ mechanism,leiding}$	kans op dijkfaalmechanisme gegeven leidingfalen (per jaar)
$P_{dike\ mechanism,\overline{leiding}}$	kans op dijkfaalmechanisme gegeven <u>geen</u> leidingfalen (per jaar)

De totale faalkansbijdrage door leidingfalen wordt als volgt berekend (waarbij aangenomen wordt dat de verschillende dijkfaalmechanismen onafhankelijk van elkaar zijn):

$$P_f = \sum_{j=1} P_{leiding,j} \cdot P_{hw,j} \cdot (P_{DF,j} \cup P_{GEKB,A,j} \cup P_{GEBU,A,j} \cup P_{STBI,A,j} \cup P_{STBU,A,j} \cup P_{STPH,A,j}) \quad Eq.(10)$$

En:

$$P_{STBI,A,j} \cup P_{STBU,A,j} = P_{STBI,A,j} + P_{STBU,A,j} - P_{STBI,A,j} \cdot P_{STBU,A,j} \quad Eq.(11)$$

Waarin:

- P_f totale faalkans (per jaar);
- $P_{leiding,j}$ kans op leidingfalen voor leidingtype j (per jaar);
- $P_{hw,j}$ kans op hoogwater binnen herstelperiode (per leidingfaalgeval);
- $P_{DF,j}$ kans op direct falen (per jaar);
- $P_{...A,j}$ additionele kans (per jaar) op de dijkfaalmechanismen GEKB, GEBU, STBI, STBU en STPH. Voor bepaling wordt verwezen naar paragraaf 2.2.

De kans $P_{leiding}$ heeft betrekking op de correlatielengte van de leiding van $\Delta L = 50 \text{ m}$. In Bijlage G (Beschouwing referentielengte) is te zien dat de correlatielengte van toepassing is voor alle bezwijkmechanismen van de leiding⁴. Dit is in overeenstemming met de uitgangspunten bij de faalkanseis P_{eis} , waarop in paragraaf 2.6 zal worden ingegaan.

2.5.2 Bepaling kans hoogwater binnen hersteltijd

De kans op een hoogwater voordat de schade door leidingfalen is hersteld, hangt af van de hersteltijd en de duur van het hoogwater. Eén hoogwatergebeurtenis binnen een referentieperiode van 1 jaar is beschouwd. De kans P_{hw} kan dan als volgt worden berekend:

$$P_{hw} = \frac{t_{hoogwater} + t_{herstel}}{t_{ref}} \quad \text{Eq.(12)}$$

Met:

- $t_{hoogwater}$ duur van het hoogwater;
- $t_{herstel}$ ontdek- en hersteltijd van gapend of sluipend lek;
- t_{ref} referentieperiode waarbinnen zowel de leiding faalt als een hoogwater optreedt

Waarbij de eenheden van $t_{hoogwater}$, $t_{herstel}$ en t_{ref} hetzelfde moeten zijn, bijvoorbeeld weken.

Voor een sluipend lek wordt aangenomen dat deze niet opgemerkt wordt en dus ook niet hersteld wordt. Daarom is aangenomen dat $P_{hw,sluipend} = 1$ per jaar.

Voor een gapend lek is aangenomen dat $t_{hoogwater} = 10$ dagen, $t_{herstel} = 8$ dagen (meer dan een week is ruim voor de kleine kraters bij de kleine diameter leidingen) en $t_{ref} = 365$ dagen, waarmee:

$$P_{hw,gapend} = \frac{t_{hoogwater} + t_{herstel}}{t_{ref}} = \frac{10+8}{365} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ per jaar} \quad \text{Eq.(13)}$$

2.6 Toetsing

De toetsing van de bijdrage van leidingfalen aan de overstromingskans, P_f , beschreven in paragraaf 2.5.1, wordt gebaseerd op de totale faalkansbijdrage van de leidingen (ofwel de additionele bijdrage) ten opzichte van de maximale toelaatbare overstromingskans of de signaleringswaarde van een wettelijk dijktraject (P_{norm}).

Hierbij wordt uitgegaan van het volgende:

- Uit eerdere POV projecten is gebleken dat grondvervormingen bij hoogwater relatief gering zijn als de waterkeringen aan de gestelde waterveiligheidseisen voldoen en dat er vanuit gegaan kan worden dat leidingfalen en dijkfalen niet gecorreleerd zijn.
- De kans op een overstroming door leidingfalen wordt berekend. Een overstroming die niet het gevolg is van leidingfalen is dus niet relevant.

⁴ Hierbij wordt opgemerkt dat deze correlatielengte op een pragmatische manier is vastgesteld en dat wellicht in de toekomst kwantitatief onderbouwde differentiatie mogelijk is.

- Gegeven dat de leiding is gefaald, ligt de locatie van de (mogelijke) overstroming vast en is het niet nodig om voor een dijkfaalmechanisme een lengte-effect in rekening te brengen.
- De faalkans op doorsnedeniveau wordt getoetst aan de toelaatbare overstromingskans van het dijktraject P_{norm} , maal de faalkansruimte die we reserveren voor leidingfalen, ω , gedeeld door de lengte-effectfactor N:

$$P_{eis} = \frac{P_{norm} \cdot \omega}{N}. \quad Eq.(14)$$

- Binnen de hier gehanteerde methodiek wordt er vanuit gegaan dat een bijdrage van leidingfalen van alle parallelle leidingen in het dijktraject aan de overstromingskans van 1% van de trajectnorm toelaatbaar is, oftewel $\omega = 0.01$. Dat is een conservatief uitgangspunt. Uitgangspunt in deze studie is verder dat de 1% betrekking heeft op alle parallelle leidingen in het dijktraject tezamen. Zo kan worden voorkomen dat bij toepassing van dit criterium op alle parallelle leidingen in het traject de gezamenlijke faalkansbijdrage toch significant wordt. De beschikbare faalkansruimte kan uit de post “overig” van 30% worden genomen.
- De vergelijking van de lengte-effectfactor N voor de parallelle leidingen is:

$$N = 1 + \frac{a \cdot L_{leiding}}{b} \quad Eq.(15)$$

- $L_{leiding}$ is de totale lengte van de leidingen in het traject. Gegeven de gemiddelde trajectlengte van ca 20 km in het beheergebied van Waterschap Rivierenland en de mogelijke aanwezigheid van meerdere parallelle leidingen is $L_{leiding} = 50,000 \text{ m}$ een voldoende veilige schatting.
- a is het deel van de leidingen dat een significante bijdrage levert aan de kans op overstroming. Het dijkprofiel, de dijkopbouw, het type leiding en de locatie van de leiding varieert langs de dijk. Een deel van de leidingen zullen dus een verwaarloosbare invloed hebben op de overstromingskans door leidingfalen. Geschat wordt dat $a = 0.01$, waarbij onduidelijk is in hoeverre dit een optimistische of juist conservatieve schatting is. Dat zou uit een consequentanalyse van de filters bij een waterschap moeten volgen. In de toekomst kan het dus zo zijn dat op basis van uit te voeren studies blijkt dat deze waarde verhoogd of verlaagd dient te worden.
- b wordt gelijk genomen aan de correlatielengte van de leiding, $\Delta L = 50 \text{ m}$. De onderbouwing volgt uit de notitie “Beschouwing referentielengte” van Spiekhout en Vrouwenvelder, opgenomen in Bijlage G. Het komt dit erop neer dat leidingfalen voor een groot deel bepaald wordt verplaatsingen (zoals zettingen) in de ondergrond en daarmee door fluctuaties in de ondergrond. De kans op niet-grond gerelateerde oorzaken, zoals graafwerkzaamheden, lijkt bij een dijk vrij klein te zijn. Dit blijkt uit het feit dat het verschil tussen leidingfaalfrequenties met en zonder externe oorzaken bij zowel gas- als drinkwaterleidingen klein is (zie Bijlagen C en D). Het dient te worden opgemerkt dat deze correlatielengte op een pragmatische manier is vastgesteld en dat wellicht in de toekomst kwantitatief onderbouwde differentiatie naar leiding bezwijkmechanismen mogelijk is⁵.
- Bij de berekening van de lengte-effectfactor volgt dan:

$$N = 1 + \frac{0.01 \cdot 50,000}{50} \approx 10 \quad Eq.(16)$$

⁵ Feitelijk gaat het bij het lengte-effect om een combinatie van dijkfalen en leidingfalen. De correlatielengtes voor dijkfaalmechanismen zijn gelijk of groter dan de 50 m voor de leiding. Daarmee is het aanhouden van $\Delta L=50 \text{ m}$ in het bepalen van de lengte-effect factor conservatief.

Daarmee wordt de doorsnede-eis:

$$P_{eis} = \frac{P_{norm} \cdot \omega}{N} = \frac{P_{norm} \cdot 0.01}{10} \quad Eq.(17)$$

Voor elk van de geïntegreerde faalkansanalyses wordt getoetst of de bijdrage van leidingfalen aan de overstromingskans, P_f , niet groter is dan P_{eis} . Dit heeft dus betrekking op de faalkansbijdrage voor alle faalpaden waarbij dijkfalen veroorzaakt wordt of ongunstig beïnvloed wordt door leidingfalen. Bij de afleiding van de filters zijn dijkprofielen met een variërende P_{norm} beschouwd (zie tabel 2.3) en is er dus getoetst aan verschillende P_{eis} -waarden. Er is op deze manier een bandbreedte aan verschillende normen meegenomen.

Voorwaarde voor de toetsing van een leiding volgens bovenstaande methode is dat men eerst moet nagaan of er sprake is van een 'normale situatie' conform een standaard leidingontwerp en dat er geen afwijkingen aan de orde zijn met bijvoorbeeld grote verschilzettingen over korte afstanden.

2.7 Software

De geïntegreerde faalkansanalyses zijn grotendeels geautomatiseerd uitgevoerd via Python scripts. Geautomatiseerd uitgevoerd is onder meer:

- genereren van erosiekraters bij gapend lek en aangepaste freatische lijn bij sluipend lek
- aansturen van de software D-Stability, versie 18.1.0.564, t.b.v. STBI en STBU berekeningen met en zonder erosiekraters of aangepaste freatische lijn
- uitvoeren van piping berekeningen met en zonder erosiekraters
- omrekenen veiligheidsfactoren in faalkansen
- combineren van conditionele faalkansen tot overstromingskansen met en zonder leidingfalen.

Voor het faalmechanisme GEKB zijn handmatig berekeningen met Hydra-NL gedaan.

Voor afleiding van de vorm van de beslisbomen is gebruik gemaakt van een decision tree tool in Python/Numpy ("decisiontreeclassifier"). Zie meer informatie in Bijlage B.

2.8 Geselecteerde dijkprofielen met grondopbouw

Er is voor gekozen om dwarsprofielen van dijken die in het beheergebied van Waterschap Rivierenland liggen te selecteren. Hierbij is het selectie criterium geweest dat er voldoende variatie is in:

- deklaagdikte, variërend van 12 m in het westen tot 1 m of minder in het oosten
- profielen met en zonder opdrijven
- grondopbouw, variërend van het voorkomen van veenlagen en humeuze kleilagen in het westen tot meer klei en zandige lagen in het oosten
- dijksopbouw. Hoofdzakelijk kleidijken, maar ook kleidijken die in de jaren 90 aan de binnenzijde versterkt zijn met (met klei afgedekt) zand
- dijkprofiel: over het algemeen vrij uniform, maar variatie in steilheid van taluds en vorm van stabiliteitsbermen.

Dit heeft uiteindelijk geleid tot 12 dwarsprofielen, waarvan voldoende gegevens (zoals grondgegevens) beschikbaar waren. De belangrijkste kenmerken van deze profielen zijn gegeven in tabel 2.3. Voor details met betrekking tot de selectie en kenmerken per profiel wordt verwezen naar Bijlage A. Locaties van de dwarsprofielen worden niet gegeven in verband met gemaakte afspraken.

Uitgangspunt voor de geïntegreerde faalkansanalyses is dat gemiddeld beschouwd in alle profielen elk faalmechanisme zonder leidingfalen juist voldoet aan de faalkanseis volgens de norm. Hiertoe moesten de meeste profielen worden aangepast. In geval van de faalmechanismen STBI en STBU is dit gedaan door de geometrie van de dijk aan te passen, of (als dit niet mogelijk is) grondparameters aan te passen, zonder daarbij op onrealistische waarden uit te komen. Er waren voor SPTH nog geen parameters beschikbaar. Startwaarden van de parameters zijn uit het WTI-SOS ontnomen en daarna aangepast om precies op de faalkanseis uit te komen, wederom zonder op onrealistische waarden uit te komen.

Tabel 2-3 Overzicht cases in faalkansanalyses en belangrijkste kenmerken

Case #:	Watersysteem Boven/beneden rivier	Norm [1/jaar]	Kruin breedte [m]	Minimale dikte deklaag [m]	Dijk kern opbouw Zand/klei	Berm? Ja/nee	Berm breedte [m]
1	boven	30.000	8.6	3.6	zand + klei	Nee	-
2	beneden	10.000	7.5	10.4	klei	Ja	54
3	beneden	30.000	5.5	11.0	Klei +zand	Ja	32
4	boven	30.000	7.0	8.5	klei	Nee	-
5	boven	30.000	12.5	7.3	Klei +zand	Nee	-
6	boven	30.000	7.0	7.2	Klei + zand	Nee	-
7	boven	30.000	7.0	8.9	Klei + zand	Nee	-
8	boven	3.000	6.0	3.0	klei	Ja	5
9	beneden	10.000	8.2	12.5	Klei + zand	Nee	-
10	boven	10.000	5.5	3.3	klei	Ja	11
11	boven	30.000	7.4	10.0	klei	Ja	8
12	beneden	30.000	15.6	10.0	klei	Ja	30

2.9 Overzicht doorgerekende combinaties

De geïntegreerde faalkansanalyses zijn uitgevoerd op elke mogelijke combinatie van:

- 12 dijkprofielen met grondopbouw
- 7 tot 9 leidingposities (afhankelijk van aanwezigheid berm)
- 90 drinkwaterleidingen, met combinaties van:
 - Materiaal AC, Grijs Gietijzer, Nodulair Gietijzer, Staal, PE, PVC
 - Diameter [mm] 90, 125, 200, 400, 700 (bovengrenzen per klasse)
 - Druk [bar] 3, 4, 6 (bovengrenzen)
- 72 gasleidingen, met combinaties van:
 - Materiaal AC, Grijs Gietijzer, Nodulair Gietijzer, Staal, PE, PVC
 - Diameter [mm] 125, 200, 315 (bovengrenzen)
 - Druk [bar] 0.1, 1, 4, 8 (bovengrenzen)
- 5 dijkfaalmechanismen (tezamen leidend tot één overstromingskans):
 - Stabiliteit: STBI, STBU
 - Piping: SPTH
 - Erosie: GEBU, GEKB

Niet alle combinaties konden worden doorgerekend, met name door problemen in D-Stability die binnen het project niet eenvoudig konden worden opgelost. Verwachting is dat het effect op de uiteindelijke filters zeer beperkt is. Het totaal aantal doorgerekende cases komt daarmee op 14214.

2.10 Bepaling filters

2.10.1 Vorm

De filters hebben dezelfde vorm als de huidige filters in Bijlage III van de Ministeriele Regeling (WBI2017), dat wil zeggen beslisbomen, waarbij aan het einde van elke tak twee uitkomsten mogelijk zijn:

- Bijdrage leidingfalen aan overstromingskans verwaarloosbaar (FV)
- Verder beoordelen of ontwerpen (VB)

2.10.2 Methode

De in de voorgaande paragrafen beschreven methodiek is toegepast voor het verkrijgen van resultaten van de integrale faalkansanalyses. De resultaten, inclusief leiding- en dijkkenmerken, zijn in een database verzameld om verwerkt te worden tot beslisbomen. De methode die gebruikt is voor het bepalen van de beslisbomen is hieronder beschreven.

Per leidinglocatie (figuur 2.14 in paragraaf 2.4) zijn beslisbomen opgesteld. Voor leidingpositie 1 t/m 3 zijn de beslisbomen telkens van toepassing voor alle leidingen die liggen in de zone tussen de leidingpositie en de naastliggende leidingpositie richting rivier. Voor leidingposities 4 t/m 9 zijn de beslisbomen telkens van toepassing voor alle leidingen die liggen in de zone tussen de leidingpositie en de naastliggende leidingpositie richting land. Voorbeeld: de beslisboom behorend bij leidingpositie 5 is van toepassing op alle leidingen tussen leidingpositie 5 en 6.

Met behulp van histogrammen en Machine Learning classificatie zijn per leidinglocatie beslisbomen opgesteld. In Bijlage H is een aantal histogrammen opgenomen, waarin op de X-as “bins” zijn weergegeven van de ratio tussen de berekende additionele bijdrage aan de faalkans, P_f uit vergelijking (Eq 10) en de faalkanseis P_{eis} uit vergelijking (Eq 17), zoals gedefinieerd in paragraaf 2.6, en op de Y-as de kans op beschouwde cases per bin (som = 1)⁶. Alle cases die links van de rode lijn liggen voldoen aan de eis, alle cases rechts van de lijn voldoen niet (Er zijn dijkprofielen met een variërende P_{norm} beschouwd; zoals beschreven in paragraaf 2.6). In bijlage H worden ook de verschillende posities van de leidingen in het dijkprofiel beschouwd. De leidingpositie wordt aangeduid met label.

Omdat het aantal mogelijke takken in de boom bij bijvoorbeeld zes besliscriteria al snel extreem groot kan worden, is gebruik gemaakt van Machine Learning classificatie (een “non-parametric supervised learning method”) om per leidingpositie een eerste beslisboom te genereren. Voor een voldoende betrouwbare beslisboom is gekeken naar een aantal indicatoren. Zo mag het aantal false positives (onterecht goedkeuren) en false negatives (onterecht afkeuren) niet te hoog zijn, maar moet ook per tak van de beslisboom de dataset voldoende in balans zijn wat betreft goedkeuren en niet-goedkeuren. Dit kan ertoe leiden dat subsets van data op basis waarvan de beslisbomen zijn afgeleid (bijvoorbeeld twee naast elkaar gelegen leidingposities) samengevoegd moeten worden om aan de criteria te voldoen. Details zijn beschreven in Bijlage B.

⁶ Bij oneindig kleine bins zouden de histogrammen de probability density function (pdf) weergeven

3 Resultaten

In dit hoofdstuk worden de met de in het vorige hoofdstuk beschreven methodiek gegenereerde beslisbomen beschreven. Zoals beschreven in hoofdstuk 1 zijn deze beslisbomen bedoeld voor parallelle lagedruk gas- en drinkwaterleidingen met diameters kleiner dan 500 mm.

3.1 Beslisbomen voor beheersgebied Waterschap Rivierenland

De beslisbomen die met de ontwikkelde methode zijn uitgewerkt in een test case voor het beheersgebied van het Waterschap Rivierenland, zijn zo eenvoudig mogelijk gehouden. Machine Learning classificatie is gebruikt om zo veel mogelijk automatisch de beslisbomen te maken. Waar nodig is bijgestuurd om de structuur in de beslisbomen zo eenduidig mogelijk te houden.

In de beslisbomen zijn er voor elke tak in de boom per leidinglocatie twee mogelijke uitkomsten:

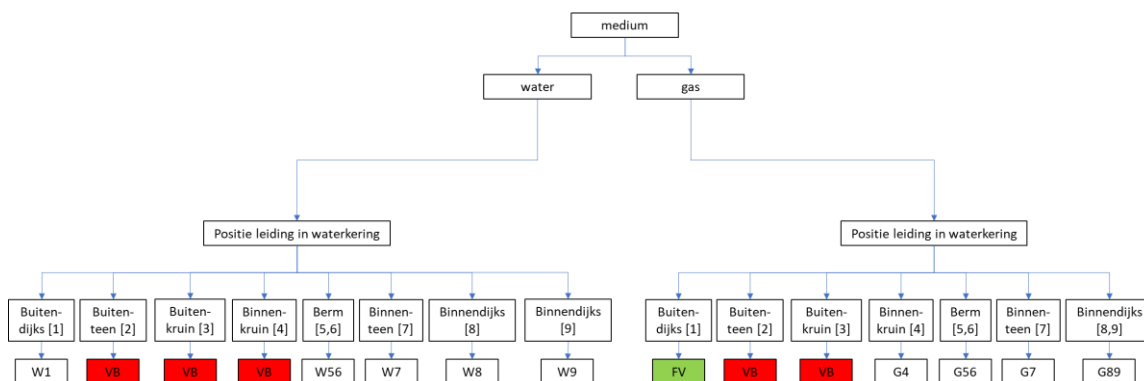
- FV = bijdrage van leidingfalen aan de overstromingskans is verwaarloosbaar (“voldoet”)
- VB = verder beoordelen of ontwerpen (“voldoet niet”)

Onderstaande figuur 3.1 geeft de “hoofdboom”, met doorverwijzingen naar de deelbomen per leidingpositie (W1, W2, etc) en medium (water/gas). Een aantal leidingposities zijn geclusterd, als uit de Machine Learning classificatie bleek dat dit het optimale filter opleverde. Voor een aantal leidingposities geldt dat in alle gevallen de bijdrage van leidingfalen aan de overstromingskans te groot is. Voor één leidingpositie bij de gasleidingen, in het voorland, geldt dat elke distributie leiding voldoet.

Voor het gebruik van het begrip “leidingpositie” bij het toepassen van de beslisbomen wordt verwezen naar de toelichting in paragraaf 2.10.2.

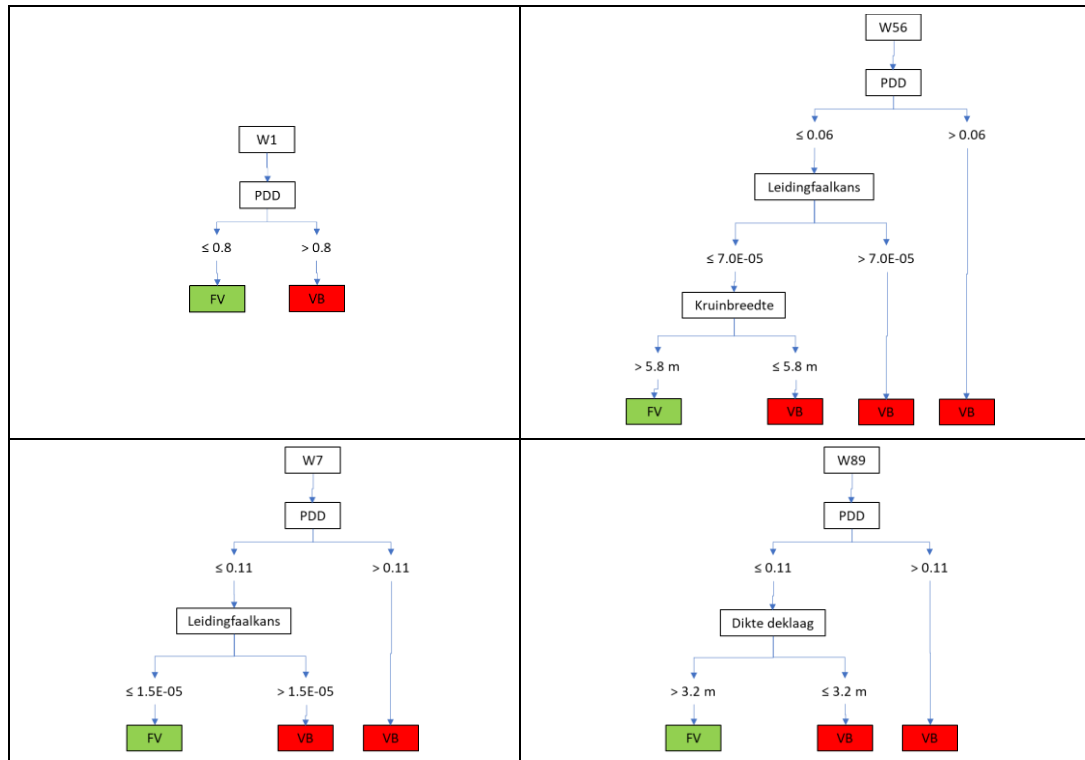
In de bomen komen de volgende besliscriteria voor:

- PDD: het product van de totale leidingdruk in bar (bij drinkwaterleidingen is dit de werkdruk en bij gasleidingen is dit de werkdruk plus atmosferische druk) en het kwadraat van de leidingdiameter in m;
- Leidingfaalkans in kans per jaar per m. Deze kunnen bepaald worden met behulp van tabellen 2-1 en 2-2 in paragraaf 2.2.2;
- Dikte deklaag aan binnenzijde van de dijk in m;
- Breedte berm aan binnenzijde van de dijk in m (indien er geen binnenberm is, is de breedte 0 m);
- Kruinbreedte van de dijk in m.



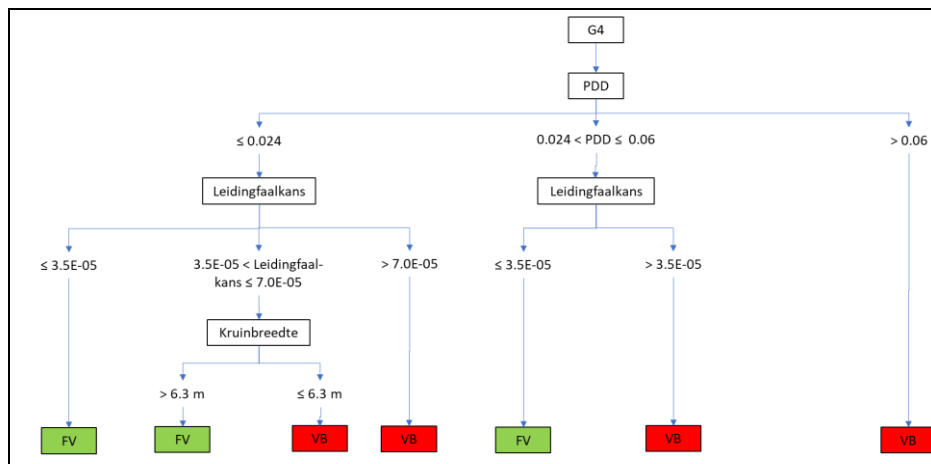
Figuur 3.1 Hoofdbeslisboom voor parallelle gas- en drinkwaterleidingen

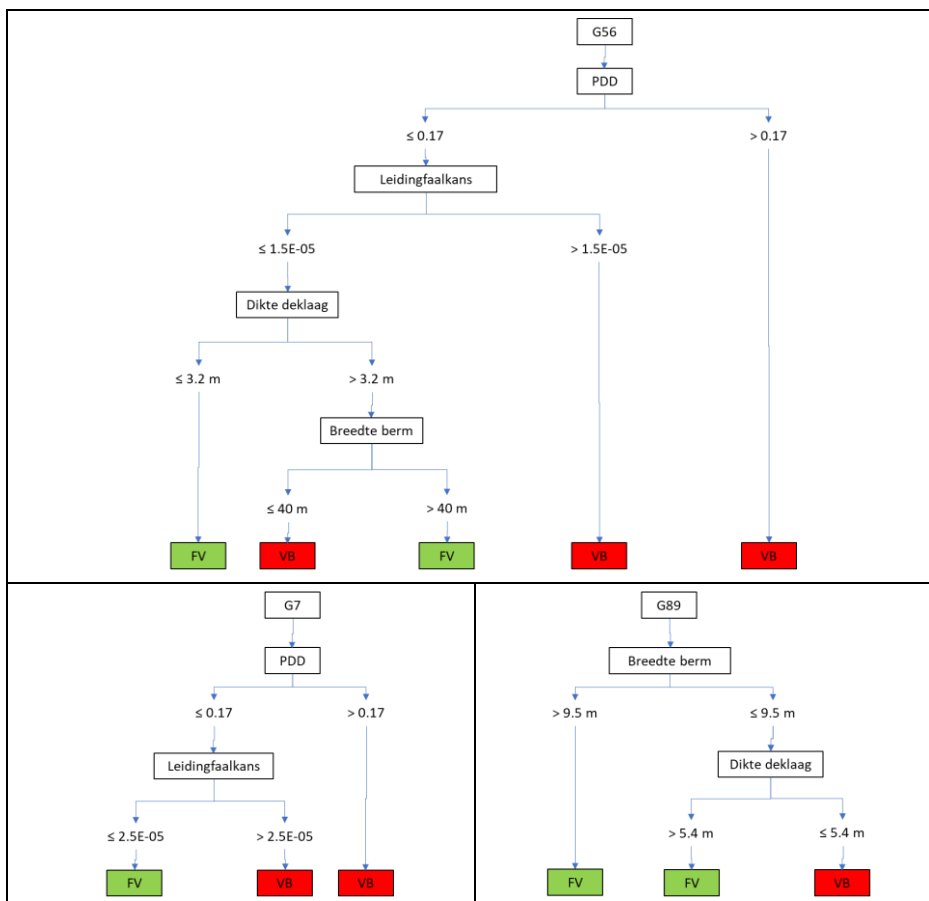
De onderstaande figuur 3.2 geeft de deelbomen voor de verschillende posities van de drinkwaterleidingen. Zoals hierboven beschreven zijn enkele punten geclusterd.



Figuur 3.2 Beslisbomen per locatie voor de drinkwaterleidingen

De onderstaande figuur 3.3 geeft de deelbomen voor de verschillende posities van de gasleidingen. Ook hier zijn enkele leidingposities geclusterd.





Figuur 3.3 Beslisbomen per locatie voor de gasleidingen

3.2 Discussie

In de bovenstaande beslisbomen voor een eenvoudige toets (filter) is duidelijk te zien dat de druk en de diameter een belangrijke rol spelen. Deze parameters zijn bepalend voor de omvang van de erosiekrater die kan ontstaan bij het falen van de leiding. Bij de drinkwaterleidingen is dit effect sterker aanwezig dan bij de gasleidingen. Door de meer conservatieve benadering bij de drinkwaterleidingen voor het bepalen van de erosiekrater is het effect van de grotere omvang van de erosiekrater prominenter aanwezig. Ook is duidelijk te zien dat na de inwendige druk en de diameter de kans op leidingfalen veelvuldig terugkomt in de beslisbomen. De faalkansen van de leidingen zijn afhankelijk van het materiaal en de drukklasse en ook van de diameterklasse.

Naast de bovengenoemde leidingkenmerken komen dikeigenschappen ook terug in de beslisbomen die voor de eenvoudige toets gebruikt kunnen worden. Voor de leidingposities nabij de waterkering blijkt de kruinbreedte in een aantal gevallen van belang. Als de leidingen in het achterland liggen, zijn vooral de bermbreedte en de dikte van de deklaag (cohesieve, slecht doorlatende grondlagen) van belang. Bij de gasleidingen is de invloed beter zichtbaar, omdat bij de drinkwaterleidingen de zeer conservatief bepaalde erosiekraters overheersen.

3.3 Voorbeelden toepassing beslisboom

Hieronder wordt een tweetal voorbeelden gegeven van de toepassing van de beslisboom voor het uitvoeren van een eenvoudige toets.

Het eerste voorbeeld betreft een fictieve situatie van een PE gasleiding met een diameter van 125 mm en een werkdruk van 0.1 bar die gelegen in de binnenkruin van de dijk is bij het plaatsje Faalgat. De waterkering is gelegen op een deklaag met een dikte van 8 meter. De kruinbreedte bedraagt 7 meter.

De primaire beslisboom laat zien dat deze leiding dient te worden beschouwd op positie G4. In de secundaire boom G4 kan dan als eerste de waarde PDD worden berekenend.

De totale druk in de leiding bedraagt 1 (atmosferische druk) + 0.1 (overdruk) = 1.1 bar. De PDD waarde wordt gevonden door de totale druk met de diameter (in m) in het kwadraat te vermenigvuldigen. De PDD waarde is dan 0.017. Dit betekent dat de linker tak moet worden gevolgd. De faalkans uit tabel 2.2 voor PE bedraagt $5.0E-5$ per meter per jaar. Zodat onder de leidingfaalkans het middelste spoor kan worden gevolgd. De beschouwing van de kruinbreedte, die in dit geval 7 m is en groter is dan 6.3 m, leidt tot het antwoord FV. Dit betekent dat in dit geval de betreffende PE gasleiding geen significante bijdrage levert aan de overstromingskans, zodat op basis van de eenvoudige toets de leiding ter plaatse van de binnenkruin kan worden toegestaan.

Het tweede voorbeeld betreft een fictieve situatie van een nodulair gietijzeren drinkwaterleiding met een diameter van 180 mm en een maximale werkdruk van 2.5 bar die gelegen achter de berm van de dijk is bij het plaatsje Wel aan de Lek. De waterkering is gelegen op een deklaag met een dikte van 3 meter. De kruinbreedte bedraagt 8 meter.

De primaire beslisboom laat zien dat deze leiding dient te worden beschouwd op positie W7. In de secundaire boom W7 kan dan als eerste de waarde PDD worden berekenend.

De druk in de drinkwaterleiding bedraagt 2.5 bar. De PDD waarde wordt gevonden door de totale druk met de diameter (in m) in het kwadraat te vermenigvuldigen. De PDD waarde is dan 0.09. Dit betekent dat de linker tak moet worden gevolgd. De faalkans uit tabel 2.2 voor Nodulair gietijzer bedraagt $1.0E-5$ per meter per jaar. Zodat onder de leidingfaalkans het linker spoor kan worden gevolgd wat leidt tot het antwoord FV. Dit betekent dat in dit geval de betreffende drinkwaterleiding geen significante bijdrage levert aan de overstromingskans, zodat op basis van de eenvoudige toets de leiding direct achter de berm kan worden toegestaan.

3.4 Gebruik methode en resultaten afgeleid filter

De Machine Learning classificatie scripts blijken bruikbaar om op een semi-automatische wijze beslisbomen te genereren. Voor een herkenbare structuur in de beslisbomen is bijgestuurd waar nodig. Tijdens het maken van de bomen is gebleken dat er meer dijkprofielen benodigd zijn dan de 14 geselecteerde waterkeringen uit het Waterschap Rivierenland. Met name het aantal variaties in bepaalde eigenschappen van de waterkering bleek te gering om een aantal deze dikeigenschappen structureel in de beslisbomen op te nemen. Dit is terug te zien in de bomen zoals die hierboven zijn afgeleid.

Het dient te worden opgemerkt dat de gepresenteerde beslisbomen voorbeelden zijn van de uitwerking van de ontwikkelde methodiek die semi-automatisch is toegepast. Door het ontbreken van voldoende variatie van eigenschappen van waterkeringen zijn de beslisbomen nog niet gereed voor gebruik in de praktijk.

Een vergelijking van het in dit rapport afgeleide filter en de huidige filters van NEN 3651 geeft het volgende resultaat:

1) Leidingen binnen het profiel van een waterkering.

Volgens paragraaf 7.3.5 mogen lagedruk gasleidingen met een inwendige druk kleiner dan 0.1 MPa (1 bar) en een inwendige diameter kleiner dan 200 mm en vloeistofleidingen, waarvoor geldt $H^3 \times D_i^5 < 40 \text{ m}^8$ in een waterkering worden gelegd. Dit onder voorwaarde dat de leiding voldoet aan de eisen, die gelden voor leidingen binnen de veiligheidszone en leidingbreuk niet tot aantasting van het theoretisch profiel leidt. Een onderbouwing van deze eenvoudige toets (filter) is niet bekend.

2) Eenvoudige toets van bestaande leidingen die vóór 1972 zijn aangelegd.

Bijlage E van NEN 3651 (2020) laat zien dat in het filter geen leidingpositie wordt benoemd en dat er geen gedetailleerd onderscheid wordt gemaakt in drukklassen. Er worden in NEN 3651 als grenswaarde voor de leidingdiameter van lagedruk leidingen twee waarden genoemd namelijk 125 mm voor niet-stalen leidingen en 500 mm voor stalen leidingen. Bij de toetsing volgens bijlage E van NEN 3651 worden sterkte-technische beoordelingen voor geschreven (het is niet duidelijk of deze beoordelingen alle faaloorzaken voor leidingen, zoals beschreven in NEN 3650-1 voldoende afdekken). Faalkansen van leidingen worden niet beschreven in het filter in NEN 3651. Bijlage E van NEN 3651 verwijst naar het WBI, maar ook in bijlage III van het WBI wordt geen toelichting op de eenvoudige toets uit NEN 3651 gegeven. Waarschijnlijk is de invloed van een sluipend lek bij water leidingen niet beschouwd.

Het filter met de eenvoudige toets dat in het voorliggende rapport is beschreven is gebaseerd op faalpaden, de achtergronden en toetswaarden zijn in het rapport beschreven. De achtergrond van het filter in Bijlage E van NEN 3651 en in bijlage III van het WBI is onbekend.

4 Conclusies en aanbevelingen

4.1 Algemeen

Dit hoofdstuk bevat de conclusies van deze studie over de ontwikkelde methodiek voor het maken van filters van parallel gelegen leidingen in het dijklichaam of nabij de dijk en specifiek over de filters volgens deze methodiek die zijn gegenereerd voor een aantal waterkeringen in het beheersgebied van Waterschap Rivierenland.

Bij de uitvoering van deze studie is zowel bij het opstellen van de methodiek als bij het opstellen van de filters inzicht opgedaan die niet kon worden toegepast binnen deze studie maar die in de nabije toekomst zouden kunnen worden opgepakt.

4.2 Conclusies

4.2.1 Methodiek

De hoofdconclusies met betrekking tot de ontwikkelde methodiek zijn:

1. Het veiligheidsraamwerk uit (Deltares 2018) kan als basis worden gebruikt om generieke faalpaden voor parallel gelegen leidingen af te leiden, die kwantitatief kunnen worden geanalyseerd door middel van een integrale faalkansanalyse. Voor specifieke leidingen is dit al in eerdere projecten van de POV K&L geïllustreerd, maar ook een generieke aanpak blijkt mogelijk voor parallel gelegen leidingen.
2. Op basis van een groot aantal geïntegreerde faalkansanalyses kunnen filters voor parallelle water- en gasleidingen worden afgeleid. Op basis van de filters kan bepaald worden of de bijdrage van een leiding aan de overstromingskans verwaarloosbaar is of niet.
3. Het resultaat van een integrale faalkansanalyse voor een waterkering met leiding kan worden getoetst behulp van een beschouwing van lengte-effecten van parallel gelegen leidingen, die zijn gebaseerd op de correlatielengte die in het achtergrond rapport van NEN 3650 is beschreven en die bij deze studie op een pragmatische wijze nader is beschouwd.
4. De lekfrequenties die in de databases Ustore voor de drinkwaterleidingen en Nestor voor de gasleidingen aanwezig zijn kunnen worden gebruikt voor de bepaling van de leidingfaalkansen, die gebruikt kunnen worden in een integrale faalkansanalyse. Hiertoe is een indeling gebruikt in diameter en leidingmateriaal en bij de gasleidingen ook in drukklasse. Bij de drinkwaterleidingen zijn geen drukklassen geregistreerd bij de lekincidenten, daarom zijn hier drukklassen aangenomen met conservatieve boven grenzen.
5. De gebruikte Software om (semi-)automatisch de berekeningen conform de opstelde methodiek uit te voeren bleek geschikt om een database met resultaten te creëren. Voor het dijkfaalmechanisme GEKB zijn de berekeningen handmatig uitgevoerd.
6. De Machine Learning classificatie scripts zijn goed bruikbaar om op een automatische wijze beslisbomen te genereren. Voor het aanbrenge van een herkenbare structuur in de beslisbomen is handmatig bijsturen nodig.
7. Bij het maken van de beslisbomen is gebleken dat er meer dijkprofielen benodigd zijn dan de 14 geselecteerde waterkeringen uit het Waterschap Rivierenland. Met name het aantal variaties in bepaalde eigenschappen bleek te gering om een aantal dikeigenschappen structureel in de beslisbomen op te nemen.

De opgestelde methodiek maakt het mogelijk om conservatieve uitgangpunten te gebruiken zodat het zeker is dat de filters veilig zijn. In de hier beschreven studie is een maximaal toelaatbare

bijdrage van alle parallelle leidingen aan de overstromingskans van 1% aangehouden (hier kan een waterschap eventueel een andere waarde kiezen). Door in de eis het aantal parallelle leidingen en de lengte van de leidingen te beschouwen middels een lengte-effectfactor betekent dat in een situatie die precies voldoet volgens het filter de daadwerkelijke bijdrage van een te beoordelen leiding aan de overstromingskans kleiner is dan 0,1%.

Voor de volledigheid volgen hieronder stappen in de faalkansanalyses waarin in deze studie de belangrijkste conservatieve aannames zijn gedaan:

- Bepaling leidingfaalkansen: per leidingklasse is telkens met de hoogste leidingfaalkans binnen de leidingklasse gerekend;
- Gevolgen gapend lek: in de bepaling van de kraterdimensies zijn diverse conservatieve aannames gedaan;
- Gevolgen sluipend lek: volledige verzadiging van de dijk;
- Bepaling kans op de dijkfaalmechanismen afschuiven binnen- en buitentalud (STBI en STBU) gegeven leidingfalen: er zijn geen 3D effecten meegenomen (afmetingen krater parallel aan dijk zijn bijvoorbeeld kleiner dan breedte van een afschuiving);
- Bepaling kans op het dijkfaalmechanisme erosie grasbekleding buitentalud (GEBU) gegeven leidingfalen: in buitenteen en buitenkruin is deze kans altijd 1 aangenomen;
- Bepaling kans op alle dijkfaalmechanismen: er is geen "reststerkte" na het initiële dijkfaalmechanisme meegenomen;
- Bepaling van de faalkanseis: bepaling van de lengte-effectfactor en faalkansruimtefactor zijn waarschijnlijk conservatief gekozen.

4.2.2 Filters voor waterkeringen in beheersgebied van Waterschap Rivierenland

Voor het opstellen van de filters voor de primaire waterkeringen in het beheersgebied van Waterschap Rivierenland is een aantal waterkeringen geselecteerd. De waterkeringen zijn grotendeels automatisch doorgerekend. De resultaten van deze semi-automatische serie integrale faalkansanalyses, inclusief de belangrijkste leiding- en dijkarakteristieken, zijn opgeslagen in een database. De database is gebruikt om met speciale Machine Learning classificatie software beslisbomen te genereren. Gedurende de toepassing van de Machine Learning-scripts bleek dat enige handmatige bijsturing benodigd was.

Voorwaarde voor de toetsing van een leiding volgens de ontwikkelde methode is dat men eerst moet nagaan of er sprake is van een 'normale situatie' conform een standaard leidingontwerp en dat er geen afwijkingen aan de orde zijn met bijvoorbeeld grote verschilzettingen over korte afstanden. De methode is toegepast in het beheersgebied van Waterschap Rivierenland om een filter te maken die het mogelijk maakt om een eenvoudige toets uit te voeren voor parallelle lage druk gas- en drinkwaterleidingen tot een diameter van 500 mm.

Er zijn beslisbomen gegenereerd voor waterleidingen en voor gasleidingen. Doordat er bij drinkwaterleidingen sprake is van een mogelijk sluipend lek, waar dat bij gasleidingen geen rol speelt, en doordat mede door de zeer conservatieve aanpak de kraterafmetingen bij drinkwaterleidingen fors groter zijn dan bij gasleidingen zijn er verschillen tussen de beide beslisbomen.

Voor de drinkwaterleidingen kan het volgende worden geconcludeerd:

- Leidingeigenschappen diameter en druk zijn belangrijk;
- De faalkans van de leiding speelt een duidelijke rol;
- Bij de dikeigenschappen is de kruinbreedte van belang als de leiding zich nabij de waterkering bevindt;
- Als de leiding zich op grotere afstand van de dijk bevindt is de dikte van deklaag relevant, door de grote kraters bij drinkwaterleidingen die op zeer conservatieve wijze zijn bepaald. Ook moet de kanttekening worden gemaakt dat de variatie in dikeigenschappen in de geselecteerde dwarsprofielen te gering is gebleken.

Voor de gasleidingen kan het volgende worden geconcludeerd:

- Leidingeigenschappen diameter en druk zijn belangrijk;
- De faalkans van de leiding speelt een duidelijke rol;
- Dikeigenschappen zijn minder van belang dan bij drinkwaterleidingen, maar ook hierbij moet de kanttekening worden geplaatst dat er in de geselecteerde dwarsprofielen te weinig variatie in dikeigenschappen aanwezig bleek te zijn.

De Machine Learning classificatie scripts blijken bruikbaar om op een semi-automatische wijze beslisbomen te genereren. Voor een herkenbare structuur in de beslisbomen is bijgestuurd waar nodig. Tijdens het maken van de bomen is gebleken dat er meer dijkprofielen benodigd zijn dan de 14 geselecteerde waterkeringen uit het Waterschap Rivierenland. Met name het aantal variaties in bepaalde eigenschappen bleek te gering om een aantal dikeigenschappen structureel in de beslisbomen op te nemen. Dit is terug te zien in de bomen zoals die hierboven zijn afgeleid. De gepresenteerde beslisbomen moeten dus gezien worden als voorbeelden van de uitwerking van de in deze studie ontwikkelde methodiek en zijn nog niet gereed voor gebruik in de praktijk.

Uit vergelijking met de bestaande filters van NEN 3651 is gebleken dat deze niet goed aansluiten op de in dit rapport afgeleide beslisbomen.

4.3 Aanbevelingen

In deze studie is in eerste instantie van grof naar fijn gewerkt om de faalkansbijdragen van leidingen aan de overstromingskans te bepalen, op basis waarvan de filters zijn afgeleid. Vanwege de mogelijkheden tot automatisering van de faalkansanalyses is gedurende het project besloten op de eerste grove stappen over te slaan. Tevens is vanwege complexiteit besloten om een aantal probabilistische onderdelen in de studie niet in te bouwen. Zo is de kansverdeling van de erosiekraters niet in de automatische methodiek opgenomen.

Door de nadruk op het opstellen van een methodiek is de selectie van de waterkeringen enigszins onderbelicht. Op zich zijn een aantal waterkeringen geselecteerd met verschillende eigenschappen die de variatie in de waterkeringen in het beheersgebied goed afdekken, maar bij de toepassing van de Machine Learning scripts waarmee de beslisbomen zijn opgesteld bleken er te weinig variaties aanwezig in de specifieke eigenschappen van onderdelen van de waterkeringen. Dit zou goed kunnen worden ondervangen door de informatie van de werkelijke waterkeringen te gebruiken voor een zeer groot aantal fictieve dijkprofielen, waarbij bijvoorbeeld veel tussenstappen zijn in kruinbreedte, berm lengte, bermdikte, en dikte en sterkte van de deklaag.

Met betrekking tot de vaststelling van de generieke toetseis is er methodisch een goede manier gevonden om deze vast te stellen voor parallelle leidingen in en nabij waterkeringen. Het dient te worden opgemerkt dat de keuze van de onderliggende variabelen bij het vaststellen van het lengte-effect weliswaar goed aansluit bij de eerdere POV K&L projecten, maar dat andere keuze mogelijkheden ook moeten worden beschouwd.

Tevens zijn de volgende aanbevelingen tijdens de studie naar voren gekomen:

- De filters zullen moeten worden toegepast in de praktijk om de effectiviteit van de filters vast te stellen;
- Het is raadzaam om de filters ook afleiden bij (bijvoorbeeld) een 10 keer minder strenge eis. Hiermee kan beoordeeld worden wat het effect is van een “scherpere” bepaling van de faalkansbijdrage van leidingen of een “scherpere” eis (hierboven beschreven) op de effectiviteit van de filters;
- Een meer gedetailleerde beschouwing van de afleiding van de faalkans van de leiding uit geconstateerde lekfrequenties;
- Het minder conservatief bepalen van de afmetingen van de erosiekraters bij drinkwaterleidingen. (Op basis van systeemberekeningen kunnen op generieke wijze karakteristieke waarden worden bepaald voor het vermogen ter plaatse van een potentieel lek).

5 Referenties

Deltares (2015). Globale stochastische ondergrondschematisatie (WTI-SOS) voor de primaire Waterkeringen. Deltares rapport kenmerk 1209432-000-GEO-0006, september 2015.

Deltares (2016) Derivation of the semi-probabilistic safety assessment rule for inner slope stability - Calibration STBI 2016. Deltares rapport kenmerk 1230086-009-GEO-0029, September 2016

Deltares (2018a). WBI Veiligheidsraamwerk kabels en leidingen, Deltares rapport kenmerk 11202225-005-GEO-0001.

Deltares (2018b). Faalkansanalyse bij dijkontwerp Zeeburgereiland met parallelle waterleiding - POV Kabels & Leidingen. Deltares rapport kenmerk 11202871-002-GEO-0001

Deltares (2020). Faalkansanalyse dijkontwerp Wolferen-Sprok met kruisende gasleiding A-505
Deltares rapport kenmerk 11203959-000-GEO-0001

ENW (2009). Technisch Rapport Actuele sterkte van dijken. Expertisenetwerk waterveiligheid, maart 2009.

KPR (2016). Factsheet post “overig” in de faalkansbegroting en indirecte mechanismen, 9 november 2016

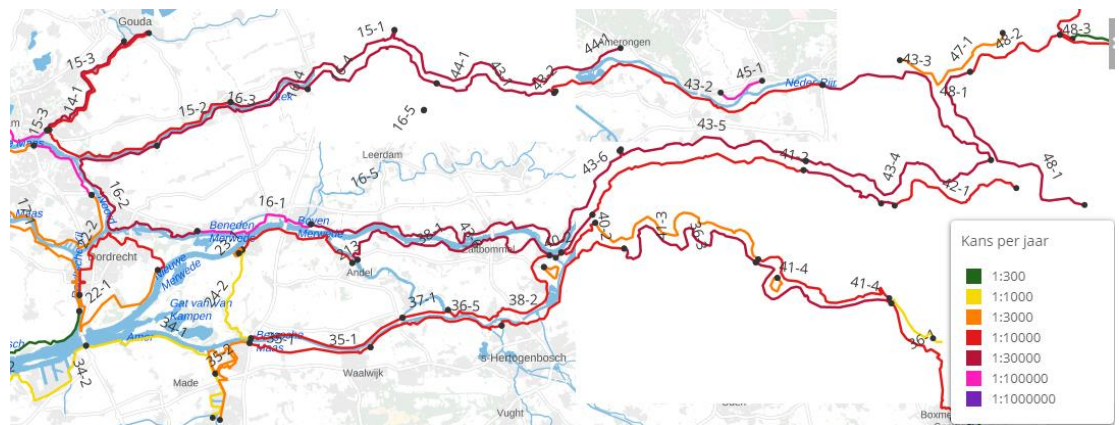
A Selectie dijkprofielen met grondopbouw

Deze bijlage geeft een beschrijving van de gebruikte cases voor geïntegreerde faalkansanalyse ten behoeve van de afleiding van de filter voor parallelle gas- en waterleidingen in en bij waterkeringen. Deze betreffen verschillende dijktypen en ondergronden, welke representatief zijn en dekkend voor het beheersgebied van WSRL – Figuur 4(a).

Uitgangspunt was om te komen tot een set van maximaal 10 à 15 profielen die de gehele variatie van dijkgeometrie-ondergrond combinaties in het beheergebied van WSRL zo goed mogelijk afdekken. Als er bepaalde situaties toch niet goed afgedekt worden, moet dit opgemerkt worden, zodat duidelijk, en bij WSRL bekend is, dat het filter dat gemaakt wordt die betreffende situatie mogelijk niet gevalideerd is.



(a) Beheersgebied van WSRL



(b) overstromingskansen normering - signaleringswaarde (<https://waterveiligheidsportaal.nl/#/nss/nss/norm>)

Figuur 4: Beheersgebied van WSRL

A.1 Beschikbare gegevens

Er zijn diverse bronnen ter verkrijging van de benodigde dwarsprofielen:

- Profielen gebruikt voor de **kalibratiestudie WBI/BOI** (Deltares 2016), dit betreft 16 locaties/profielen in het beheersgebied van WSRL. De profielen die beschikbaar zijn voor WSRL liggen niet echt goed verdeeld over het beheersgebied. Dit hoeft echter geen probleem te zijn, mits voldoende variatie in ondergrond, ligging en dijkprofiel, inclusief opbouw (materiaal) van de dijk;
- Stabiliteitsberekeningen/dwarsprofielen langs de Waal van **dijkversterkingsprojecten**:
 - Tiel – Waardenburg (TiWa),
 - Neder Betuwe (Tiel - Wolferen)
 - en Wolferen – Sprok (WOS).

Dit betreft globaal het traject langs de rechteroever van de Waal vanaf Tiel tot Nijmegen. Per traject zijn van WSRL circa 8 stabiliteitssommen ontvangen (totaal ca. 24). Voordeel is mogelijk dat van betreffende profielen beter de grondopbouw en waterspanningen bekend zijn, omdat dit ontwerpprofielen voor de a.s. dijkversterking betreft;

- Overige projecten, met name van WSRL, waarvan binnen Deltares gegevens beschikbaar zijn. Er zijn in het verleden bijvoorbeeld werkzaamheden verricht voor Werkendam en de dijkversterking langs het Steurgat (Werkendam – Hank). Hiervan zijn dwarsprofielen en geotechnische profielen beschikbaar. Hetzelfde geldt voor de dijkversterking Arnhem-Malburgen. Vermoedelijk zijn er meerdere projecten met de benodigde informatie.

A.2 Geselecteerde dijkprofielen

A.2.1 Selectiecriteria

Onderstaand zijn criteria weergegeven waarvan op voorhand verwacht werd dat deze een substantiële en relevante invloed hebben op het ontwerp en/of de mate van invloed van kabels en leidingen, inclusief een beschrijving hoe deze variëren binnen het beheersgebied van WSRL:

- Variërende **deklaagdikte** van orde 12 m tot 1 m of wellicht minder (van west naar oost afnemende deklaag dikte). Variaties zijn inderdaad groot, zowel in dikte als in samenstelling. In het westelijke deel komen met name ook veen en humeuze kleilagen voor. Richting het oosten wordt dit aanzienlijk minder tot vrijwel nihil in het meest oostelijke deel. Naar het oosten komen, bij een afnemende deklaag dikte, meer klei, zandige klei en zandlagen voor.
- Het wel of niet optreden van **opdrijven** is een belangrijk uitgangspunt in stabiliteitsberekeningen.
- Variërende **bodemsamenstelling**, met name het voorkomen van veenlagen en humeuze kleilagen in het meer westelijke deel naar veel meer klei en zand(ige) lagen meer in het oosten (zie tevens de SOS-profielen).
- In het meest westelijk deel van het beheersgebied van WSRL is nog getijde invloed en zullen de **(waterstands)belastingen** anders zijn dan meer naar het oosten. Vanaf iets ten oosten van Gorinchem (Vuren) is er vrijwel geen invloed van zee (getij) meer en is er sprake van bovenrivieren.
- **Dijksopbouw**; in het algemeen komen tin het rivierengebied voornamelijk kleidijken voor. Bij de voorgaande versterkingsronde, in de meeste gevallen uitgevoerd in de jaren '90 is in veel gevallen binnendijks versterkt, waarbij aan de binnenzijde is aangevuld met zand (kern en stabiliteitsberm), afgedekt met een kleilaag of afdeklaag van bovengrond (met name op de bermen) Destijds werd nog ontworpen op lage overslagdebieten van maximaal 0,1 l/s per m of 1,0 l/s per m. Erosie van het binnentalud speelde daarbij vrijwel geen rol. Tegenwoordig wordt in huidige ontwerpen met hogere overslagdebieten gerekend (10 l/s per m). Aan de buitenzijde is voor zover bekend vrijwel altijd opgehoogd/aangevuld met klei uitzondering in ieder geval Werkendam).

- **Dijkprofiel;** In het algemeen zal dit in het rivierengebied vrij uniform zijn, maar wel mogelijke afwijkingen van steilheid van de taluds. Ook de vorm van stabiliteitsbermen kan verschillen meer naar het westen komen voornamelijk dikkere 1:20 bermen met en bermtalud van 1:3 voor. Meer oostwaarts werden ook wel plattere bermen (1:10) toegepast, verlopend naar maaiveld, soms tevens als pipingberm fungerend. In een enkel geval ook getailleerde taluds; combinatie van 1:2 of 1:2,5 (boventalud) met een ondertalud van 1:4 of 1:5.
- **Schaardijk,** of dijk met als dan niet hoog **voorland.**

A.2.2 Geselecteerde profielen

De cases uit de kalibratiestudie WBI/BOI (Deltares, 2016), d.w.z. de cases die in het beheergebied WSRL liggen, blijken goed aan bovenstaande criteria te voldoen (hetgeen te verwachten valt, aangezien voor de kalibratiestudie voor selectie van de cases grofweg dezelfde criteria zijn gebruikt).

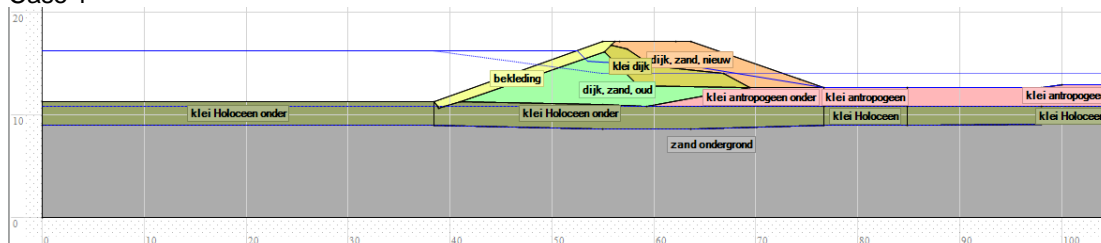
Tabel 4 kenmerken van de profielen

Case #:	Watersysteem Boven/beneden rivier	Norm [1/jaar]	Kruin breedte [m]	Minimale dikte deklaag [m]	Dijk kern opbouw Zand/klei	Berm? Ja/nee	Berm breedte [m]
1	boven	30.000	8.6	3.6	zand + klei	Nee	-
2	beneden	10.000	7.5	10.4 (veen)	klei	Ja	54
3	beneden	30.000	5.5	11	Klei +zand	Ja	32
4	boven	30.000	7.0	8.5	klei	Nee	-
5	boven	30.000	12.5	7.3	Klei +zand	Nee	-
6	boven	30.000	7.0	7.2	Klei + zand	Nee	-
7	boven	30.000	7.0	8.9	Klei + zand	Nee	-
8	boven	3.000	6.0	3 (sloot)	klei	Ja	5
9	beneden	10.000	8.2	12.5	Klei + zand	Nee	-
10	boven	10.000	5.5	3.3	klei	Ja	11
11	boven	30.000	7.4	10	klei	Ja	8
12	beneden	30.000	15.6	10	klei	Ja	30

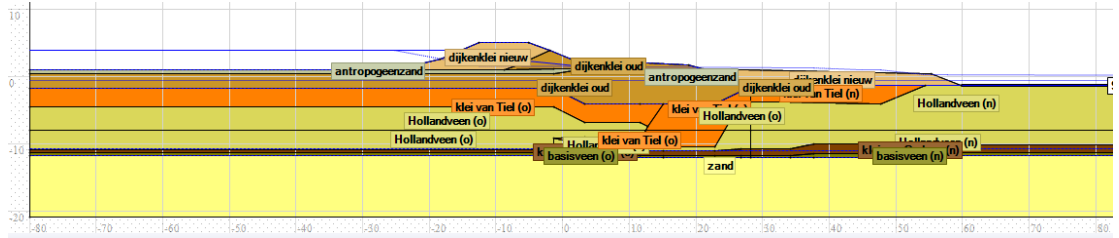
Hieronder grafisch weergegeven de geometrie en ondergrond per case (screenshots uit D-Stability).

In enkele cases zijn de grondbeschrijvingen uit het WTI-SOS gehanteerd. Een beschrijving van de eenheden wordt gegeven in Deltares (2015).

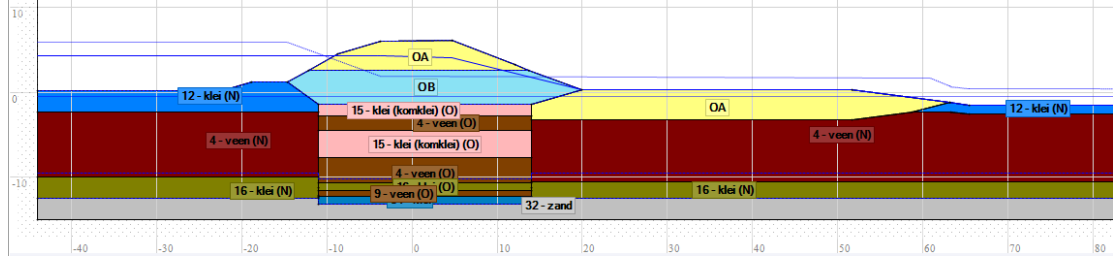
Case 1



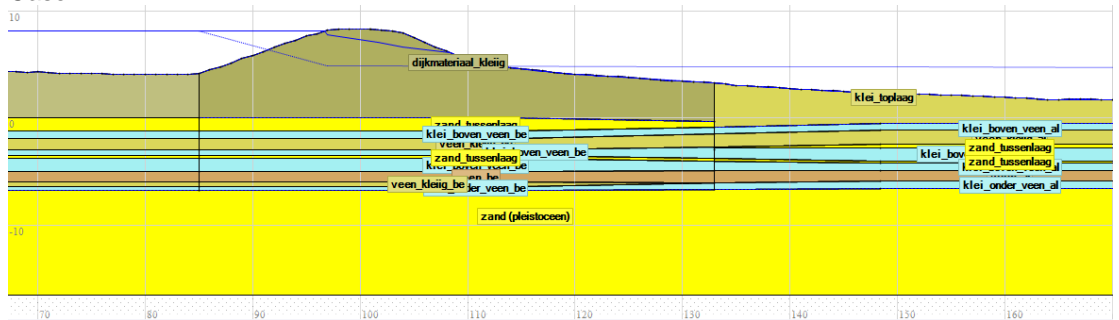
Case 2



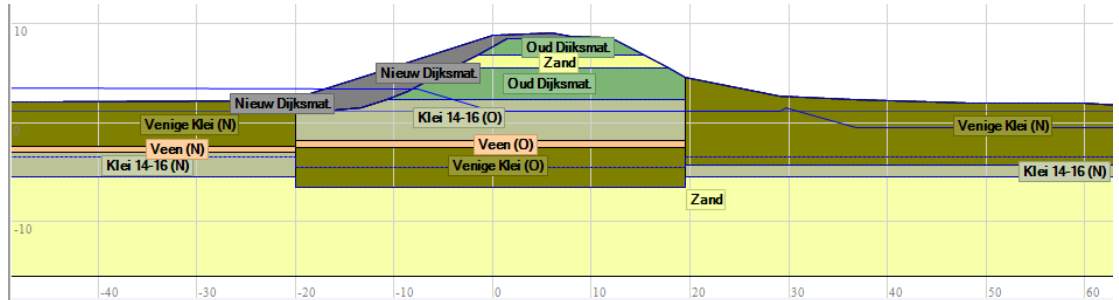
Case 3



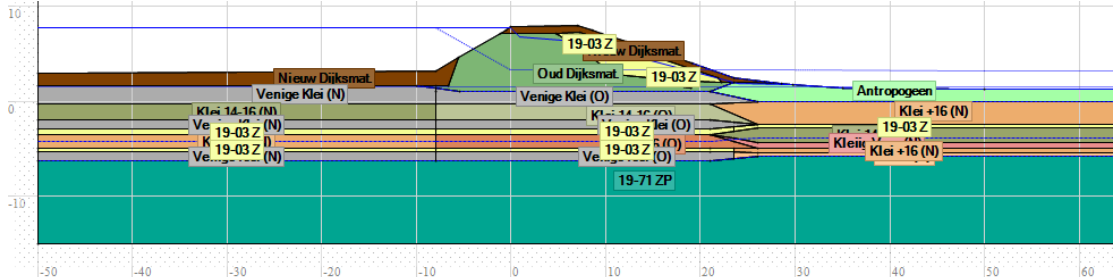
Case 4



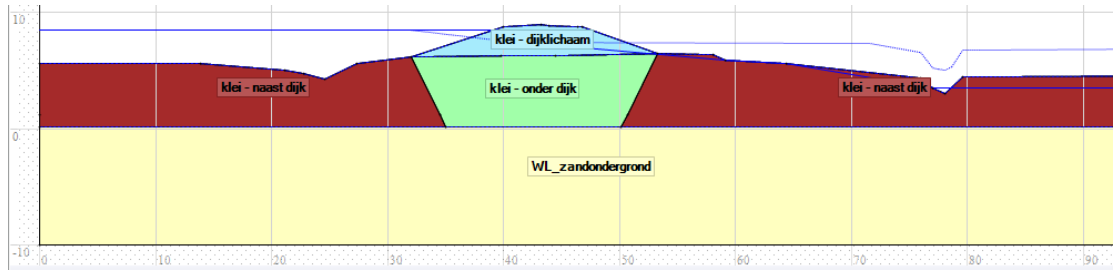
Case 5



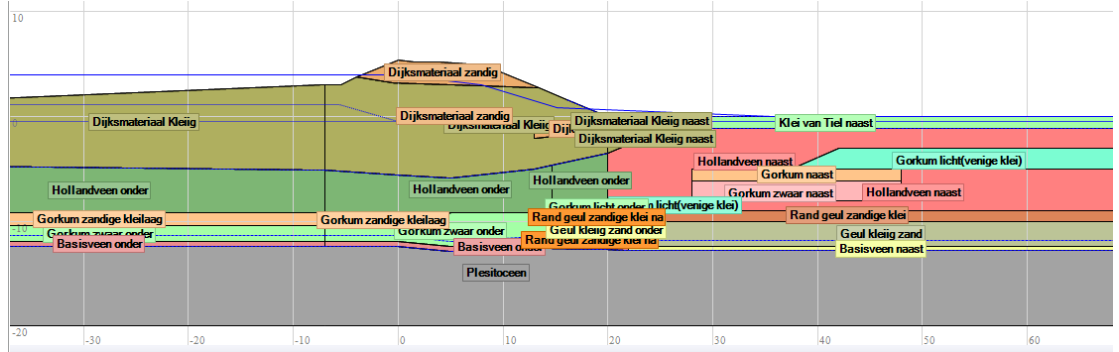
Case 6



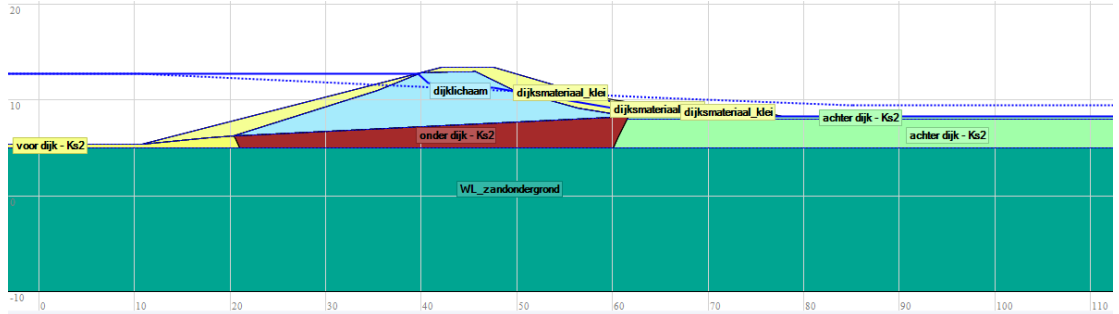
Case 7



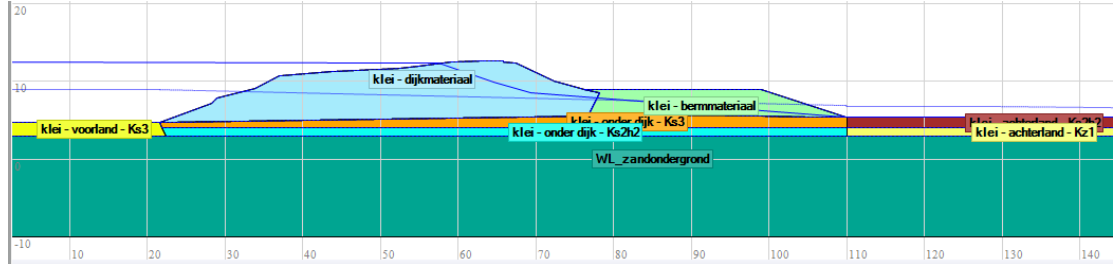
Case 8



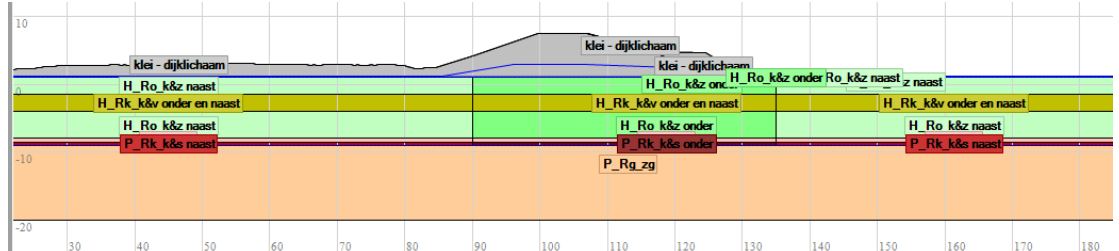
Case 9



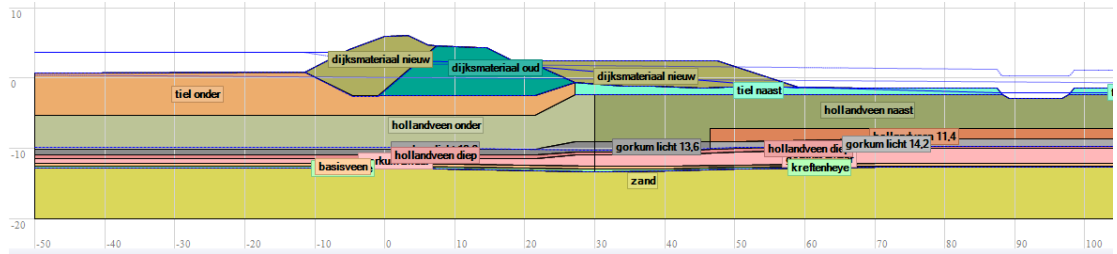
Case 10



Case 11



Case 12



A.3 Norm en eis per faalmechanisme op doorsnedeniveau

Uitgangspunt van de uitgevoerde geïntegreerde faalkansanalyses is dat gemiddeld in alle cases alle faalmechanismen precies aan de norm voldoen. Dit betekent dat de cases uit de kalibratiestudie moesten worden aangepast. Dit wordt besproken in paragraaf A.5. In deze paragraaf wordt per faalmechanisme de bepaling van de eis zonder leidingfalen besproken.

De faalkanseis per faalmechanisme i op dijktrajectniveau wordt, conform BOI, bepaald door rekening te houden met de faalkansruimte factor ω en de lengte-effect factor N : $P_{eis,dsn} = \omega \times P_{signal} / N$. Alle voor deze studie relevante faalkanseisen op doorsnedeniveau en vereiste betrouwbaarheidsindices zijn samengevat in Tabel 5 voor een dijktraject, en in Tabel 6 voor alle dijktrajecten van WSRL.

Uitgangspunt voor de faalkansanalyses is dat verschillende faalmechanismen per gekozen case / doorsnede gemiddeld genomen voldoen aan de eisen zoals in Tabel 7 weergegeven.

Tabel 5 Faalkanseisen op doorsnedeniveau en vereiste betrouwbaarheidsindices voor 16-2, signaleringswaarde van $T=30,000$.

Faalmechanisme dijk	Faalkansruimte ω	Lengte-effect factor N	Faalkanseis $P_{eis,dsn}$ ($\beta_{eis,dsn}$)
Golfoverslag, erosie kruin/binnentalud (GEKB)	0.24	1	8.0 E-6 (4.3)
Piping/heave (STPH)	0.24	42.4 [#]	1.9 E-7 (5.1)
Macro-instabiliteit binnenwaarts (STBI)	0.04	21.5 ^{##}	6.2 E-8 (5.3)
Macro-instabiliteit buitenwaarts (STBU)	0.40 ^{**}	21.5 ^{##}	6.2 E-7 (4.8)

^{**}Voor STBU is een factor 10 soepelere eis aangehouden dan voor STBI. Indien de kans op herstel voor een volgend hoogwater expliciet wordt meegenomen, wordt buitenwaartse macro-instabiliteit gezamenlijk beoordeeld met STBI.

[#]Lengte-effect STPH bovenrivierengebied: $N = 1 + (a / b \times L_{traject}) = 1 + (0,4 / 300 \times 31,022) = 42.4$

^{##}Lengte-effect STBI/STBU: $N = 1 + (a / b \times L_{traject}) = 1 + (0,033/50 \times 31,022) = 21.5$

Tabel 6 Faalkanseisen op doorsnedeniveau per WSRL dijktraject.

dijk	traject	T [jaar]	Lengte [m]	N_STBI en STBU	Beta_eis STBI	Beta_eis STBIU	N_STPH	Beta_eis STPH	Beta_eis GEKB
16	1	100000	15064	10.9	5.4	5.0	21.1	5.2*	4.6
	2	30000	31022	21.5	5.3	4.8	42.4	5.1*	4.3
	3	30000	19909	14.1	5.2	4.8	27.5	5.0*	4.3
	4	30000	19571	13.9	5.2	4.8	27.1	5.0*	4.3
23	1	3000	2643	2.7	4.4	3.9	4.5	4.1*	3.8
24	1	10000	18016	12.9	5.0	4.5	25.0	4.8*	4.1
	2	1000	12989	9.6	4.5	3.9	18.3	4.2*	3.5
	3	10000	15828	11.1	5.0	4.5	21.4	4.7*	4.1

38	1	30000	28837	20.0	5.3	4.8	87.5	5.2**	4.3
	2	10000	20212	14.3	5.0	4.5	61.6	4.9**	4.1
	3	3000	4701	4.1	4.5	4.0	15.1	4.4**	3.8
40	1	30000	5283	4.5	5.0	4.5	16.8	4.9**	4.3
	2	10000	6375	5.2	4.8	4.3	20.1	4.7**	4.1
41	1	30000	12635	9.4	5.1	4.7	38.9	5.1**	4.3
	2	10000	27598	19.2	5.1	4.6	83.8	5.0**	4.1
	3	3000	26989	18.8	4.8	4.3	81.9	4.8**	3.8
	4	10000	20063	14.2	5.0	4.5	61.2	4.9**	4.1
42	1	10000	17398	12.5	5.0	4.5	53.2	4.9**	4.1
43	1	30000	15877	11.5	5.2	4.7	48.6	5.1**	4.3
	2	10000	33950	23.4	5.1	4.6	102.9	5.0**	4.1
	3	30000	25363	17.7	5.3	4.8	77.1	5.2**	4.3
	4	30000	25825	18.1	5.3	4.8	78.5	5.2**	4.3
	5	30000	22526	15.9	5.2	4.8	68.6	5.2**	4.3
	6	30000	46859	31.9	5.4	4.9	141.6	5.3**	4.3

* lengte effect factor a voor piping = 0.40

** lengte effect factor a voor piping = 0.90

Tabel 7 Gemiddelde faalkanseisen op doorsnedeniveau per faalmechanisme voor WSRL gebied.

Faalmechanisme dijk	Faalkanseis [1/jaar]	Betrouwbaarheidseis
Golfoverslag, erosie kruin/binnentalud (GEKB)	1.3 E-5	4.2
Piping/heave (STPH)	2.7 E-7	5.0
Macro-instabiliteit binnenwaarts (STBI)	1.6 E-7	5.1*
Macro-instabiliteit buitenwaarts (STBU)	1.6 E-6	4.7*

* dit komt overeen met een D-Stability stabiliteitsfactor (FoS) van ongeveer 1,2

A.4 Invoer voor faalmechanismen

De veiligheidsbeschouwingen in deze studie hebben (uitsluitend) betrekking op waterveiligheid. De veiligheid van een primaire waterkering dient te worden bepaald aan de hand van de veiligheid van de hieronder faalmechanismen:

Tabel 8 Beschouwde mechanismen bij dijkdoorsnede met leidingen.

Mechanisme	Model, Software & Opmerking
Overloop/golfoverslag en erosie kruin/binnentalud (GEKB)	Hydra-NL Frequentie van het overschrijden van het kritiek overslagdebiet toetsen aan de toelaatbare jaarlijkse faalkans. Voor een dijk met een krater wordt uitgegaan van een beschadigde maaiveld, en daarmee een verlaagd kritiek overslagdebiet van 0.1 l/m/s, vergeleken met een waarde van 10 l/m/s in normale omstandigheden.
Interne erosie piping en heave (STPH).	Opbarsten, Heave en Sellmeijer (terugschrijdende erosie) criterium. Voor de scenario's met krater in voor- of achterland worden ter plekke van de leklocatie (tegelijk diepste punt van de krater)

	intrede respectievelijk uittredepunten geschematiseerd. De waterspanningen ter plekke van de erosiekraters worden niet aangepast ten opzichte van de normale situatie (conservatief uitgangspunt).
Macro-instabiliteit binnenwaarts (STBI) en buitenwaarts (STBU)	D-Stability. Faalkans inschatting o.b.v. semi-probabilistische analyses* De kans op een instabiliteit kan toenemen wanneer er een krater nabij de dijk is ontstaan. De waterkering is gedefinieerd als gefaald indien de 'kernzone' van de dijk is aangetast, ook zone 1 of benodigd restprofiel benoemd.

*De kalibratie relatie is mogelijk niet geschikt voor de situaties met krater

Dit zijn de faalmechanismen die van belang zijn als het gaat om de invloed van de leidingen op de dijk, waarbij rekening wordt gehouden met de mogelijke gevolgen van falen van de leidingen. Hieronder een beschrijving van de belangrijkste uitgangspunten voor de veiligheid en integrale faalkansanalyse.

A.4.1 **Belasting**

De hydraulische belasting is bepaald met Hydra-NL (Klimaatscenario W+, zichtjaar 2023). De hydraulische database, uitvoerlocatie, oriëntatie en dijkgeometrie zijn per doorsnede gedefinieerd. Geen verkeersbelasting is in de berekeningen meegenomen.

A.4.2 **Erosie: GEKB**

Voor erosie binnentalud zijn Hydra-NL berekeningen uitgevoerd, zoals in de vorige paragraaf uitgelegd. Berekeningen voor 0.1 en 10 l/s/m zijn uitgevoerd.

A.4.3 **Piping: STPH**

Voor piping is de invoer zoveel mogelijk uit de stabiliteit som gehaald. Uitzonderingen waren de parameters d70, doorlatendheid en dikte van de zandpakket en (verzadigd) gewicht van de deklaag. Deze zijn uit de VNK / SOS model, per case, gehaald. Gebruikte kwantielen zijn hieronder weergegeven:

d70	k	D_aquifer	Gamma_sat
5%	95%	95%	5%

A.4.4 **Stabiliteit: STBI en STBU**

Voor stabiliteit is gebruik gemaakt van de gerapporteerde cases in **kalibratiestudie WBI/BOI** (Deltares, 2016). Voor stabiliteit binnenwaarts (STBI) is het Uplift-van model gebruikt, en voor stabiliteit buitenwaarts (STBU) is Bishop gebruikt.

Invoer hetzelfde, 2 fases gehanteerd:

STBI/STBU Fase 1: dagelijks condities en POP

STBI/STBU Fase 2: WBN of val na hoogwater

A.5 **Aanpassing cases op norm**

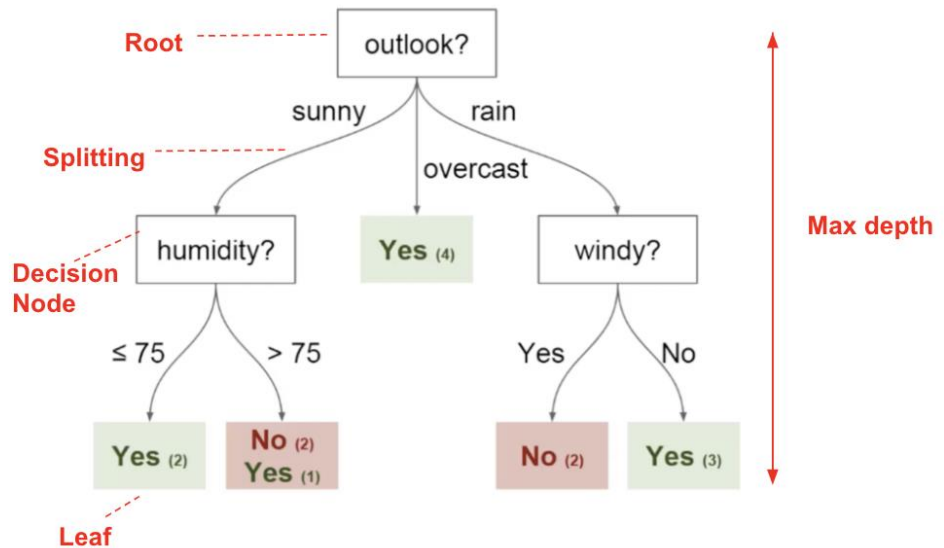
Uitgangspunt voor de geïntegreerde faalkansanalyses is dat gemiddeld beschouwd in alle cases alle faalmechanismen zonder leidingfalen (ongeveer voldoen aan de faalkanseis volgens de norm. Hiertoe moesten de meeste cases uit de kalibratiestudie worden aangepast. In geval van de faalmechanismen STBI en STBU is dit gedaan door de geometrie van de dijk aan te passen, of (als dit niet mogelijk is) grondparameters aan te passen, zonder daarbij op onrealistische waarden

uit te komen. Omdat de profielen gebruikt zijn voor kalibratie van de semi-probabilistische toets voor STBI, waren voor SPTH nog geheel geen parameters beschikbaar. Startwaarden van de parameters zijn uit WTI-SOS en daarna aangepast om precies op de faalkanseis uit te komen, wederom zonder op onrealistische waarden uit te komen.

B Decision tree analysis o.b.v. Machine Learning

Een beslissingsboom is een boomstructuur voor de weergave van de alternatieven en keuzen in een besluitvormingsproces, en is een techniek uit de besliskunde. Het is een bijzonder geval van een stroomdiagram, namelijk een zonder cykels, en met als enige actie steeds het kiezen van een tak.

Decision Tree Diagram



In kort de volgende stappen zijn gevolgd om tot een getraind 'decision tree' te komen:

- Step 1: import data (no need to normalize)
- Step 2: define input and output for ML
- Step 3: check input/output
 - remove cases with empty/error/no results
 - check that dataset/output classes are balanced (50/50, assumed if > 35% but < 65% also ok)
- Step 4: Machine Learning (classification)
 - create training and test sets train_size default = 25%
 - train ML and test/assess the ML result/score

resultaten voorbeeld:

```
- data.csv

print metrics, feature importance:
['watersystem', 'coverlayer_m', 'Pipeline label', 'Inner diameter']
[0.0, 0.0567773578181697, 0.9432226421818303, 0.0] ; sum = 1.0

Depth of tree : 2
Score during testing (%) : 85.18877057115198

|--- Pipeline label <= 7.50
```



```

| |--- Pipeline label <= 1.50
| | |--- class: 1
| |--- Pipeline label > 1.50
| | |--- class: 0
|--- Pipeline label > 7.50
| |--- coverlayer_m <= 3.15
| | |--- class: 0
| |--- coverlayer_m > 3.15
| | |--- class: 1

confusion matrix:
[[y_test=y_pred=0      y_test=0 & y_pred=1 ] # 0 = fail & 1 = ok
 [y_test=1 & y_pred=0      y_test=y_pred=1    ]]

[[0.82065217 0.17934783]
 [0.12844037 0.87155963]]

[[ correct prediction of failure      false positive(ok) ]
 [ false negative(failure)           correct prediction of ok=true positive]]

```

Opgemerkt wordt dat cases waar ‘y_test=0 & y_pred=1’ false positives zijn genoemd, en een hoog % van deze moeten worden vermeden. Enkele voor- en nadelen van beslisbomen zijn:

voordelen	nadelen
<p>Eenvoudig te begrijpen en te interpreteren.</p> <p>Vereist weinig gegevensvoorbereiding. Andere technieken vereisen vaak dat de gegevens worden genormaliseerd.</p> <p>In staat om zowel numerieke als categorische (regression and classification) gegevens te verwerken.</p> <p>Gebruikt een ‘white box’ model. Als een bepaalde situatie in een model waarneembaar is, is de verklaring voor de toestand eenvoudig te verklaren door booleaanse logica.</p> <p>Mogelijk om een model te valideren met behulp van statistische tests. Dat maakt het mogelijk om de betrouwbaarheid van het model te verantwoorden.</p> <p>Presteert goed, zelfs als de aannames ervan enigszins worden geschonden door het echte model waaruit de gegevens zijn gegenereerd.</p>	<p>Overcomplexe bomen kunnen worden creëert die de gegevens niet goed veralgemenen. Dit wordt overfitting genoemd. Mechanismen zoals snoeien, het instellen van het minimum aantal monsters dat nodig is bij een bladknoop of het instellen van de maximale diepte van de boom zijn nodig om dit probleem te voorkomen.</p> <p>Beslissingsboom-leerlingen creëren bevooroordeelde bomen als sommige klassen domineren. Het is daarom aan te raden om de dataset in balans (50/50) te brengen voordat deze in de beslisboom wordt geplaatst.</p> <p>Beslissingsbomen kunnen onstabiel zijn omdat kleine variaties in de gegevens ertoe kunnen leiden dat er een compleet andere boom wordt gegenereerd. Dit probleem wordt beperkt door gebruik te maken van beslisbomen binnen een ensemble.</p> <p>Het probleem van het leren van een optimale beslisboom is bekend als NP-compleet. Daarom zijn ze gebaseerd op heuristische algoritmen (bv. ‘greedy’) waarbij lokaal optimale beslissingen worden genomen op elk knooppunt. Dergelijke algoritmen kunnen niet garanderen dat de</p>

	globaal optimale beslissingsboom wordt teruggegeven. Dit kan worden beperkt door meerdere bomen in een ensemble-leerling te trainen, waarbij de kenmerken en steekproeven willekeurig worden bemonsterd met vervanging (zie bijvoorbeeld https://scikit-learn.org/stable/modules/ensemble.html)
--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Voor gedetailleerde achtergronden wordt verwezen naar bijvoorbeeld <https://scikit-learn.org/stable/modules/tree.html#tree-classification>

C Bepaling ontgrondingskraters gas- en waterleidingen (rapport RoyalHaskoningDHV)

RAPPORT

Bepalen ontgrondingskraters gas- en waterleidingen

Analyse voor het POV-project 'Afleiden filters voor gas- en waterleidingen parallel aan waterkeringen'

Klant: In samenwerking met Deltares (in opdracht van POV K&L)

Referentie: BH2853-RHD-ZZ-XX-RP-Z-0001

Status: S0/P01.01 definitief

Datum: 23 november 2020

Deltares

 **Royal
HaskoningDHV**
Enhancing Society Together

HASKONINGDHV NEDERLAND B.V.

Jonkerbosplein 52
6534 AB NIJMEGEN
Water

Trade register number: 56515154

+31 88 348 70 00 **T**
+31 24 323 93 46 **F**
info@rhdhv.com **E**
royalhaskoningdhv.com **W**

Titel document: Bepalen ontgrondingskraters gas- en waterleidingen

Ondertitel: Ontgrondingskraters bij waterkeringen (definitief)

Referentie: BH2853-RHD-ZZ-XX-RP-Z-0001

Status: P01.01/S0

Datum: 23 november 2020

Projectnaam: Afleiden filters voor gas- en waterleidingen parallel aan waterkeringen

Projectnummer: BH2853

Auteur(s): Harm Snoeren

Opgesteld door: Harm Snoeren en Dick Mastbergen

Gecontroleerd door: Paul Vastenburg en Henk Kruse

Datum: 23-11-2020

Goedgekeurd door: Paul Vastenburg en Harm Aantjes

Datum: 23-11-2020



Classificatie

Projectgerelateerd

Behoudens andersluidende afspraken met de Opdrachtgever, mag niets uit dit document worden vervaelvoudigd of openbaar gemaakt of worden gebruikt voor een ander doel dan waarvoor het document is vervaardigd. HaskoningDHV Nederland B.V. aanvaardt geen enkele verantwoordelijkheid of aansprakelijkheid voor dit document, anders dan jegens de Opdrachtgever. Let op: dit document bevat persoonsgegevens van medewerkers van HaskoningDHV Nederland B.V. en dient voor publicatie of anderszins openbaar maken te worden geanonimiseerd.

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Algemeen	1
1.2	Scope en afbakening	1
1.3	Leeswijzer	1
2	Referenties	2
3	Ontgrondingskraters waterleidingen	3
3.1	Inleiding	3
3.2	Uitgangspunten	3
3.2.1	Algemeen	3
3.2.2	Categorie indeling	3
3.2.3	Diepte ontgrondingskrater	4
3.2.4	Vereenvoudigde berekeningsmethodiek NEN3651	5
3.2.5	Uitgebreide berekeningsmethodiek NEN3651	5
3.2.6	Pragmatisch uitgebreide berekeningsmethodiek	6
3.2.7	Geometrie ontgrondingskraters	7
3.3	Vergelijking resultaten met vereenvoudigde formules NEN3651	8
3.4	Ontgrondingskraters t.b.v. analyse voor filters	9
3.4.1	Diepte ontgrondingskrater	10
3.4.2	Maximaal berekende afmeting ontgrondingsstraal (R)	10
3.4.3	Afmetingen ontgrondingskrater per faalmechanisme (R_L en R_B)	11
4	Ontgrondingskraters gasleidingen	12
4.1	Inleiding	12
4.2	Uitgangspunten	12
4.2.1	Algemeen	12
4.2.2	Categorie indeling	12
4.2.3	Diepte ontgrondingskrater	13
4.2.4	Theorie stationaire (maximale) gasuitstroming bij leidingbreuk	13
4.2.5	Geometrie ontgrondingskraters	16
4.3	Resultaten per categorie	17
4.4	Ontgrondingskraters t.b.v. analyse voor filters	18
4.4.1	Diepte ontgrondingskrater	19
4.4.2	Maximaal berekende afmeting ontgrondingsstraal (L)	19
4.4.3	Afmetingen ontgrondingskrater per faalmechanisme (G_L en G_B)	20
5	Conclusies en aanbevelingen	21
5.1	Conclusies	21
5.2	Aanbevelingen	21

BIJLAGEN

Bijlage 1 Resultaten waterleidingen

Bijlage 2 Resultaten gasleidingen

1 Inleiding

1.1 Algemeen

In opdracht van de POV K&L heeft Royal HaskoningDHV samen met Deltares een bijdrage geleverd aan de totstandkoming van een pragmatisch berekeningsmethodiek voor de bepaling van de ontgrondingskraters voor zowel water- als gasleidingen. Achtergronden omtrent deze pragmatische berekeningsmethodiek zijn in onderliggende rapportage gegeven. Tevens zijn voor parallel aan de waterkering gelegen water- en gasleidingen de ontgrondingskraters bepaald. De gehanteerde diameters en drukken van deze leidingen zijn zodanig gekozen, dat deze toepasbaar zijn voor het POV-project “Filters in parallel gelegen leidingen”.

1.2 Scope en afbakening

Binnen de Projectoverstijgende Verkenning Kabels en Leidingen (POV K&L) wordt een integrale analyse van leidingfalen in combinatie met dijkfalen uitgevoerd voor het opstellen van filters voor parallelle leidingen met een inwendige druk ≤ 1 MPa (≤ 10 bar) op basis van de bepaling van de invloed van leidingfalen op de dijkfaalmechanismen. Daarbij is ook inzicht nodig in de dimensies van de ontgrondingskraters van de betreffende leidingen op basis van formules, die zoveel mogelijk aansluiten bij de (deterministische) formules van de NEN3651. De huidige NEN3651 [ref.1] voorziet in een Bijlage A “Bepaling verstoringszones” met vereenvoudigde en uitgebreide formules voor de berekening van de dimensies van de ontgrondingskraters van vloeistof- en gasleidingen.

Uit de analyses van de POV K&L voor vloeistofleidingen is gebleken, dat een sluipend lek als gevolg van een klein gat of scheur in de leiding of via lekkende koppelingen voor dijkfalen maatgevend kan zijn. In de NEN3651 staan geen formules voor de bepaling van de verstoringszones bij een sluipend lek. De verstoringszone door een sluipend lek valt buiten de scope van het voorliggende rapport.

De scope van het voorliggende rapport richt zich op de toepassing van de uitgebreide formules uit de NEN3651, om zo te komen tot dimensies van de ontgrondingskraters van vloeistof- en gasleidingen voor toepassing in het POV project voor de bepaling van filters voor parallel gelegen leidingen in en nabij waterkeringen. Hierbij wordt waar mogelijk een optimalisatie toegepast van de uitgebreide formules uit de NEN3651.

De nadere uitwerking van het POV-project “Filters in parallel gelegen leidingen” voorziet in gegevens die in de toekomst bruikbaar zijn voor een brede landelijke toepassing. De uitwerking is vooralsnog toegespitst op het beheersgebied van waterschap Rivierenland.

1.3 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 is een opsomming gegeven van de gebruikte referenties. In hoofdstuk 3 zijn de uitgangspunten inclusief achtergronden van de berekeningsmethodieken gegeven omtrent de ontgrondingskraters voor waterleidingen. Tevens zijn de resultaten van de pragmatisch uitgebreide berekeningsmethodiek vergeleken met de vereenvoudigde berekeningsmethodiek. Tot slot zijn de afmetingen van de ontgrondingskraters voor een reeks aan waterleidingen gegeven. In hoofdstuk 4 zijn eveneens de uitgangspunten, achtergronden en afmetingen gegeven maar dan voor de ontgrondingskraters voor gasleidingen. In hoofdstuk 5 zijn enkele conclusies en aanbevelingen opgenomen.

2 Referenties

De volgende referenties zijn gebruikt:

- [ref. 1] NEN3651:2020, aanvullende eisen voor buisleidingen in of nabij belangrijke waterstaatswerken, d.d. januari 2020.
- [ref. 2] Rapport Deltares “Berekeningsmethode ontgroning bij gasleidingbreuk, evaluatie NEN3651, kenmerk: 1201743-000-ZKS-0003, d.d. dec 2010”.
- [ref. 3] Rapport KIWA “Lekfrequenties van gasdistributieleidingen, analyse voor het POV-project ‘Filters in parallel gelegen leidingen’, oktober 2020, documentnr.: GT-200187”.
- [ref. 4] Rapport KWR “Storingsfrequenties drinkwaterleidingen, analyse voor het POV-project ‘Filters parallel gelegen leidingen, september 2020, opdrachtnr.: 403261”.
- [ref. 5] Document Waterloopkundig Laboratorium Delft “Veiligheid persleidingen bij dijken, verslag modelonderzoek, Breusers, H.N.C., Wijdieks, J., Waterloopkundig Laboratorium Delft, M1007, 1969”.
- [ref. 6] Document Deltares “Ontgroning bij persleidingbreuk of – lek; evaluatie rekenmethode NEN3651, 1201743-000, Deltares, Dick R. Mastbergen, J. Kreber, 2010”.
- [ref. 7] Document Waterloopkundig Laboratorium Delft “Ontgroning door gasleidingbreuk, verslag modelonderzoek, Os, A.G. van, Verbeek, P.R.H, Waterloopkundig Laboratorium Delft, M1136 (1972)”.

3 Ontgrondingskraters waterleidingen

3.1 Inleiding

Voor de bepaling van de ontgrondingskraters wordt er in de NEN3651 onderscheid gemaakt tussen de vereenvoudigde berekeningsmethodiek en de uitgebreide berekeningsmethodiek. Bij de vereenvoudigde berekeningsmethodiek wordt enkel gebruik gemaakt van de inwendige druk in de leiding en de diameter. Deze berekeningsmethodiek resulteert echter in grote ontgrondingskraters. Bij de uitgebreide berekeningsmethodiek wordt gebruik gemaakt van pompkarakteristieken en wordt het werkelijke vermogen bij uitstroming uit de leiding minder conservatief berekend. Nadeel van deze berekeningsmethodiek is de benodigde beschikbaarheid van de pompkarakteristieken.

Omdat het niet wenselijk is, dat wordt uitgegaan van te conservatieve afmetingen van de ontgrondingskraters, is de uitgebreide berekeningsmethodiek op pragmatische wijze geoptimaliseerd. Daarbij is geen gebruik gemaakt van pompkarakteristieken, maar toch worden minder conservatieve afmetingen van de ontgrondingskraters bepaald. Deze optimalisatie wordt in dit document aangeduid als “pragmatisch uitgebreide berekeningsmethodiek”. Deze pragmatische geoptimaliseerde berekeningsmethodiek die gebruik maakt van de uitgebreide formules is nog steeds conservatief en is een bovengrensbepaling van de ontgrondingskraters waarbij wordt uitgegaan van het maximale debiet, zonder noodzakelijke verdere input van het leidingsysteem. Het maximale debiet is gebaseerd op een aangenomen maximale stroomsnelheid van het water door de leiding. De resultaten zijn conservatiever dan wanneer wordt uitgegaan van de pompkarakteristieken.

In navolgende paragrafen zijn de volgende onderdelen behandeld:

- Uitgangspunten (algemeen en specifiek per berekeningsmethodiek, etc.).
- Vergelijk afmetingen ontgrondingskraters (vereenvoudigde en pragmatisch uitgebreide berekeningsmethodiek).
- Resultaten afmetingen ontgrondingskraters conform pragmatisch uitgebreide berekeningsmethodiek. Deze resultaten dienen als input voor de dijkfaalmechanismen die ten grondslag liggen aan de filters voor parallelle leidingen.

3.2 Uitgangspunten

3.2.1 Algemeen

Let op: op enkele punten (formules, terminologie, geometrie ontgrondingskraters en afkortingen) zijn er verschillen in onderliggend document ten opzichte van de NEN3651.

3.2.2 Categorie indeling

Waterleidingen zijn onder meer: drinkwater-, afvalwater-, oppervlaktewater-, koelwaterleidingen, etc. Feitelijk betreft het hier de vloeistofleidingen, met uitzondering van olieleidingen. Het gaat hier om gesloten doorgaande leidingen met een inwendige druk ≤ 1 MPa. Er is hier uitgegaan van de term waterleiding, omdat de term persleiding niet gebruikt wordt bij drinkwaterleidingen. Daarnaast kan in een vrij-verval leiding ook een overdruk aanwezig zijn. Dit rapport kan gehanteerd worden voor de hiervoor genoemde soorten waterleidingen met uitzondering van olieleidingen.

De categorie indeling voor de waterleidingen (zie Tabel 3.1) komt overeen met de onderverdeling die KWR [ref. 4] hanteert voor de drinkwaterleidingen. Daarbij worden op aangegeven van KWR drie (maximale) drukklassen aangehouden, te weten 3, 4 en 6 bar. KWR heeft ten behoeve van dit project lekfrequenties opgenomen in [ref. 4]. Om de pragmatisch uitgebreide berekeningsmethodiek te kunnen toepassen is een maximale stroomsnelheid van het water in de leiding van 10 m/s gebruikt om daaruit het maximale debiet en hydraulisch vermogen af te leiden. De gegeven bovengrens stroomsnelheid is conservatief en is aangenomen op basis van praktijkervaringen en kan worden beschouwd als een bovengrenswaarde (wordt ingeschat op meer dan 99%). Deze stroomsnelheid is niet rekenkundig onderbouwd. In de praktijk liggen voor veel leidingen de ontwerp stroomsnelheden binnen een leidingstelsel significant lager (circa 1 à 3 m/s).

Uit praktijkervaring is gebleken dat de gronddekking op de leiding bijna altijd meer is dan 0,8 m en gemiddeld iets meer dan een meter bedraagt. De bovengrens van de gronddekking (95% bovengrenswaarde) is gekozen op 1,25 m.

De lekfrequenties in het rapport van KWR [ref. 4] hebben betrekking op het type leidingmateriaal, de leeftijd en de diameter van de leiding. Aangezien de berekende grootte van de ontgrondingskraters niet afhankelijk is van het type leidingmateriaal en de leeftijd, is in dit rapport hiervoor geen onderscheid tussen gemaakt.

Tabel 3.1 Categorie indeling waterleidingen

Categorie klasse [-]	Categorie diameters [-]	Werkdruk [bar]	Maximale stroomsnelheid ⁽²⁾ [m/s]	Gronddekking ⁽¹⁾ [m]
Klein I	Diameter ≤ 90 mm	3, 4 en 6	10	1,25
Klein II	Diameter > 90 t/m 125 mm	3, 4 en 6	10	1,25
Klein III	Diameter > 125 t/m 200 mm	3, 4 en 6	10	1,25
Middelgroot I	Diameter > 200 t/m 400 mm	3, 4 en 6	10	1,25
Middelgroot II	Diameter > 400 t/m 700 mm	3, 4 en 6	10	1,25
Groot	Diameter > 700 mm	3, 4 en 6	10	1,25

(1) Deze gronddekking komt overeen met 95% bovengrenswaarde.

(2) Aangenomen maximale stroomsnelheid in leidingstelsel op basis van praktijkervaring (ingeschatte 99% bovengrenswaarde).

De berekeningsmethode is ook geldig voor hogere drukken, echter 6 bar is hier als bovengrens aangehouden, omdat hogere werkdrukken niet voorkomen in de waterleidingsystemen die in het gebied van waterschap Rivierenland worden beschouwd. Bij de bepaling van de ontgrondingskraters (zie hoofdstuk 3.4) is uitgegaan van kleine diameterstappen en de in Tabel 3.1 gegeven drukstappen. Daarnaast is uitgegaan van leidingen gelegen in fijn zand. De formules in NEN3651 zijn gebaseerd op fijn zand. Dit is conservatief.

3.2.3 Diepte ontgrondingskrater

Voor ondiepe leidingen waarbij geen grondvervorming optreedt maar alleen erosie van zand naar het oppervlak aan de orde is geldt (conform [ref. 5] en [ref. 6]):

$$D_k = 1,2 \cdot (D_u + H)$$

Waarbij:

D_k = diepte ontgrondingskrater [m]

D_u = uitwendige leidingdiameter [m]

H = gronddekking op de leiding [m]

3.2.4 Vereenvoudigde berekeningsmethodiek NEN3651

De formules volgens de vereenvoudigde berekeningsmethodiek voor de ontgrondingskrater is gegeven in de NEN3651 A.2.3 [ref. 1] en luidt.

$$R_B = 8 \cdot \sqrt[3]{h^3 \cdot D_i^5}$$

Waarbij:

R_B = straal ontgrondingskrater [m]

h = drukhoogte [meter water kolom]

D_i = inwendige leidingdiameter [m]

3.2.5 Uitgebreide berekeningsmethodiek NEN3651

De formules volgens de uitgebreide berekeningsmethodiek voor de ontgrondingskraters zijn gegeven in de NEN3651 A.2.2 [ref. 1], [ref. 5] en [ref. 6]. De voornaamste formules hieromtrent zijn hierna gegeven.

Straal krater in richting uitstroming:

$$R = 7,8 \cdot d_g \cdot \left(\frac{P}{\rho \cdot g^{1,5} \cdot \mu \cdot d_g^{3,5}} \right)^{0,243}$$

Waarbij:

R = straal ontgroning in richting uitstroming [m] (= ontgrondingsstraal)

d_g = gatgrootte [m]

P = hydraulisch vermogen van de uitstroming $P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot h$ [W]

ρ = dichtheid water = 1000 kg/m³

g = zwaartekrachtversnelling = 9,81 m/s²

Q = debiet door het gat [m³/s]

h = maatgevende drukhoogte ter plaatse van het gat [m]

μ = afvoercoëfficiënt bij het gat (tussen 0,5 en 1,0) [-]

De formules zijn afgeleid uit de modelproeven voor fijn zand [ref. 5]. In andere grondsoorten zal de krater geringer zijn. De factor 7,8 is afgeleid uit de proefresultaten met een overschrijdingskans van 5% [ref. 6].

Op basis van de gegeven pompkromme kunnen de druk en uitstroming door een rond gat in de leiding berekend worden. Druk en uitstroomdebiet bepalen het hydraulisch vermogen van de straal die de ontgrondingskrater veroorzaakt en zijn bepalend voor de grootte. De berekening is conform NEN3651 [ref. 1] en [ref. 6].

Bij vrije uitstroming door een rond gat volgt voor de uitstroomsnelheid (volgens wet van Bernoulli of Torricelli). Deze snelheid is dus uitsluitend afhankelijk van de druk in de leiding.

$$v_{\text{uit}} = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = \sqrt{\frac{2p}{\rho}}$$

Waarin:

v_{uit} = stroomsnelheid uit het gat [m/s]

h = drukhoogte [meter water kolom]

p = druk = $\rho \cdot g \cdot h$ [Pa]

Het uitstromend debiet (Q) is dan (in m^3/s):

$$Q = \mu \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_g^2 \cdot v_{\text{uit}}$$

Waarin de afvoercoëfficiënt μ tussen de 0,5 (bij hoge drukken en kleine gaten) en 1 (bij lage drukken en grote gaten) ligt en overeenkomstig de NEN3651 [ref. 1] kan worden bepaald door:

$$h \leq 50 \text{ meter water kolom: } \mu = 0,0002 \cdot h^2 - 0,02 \cdot h + 1$$

$$h > 50 \text{ meter water kolom: } \mu = 0,5$$

Het bijbehorend hydraulisch vermogen (in W) bedraagt:

$$P = p \cdot Q = \rho \cdot g \cdot Q \cdot h$$

De grootte van het (rond aangenomen) gat is onbekend, maar ligt in ieder geval tussen 0 en de inwendige diameter van de leiding.

$$0 \leq d_g \leq D_i$$

3.2.6 Pragmatisch uitgebreide berekeningsmethodiek

In deze paragraaf wordt een methode beschreven waarmee de ontgrondingskrater op een vereenvoudigde manier kan worden berekend zonder dat nadere informatie over het pomp- of leidingsysteem benodigd is. Het maximale debiet Q wordt daarbij begrensd door de maximale leidingsnelheid U (in m/s). De ontwerp stroomsnelheid ligt voor de meeste leidingen onder de 3 m/s en is enigszins afhankelijk van leidingdiameter en type. Voor dit project is uitgegaan van een aangenomen maximale stroomsnelheid (bovengrens) van 10 m/s . Bij kleinere leidingsystemen is de weerstand zo groot dat deze snelheid in de praktijk niet voor kan komen. Bij systemen met grotere diameter leidingen is de capaciteit van het pompstation de beperkende factor voor de stroomsnelheid.

$$Q = \frac{\pi}{4} \cdot D_i^2 \cdot U$$

In de berekening wordt nu de gatgrootte berekend waarmee bij maximale druk het maximale debiet en dus ook het maximale vermogen bereikt wordt. De maatgevende gatgrootte is hierbij niet afhankelijk van materiaalsoort en leeftijd. Het betreft hier een bovengrensbenadering, druk en debiet zijn immers begrensd. In de vereenvoudigde formule in de NEN3651 wordt uitgegaan van een onbegrensd debiet (reservoirbenadering).

De maatgevende gatgrootte volgt uit:

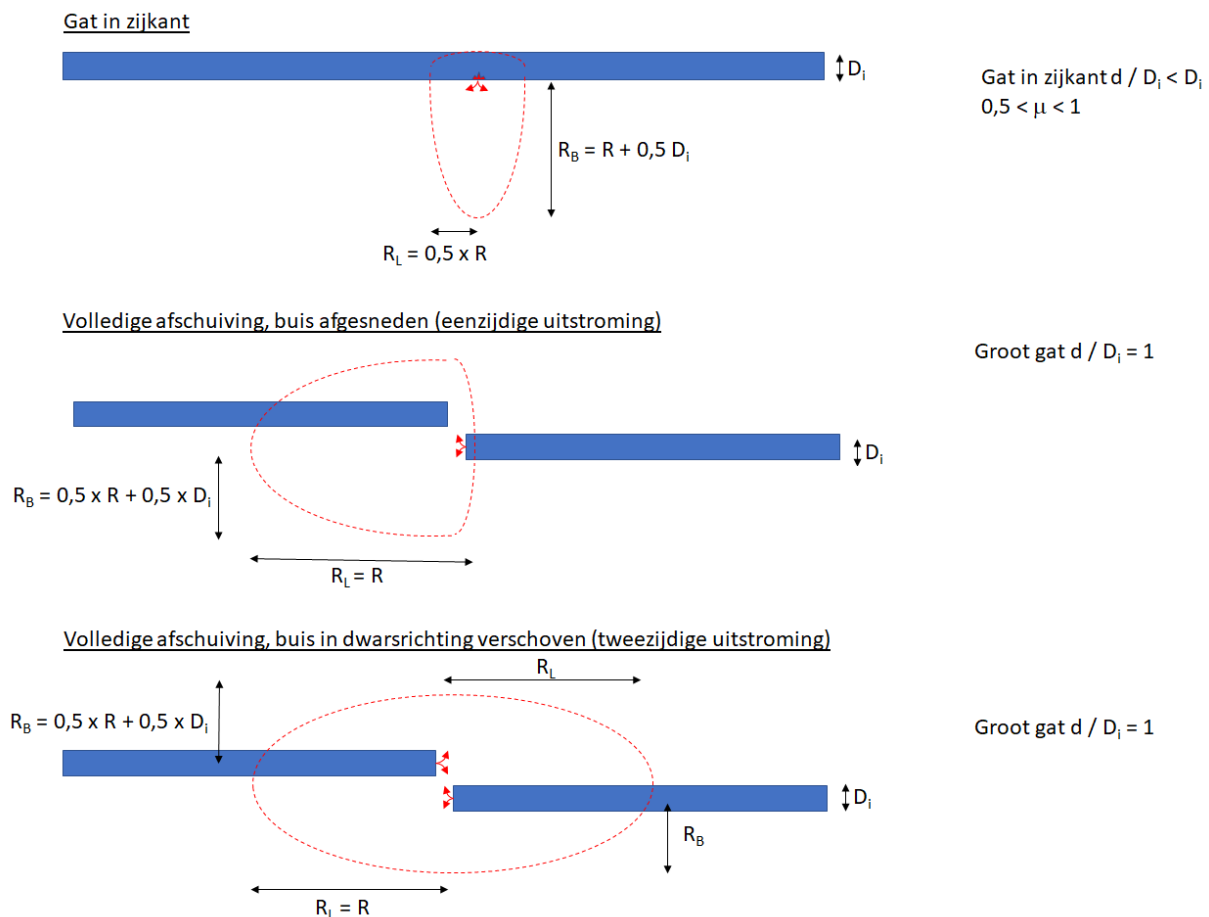
$$d_g = \sqrt{\frac{U}{\mu \cdot v_{uit}}} \cdot D_i$$

In werkelijkheid zal, afhankelijk van het pomp- en regelsysteem, de druk vaak afnemen bij toenemend uitstroomdebiet zodat het maximale vermogen afneemt. Bij een volledige breuk treedt dan een maximaal debiet op, maar met een veel lagere druk terwijl bij een klein gat de druk gehandhaafd blijft maar het debiet beperkt is.

Indien de inwendige leidingdiameter (D_i) onbekend is kan eventueel gebruik worden gemaakt van een aangenomen wanddikte van de leiding of nog conservatiever de uitwendige leidingdiameter. In dit rapport is uitgegaan van de inwendige diameter.

3.2.7 Geometrie ontgrondingskraters

In de NEN3651 is informatie opgenomen hoe de ontgraving (dwars op de leiding (RB) dan wel in lengterichting van de leiding (RL) kan worden afgeleid. Een verduidelijking hiervan is gegeven in Figuur 3.1. De aangehouden geometrie van de ontgrondingskraters wijkt enigszins af van de NEN3651.



Figuur 3.1 Geometrie ontgrondingskraters waterleidingen

3.3 Vergelijking resultaten met vereenvoudigde formules NEN3651

Zoals eerder aangegeven worden met de vereenvoudigde berekeningsmethodiek uit de NEN3651 conservatieve afmetingen van ontgrondingskraters berekend. Derhalve is gezocht naar een meer geoptimaliseerde aanpak waarbij gebruik wordt gemaakt van het maximale debiet gegeven de maximale stroomsnelheid van het water in de leiding (pragmatisch uitgebreide berekeningsmethodiek).

In Tabel 3.2 zijn de maximale ontgrondingskraters per categorie (zie paragraaf 3.2.2) bepaald. Dit is zowel gedaan voor de vereenvoudigde als de pragmatisch uitgebreide berekeningsmethodiek.

Tabel 3.2 Resulterende maximale ontgrondingskraters per categorie waterleidingen (gat in zijkant)

Berekeningsmethodiek	Betreft	Eenheid	Klein I	Klein II	Klein III	Middel groot I	Middel groot II	Groot
	Diameter categorie	[mm]	90 mm ≤	90 t/m 125 mm ^	> 125 t/m 200 mm	> 200 t/m 400 mm	> 400 t/m 700 mm	> 700 mm
	Diameter (D)	[mm]	90	125	200	400	700	1200
	Dekking (H)	[m]	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
	Diepte ontgrondingskrater	[m]	1,6	1,7	1,7	2,0	2,3	2,9
	Max. leidingssnelheid (U1)	[m/s]	10	10	10	10	10	10
	Max. debiet uitstroming (Q1)	[m³/s]	0,06	0,12	0,31	1,26	3,85	11,31
	Situatie 1							
	Werkdruk (p1)	[bar]	3	3	3	3	3	3
Pragmatisch uitgebreid	Max. vermogen (P1)	kW	19	36	92	370	1133	3328
	Max. ontgrondingsstraal (R1)	[m]	5,4	6,6	8,9	13,9	19,8	27,8
Vereenvoudigd	Ontgrondingsstraal (R1)	[m]	6,4	7,8	10,5	16,2	22,9	32,1
	Situatie 2							
	Werkdruk (p2)	[bar]	4	4	4	4	4	4
Pragmatisch uitgebreid	Max. vermogen (P2)	kW	25	48	123	493	1510	4438
	Max. ontgrondingsstraal (R2)	[m]	5,9	7,3	9,8	15,2	21,7	30,6
Vereenvoudigd	Ontgrondingsstraal (R2)	[m]	7,1	8,7	11,7	18,0	25,5	35,8
	Situatie 3							
	Werkdruk (p3)	[bar]	6	6	6	6	6	6
Pragmatisch uitgebreid	Max. vermogen (P3)	kW	37	72	185	740	2265	6657
	Max. ontgrondingsstraal (R3)	[m]	6,5	8,0	10,8	16,7	23,9	33,7
Vereenvoudigd	Ontgrondingsstraal (R3)	[m]	8,2	10,1	13,6	21,0	29,7	41,6

Op basis van deze berekeningsresultaten kan worden geconcludeerd, dat de berekende ontgrondingsstraal op basis van de pragmatisch uitgebreide berekeningsmethodiek kleiner is dan met de vereenvoudigde berekeningsmethodiek. De reductie van de straal is orde grootte 15% bij 3 bar, 16% bij 4 bar en 20% bij 6 bar.

3.4 Ontgrondingskraters t.b.v. analyse voor filters

Ten behoeve van de uit te voeren faalkansanalyses zijn de ontgrondingskraters berekend op basis van de pragmatisch uitgebreide berekeningsmethodiek. Hierbij is uitgegaan van een maximaal debiet en hieruit afgeleid vermogen gegeven de aangenomen stroomsnelheid van het water van 10 m/s.

- De berekeningen zijn uitgevoerd voor een reeks aan diameters en drukken en een gronddekking van 1,25 m (zie Tabel 3.1). Hierbij is uitgegaan van diameterstappen van 5 tot 50 mm.
- Per situatie is de maximale ontgrondingsstraal (R) bepaald. Het betreft hier de ontgrondingskuil in de richting van de uitstroming vanaf het gat, waarbij:
 - Per situatie het maximale debiet is berekend op basis waarvan de effectieve gatgrootte die dit maximale debiet levert bij maximale druk ($0 < d_{\text{gat}} < D$) en maximaal hydraulisch vermogen zijn bepaald.
 - Voor het oppervlak van het gat is uitgegaan van een rond gat.
 - Is aangenomen dat de druk in de leiding gelijk blijft.
- Vervolgens zijn voor de onderstaande leidingfaalsoorten de bijbehorende R_L en R_B vastgesteld (conform paragraaf 3.2.7):
 - Gat in de zijkant van de leiding.
 - Volledige afschuiving (buis afgesneden / buis in dwarsrichting verschoven)(eenzijdige en tweezijdige uitstroming).
- De berekende afmetingen van de ontgrondingskraters moeten worden gezien als bovengrenswaarden. Door de toepassing van een conservatieve inschatting van het vermogen is de berekende straal groter dan de 95% waarde met een gegeven vermogen. Er is uitgegaan van een maximaal gelijkblijvende druk en een maximaal debiet op het moment van optreden van een lek. De berekeningsresultaten zijn hierdoor conservatief. In werkelijkheid zal de druk afnemen bij een toenemend debiet en bij grotere afstand tot het pompstation. Ook is uitgegaan van fijn zand welke moet worden gezien als meest ongunstige grondslag.

3.4.1 Diepte ontgrondingskrater

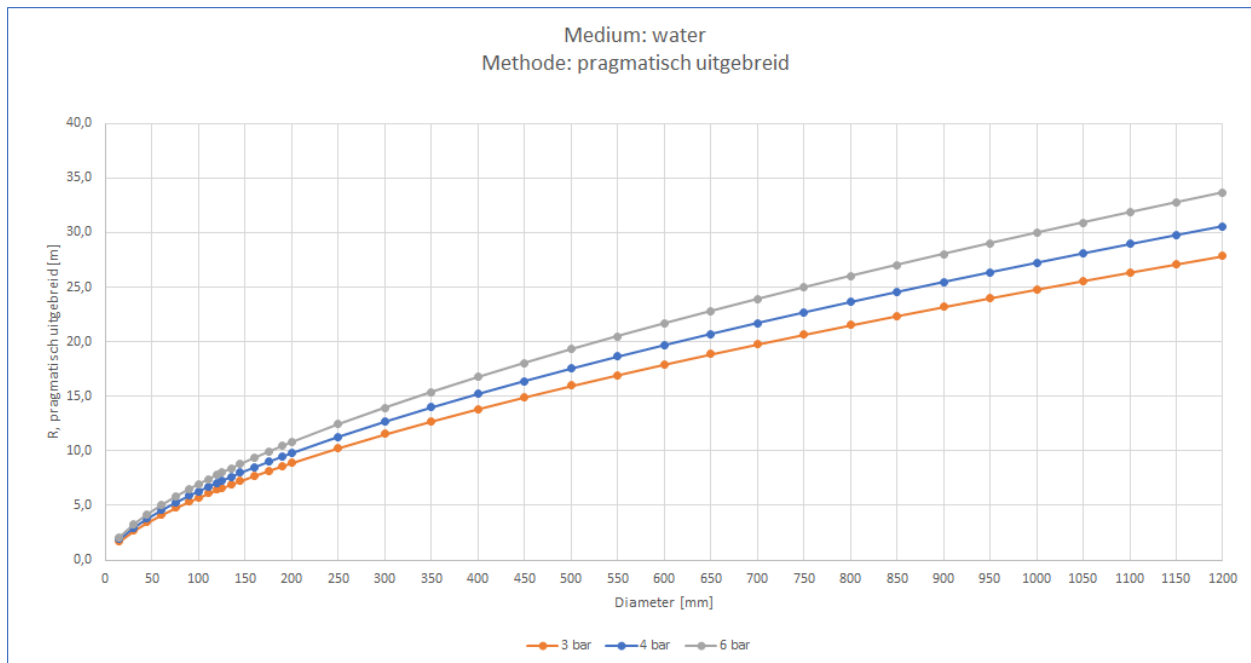
In Tabel 3.3 zijn de dieptes van de ontgrondingskraters (D_k) gegeven uitgaande van een gronddekking van 1,25 m.

Tabel 3.3 Diepte ontgrondingskraters waterleidingen

Categorieën [-]	Uitwendige leidingdiameter [mm]	Diepte ontgrondingskrater [m]	Categorieën [-]	Uitwendige leidingdiameter [mm]	Diepte ontgrondingskrater [m]	
Diameter ≤ 90 mm	15	1,5	Diameter > 400 t/m 700 mm	450	2,0	
	30	1,5		500	2,1	
	45	1,6		550	2,2	
	60	1,6		600	2,2	
	75	1,6		650	2,3	
	90	1,6		700	2,3	
Diameter > 90 t/m 125 mm	100	1,6	Diameter > 700 mm	750	2,4	
	110	1,6		800	2,5	
	120	1,6		850	2,5	
	125	1,7		900	2,6	
Diameter > 125 t/m 200 mm	135	1,7		950	2,6	
	145	1,7		1000	2,7	
	160	1,7		1050	2,8	
	175	1,7		1100	2,8	
	190	1,7		1150	2,9	
	200	1,7		1200	2,9	
Diameter > 200 t/m 400 mm	250	1,8				
	300	1,9				
	350	1,9				
	400	2,0				

3.4.2 Maximaal berekende afmeting ontgrondingsstraal (R)

In onderstaande figuren zijn de berekende ontgrondingsstralen (R) gegeven in een grafiek. In bijlage 1 zijn de numerieke resultaten gegeven in tabellen. Voor de berekeningen van de dijkfaalmechanismen bij een waterkering dienen de resultaten uit paragraaf 3.4.3 te worden aangehouden.



Figuur 3.2 Maximale ontgrondingsstraal R , pragmatisch uitgebreide berekeningsmethodiek (gebaseerd op maximaal debiet en vermogen, max. stroomsnelheid 10 m/s) bij 3, 4 en 6 bar leidingdruk

3.4.3 Afmetingen ontgrondingskrater per faalmechanisme (R_L en R_B)

Op basis van de ontgrondingsstraal (R) zijn de lengte en breedte R_L en R_B bepaald. In bijlage 1 zijn de numerieke resultaten gegeven in tabellen.

4 Ontgrondingskraters gasleidingen

4.1 Inleiding

De wijze waarop de ontgrondingskraters voor gasleidingen dienen te worden bepaald is beschreven in de NEN3651 [ref. 1]. Aangezien de NEN3651 op enkele punten onduidelijk is, is aanvullend uitgegaan van [ref. 2] en [ref 8]. De berekeningsmethoden en bijbehorende formules zoals in [ref. 2] zijn opgenomen, zijn hierbij leidend. In paragraaf 4.2.4 is enige achtergrondinformatie gegeven.

Voor onderhavig project is beoogd om voor een reeks aan situaties met verschillende drukken en diameters de ontgrondingskraters door erosie te berekenen. De erosie krater is de maatgevende krater, deze is groter dan de explosie krater [ref. 1]. De resultaten van de krater berekeningen worden vervolgens in berekeningen van de dijkfaalmechanismen meegenomen.

De tijdsduur van uitstroming in geval van een lekkage van een gasleiding is een belangrijke factor voor de bepaling van de ontgrondingsstraal. Omdat deze tijdsduur van uitstroming van meerdere factoren afhankelijk is, is conform NEN3651 voor onderhavig project uitgegaan van een conservatief aangenomen maximale uitstromingsduur van 7200 seconden (2 uur). De resultaten zullen hierdoor conservatiever zijn dan wanneer wordt uitgegaan van de werkelijke uitstromingsduur per leidingsysteem door bijvoorbeeld het eerder sluiten van afsluiters. Tevens wordt verondersteld dat er geen verlaging van de druk optreedt gedurende de uitstroming van het gas.

In navolgende paragrafen zijn de volgende onderdelen behandeld:

- Uitgangspunten (algemeen en achtergronden berekeningsmethodiek, etc.)
- Maximale ontgrondingsstralen per categorie gasleiding.
- Resultaten afmetingen ontgrondingskraters.

4.2 Uitgangspunten

4.2.1 Algemeen

Let op: op enkele punten (formules, terminologie, geometrie ontgrondingskraters en afkortingen) zijn er verschillen in onderliggend document ten opzichte van de NEN3651.

4.2.2 Categorie indeling

Het gaat om gastransportleidingen en gasdistributieleidingen.

De onderverdeling voor de gasleidingen (zie Tabel 4.1) is afgestemd op de gegevens van KIWA [ref. 3]. KIWA levert ten behoeve van dit project lekfrequenties aan. Deze data heeft tevens betrekking op het type leidingmateriaal. Aangezien de gatgrootte en daarmee de berekende grootte van de ontgrondingskraters niet afhankelijk is van het type leidingmateriaal is in dit rapport hiervoor geen onderscheid tussen gemaakt.

Tabel 4.1 Categorie indeling gasleidingen

Categorie klasse [-]	Categorie diameters [-]	Absolute druk ⁽²⁾ [bar]	Tijdsduur van de uitstroming [s]	Gronddekking ⁽¹⁾ [m]
Gas I	Diameter ≤ 125 mm	1,1, 2, 5 en 9	7200	1,25
Gas II	Diameter > 125 t/m 200 mm	1,1, 2, 5 en 9	7200	1,25
Gas III	Diameter > 200 t/m 315 mm	1,1, 2, 5 en 9	7200	1,25
Gas IV	Diameter > 315 t/m 500 mm	1,1, 2, 5 en 9	7200	1,25

(1) Deze gronddekking komt overeen met 95% bovengrens.

(2) Een absolute druk van 9 bar is de maximale druk die in de rapportage van KIWA wordt vermeld [ref. 3]. Het betreft een overdruk van 8 bar in de leiding ten opzichte van de atmosferische druk.

Bij de bepaling van de ontgrondingskraters ten behoeve van de analyse van de dijkfaalmechanismen (zie paragraaf 4.4) is uitgegaan van kleine diameterstappen en de in Tabel 4.1 gegeven drukstappen. Daarnaast is uitgegaan van leidingen gelegen in nat fijn zand conform het modelonderzoek [ref 8]. In kleigrond is de krater naar verwachting kleiner. Alhoewel droog zand conservatief is, is in deze rapportage aangenomen dat bij de combinatie van dijkfalen en leidingfalen er altijd sprake is natte omstandigheden, zodat het niet nodig is om van droge omstandigheden uit te gaan. De resultaten uit deze rapportage worden gebruikt voor het afleiden van filters voor parallelle leidingen in en nabij waterkeringen.

4.2.3 Diepte ontgrondingskrater

De diepte van de ontgrondingskrater (D_k) is, afhankelijk van de dekking en de grondsoort (vochtigheid), volgens:

$$D_k = 3 \cdot D_0 + H \quad \text{voor } w < 2\%$$

$$D_k = 40 \cdot R(w) \cdot D_0 + H \quad \text{voor } 2\% < w < 5\%$$

$$D_k = 1,6 \cdot D_0 + H \quad \text{voor } w > 5\%$$

Waarbij:

D_k = diepte ontgrondingskrater [m]

D_0 = uitwendige leidingdiameter [m]

H = gronddekking op de leiding [m]

$R(w)$ = constante afhankelijk van vochtgehalte (w) en grondsoort, zie Figuur 4.1. Voor nat zand en teelaarde bedraagt deze 0,025.

4.2.4 Theorie stationaire (maximale) gasuitstroming bij leidingbreuk

In deze paragraaf is beschreven hoe groot de gasuitstroming en impuls is bij permanentie, dus uit een leiding waarvan de druk constant gehouden wordt, bij het optreden van een gat volgens de thermodynamica. Deze berekeningsmethode, geformuleerd in [ref. 7] wordt ook gehanteerd in NEN3651 [ref. 1] en [ref. 2]. In werkelijkheid zal er een dynamische uitstroming optreden met snelle afname van de druk in de tijd. In deze situatie wordt echter veiligheidshalve uitgegaan van een constante druk gedurende 2 uur.

Met behulp van de thermodynamische vergelijkingen van de gasstroming en expansie en onder aanname van stationaire uitstroming door een gat bij constante druk volgt de maximale massa-uitstroom Q en de impulsflux I benodigd voor de berekening van de ontgrondingskuil.

Voor samendrukking en expansie geldt de Ideale Gaswet:

$$p_i / \rho_i = R \cdot T_i$$

Waarin:

p = druk

ρ = dichtheid gas

$R = c_p - c_v$ met

c_p = soortelijke warmte gas bij constante druk

c_v = soortelijke warmte gas bij constant volume

i = index die plaats aangeeft (0 = in leiding, omg = buiten, $*$ = in gat bij uitstroming)

Daarna volgt dan de druk, dichtheid en snelheid bij uitstroming:

$$\rho_0 = \frac{\rho_{omg} \cdot p_0}{p_{omg}}$$

Waarin:

p_{omg} = omgevingsdruk (= 1 bar = 10^5 Pa)

p_0 = druk in leiding

p^* = druk bij uitstroming

ρ_{omg} = dichtheid gas bij omgevingsdruk (= 0,833 kg/m³ voor aardgas)

ρ_0 = dichtheid gas in leiding

ρ^* = dichtheid gas bij uitstroming

Voor de uitstroming en expansie van het gas bij uitstroming door een gat, waarbij door drukdaling afkoeling ontstaat en de dichtheid afneemt, geldt de energievergelijking (adiabatisch dat wil zeggen zonder warmte toe- of afvoer):

$$e_{inw} + p / \rho + \frac{1}{2} u^2 = \text{constant}$$

Hieruit volgt met de gaswet de Poissonvergelijking voor adiabatische, isentropische uitstroming:

$$p_i / \rho_i^\kappa = \text{constant}$$

met $\kappa = c_p / c_v$ (= 1,33 voor aardgas).

Het gas stroomt uit met de kritische uitstroomsnelheid, onafhankelijk van de druk zolang de omgevingsdruk niet boven een kritische waarde komt (immers p / ρ is constant).

Dan volgt:

$$u^* = \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa}{\kappa + 1} \cdot \frac{p_0}{\rho_0}}$$

$$\frac{p^*}{p_0} = \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}$$

$$\frac{\rho^*}{\rho_0} = \left(\frac{p^*}{p_0}\right)^{\frac{1}{\kappa}}$$

En kan het debiet van het uitstromende gas worden berekend:

$$Q = \rho^* \cdot u^* \cdot A$$

Die wordt gebruikt voor het berekenen van de impulsstroom:

$$I = Q \cdot u^* + (p^* - p_{omg}) \cdot A$$

Waarin:

A de gatdoorsnede in m² (kan zijn volledige breuk of langsscheur). De gatdoorsnede is maximaal gelijk aan de binnendoorsnede van de gasleiding. Bij een nog groter gat (langsscheur) blijft immers de pijpdoorsnede maatgevend. Uit de zo berekende impulsstroom worden de ontgrondingskuilafmetingen berekend.

De berekeningsmethode is gebaseerd op modelonderzoek uit 1972, dat is uitgevoerd door het Waterloopkundig Laboratorium te Delft (nu Deltares) [ref. 7]. In dit onderzoek wordt de kraterontwikkeling in de tijd gegeven als functie van grondsoort (droog, nat of vochtig zand), gatgrootte en de gasuitstroming in de tijd. Deze berekeningsmethode is overgenomen in NEN3651:2012.

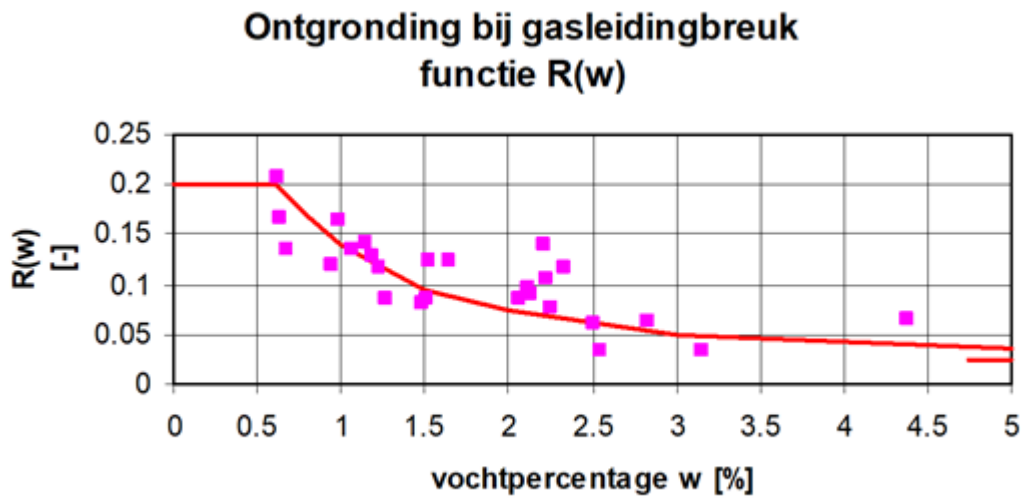
De berekeningen zijn conform NEN3651 Bijlage A.1.1, Ontgroning / erosie door uitstromend gas en gebaseerd op modelonderzoek van WL Delft, 1972, 1991, Pijpleidingcode en herevaluatie Deltares, 2010 [ref 7].

Voor de straal van de ontgroning in de richting van de uitstroming (L) (= ontgrondingsstraal), is de volgende semi-empirische relatie afgeleid, gebaseerd op theorie voor ontgrondingen en de WL modelproefresultaten, als functie van de impuls en de tijd:

$$L = R(w) \cdot \left\{ \frac{g}{\eta^2} \cdot \left(\frac{I}{\rho_{omg} \cdot g} \right)^3 \cdot t^2 \right\}^{1/8}$$

Omdat fijn zand maatgevend werd geacht voor de kratergrootte zijn andere grondsoorten niet getest. Naar verwachting is de ontgroning in klei veel geringer. Voor nat zand ($w > 5\%$) is voor de 95% bovengrenswaarde een $R(w)$ van 0,025 aangehouden. Een spreidingsfactor van 1,4 is hierin reeds verdisconteerd. De grafiek in Figuur 4.1 geeft de spreiding van de proefresultaten weer bij verschillende vochtgehaltes.

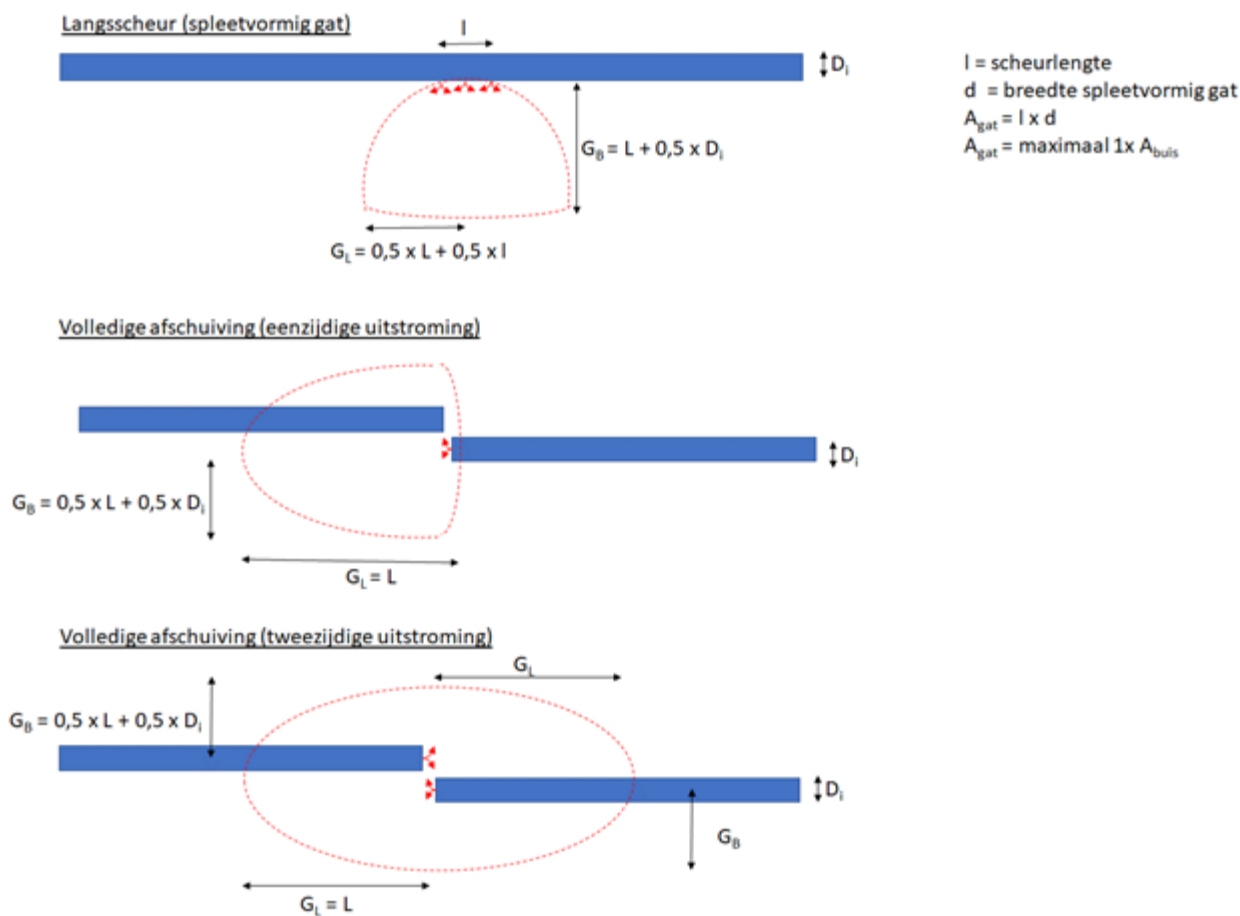
Indien de inwendige leidingdiameter (D_i) onbekend is kan eventueel gebruik worden gemaakt van een aangenomen wanddikte van de leiding of nog conservatiever de uitwendige leidingdiameter. In dit rapport is uitgegaan van de inwendige diameter.



Figuur 4.1 $R(w)$ parameter als functie van het vochtgehalte (fijn zand). Voor nat zand geldt 0,025 als 95% bovengrenswaarde. Symbolen geven de modelproefresultaten weer.

4.2.5 Geometrie ontgrondingskraters

In de NEN3651 is informatie opgenomen hoe de ontgroning (dwars op de leiding (GB) dan wel in lengterichting van de leiding (GL) kan worden afgeleid. Een verduidelijking hiervan is gegeven in Figuur 4.2. De aangehouden geometrie van de ontgrondingskraters wijkt enigszins af van de NEN3651.



Figuur 4.2 Geometrie ontgrondingskraters gasleidingen

4.3 Resultaten per categorie

In Tabel 4.2 zijn de berekende ontgrondingsstralen inclusief impulsflux voor enkele representatieve gasleidingen per categorie gegeven.

Tabel 4.2 Resulterende maximale kuillengte per categorie gasleidingen

Betreft	Eenheid	Gas I	Gas II	Gas III	Gas IV
Diameter categorie	[mm]	≤ 125 mm	> 125 t/m 200 mm	> 200 t/m 315 mm	> 315 t/m 500 mm
Diameter (D)	[mm]	125	200	315	500
Tijdsduur van de uitstroming (t)	[s]	7200	7200	7200	7200
Dekking (H)	[m]	1,25	1,25	1,25	1,25
Diepte ontgrondingskrater	[m]	1,5	1,6	1,8	2,1
Situatie 1					
Overdruk	[bar]	0,1	0,1	0,1	0,1
Absolute druk (p1)	[bar]	1,1	1,1	1,1	1,1
Impulsflux (I 1)	[kN]	0,5	1,2	3,0	7,6

Betreft	Eenheid	Gas I	Gas II	Gas III	Gas IV
Max. ontgrondingsstraal (L1)	[m]	1,3	1,8	2,4	3,3
Situatie 2					
Overdruk	[bar]	1	1	1	1
Absolute druk (p2)	[bar]	2	2	2	2
Impulsflux (I 2)	[kN]	1,9	4,8	11,8	29,8
Max. ontgrondingsstraal (L2)	[m]	2,1	3,0	4,1	5,5
Situatie 3					
Overdruk	[bar]	4	4	4	4
Absolute druk (p3)	[bar]	5	5	5	5
Impulsflux (I 3)	[kN]	6,5	16,6	41,3	104,0
Max. ontgrondingsstraal (L3)	[m]	3,4	4,8	6,5	8,9
Situatie 4					
Overdruk	[bar]	8	8	8	8
Absolute druk (p4)	[bar]	9	9	9	9
Impulsflux (I 4)	[kN]	12,7	32,5	80,5	202,9
Max. ontgrondingsstraal (L4)	[m]	4,4	6,1	8,4	11,4

4.4 Ontgrondingskraters t.b.v. analyse voor filters

Ten behoeve van de uit te voeren stabiliteitsberekeningen zijn de ontgrondingskraters berekend op basis van de hiervoor beschreven berekeningsmethodiek (zie paragraaf 4.2).

- De berekeningen zijn uitgevoerd voor een reeks aan diameters en drukken en een gronddekking van 1,25 m (zie Tabel 4.1). Hierbij is uitgegaan van diameterstappen van 25 tot 50 mm.
- Per situatie is de maximale ontgrondingsstraal (L) in de richting van de uitstroming vanaf het gat bepaald, waarbij:
 - Een tijdsduur van uitstroming van 7200 seconden (2 uur) is aangehouden.
 - Is aangenomen dat de druk in de leiding gelijk blijft.
- Vervolgens zijn de bijbehorende G_L en G_B vastgesteld.
- Er is uitgegaan van een $R(w)$ van 0,025 (betreft 95% bovengrenswaarde). Deze $R(w)$ is toepasbaar voor nat fijn zand met een vochtgehalte (w) groter dan 5%. In deze $R(w)$ is reeds een spreidingsfactor van 1,4 verdisconteerd. Voor klei en andere grondsoorten worden kleinere kraters verwacht.

- Voor de gatgrootte is uitgegaan van 100% van de diameter van de leiding. Dit komt impliciet neer op een volledige afschuiving.

4.4.1 Diepte ontgrondingskrater

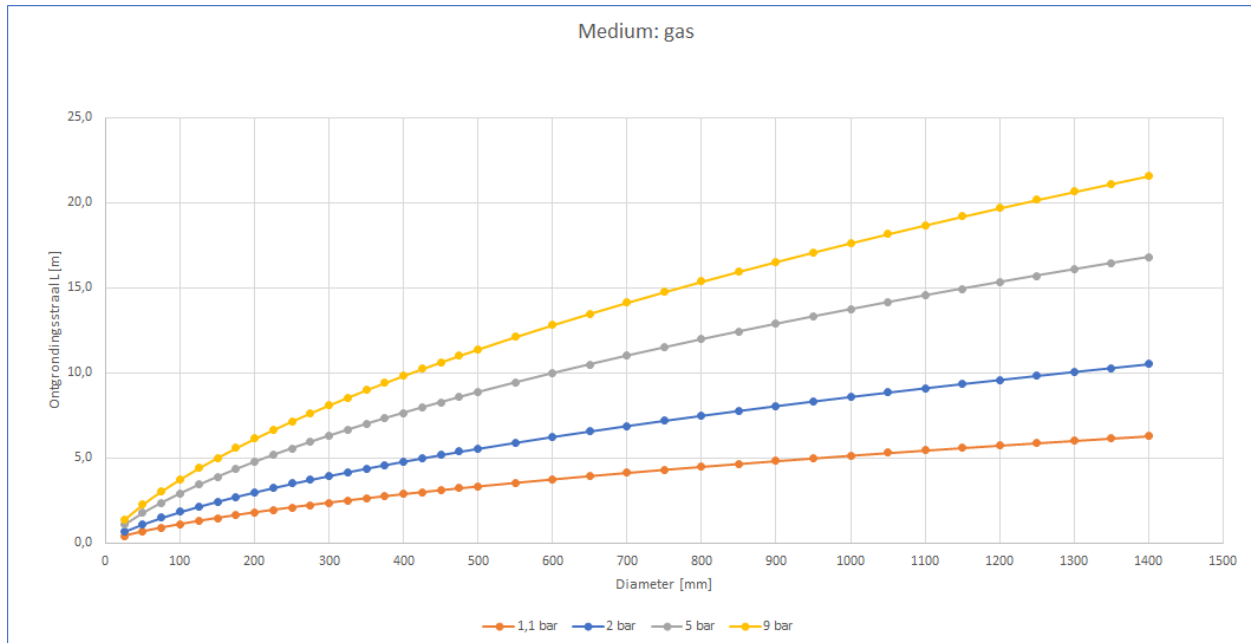
In Tabel 4.3 zijn de dieptes van de ontgrondingskraters (D_k) gegeven uitgaande van een gronddekking van 1,25 m en nat fijn zand met een vochtgehalte >5%.

Tabel 4.3 Diepte ontgrondingskraters gasleidingen

Categorieën [-]	Uitwendige leidingdiameter [mm]	Diepte ontgrondingskrater [m]	Categorieën [-]	Uitwendige leidingdiameter [mm]	Diepte ontgrondingskrater [m]
Diameter ≤ 125 mm	25	1,3	Diameter > 500 mm	550	2,1
	50	1,3		600	2,2
	75	1,4		650	2,3
	100	1,4		700	2,4
	125	1,5		750	2,5
Diameter > 125 t/m 200 mm	150	1,5		800	2,5
	175	1,5		850	2,6
	200	1,6		900	2,7
Diameter > 200 t/m 315 mm	225	1,6		950	2,8
	250	1,7		1000	2,9
	275	1,7		1050	2,9
	300	1,7		1100	3,0
Diameter > 315 t/m 500 mm	325	1,8		1150	3,1
	350	1,8		1200	3,2
	375	1,9		1250	3,3
	400	1,9	1300	3,3	
	425	1,9	1350	3,4	
	450	2,0	1400	3,5	
	475	2,0			
	500	2,1			

4.4.2 Maximaal berekende afmeting ontgrondingsstraal (L)

In Figuur 4.3 zijn de berekende ontgrondingsstralen (L) gegeven in een grafiek. In bijlage 2 zijn de numerieke resultaten gegeven in tabellen. Voor de stabiliteitsberekeningen van een waterkering dienen de resultaten uit paragraaf 4.4.3 te worden aangehouden.



Figuur 4.3 Maximale ontgrondingsstralen (L)

4.4.3 Afmetingen ontgrondingskrater per faalmechanisme (G_L en G_B)

Op basis van de ontgrondingsstraal (L) zijn de lengte en breedte G_L en G_B bepaald. In bijlage 2 zijn de numerieke resultaten gegeven in tabellen.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

Binnen de Projectoverstijgende Verkenning Kabels en Leidingen (POV K&L) wordt een integrale analyse van leidingfalen in combinatie met dijkfalen uitgevoerd voor het opstellen van filters voor parallelle leidingen met een inwendige druk ≤ 1 MPa (≤ 10 bar) op basis van de bepaling van de invloed van leidingfalen op de dijkfaalmechanismen. In dit rapport zijn de dimensies van de ontgrondingskraters van de betreffende leidingen berekend, die nodig zijn voor de faalkans analyses. Voor de berekening van de ontgrondingskraters is gebruik gemaakt van hiervoor geschikte formules uit de NEN3651.

Voor de waterleidingen is het op basis van een pragmatisch uitgebreide berekeningsmethodiek mogelijk om te komen tot minder conservatieve ontgrondingskraters dan met de vereenvoudigde berekeningsmethodiek. Het betreft een conservatieve bovengrensbepaling, omdat is uitgegaan van conservatieve uitgangspunten die leiden tot een zeer conservatief vermogen bij leidinglekage.

Voor de gasleidingen zijn op basis van de in NEN3651 beschreven berekeningsmethodiek de ontgrondingskraters berekend. Het betreft hier een bovengrensbepaling omdat is uitgegaan van conservatieve uitgangspunten waaronder de lange uitstromingsduur van 7200 sec en de gelijkblijvende druk bij lekkage.

Voor het hiervoor genoemde POV-project kunnen de ontgrondingskraters worden gebruikt in de faalkans analyses.

5.2 Aanbevelingen

Aanbevolen wordt om:

- De informatie, zoals opgenomen in de NEN3651 over hoe de geometrie van de ontgrondingskrater, dwars op de leiding dan wel in lengterichting van de leiding kan worden afgeleid, te verduidelijken. Een voorzet hiervan is opgenomen in onderliggend rapport.
- Om proeven uit te voeren in andere grondsoorten en de afleiding voor de ontgrondingskraters hierop af te stemmen.

Voor de waterleidingen wordt specifiek aanbevolen om:

- De pragmatisch uitgebreide berekeningsmethodiek te implementeren in de volgende versie van de NEN3651 ter vervanging van de huidige eenvoudige methode.
- De resultaten uit de pragmatisch uitgebreide berekeningsmethodiek te vergelijken met de resultaten waarbij wel gegevens omtrent pompkarakteristieken, debieten en stroomsnelheden voorhanden zijn.
- Voor de in deze rapportage aangenomen maximale stroomsnelheid van het water van 10 m/s een minder conservatieve waarde te definiëren en dat rekenkundig of met data te onderbouwen.
- Om een nadere analyse uit te voeren waarbij gezocht wordt naar een verband tussen de drukafname gegeven een bepaalde gatgrootte bij lekkage.

Voor de gasleidingen wordt specifiek aanbevolen om:

- De berekeningsmethodiek zoals nu opgenomen in de NEN3651 te verduidelijken.
- Om een nadere analyse uit te voeren waarbij gezocht wordt naar een verband tussen de drukafname in de tijd gegeven een opgetreden lekkage zodat een realistische waarde voor de tijdsduur en drukafname kan worden vastgesteld.

Deltares



Bijlage

1. Resultaten waterleidingen

Deltares



Tabel A1 1 Waterleiding, maximale ontgrondingsstraal (vereenvoudigde berekeningsmethodiek)

Diameter [mm]	Maximale ontgrondingsstraal (R) [m]		
	3 bar	4 bar	6 bar
15	2,1	2,3	2,7
30	3,2	3,6	4,2
45	4,1	4,6	5,3
60	4,9	5,5	6,4
75	5,7	6,3	7,4
90	6,4	7,1	8,2
100	6,8	7,6	8,8
110	7,2	8,0	9,3
120	7,6	8,5	9,9
125	7,8	8,7	10,1
135	8,2	9,1	10,6
145	8,6	9,5	11,1
160	9,1	10,1	11,8
175	9,6	10,7	12,5
190	10,1	11,3	13,2
200	10,5	11,7	13,6
250	12,0	13,4	15,6
300	13,5	15,0	17,5
350	14,9	16,6	19,3
400	16,2	18,0	21,0
450	17,4	19,4	22,6
500	18,6	20,7	24,1
550	19,7	22,0	25,6
600	20,8	23,2	27,0
650	21,9	24,4	28,4
700	22,9	25,5	29,7
750	23,9	26,7	31,0
800	24,9	27,8	32,3
850	25,9	28,8	33,6
900	26,8	29,9	34,8
950	27,7	30,9	36,0
1000	28,6	31,9	37,1
1050	29,5	32,9	38,3
1100	30,4	33,9	39,4

Diameter [mm]	Maximale ontgrondingsstraal (R) [m]		
1150	31,3	34,8	40,5
1200	32,1	35,8	41,6

Tabel A1 2 Waterleiding, maximale ontgrondingsstraal (pragmatisch uitgebreide berekeningsmethodiek)

Diameter [mm]	Maximale ontgrondingsstraal (R) [m]		
	3 bar	4 bar	6 bar
15	1,7	1,9	2,1
30	2,7	2,9	3,2
45	3,5	3,8	4,2
60	4,1	4,6	5,0
75	4,8	5,3	5,8
90	5,4	5,9	6,5
100	5,7	6,3	6,9
110	6,1	6,7	7,4
120	6,4	7,1	7,8
125	6,6	7,3	8,0
135	6,9	7,6	8,4
145	7,3	8,0	8,8
160	7,7	8,5	9,4
175	8,2	9,0	9,9
190	8,6	9,5	10,4
200	8,9	9,8	10,8
250	10,3	11,3	12,4
300	11,5	12,7	13,9
350	12,7	14,0	15,4
400	13,9	15,2	16,7
450	14,9	16,4	18,0
500	16,0	17,5	19,3
550	17,0	18,6	20,5
600	17,9	19,7	21,7
650	18,9	20,7	22,8
700	19,8	21,7	23,9
750	20,7	22,7	25,0
800	21,5	23,6	26,0
850	22,4	24,6	27,0
900	23,2	25,5	28,0

Diameter [mm]	Maximale ontgrondingsstraal (R) [m]		
950	24,0	26,4	29,0
1000	24,8	27,2	30,0
1050	25,6	28,1	30,9
1100	26,3	28,9	31,9
1150	27,1	29,8	32,8
1200	27,8	30,6	33,7

Tabel A1.3 Waterleiding, pragmatisch uitgebreide methode (gat in zijkant)

Diameter [mm]	3 bar		4 bar		6 bar	
	R _L [m]	R _B [m]	R _L [m]	R _B [m]	R _L [m]	R _B [m]
15	0,9	1,7	0,9	1,9	1,0	2,1
30	1,3	2,7	1,5	2,9	1,6	3,2
45	1,7	3,5	1,9	3,8	2,1	4,2
60	2,1	4,2	2,3	4,6	2,5	5,0
75	2,4	4,8	2,6	5,3	2,9	5,8
90	2,7	5,4	2,9	5,9	3,2	6,5
100	2,9	5,8	3,2	6,4	3,5	7,0
110	3,0	6,2	3,3	6,8	3,7	7,4
120	3,2	6,5	3,5	7,1	3,9	7,9
125	3,3	6,7	3,6	7,3	4,0	8,1
135	3,5	7,0	3,8	7,7	4,2	8,5
145	3,6	7,3	4,0	8,1	4,4	8,9
160	3,9	7,8	4,3	8,6	4,7	9,4
175	4,1	8,3	4,5	9,1	5,0	10,0
190	4,3	8,7	4,7	9,6	5,2	10,5
200	4,5	9,0	4,9	9,9	5,4	10,9
250	5,1	10,4	5,6	11,4	6,2	12,5
300	5,8	11,7	6,3	12,8	7,0	14,1
350	6,4	12,9	7,0	14,2	7,7	15,6
400	6,9	14,1	7,6	15,4	8,4	16,9
450	7,5	15,2	8,2	16,6	9,0	18,3
500	8,0	16,2	8,8	17,8	9,6	19,5
550	8,5	17,2	9,3	18,9	10,3	20,8
600	9,0	18,2	9,8	20,0	10,8	22,0
650	9,4	19,2	10,4	21,0	11,4	23,1

Diameter [mm]	3 bar		4 bar		6 bar	
	R _L [m]	R _B [m]	R _L [m]	R _B [m]	R _L [m]	R _B [m]
700	9,9	20,1	10,9	22,1	11,9	24,2
750	10,3	21,0	11,3	23,1	12,5	25,3
800	10,8	21,9	11,8	24,0	13,0	26,4
850	11,2	22,8	12,3	25,0	13,5	27,5
900	11,6	23,6	12,7	25,9	14,0	28,5
950	12,0	24,5	13,2	26,8	14,5	29,5
1000	12,4	25,3	13,6	27,7	15,0	30,5
1050	12,8	26,1	14,0	28,6	15,5	31,4
1100	13,2	26,9	14,5	29,5	15,9	32,4
1150	13,6	27,7	14,9	30,3	16,4	33,3
1200	13,9	28,4	15,3	31,2	16,8	34,3

 $R_L = 0,5 \times R$
 $R_B = R + 0,5 \times D_i$

Tabel A1 4 Waterleiding, pragmatisch uitgebreide methode (volledige afschuiving, buis afgesneden / buis in dwarsrichting verschoven) (eenzijdige / tweezijdige uitstroming)

Diameter [mm]	3 bar		4 bar		6 bar	
	R _L [m]	R _B [m]	R _L [m]	R _B [m]	R _L [m]	R _B [m]
15	1,7	0,9	1,9	1,0	2,1	1,0
30	2,7	1,4	2,9	1,5	3,2	1,6
45	3,5	1,8	3,8	1,9	4,2	2,1
60	4,1	2,1	4,6	2,3	5,0	2,5
75	4,8	2,4	5,3	2,7	5,8	2,9
90	5,4	2,7	5,9	3,0	6,5	3,3
100	5,7	2,9	6,3	3,2	6,9	3,5
110	6,1	3,1	6,7	3,4	7,4	3,7
120	6,4	3,3	7,1	3,6	7,8	4,0
125	6,6	3,4	7,3	3,7	8,0	4,1
135	6,9	3,5	7,6	3,9	8,4	4,3
145	7,3	3,7	8,0	4,1	8,8	4,5
160	7,7	3,9	8,5	4,3	9,4	4,8
175	8,2	4,2	9,0	4,6	9,9	5,0
190	8,6	4,4	9,5	4,8	10,4	5,3
200	8,9	4,6	9,8	5,0	10,8	5,5

Diameter [mm]	3 bar		4 bar		6 bar	
	R _L [m]	R _B [m]	R _L [m]	R _B [m]	R _L [m]	R _B [m]
250	10,3	5,3	11,3	5,8	12,4	6,3
300	11,5	5,9	12,7	6,5	13,9	7,1
350	12,7	6,5	14,0	7,2	15,4	7,9
400	13,9	7,1	15,2	7,8	16,7	8,6
450	14,9	7,7	16,4	8,4	18,0	9,2
500	16,0	8,2	17,5	9,0	19,3	9,9
550	17,0	8,8	18,6	9,6	20,5	10,5
600	17,9	9,3	19,7	10,1	21,7	11,1
650	18,9	9,8	20,7	10,7	22,8	11,7
700	19,8	10,2	21,7	11,2	23,9	12,3
750	20,7	10,7	22,7	11,7	25,0	12,9
800	21,5	11,2	23,6	12,2	26,0	13,4
850	22,4	11,6	24,6	12,7	27,0	13,9
900	23,2	12,0	25,5	13,2	28,0	14,5
950	24,0	12,5	26,4	13,7	29,0	15,0
1000	24,8	12,9	27,2	14,1	30,0	15,5
1050	25,6	13,3	28,1	14,6	30,9	16,0
1100	26,3	13,7	28,9	15,0	31,9	16,5
1150	27,1	14,1	29,8	15,5	32,8	17,0
1200	27,8	14,5	30,6	15,9	33,7	17,4

$$R_L = R$$

$$R_B = 0,5 \times R + 0,5 \times D_i$$

Bijlage

2. Resultaten gasleidingen

Deltares



Tabel A2 1 Gasleiding, maximale ontgrondingsstraal

Diameter [mm]	1,1 bar	2 bar	5 bar	9 bar
25	0,4	0,7	1,1	1,4
50	0,7	1,1	1,8	2,3
75	0,9	1,5	2,4	3,0
100	1,1	1,8	2,9	3,7
125	1,3	2,1	3,4	4,4
150	1,5	2,4	3,9	5,0
175	1,6	2,7	4,3	5,6
200	1,8	3,0	4,8	6,1
225	1,9	3,2	5,2	6,6
250	2,1	3,5	5,6	7,1
275	2,2	3,7	5,9	7,6
300	2,4	3,9	6,3	8,1
325	2,5	4,2	6,7	8,6
350	2,6	4,4	7,0	9,0
375	2,7	4,6	7,3	9,4
400	2,9	4,8	7,6	9,8
425	3,0	5,0	8,0	10,2
450	3,1	5,2	8,3	10,6
475	3,2	5,4	8,6	11,0
500	3,3	5,5	8,9	11,4
550	3,5	5,9	9,4	12,1
600	3,7	6,2	10,0	12,8
650	3,9	6,6	10,5	13,5
700	4,1	6,9	11,0	14,1
750	4,3	7,2	11,5	14,8
800	4,5	7,5	12,0	15,4
850	4,6	7,8	12,4	16,0
900	4,8	8,1	12,9	16,5
950	5,0	8,3	13,3	17,1
1000	5,1	8,6	13,7	17,6
1050	5,3	8,8	14,1	18,2
1100	5,4	9,1	14,5	18,7
1150	5,6	9,3	14,9	19,2
1200	5,7	9,6	15,3	19,7
1250	5,9	9,8	15,7	20,2

Diameter [mm]	1,1 bar	2 bar	5 bar	9 bar
1300	6,0	10,1	16,1	20,7
1350	6,1	10,3	16,4	21,1
1400	6,3	10,5	16,8	21,6

Tabel A2 2 Gasleiding, langsscheur (spleetvormig gat in zijkant)

Diameter [mm]	1,1 bar		2 bar		5 bar		9 bar	
	G _L [m]	G _B [m]	G _L [m]	G _B [m]	G _L [m]	G _B [m]	G _L [m]	G _B [m]
25	0,3	0,4	0,4	0,7	0,6	1,1	0,8	1,4
50	0,5	0,7	0,7	1,1	1,1	1,8	1,3	2,3
75	0,7	0,9	1,0	1,5	1,5	2,4	1,8	3,1
100	0,9	1,1	1,3	1,9	1,8	3,0	2,3	3,8
125	1,1	1,3	1,6	2,2	2,2	3,5	2,7	4,5
150	1,3	1,5	1,8	2,5	2,5	4,0	3,1	5,1
175	1,5	1,7	2,0	2,8	2,9	4,4	3,5	5,7
200	1,7	1,9	2,3	3,1	3,2	4,9	3,8	6,2
225	1,9	2,0	2,5	3,3	3,5	5,3	4,2	6,8
250	2,0	2,2	2,7	3,6	3,8	5,7	4,6	7,3
275	2,2	2,4	2,9	3,9	4,0	6,1	4,9	7,8
300	2,4	2,5	3,2	4,1	4,3	6,5	5,2	8,2
325	2,5	2,7	3,4	4,3	4,6	6,8	5,6	8,7
350	2,7	2,8	3,6	4,6	4,9	7,2	5,9	9,2
375	2,8	2,9	3,8	4,8	5,1	7,5	6,2	9,6
400	3,0	3,1	4,0	5,0	5,4	7,8	6,5	10,0
425	3,2	3,2	4,2	5,2	5,7	8,2	6,8	10,4
450	3,3	3,3	4,4	5,4	5,9	8,5	7,1	10,9
475	3,5	3,4	4,5	5,6	6,2	8,8	7,4	11,2
500	3,6	3,6	4,7	5,8	6,4	9,1	7,7	11,6
550	3,9	3,8	5,1	6,2	6,9	9,7	8,2	12,4
600	4,2	4,0	5,5	6,5	7,3	10,3	8,8	13,1
650	4,5	4,3	5,8	6,9	7,8	10,8	9,3	13,8
700	4,8	4,5	6,2	7,2	8,2	11,3	9,8	14,5
750	5,1	4,7	6,5	7,6	8,7	11,9	10,3	15,1
800	5,4	4,9	6,9	7,9	9,1	12,4	10,8	15,8
850	5,7	5,1	7,2	8,2	9,5	12,8	11,3	16,4
900	5,9	5,3	7,6	8,5	10,0	13,3	11,8	17,0

Diameter [mm]	1,1 bar		2 bar		5 bar		9 bar	
	G _L [m]	G _B [m]	G _L [m]	G _B [m]	G _L [m]	G _B [m]	G _L [m]	G _B [m]
950	6,2	5,5	7,9	8,8	10,4	13,8	12,3	17,6
1000	6,5	5,6	8,2	9,1	10,8	14,2	12,7	18,1
1050	6,8	5,8	8,5	9,4	11,2	14,7	13,2	18,7
1100	7,0	6,0	8,9	9,7	11,6	15,1	13,7	19,2
1150	7,3	6,2	9,2	9,9	12,0	15,5	14,1	19,8
1200	7,6	6,3	9,5	10,2	12,4	15,9	14,6	20,3
1250	7,8	6,5	9,8	10,5	12,8	16,3	15,0	20,8
1300	8,1	6,7	10,1	10,7	13,1	16,7	15,4	21,3
1350	8,4	6,8	10,4	11,0	13,5	17,1	15,9	21,8
1400	8,6	7,0	10,8	11,2	13,9	17,5	16,3	22,3

$$G_L = 0,5 \times L + 0,5 \times l$$

$$G_B = L + 0,5 \times D_i$$

Tabel A2.3 Gasleiding, volledige afschuiving (eenzijdige en tweezijdige uitstroming)

Diameter [mm]	1,1 bar		2 bar		5 bar		9 bar	
	G _L [m]	G _B [m]	G _L [m]	G _B [m]	G _L [m]	G _B [m]	G _L [m]	G _B [m]
25	0,4	0,2	0,7	0,3	1,1	0,5	1,4	0,7
50	0,7	0,4	1,1	0,6	1,8	0,9	2,3	1,2
75	0,9	0,5	1,5	0,8	2,4	1,2	3,0	1,6
100	1,1	0,6	1,8	1,0	2,9	1,5	3,7	1,9
125	1,3	0,7	2,1	1,1	3,4	1,8	4,4	2,3
150	1,5	0,8	2,4	1,3	3,9	2,0	5,0	2,6
175	1,6	0,9	2,7	1,4	4,3	2,3	5,6	2,9
200	1,8	1,0	3,0	1,6	4,8	2,5	6,1	3,2
225	1,9	1,1	3,2	1,7	5,2	2,7	6,6	3,4
250	2,1	1,2	3,5	1,9	5,6	2,9	7,1	3,7
275	2,2	1,2	3,7	2,0	5,9	3,1	7,6	4,0
300	2,4	1,3	3,9	2,1	6,3	3,3	8,1	4,2
325	2,5	1,4	4,2	2,2	6,7	3,5	8,6	4,4
350	2,6	1,5	4,4	2,4	7,0	3,7	9,0	4,7
375	2,7	1,6	4,6	2,5	7,3	3,9	9,4	4,9
400	2,9	1,6	4,8	2,6	7,6	4,0	9,8	5,1
425	3,0	1,7	5,0	2,7	8,0	4,2	10,2	5,3
450	3,1	1,8	5,2	2,8	8,3	4,4	10,6	5,5

Diameter [mm]	1,1 bar		2 bar		5 bar		9 bar	
475	3,2	1,8	5,4	2,9	8,6	4,5	11,0	5,7
500	3,3	1,9	5,5	3,0	8,9	4,7	11,4	5,9
550	3,5	2,0	5,9	3,2	9,4	5,0	12,1	6,3
600	3,7	2,2	6,2	3,4	10,0	5,3	12,8	6,7
650	3,9	2,3	6,6	3,6	10,5	5,6	13,5	7,1
700	4,1	2,4	6,9	3,8	11,0	5,8	14,1	7,4
750	4,3	2,5	7,2	4,0	11,5	6,1	14,8	7,8
800	4,5	2,6	7,5	4,1	12,0	6,4	15,4	8,1
850	4,6	2,7	7,8	4,3	12,4	6,6	16,0	8,4
900	4,8	2,9	8,1	4,5	12,9	6,9	16,5	8,7
950	5,0	3,0	8,3	4,6	13,3	7,1	17,1	9,0
1000	5,1	3,1	8,6	4,8	13,7	7,4	17,6	9,3
1050	5,3	3,2	8,8	4,9	14,1	7,6	18,2	9,6
1100	5,4	3,3	9,1	5,1	14,5	7,8	18,7	9,9
1150	5,6	3,4	9,3	5,2	14,9	8,0	19,2	10,2
1200	5,7	3,5	9,6	5,4	15,3	8,3	19,7	10,4
1250	5,9	3,6	9,8	5,5	15,7	8,5	20,2	10,7
1300	6,0	3,7	10,1	5,7	16,1	8,7	20,7	11,0
1350	6,1	3,7	10,3	5,8	16,4	8,9	21,1	11,2
1400	6,3	3,8	10,5	6,0	16,8	9,1	21,6	11,5

 $G_L = L$
 $G_B = 0,5 \times L + 0,5 \times D_i$

D Lekfrequenties van gasdistributieleidingen (rapport KIWA)

GT-200187

23 November 2020

Lekfrequenties van gasdistributieleidingen

Analyse voor het POV-K&L project 'Filters voor parallel
gelegen leidingen'



▶ **Partner
for
Progress**



GT-200187

23 November 2020

Lekfrequenties van gasdistributieleidingen

Analyse voor het POV-K&L project 'Filters voor
parallel gelegen leidingen'

© 2020 Kiwa N.V.

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

Kiwa Technology B.V.
Wilmersdorf 50
postbus 137
7300 AC Apeldoorn

Tel. 088 998 35 21
technology@kiwa.nl

www.kiwatechnology.com

Colofon

Titel

Lekfrequenties van
gasdistributieleidingen

Projectnummer

004P001907

Projectmanager

R.J.M. Hermkens

Opdrachtgever

Deltares

Kwaliteitsborger

C.J.A. Pulles

Auteur

P.J. Postma



Voorwoord

Dit onderzoek is uitgevoerd ten behoeve van het POV K&L project 'Filters voor parallel gelegen leidingen'.

Samenwerking met KWR

Gelijktijdig met het onderzoek van Kiwa Technology naar de lekfrequenties van gasleidingen, heeft KWR eenzelfde onderzoek gedaan naar lekfrequenties van waterleidingen. Tussen KWR en Kiwa Technology heeft hierover afstemming plaatsgevonden.

De resultaten van KWR staan beschreven in het rapport "Storingsfrequenties drinkwaterleidingen" [1].

Medewerking Netbeheer Nederland

Om de lekfrequentie vast te kunnen stellen is gebruik gemaakt van storingsinformatie van de netbeheerders. Deze informatie is beschikbaar in het landelijke storingsregister NESTOR, dat door Netbeheer Nederland beheerd wordt. Netbeheer Nederland heeft toestemming gegeven om NESTOR-gegevens ten behoeve van dit project te gebruiken.

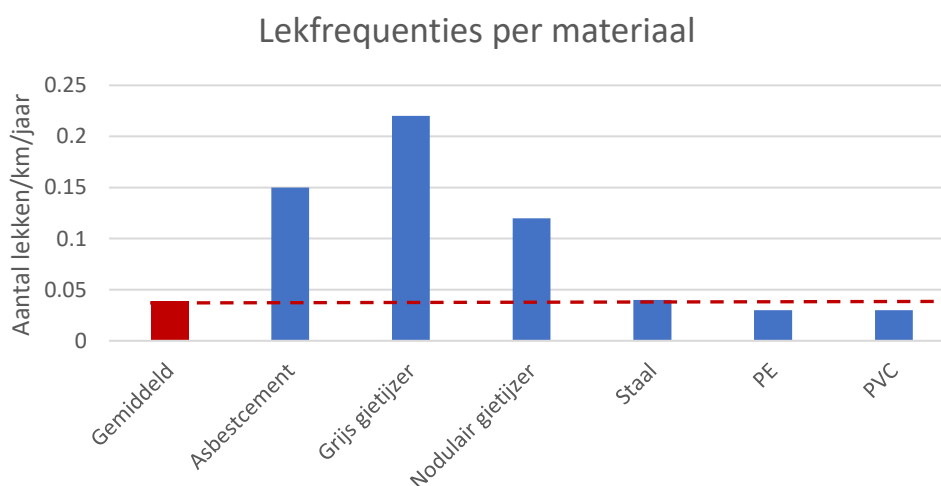


Samenvatting

In opdracht van Deltares heeft Kiwa Technology de kansen op lekken in gasleidingen bepaald ten behoeve van het POV K&L project 'Filters voor parallel gelegen leidingen'.

De gemiddelde lekfrequentie van gasleidingen is 0,04 lekken per km per jaar, indien geen onderscheid wordt gemaakt naar leidingmateriaal, diameter en netdruk. Sommige oude leidingmaterialen (asbestcement, grijs gietijzer en nodulair gietijzer) vertonen echter beduidend hogere lekfrequenties, zoals in onderstaande figuur zichtbaar is. Dat de gemiddelde lekfrequentie desondanks zo laag is, komt omdat de oude materialen met hoge lekfrequenties relatief nog maar weinig voorkomen.

De in dit rapport gepresenteerde lekfrequenties zijn vastgesteld op basis van landelijke storingsgegevens over een periode van 10 jaar (2009 tot en met 2018).



Figuur 1 De gemiddelde lekfrequentie en de lekfrequentie per leidingmateriaal



inhoudsopgave

	Voorwoord	1
	Samenvatting	2
	inhoudsopgave	3
1	Lekfrequenties	5
1.1	Achtergrond	5
2	Netstructuur gasdistributienet	6
3	Basisgegevens voor de berekening	8
3.1	NESTOR	8
3.2	CODATA	10
4	Indeling van storingen	11
4.1	Generieke indeling, Niveau 1	11
4.2	Specifieke indeling leidinggroepen, Niveau 2	12
4.3	Categorisering oorzaak lekkages	12
5	Lekfrequenties	14
5.1	Lekfrequenties generieke indeling, Niveau 1	14
5.1.1	Lekfrequenties alle lekken	14
5.1.2	Lekfrequenties, exclusief lekken door externe oorzaken	15
5.1.3	Lekfrequenties als gevolg van externe oorzaken	16
5.2	Lekfrequenties specifieke indeling, Niveau 2	16
5.2.1	Lekfrequenties alle lekken	16
5.2.2	Lekfrequenties, exclusief lekken door externe oorzaken	17
5.2.3	Lekfrequenties als gevolg van externe oorzaken	18
6	Conclusies en aanbevelingen	20
7	Verwijzingen	21
I	Aantal lekken en netlengtes	22
I.1	Lekken en netlengte totale net (2009-2018)	22
I.2	Lekken en netlengte per materiaal (2009-2018)	22
I.3	Lekken en netlengte per diameter (2009-2018)	22
I.4	Lekken en netlengte per druk (2009-2018)	22
I.5	Aantal lekken per materiaal en diameter (2009-2018)	23
I.5.1	Totaal aantal lekken (2009-2018)	23
I.5.2	Aantal lekken, excl. externe oorzaken (2009-2018)	23
I.5.3	Aantal lekken als gevolg van externe oorzaken (2009-2018)	23



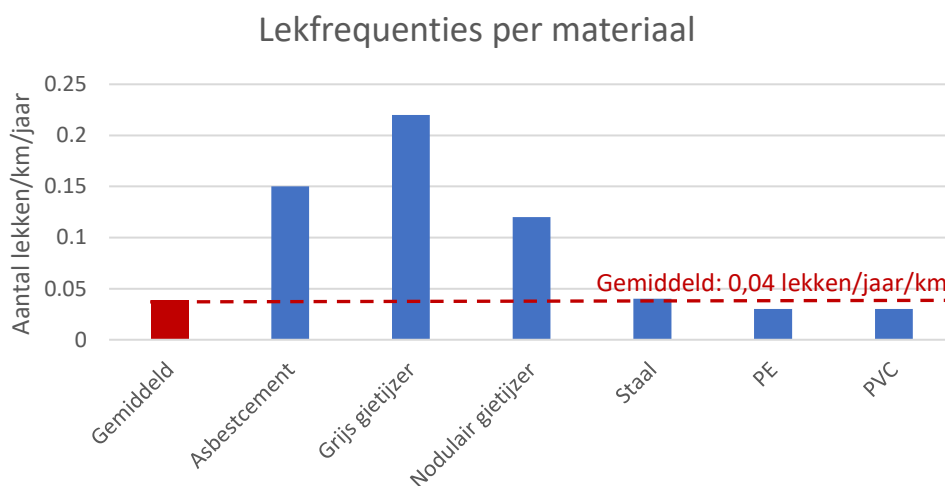
I.6	Aantal lekken per druk, materiaal en diameter (2009-2018)	24
I.6.1	Totaal aantal lekken (2009-2018)	24
I.6.2	Aantal lekken, excl. externe oorzaken (2009-2018)	25
I.6.3	Aantal lekken als gevolg van externe oorzaken (2009-2018)	26
II	Definities	27



1 Lekk frequenties

In opdracht van Deltares heeft Kiwa Technology de kansen op lekken in gasleidingen bepaald ten behoeve van het POV K&L project 'Filters voor parallel gelegen leidingen'.

De gemiddelde lek frequentie van gasleidingen is 0,04 lekken per km per jaar, indien geen onderscheid wordt gemaakt naar leidingmateriaal, diameter en netdruk. Sommige oude leidingmaterialen vertonen echter beduidend hogere lek frequenties, zoals in onderstaande figuur zichtbaar is. De lek frequenties zijn vastgesteld op basis van landelijke storingsgegevens over een periode van 10 jaar (2009 tot en met 2018).



Figuur 1: De gemiddelde lek frequentie en de lek frequentie per leidingmateriaal.

De lek frequenties hebben betrekking op hoofdleidingen van het gasdistributienet. Dat is inclusief de aanwezige verbindingen, maar exclusief de aansluitleidingen¹. Verder beperkt het zich tot de grote/risicovolle² lekken.

Gelijktijdig met het onderzoek van Kiwa Technology naar de lek frequenties van gasleidingen, heeft KWR eenzelfde onderzoek gedaan naar lek frequenties van waterleidingen [1]. Daarbij heeft er afstemming plaatsgevonden tussen KWR en Kiwa Technology om, voor zover mogelijk, tot een eenduidige indeling te komen. Een en ander wordt toegelicht in de betreffende hoofdstukken.

1.1 Achtergrond

In het kader van het HWBP (Hoogwaterbeschermingsprogramma) worden faalkansberekeningen uitgevoerd. Daarvoor zijn faalkansen (kans op lekkages) van leiding in de nabijheid van waterkeringen nodig. De lek frequenties voor gasleidingen die genoemd worden in NPR 3659:A1:C1:1996, zijn inmiddels gedateerd (periode 1965-1980) [2]. Kiwa Technology is daarom gevraagd de lek frequenties op basis van de geregistreerde lekken in gasdistributieleidingen vast te stellen over de periode 2009 tot en met 2018.

¹ Een aansluitleiding is de verbindende leiding tussen het distributienet en de afnemer, zie ook hoofdstuk 2.

² Lekken worden als risicovol beschouwd indien een verhoogde kans op schade, gewonden of doden is, als gevolg van brand of explosie. Dat is het geval indien het lek groot is en/of dicht in de buurt van een gebouw is. Het heeft dus geen betrekking op de eventuele risico's voor het functioneren van een dijklichaam.



2 Netstructuur gasdistributienet

De Nederlandse gasinfrastructuur is onder te verdelen in het landelijke gastransportnet (beheerd door Gasunie Transport Services, een onderdeel van de Nederlandse Gasunie) en een groot aantal lokale distributienetten [3]. Deze distributienetten worden beheerd door de zeven regionale netbeheerders.

De grens tussen het landelijk transportnet en de distributienetten ligt bij het zogenaamde gasontvangststation (GOS). Het gasdistributienet bevat alles vanaf het GOS tot en met de gasmeter bij de gebruiker.

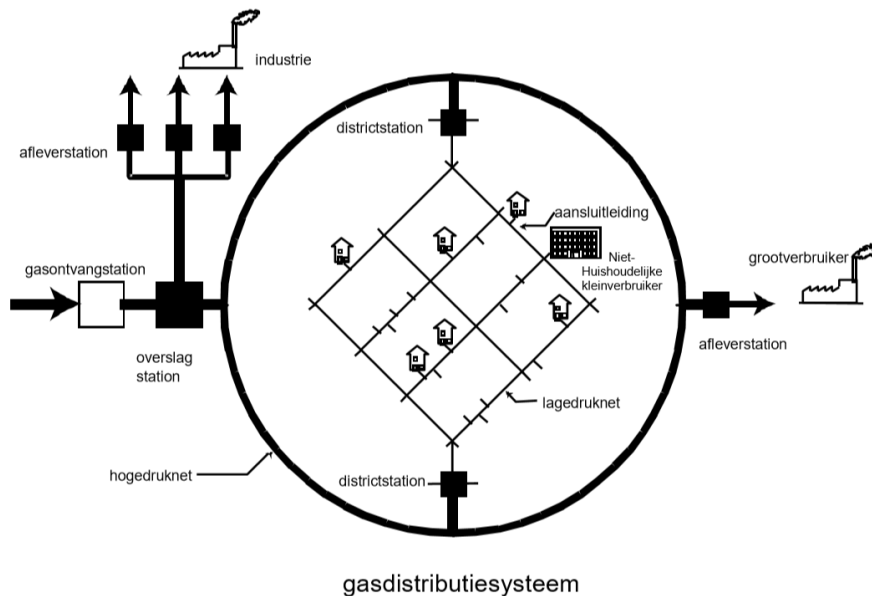
Gasdistributienetten worden onderscheiden naar hun maximale bedrijfsdruk¹ (MOP: Maximum Operating Pressure). Dit is de daadwerkelijke druk die in het net aanwezig is. Afhankelijke van de gasvraag en de afstand tot het station kan de druk lokaal lager zijn als gevolg van de stromingsweerstand.

In Nederland gelden een aantal standaard/veel voorkomende druktrappen, die genoemd worden naar hun bedrijfsdruk (de drukken worden uitgedrukt in overdruk t.o.v. de luchtdruk):

- 8 bar (0,8 MPa)
- 4 bar (0,4 MPa)
- 1 bar (0,1 MPa)
- 100 mbar (10 kPa)
- 30 mbar (3 kPa)

De netten met een druk van 1 bar of meer worden ook wel hogedruknetten genoemd (let op: niet te verwarren met het hogedruk landelijk transportnet) en hebben voornamelijk een regionale transportfunctie. Deze netten liggen daarom niet alleen in het stedelijke gebied, maar ook in de buitengebieden. De 100 mbar en 30 mbar netten worden ook wel lagedruknetten genoemd, en hebben een distributiefunctie. Om die reden liggen lagedruknetten vooral in stedelijke gebied. De hogedruknetten voeden de lagedruknetten. De koppeling gaat via stations waar onder meer de druk wordt gereduceerd met regelaars. Een en ander is schematisch weergegeven in onderstaande figuur.

¹ Dit is de daadwerkelijke druk die in het net aanwezig is. Afhankelijke van de gasvraag en de afstand tot het station kan de druk lokaal lager zijn als gevolg van de stromingsweerstand.



Figuur 2: Schematische weergave van het gasdistributiesysteem

Om de leveringszekerheid te verhogen, zijn de hogedruknetten vaak in een ringvorm aangelegd, terwijl de lagedruknetten vaak in sterke mate vermaasd zijn.

Verder wordt onderscheid gemaakt tussen hoofdleidingen en aansluitleidingen. De hoofdleidingen bestaan uit alle leidingen (inclusief alle verbinden en appendages, exclusief stations) die het distributiesysteem vormen. Hoofdleidingen liggen voornamelijk in publieke grond. De aansluitleidingen verbinden de afnemers met de hoofdleidingen en liggen derhalve veelal in particuliere grond.

De gebruikte buismaterialen verschillen per druktrap. Voor lagedruknetten wordt vooral PVC gebruikt. Voor hogedruknetten wordt vooral staal en (in toenemende mate) PE gebruikt.



3 Basisgegevens voor de berekening

Voor de berekening van de lekfrequenties is gebruik gemaakt van beschikbare gegevensbronnen. Het betreft de volgende brongegevens:

- Lekgegevens: NESTOR
- Netlengte: CODATA

Van deze bronnen zijn de gegevens gebruikt over een periode van 10 jaar. Er is daarbij gekozen voor de meest recente periode waarvoor de storingscijfers definitief zijn vastgesteld. Dit betreft de periode van 2009 tot en met 2018.

In de loop van de tijd veranderen de netlengtes en het aantal storingen. Om de lekfrequenties te bepalen, is gekozen om het gemiddelde aantal lekken per jaar te bepalen en dit te delen door de gemiddelde netlengte in deze 10 jaar.

De achtergronden van NESTOR en CODATA worden hieronder in meer detail beschreven.

3.1 NESTOR

De Autoriteit Consument en Markt (ACM) verwacht dat de regionale en landelijke netbeheerders jaarlijks inzicht geven in de betrouwbaarheid en veiligheid van het gasnet [3]. De netbeheerders gebruiken een landelijke methode voor het registreren van storingen en geplande onderbrekingen: NESTOR Gas. De NESTOR-registratie is ingevoerd in 1976. Bij de start konden netbeheerders nog op vrijwillige basis meedoen. Sinds 2005 participeren alle netbeheerders [4]. Inmiddels zijn alle netbeheerders in Nederland verplicht om de registratie in te vullen [3].

NESTOR zorgt ervoor dat alle netbeheerders in Nederland op dezelfde manier registreren [5]. De doelen van NESTOR-registratie zijn:

- invulling geven aan de verplichting uit de MRQ (Ministeriële regeling kwaliteitsaspecten netbeheer elektriciteit en gas);
- de betrouwbaarheid van de levering van elektriciteit en gas in Nederland én per netbeheerder in kaart brengen;
- de veiligheid van de levering van gas in Nederland in kaart brengen.

Voor de netbeheerders zelf is NESTOR ook belangrijk. De netbeheerders willen weten waardoor storingen zijn ontstaan, zodat ze hiervan kunnen leren en ze daardoor storingen kunnen voorkomen. Ook willen ze de storingen zo snel mogelijk verhelpen. Het achterliggende doel is steeds de klant: die moet zo min mogelijk last hebben van storingen en onderbrekingen. Daarom gebruiken de netbeheerders de NESTOR gegevens ook voor onder andere:

- het bepalen of de infrastructuur gewijzigd of onderhouden moet worden, om storingen te voorkomen;
- het storingsproces verbeteren, om een storing zo snel mogelijk op te lossen.

Er vindt registratie plaats van de volgende gegevens, onderscheiden naar drukniveau:

- het identificatienummer dat de netbeheerder toekent aan de storing, de onderbreking of het vastgestelde lek.
- de locatiegegevens van de storing, de onderbreking of het vastgestelde lek¹.
- de datum waarop de netbeheerder het lek vaststelt.
- de datum en het aanvangstijdstip van de storing of onderbreking.
- de datum en het tijdstip van beëindiging van de onderbreking.

¹ De locatiegegevens zijn niet beschikbaar voor dit onderzoek.

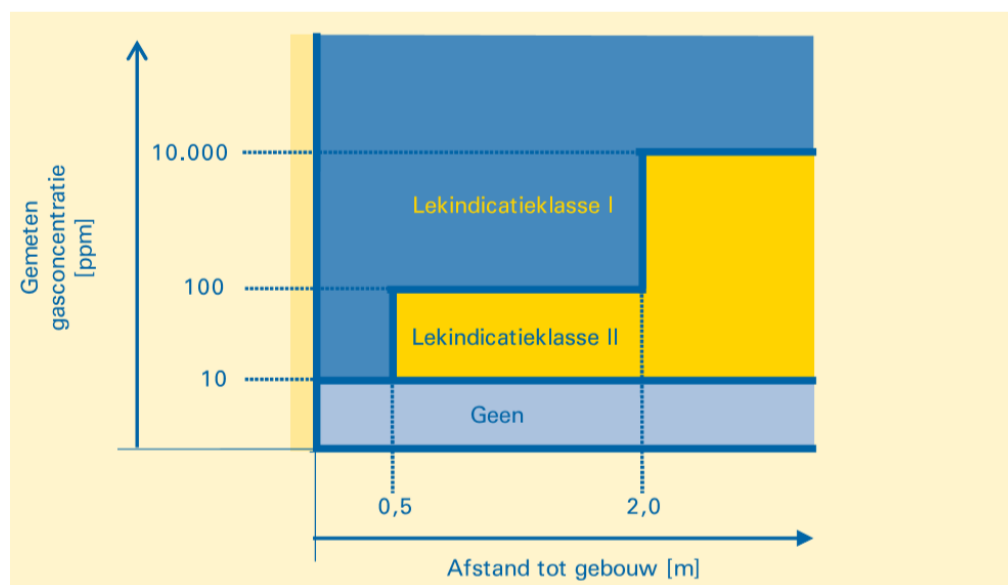


- het onderscheid tussen storingen waarbij de veiligheid van personen of objecten in onmiddellijk gevaar is en storingen waarbij dat niet het geval is.
- de datum en het tijdstip van veiligstellen van storingen waarbij de veiligheid van personen of objecten in onmiddellijk gevaar is (kans op (letsel)schade als gevolg van brand of explosie).
- de aard en oorzaak van de storing, waarmee wordt aangegeven of het bijvoorbeeld om een lekkage dan wel om te hoge of te lage druk ging.
- het drukniveau van het onderdeel van het gastransportnet waarin de storing of onderbreking zich voordoet of waarin het lek is vastgesteld.
- de wijze waarop de netbeheerder het lek heeft vastgesteld.
- het totale aantal getroffen afnemers.

In NESTOR worden meerdere typen storingen geregistreerd, waaronder lekkages. Ten behoeve van dit rapport zijn uitsluitend de geregistreerde lekken gebruikt en zijn andersoortige storingen buiten beschouwing gelaten.

Alleen categorie I lekken

Een deel van de geregistreerde lekken zijn geconstateerd bij het lekzoeken. Van de lekken die bij lekzoeken worden vastgesteld, zijn in deze rapportage alleen de zogenaamde categorie I lekken geteld. De categorisering van lekken gebeurt op basis van de gemeten hoeveelheid gas en de afstand tot gebouwen [6], zoals weergegeven in de volgende figuur.



Figuur 3: Categorisering lekken volgens de meetprocedure voor bovengronds lekzoeken (bron: Gasnet, jaargang 21 nummer 2 [7])

De reden om categorie II lekken niet mee te tellen in de lekfrequenties is dat het hier om kleine lekjes gaat die geen risico vormen voor eventuele kratervorming.

Of er wel of geen ontgroning heeft plaatsgevonden, wordt overigens niet in de NESTOR-data vastgelegd. Evenmin wordt de grootte van het gat in de leiding gerapporteerd. Bij waterleidingen wordt wel eens onderscheid gemaakt tussen gapend en sluipend lek, in verband met de risico's voor waterkeringen [8]. Maar een dergelijk onderscheid kan op basis van de NESTOR data niet worden gemaakt voor gasleidingen.



3.2 CODATA

De Gaswet kent diverse verplichtingen voor de netbeheerders tot het verstrekken van informatie aan de Minister van Economische Zaken dan wel de Autoriteit Consument en Markt (ACM) [9]. In dat verband wordt een informatiecycclus aangehouden onder de naam CODATA [10].

De CODATA gegevens worden jaarlijks verstrekt door de netbeheerders. Onderdeel hiervan zijn de gegevens over transport- en distributieleidingen. De gegevens over leidingen bestaan uit:

- De lengte
- De materiaalsoort
- De bedrijfsdruk¹

Er wordt bij CODATA geen onderscheid gemaakt naar diameter. Om bij de lekfrequenties toch onderscheid te kunnen maken naar diameter is gebruik gemaakt van een diameterverdeling die in 2008 is vastgesteld [11]. Hierin staat de toen geldende diameterverdeling per materiaal. Kiwa acht het aannemelijk dat de diameterverdeling in de loop van de tijd niet veel varieert en daarmee voldoende basis vormt om de lekfrequenties per diametergroep te kunnen bepalen.

¹ Zie hoofdstuk 2.



4 Indeling van storingen

Naast de lekfrequentie voor het hele net, zijn ook de lekfrequenties voor mogelijk relevante deelpopulaties bepaald. Daarbij is in samenwerking met KWR een vergelijking gemaakt met de beschikbare informatie voor water- en gasleidingen. Voor een deel is de informatie gelijk en kan dezelfde indeling worden toegepast. Maar er zijn ook een aantal verschillen. In onderling overleg is besloten om de lekfrequenties op twee niveaus te presenteren:

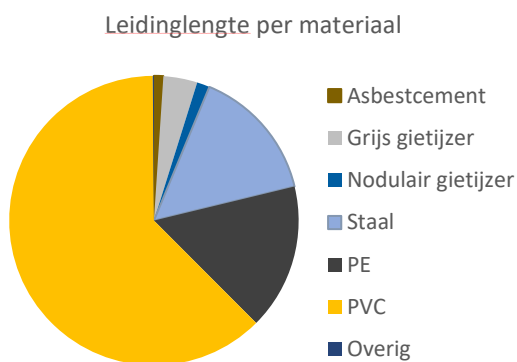
- **Generieke indeling, Niveau 1**
Hierbij worden populaties vastgesteld op basis van categorieën die voor zowel water- als gasleidingen beschikbaar zijn. Het betreft hier de volgende categorieën:
 - Materialen
 - Diametergroepen
- **Specifieke indeling, Niveau 2**
Hier worden de populaties verder uitgesplitst op basis van informatie die voor waterleidingen dan wel gasleidingen specifiek beschikbaar is. In het geval van gasleidingen betreft dit:
 - Maximale Operationele Druk (MOP)

Naast de indeling van de leidingen wordt ook onderscheid gemaakt naar de oorzaak van de lekkage.

4.1 Generieke indeling, Niveau 1

Voor zowel waterleidingen als gasleidingen is in de storingsinformatie het materiaal en de diameter bekend. Voor materialen worden de volgende soorten onderscheiden (met tussen haakjes de daarvoor vaak gebruikte afkortingen):

- Asbestcement (AC)
- Staal (ST)
- Nodulair gietijzer (N.GY)
- Grijs gietijzer (G.GY)
- Koper (CU)
- Polyvinylchloride (PVC)
- Polyetheen (PE)



Hierbij moet opgemerkt worden dat bij PE en PVC ook nog vaak gehanteerde subgroepen bestaan, zoals bijvoorbeeld de verschillende generaties PE en bij PVC het onderscheid tussen zogenaamd hard en slagvast PVC. Maar deze subgroepen worden niet in (al) de brondata onderscheiden. Om die reden is het ook niet mogelijk om deze specificering toe te passen.

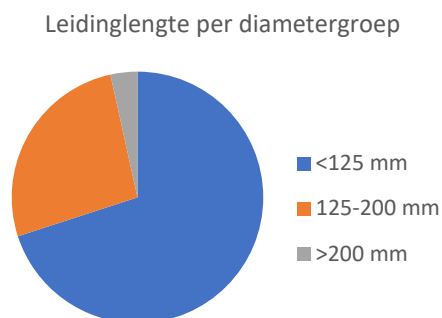
Het onderscheid kan overigens wel relevant zijn. Van 1^e generatie PE is bekend dat het veel gevoeliger is voor puntbelastingen. Bij PVC wordt vaak onderscheid gemaakt tussen hard PVC (het normale PVC dat ook voor waterleidingen wordt gebruikt) en slagvast PVC (dat sinds de jaren 80 voor gasleidingen wordt gebruikt). Dit is vooral relevant met betrekking tot graafschades. Slagvast PVC is iets beter bestand tegen slagbelastingen. Voor zover het onderscheid tussen hard PVC en slagvast PVC kan worden gemaakt, is dit terug te zien in de lekfrequenties. De lekfrequenties van hard PVC en slagvast PVC zijn gelijk indien lekken door externe factoren buiten



beschouwing worden gelaten. Worden lekken door externe factoren wel meegenomen, dan zijn de lekfrequenties van hard PVC twee keer zo hoog.

Naast het materiaal wordt er onderscheid gemaakt naar diameterranges. Deze zijn in de brondata al samengevoegd tot een aantal groepen. Water- en gasleidingen hebben de volgende overeenkomstige diameterranges in de brondata:

- < 125 mm
- 125-200 mm
- > 200 mm

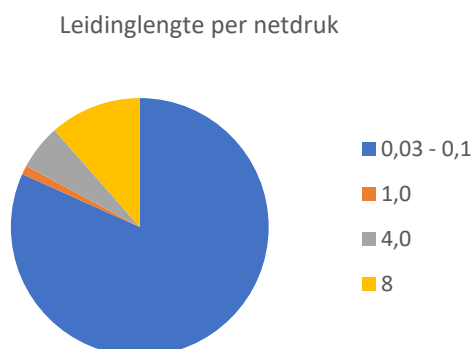


Voor gas kan de groep < 125 mm worden opgesplitst bij 50 mm. Bij water ligt de splitsing van deze groep echter bij 90 mm. Daarom is gekozen om bij de generieke indeling deze groepen samen te voegen. Bij water wordt de groep met diameter >200 mm nog verder onderverdeeld. Dit is voor gas met de beschikbare gegevens niet mogelijk. Bovendien is deze groep bij gas te klein om een verdere uitsplitsing te rechtvaardigen. De grootste diameters die voor gas zijn toegepast, zijn 500 a 600 mm en komen waarschijnlijk alleen voor in oude 30 mbar netten. In de huidige aanlegpraktijk wordt over het algemeen niet groter gelegd dan 315 mm.

4.2 Specifieke indeling leidinggroepen, Niveau 2

Gasnetten zijn onderverdeeld in een aantal druktrappen (zie ook hoofdstuk 2). De volgende standaard druktrappen worden onderscheiden:

- 30 en 100 mbar
- 1 bar
- 4 bar
- 8 bar



Deze indeling is gekozen, omdat 30 en 100 mbar netten dezelfde functie en hetzelfde materiaalgebruik kennen. Er bestaan ook enkele netten met afwijkende drukken. Dit betreft 200 mbar, 2 en 3 bar netten. De 200 mbar netten zijn meegenomen in de groep 30 en 100 mbar. De 2 en 3 bar netten zijn opgenomen in de groep 4 bar.

4.3 Categorisering oorzaak lekkages

Op verzoek van de opdrachtgever worden de lekfrequenties gegeven inclusief en exclusief lekkages als gevolg van zogenaamde externe factoren. Worden deze twee bij elkaar opgeteld, dan geeft dit weer de totale lekfrequentie.



Bij externe factoren moet worden gedacht aan activiteiten door derden, waarbij in principe de kosten verhaalbaar zijn. In de brondata voor gas betreft dit de volgende gedefinieerde oorzaken:

- Door de klant / aangeslotene
- Graafwerk
- Vandalisme/diefstal

Alle andere oorzaken worden niet als externe factor worden beschouwd. Dit betreft de volgende gedefinieerde oorzaken in het storingsregister:

- Aanlegfout (in het verleden)
- Anders, toelichten bij opm.
- Bediening
- Corrosie / veroudering
- Montagefout (nu)
- Onbekend
- Productfout
- Puntbelasting
- Werking van de bodem



5 Lekfrequenties

In dit hoofdstuk worden de lekfrequenties gepresenteerd. De cijfers waarop deze frequenties zijn gebaseerd, staan in bijlage I. Deze cijfers zijn van belang om de hier gegeven frequenties te kunnen wegen. Per indeling worden drie lekfrequenties gegeven:

- Lekfrequenties van alle lekken
- Lekfrequenties, exclusief lekken als gevolgen van externe oorzaken
- Lekfrequenties van lekken uitsluitende als gevolg van externe oorzaken.

De lekfrequenties van de laatste twee punten vormen opgeteld samen de lekfrequenties van alle lekken, zoals genoemd onder het eerst punt. Door het onderverdelen kunnen kleine populaties ontstaan met weinig lekken en/of weinig lengte. Naarmate het aantal (n) lekken kleiner is, wordt de onzekerheid groter (de onzekerheid is evenredig met $\frac{1}{\sqrt{n}}$). In overleg met KWR is daarom tot het volgende besloten:

- De lekfrequentie wordt **grijs** getoond, indien:
 - minder dan 10 lekken zijn gevonden (te grote onzekerheid)
 - de netlengte kleiner dan 10 km is. (onvoldoende representatief).
- De lekfrequentie wordt in **blauw** getoond, indien:
 - het aantal lekken tussen 10 en 50 ligt (lagere zekerheid)

5.1 Lekfrequenties generieke indeling, Niveau 1

Bij de generieke indeling worden de lekken ingedeeld naar materiaal en diametergroep. Van een aantal lekken is het materiaal niet bekend. Het aandeel lekken waarbij het materiaal niet bekend is, betreft 0,8% van alle lekken. Er is ook een deel van de netlengtes waarvan het materiaal niet bekend is. Dit betreft 0,1% van de totale netlengte. De lekken waarvan het materiaal niet bekend is, hebben geen relatie met de netlengte waarvan het materiaal niet van bekend is. Dat betekent dat uit deze twee getallen geen lekfrequentie mag worden berekend. Daarom is deze categorie niet in de tabellen opgenomen. Het is echter wel meegenomen in de lekfrequenties, indien geen onderscheid naar materiaal wordt gemaakt.

5.1.1 Lekfrequenties alle lekken

De lekfrequentie van het totale net is 0,04 lekken per km per jaar. In tabel 1 worden de frequenties gegeven, uitgesplitst naar materiaal en diameter. In de onderste rij worden de frequenties gegeven per diameterrange, zonder onderscheid te maken naar materiaalsoort. In de rechterkolom wordt de frequentie gegeven per materiaalsoort, zonder onderscheid te maken naar diameterrange. Tot slot wordt in de cel rechts onderin de lekfrequentie van het totaal gegeven. Zie bijlage I.5.1 voor het aantal lekken per item.

Tabel 1: Lekfrequenties per materiaal en diametergroep, incl. externe oorzaken

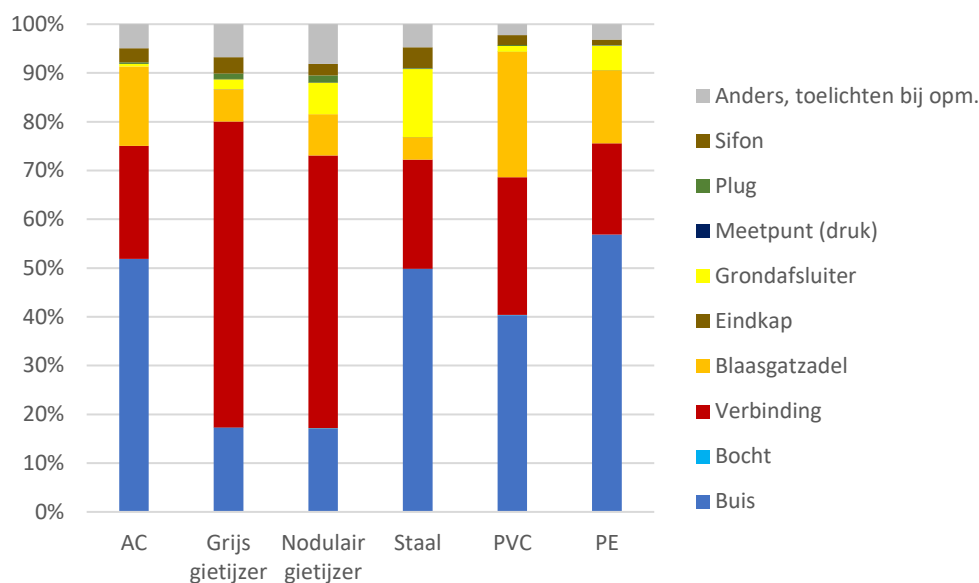
Lekken per km per jaar				
Materiaal	Diameter			Per materiaal
	<125 mm	125-200 mm	>200 mm	
Asbestcement	0,14	0,16	0,17	0,16
Grijs gietijzer	0,18	0,24	0,31	0,23
Nodulair gietijzer	0,10	0,11	0,20	0,13
Staal	0,05	0,02	0,03	0,04
PE	0,02	0,04	0,06	0,03
PVC	0,03	0,03	0,05	0,03
Per diametergroep:	0,03^a	0,04^a	0,10^a	0,04^a

^{a)} Lekfrequentie alle gasleidingen, inclusief lekken waarvan het materiaal niet bekend is.



De tabel laat zien dat vooral per materiaal de lekfrequenties verschillen. Maar ook de diameter lijkt uit te maken. Bij de diameters >200 mm liggen de lekfrequenties twee keer zo hoog. Een deel van de verklaring is gelegen in het feit dat asbestcement, grijs gietijzer en nodulair gietijzer relatief meer voorkomen bij de grotere diameters, Daar komt bij dat juist voor deze materialen een positieve relatie tussen diameter en lekfrequentie zichtbaar is.

Interessant is om ook even te kijken welke componenten het meeste bijdragen aan de lekkages in een leidingsysteem van een bepaald materiaal.



Figuur 4: Relatieve bijdrage aan de lekfrequenties van componenten (per leidingsysteem van een bepaald materiaal)

In figuur 4 is terug te zien dat bij gietijzeren leidingen (zowel grijs als nodulair) relatief vaker problemen zijn met de verbindingen. Vroeger werden hiervoor onder andere zogenaamde lood-striktouwverbindingen voor gebruikt. Bij de overschakeling naar het droge aardgas droogde het hennep uit, waardoor deze verbindingen vaak lekkageproblemen veroorzaken. Dat vooral bij PVC relatief vaak problemen zijn met blaasgatzadels, is niet verwonderlijk. Het zetten van blazen om de leiding tijdelijk af te sluiten is typisch een techniek voor lagedruk netten en PVC is bij uitstek het materiaal dat in lagedruk netten wordt toegepast. Bij staal is juist het aandeel van grondafsluiters groter, wat begrijpelijk is, omdat in hogedruk netten vaker grondafsluiters worden toegepast en staal vooral voor hogedruknetten wordt gebruikt.

5.1.2 Lekfrequenties, exclusief lekken door externe oorzaken

Indien de externe oorzaken niet worden meegenomen, dan is de lekfrequentie van het totale net 0,03 lekken per km per jaar. In *tabel 2* staan deze lekken uitgesplitst naar materiaal en diameter. In de onderste rij worden de frequenties gegeven per diameterrange, zonder onderscheid te maken naar materiaalsoort. In de rechterkolom wordt de frequentie gegeven per materiaalsoort, zonder onderscheid te maken naar diameterrange. Tot slot wordt in de cel rechts onderin de lekfrequentie van het hele net gegeven. Zie voor het totaal aantal lekken per item bijlage I.5.2.



Tabel 2: Lekk frequenties per materiaal en diametergroep, excl. externe oorzaken

Lekken per km per jaar, exclusief externe oorzaken				
Materiaal	Diameter			Per materiaal
	<125 mm	125-200 mm	>200 mm	
Asbestcement	0,13	0,15	0,16	0,14
Grijs gietijzer	0,17	0,23	0,30	0,21
Nodulair gietijzer	0,09	0,10	0,19	0,12
Staal	0,05	0,02	0,03	0,03
PE	0,02	0,03	0,05	0,02
PVC	0,01	0,02	0,04	0,02
Per diametergroep:	0,02^a	0,04^a	0,09^a	0,03^a

^{a)} Lekk frequentie alle gasleidingen, inclusief lekken waarvan het materiaal niet bekend is.

In vergelijking tot de lek frequenties inclusief externe oorzaken valt op dat het weglaten van externe invloeden geen invloed heeft op de getallen voor nodulair gietijzer en staal. Dit is te begrijpen, omdat leidingen van staal en nodulair gietijzer veel minder gevoelig zijn voor graafschade dan de overige materialen.

5.1.3 Lekk frequenties als gevolg van externe oorzaken

In de onderstaande tabel zijn de lek frequenties gegeven als gevolg van externe oorzaken. De frequenties zijn gegeven met een extra cijfer achter de komma, omdat de frequenties erg laag zijn. Zie voor het totaal aantal lekken per item bijlage 5.1.3.

Tabel 3: Lekk frequenties als gevolg van externe oorzaken

Lekken per km per jaar als gevolg van externe oorzaken				
Materiaal	Diameter			Per materiaal
	<125 mm	125-200 mm	>200 mm	
Asbestcement	0,014	0,010	0,012 ^b	0,012
Grijs gietijzer	0,008	0,009	0,011	0,009
Nodulair gietijzer	0,004 ^b	0,005 ^b	0,007 ^b	0,005
Staal	0,003	0,001	0,003 ^b	0,002
PE	0,008	0,007	0,008 ^b	0,008
PVC	0,012	0,008	0,008	0,011
Per diametergroep:	0,010^a	0,006^a	0,007^a	0,009^a

^{a)} Lekk frequentie alle gasleidingen in de drukgroep, inclusief lekken waarvan het materiaal niet bekend is.

^{b)} Het totaal aantal lekken in 10 jaar ligt tussen de 10 en 50, wat een lagere betrouwbaarheid betekent.

Hier is zichtbaar dat stalen leidingen minder gevoelig zijn voor externe oorzaken. Dit is te begrijpen omdat een stalen leiding veel beter bestand is tegen schade door bijvoorbeeld graafwerkzaamheden.

5.2 Lekk frequenties specifieke indeling, Niveau 2

Voor gasleidingen kan onderscheid gemaakt worden naar netdruk. De resultaten daarvan staan hieronder weergegeven.

5.2.1 Lekk frequenties alle lekken

In tabel 4 worden de frequenties gegeven, uitgesplitst per drukgroep, materiaal en diameter. Per drukgroep wordt eveneens per diametergroep de frequentie gegeven, zonder onderscheid te maken naar materiaal soort. In de rechterkolom wordt de frequentie gegeven per drukgroep en per materiaal soort, zonder onderscheid te maken naar diameter range. Tot slot wordt telkens in de cel in rechterkolom op de rij "Per diametergroep", de lek frequentie per druktrap gegeven, zonder onderscheid te maken naar diameter en materiaal. Zie voor het totaal aantal lekken per item bijlage I.6.1.



In deze tabel valt op dat nodulair gietijzer beter lijkt te presteren in de hogere drukgroepen. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat nodulair gietijzer en grijs gietijzer niet eenvoudig te onderscheiden zijn. Dit kan veroorzaken dat lekken in grijs gietijzeren leidingen bij de registratie per ongeluk toegekend worden aan nodulair gietijzer. Omdat grijs gietijzer niet in 4 en 8 bar netten voorkomt, kan daar deze vergissing niet gemaakt worden.

Tabel 4: Lekfrequenties per druk, materiaal en diametergroep, incl. externe oorzaken

Lekken per km per jaar					
Druk	Materiaal	Diameter			Per materiaal
		<125 mm	125-200 mm	>200 mm	
30 - 100 mbar	Asbestcement	0,14	0,16	0,17	0,15
	Grijs gietijzer	0,18	0,23	0,30	0,22
	Nodulair gietijzer	0,12	0,18	0,22	0,16
	Staal	0,11	0,09	0,17	0,11
	PE	0,02	0,05	0,11	0,03
	PVC	0,03	0,03	0,05	0,03
	Diametergroep:	0,04	0,05	0,14	0,04^a
1 bar	Grijs gietijzer	0,59 ^d	0,24	0,35	0,33
	Nodulair gietijzer	0,26 ^b	0,08 ^b	0,21	0,18
	Staal	0,23	0,06	0,10	0,10
	PE	0,04	0,03	0,03 ^b	0,03
	Diametergroep:	0,05	0,07	0,17	0,08^a
4 bar	Nodulair gietijzer	0,05 ^c	0,03 ^b	0,02 ^c	0,03^b
	Staal	0,03	0,02	0,02 ^b	0,02
	PE	0,03	0,03	0,01 ^c	0,03
	Diametergroep:	0,03	0,03	0,02^b	0,03^a
8 bar	Nodulair gietijzer	0,02 ^b	0,02	0,04 ^c	0,02
	Staal	0,01	0,01	0,01	0,01
	PE	0,01	0,01 ^b	0,05 ^b	0,01
	Diametergroep:	0,01	0,01	0,02	0,01^a

^a) Lekfrequentie alle gasleidingen in de drukgroep, inclusief lekken waarvan het materiaal niet bekend is.

^b) Het totaal aantal lekken in 10 jaar ligt tussen de 10 en 50, wat een lagere betrouwbaarheid betekent.

^c) Minder dan 10 lekken in 10 jaar, wat een lage betrouwbaarheid geeft.

^d) De populatie betreft minder dan 10 km, en wordt daarom niet als representatief beschouwd.

5.2.2 Lekfrequenties, exclusief lekken door externe oorzaken

In tabel 5 worden de frequenties gegeven exclusief de lekken door externe oorzaken. Deze worden uitgesplitst per drukgroep, materiaal en diameter. Per druktrap wordt eveneens per diametergroep de frequentie gegeven, zonder onderscheid te maken naar materiaalsoort. In de rechterkolom wordt de frequentie gegeven per druktrap en per materiaalsoort, zonder onderscheid te maken naar diameter. Tot slot wordt telkens in de cel in rechterkolom op de rij "Per diametergroep", de lekfrequentie per druktrap gegeven, zonder onderscheid te maken naar diameter en materiaal. Zie voor het totaal aantal lekken per item bijlage I.6.2.



Tabel 5: Lekk frequenties per druk, materiaal en diametergroep, excl. externe oorzaken

Lekken per km per jaar, exclusief externe oorzaken					
Druk	Materiaal	Diameter			Per materiaal
		<125 mm	125-200 mm	>200 mm	
30 - 100 mbar	Asbestcement	0,13	0,15	0,16	0,15
	Grijs gietijzer	0,17	0,23	0,29	0,22
	Nodulair gietijzer	0,11	0,17	0,21	0,16
	Staal	0,10	0,09	0,15	0,11
	PE	0,01	0,04	0,09	0,03
	PVC	0,01	0,02	0,04	0,03
	Diametergroep:	0,02^a	0,05^a	0,13^a	0,03^a
1 bar	Grijs gietijzer	0,59 ^d	0,23	0,34	0,33
	Nodulair gietijzer	0,25 ^b	0,08 ^b	0,20	0,18
	Staal	0,19	0,06	0,09	0,10
	PE	0,03	0,02 ^b	0,03 ^b	0,03
	Diametergroep:	0,04^a	0,06^a	0,16^a	0,08^a
4 bar	Nodulair gietijzer	0,05 ^c	0,03 ^b	0,01 ^c	0,03^b
	Staal	0,03	0,02	0,02 ^b	0,02
	PE	0,02	0,03	0,01 ^c	0,03
	Diametergroep:	0,02^a	0,03^a	0,02^{a,b}	0,02^a
8 bar	Nodulair gietijzer	0,02 ^b	0,02	0,04 ^c	0,02
	Staal	0,01	0,01 ^b	0,01	0,01
	PE	0,01	0,00 ^b	0,04 ^c	0,01
	Diametergroep:	0,01^a	0,01^a	0,01^a	0,01^a

^a) Lekk frequentie alle gasleidingen in de drukgroep, inclusief lekken waarvan het materiaal niet bekend is.

^b) Het totaal aantal lekken in 10 jaar ligt tussen de 10 en 50, wat een lagere betrouwbaarheid betekent.

^c) Minder dan 10 lekken in 10 jaar, wat een lage betrouwbaarheid geeft.

^d) De populatie betreft minder dan 10 km, en wordt daarom niet als representatief beschouwd.

Het weglaten van de externe factoren heeft vooral invloed op de leidingen in de lagedruk netten (30 en 100 mbar). Dit kan ten eerste verklaard worden door het materiaalgebruik. In lagedruk netten worden meer materialen toegepast die gevoeliger zijn voor graafschade. Naast het materiaalgebruik is een mogelijke verklaring dat de hogedruk leidingen vaker in buitengebied liggen, waar minder kans is op graafschade.

5.2.3 Lekk frequenties als gevolg van externe oorzaken

In de onderstaande tabel zijn de lekk frequenties gegeven als gevolg van externe oorzaken. De frequenties zijn gegeven met een extra cijfer achter de komma, omdat de frequenties erg laag zijn. Zie voor het totaal aantal lekken per item bijlage I.6.3.



Tabel 6: Lekk frequenties per druk, materiaal en diametergroep, als gevolg van externe oorzaken

Lekken per km per jaar als gevolg van externe oorzaken					
Druk	Materiaal	Diameter			Per materiaal
		<125 mm	125-200 mm	>200 mm	
30 - 100 mbar	Asbestcement	0,014	0,010	0,012 ^b	0,012
	Grijs gietijzer	0,008	0,009	0,010	0,009
	Nodulair gietijzer	0,005 ^b	0,008 ^b	0,007 ^b	0,007
	Staal	0,005	0,006	0,013 ^b	0,005
	PE	0,009	0,013	0,018 ^b	0,010
	PVC	0,012	0,008	0,008	0,011
	Diametergroep:	0,008^a	0,011^a	0,009^a	0,010^a
1 bar	Grijs gietijzer	0,000 ^{dc}	0,007 ^c	0,014 ^c	0,011 ^b
	Nodulair gietijzer	0,010 ^c	0,002 ^c	0,008 ^b	0,007 ^b
	Staal	0,037 ^b	0,003 ^c	0,005 ^c	0,009 ^b
	PE	0,009 ^c	0,006 ^b	0,001 ^c	0,008
	Diametergroep:	0,006^a	0,010^{a,b}	0,007	0,008^a
4 bar	Nodulair gietijzer	0,000 ^c	0,002 ^c	0,008 ^c	0,003 ^c
	Staal	0,003 ^c	0,001 ^c	0,002 ^c	0,002 ^b
	PE	0,005	0,003 ^b	0,000 ^c	0,005
	Diametergroep:	0,002^a	0,005^{a,b}	0,002^c	0,004^a
8 bar	Nodulair gietijzer	0,001 ^c	0,001 ^c	0,000 ^c	0,001 ^c
	Staal	0,001	0,001 ^b	0,002 ^b	0,001
	PE	0,003 ^b	0,003 ^b	0,015 ^c	0,003 ^b
	Diametergroep:	0,001^a	0,001^a	0,002^b	0,001^a

^a) Lekk frequentie alle gasleidingen in de drukgroep, inclusief lekken waarvan het materiaal niet bekend is.

^b) Het totaal aantal lekken in 10 jaar ligt tussen de 10 en 50, wat een lagere betrouwbaarheid betekent.

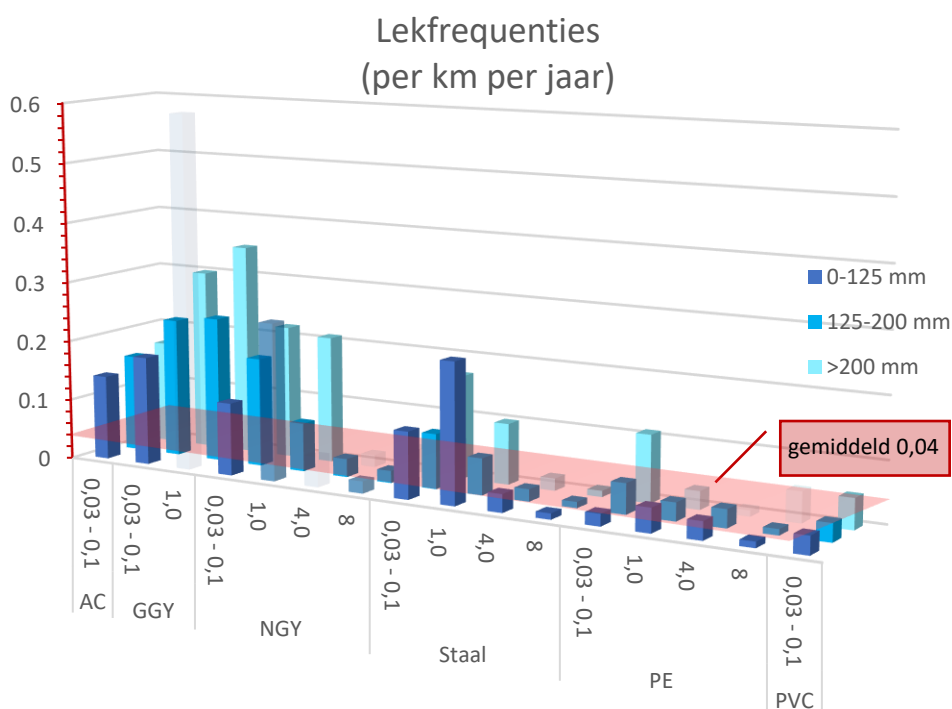
^c) Minder dan 10 lekken in 10 jaar, wat een lage betrouwbaarheid geeft.

^d) De populatie betreft minder dan 10 km, en wordt daarom niet als representatief beschouwd.



6 Conclusies en aanbevelingen

De algemene lekfrequentie van gasleidingen ligt rond 0,04 lek per km per jaar. Vooral per materiaalsoort zijn er echter duidelijke verschillen, maar ook per netdruk. Dat de gemiddelde lekfrequentie desondanks zo laag is, komt omdat de oude materialen met hoge lekfrequenties relatief nog maar weinig voorkomen.



Figuur 5: Lekfrequenties per materiaal, netdruk en diametergroep.

Asbestcement leidingen en grijs gietijzeren leidingen hebben een beduidend hogere lekfrequentie. Dit lijkt voor nodulair gietijzer ook het geval, maar er zijn aanwijzingen dat dit mogelijk veroorzaakt wordt door vergissingen bij het invullen van de storingsgegevens, omdat ter plekke moeilijk onderscheid te maken is tussen nodulair en grijs gietijzer.

De druk van het net lijkt ook verschil te maken. Dit kan in de eerste plaats verklaard worden doordat bij lagedruknetten meer materialen worden toegepast die gevoelig zijn voor graafschade. Daarnaast is een mogelijke verklaring dat hogedruk leidingen vaker in buitengebied liggen en daardoor minder kans op graafschade hebben.

In de NPR 3659/A1/C1:1996 worden lekfrequenties genoemd voor de periode 1965 – 1980. Aanbevolen wordt om de NPR te wijzigen en voor lagedruk gasleidingen de in dit rapport genoemde lekfrequenties te hanteren.



7 Verwijzingen

- [1] R. Beuken, „Storingsfrequenties drinkwaterleidingen. Analyse voor het POV-project 'Filters in parallel gelegen leidingen',” KWR, Nieuwegein, 2020.
- [2] -, „NPR 3659/A1/C1:1996 Ondergrondse pijpleidingen. Grondslagen voor de sterkteberekening.” NEN, Delft, 2006.
- [3] R. v. Aerde, „Betrouwbaarheid van gasnetten in Nederland. Resultaten 2019.” Netbeheer Nederland, Den Haag, 2020.
- [4] R. v. Aerde, „Betrouwbaarheid van gasdistributienetten in Nederland. Resultaten 2018.” Netbeheer Nederland, Den Haag, 2019.
- [5] -, „Handleiding Nestor Gas. Versie 4.0,” Netbeheer Nederland, Den Haag, 2018.
- [6] Netbeheer Nederland, „Meetprocedure voor bovengronds lekzoeken, versie augustus 2012,” 31 08 2012. [Online]. Available: https://www.netbeheernederland.nl/_upload/Files/Meetprocedure_bovengrondse_lekzoeken__versie_augustus_2012_100.pdf. [Geopend 2020 09 02].
- [7] C. Lock, „Bovengronds lekzoeken deel 2,” *Gasnet*, vol. jaargang 21, nr. 2, pp. 1-8, 2007.
- [8] T. Schweckendiek en A. v. d. Meer, „Faalkansanalyse dijkontwerp Gorinchem - Waardenburg met kruisende waterleiding. Tweede toepassing Veiligheidsraamwerk Kabels & Leidingen.” Stuurgroep Project Overstijgende Verkenning Kabels & Leidingen (POV K&L), Delft, 2020.
- [9] -, „KENGETALLEN REGIONALE GASNETTEN. CODATA handboek NG,” NMa, 2009.
- [10] -, „Regeling kwaliteitsaspecten netbeheer elektriciteit en gas,” *Staatscourant*, p. 9., 30 12 2004.
- [11] C. Lock, P. Van Norden en A. Hendriks, „Overzicht van de aanwezige leidingmaterialen in het Nederlandse gasdistributienet,” Kiwa N.V., Apeldoorn, 2008.



I Aantal lekken en netlengtes

Om onzekerheid van de lekfrequenties te kunnen beoordelen, is van belang om te weten om hoeveel storingen het gaat. Voor de representativiteit is van belang om te weten wat de daadwerkelijke netlengte is. Daarom zijn deze cijfers hier ter informatie gegeven.

I.1 Lekken en netlengte totale net (2009-2018)

Aantal lekken	48518
Aantal lekken, excl. externe oorzaak	37347
Gemiddelde netlengte (km)	124633

I.2 Lekken en netlengte per materiaal (2009-2018)

In de onderstaande tabel ontbreken de lekken en de netlengtes waarvan het materiaal niet bekend is.

Materiaal	Lekken		Lekken excl. ext. oorzaken		Gem. netlengte [km] [%]	
Asbestcement	2004	4%	1846	5%	1302	1%
Grijs gietijzer	10366	22%	9948	27%	4727	4%
Nodulair gietijzer	2131	4%	2042	6%	1772	1%
Staal	6778	14%	6352	17%	18641	15%
PE	5546	12%	3941	11%	20308	16%
PVC	21297	44%	12864	35%	77724	62%

I.3 Lekken en netlengte per diameter (2009-2018)

Diametergroep	Lekken		Lekken excl. ext. oorzaken		Gem. netlengte [km] [%]	
<125 mm	29601	61%	20841	56%	87238	70%
125-200 mm	14662	30%	12534	34%	33088	27%
>200 mm	4255	9%	3972	11%	4307	3%

I.4 Lekken en netlengte per druk (2009-2018)

Drukgroep	Lekken		Lekken excl. ext. oorzaken		Gem. netlengte [km] [%]	
0,03 - 0,1	43786	90%	33219	89%	101852	82%
1,0	1196	2%	1078	3%	1411	1%
4,0	2032	4%	1716	5%	7038	6%
8	1504	3%	1334	4%	14329	11%



I.5 Aantal lekken per materiaal en diameter (2009-2018)

I.5.1 Totaal aantal lekken (2009-2018)

Aantal lekken (2009-2018)				
Materiaal	Diameter			Per materiaal
	<125 mm	125-200 mm	>200 mm	
Asbestcement	721	943	340	2004
Grijs gietijzer	3741	4582	2043	10366
Nodulair gietijzer	562	909	660	2131
Staal	4845	1453	480	6778
PE	4236	1156	154	5546
PVC	15254	5493	550	21297
Grand Total	29601^a	14662^a	4255^a	48518

^{a)} Lekfrequentie alle gasleidingen, inclusief lekken waarvan het materiaal niet bekend is.

I.5.2 Aantal lekken, excl. externe oorzaken (2009-2018)

Aantal lekken, exclusief externe oorzaken (2009-2018)				
Materiaal	Diameter			Per materiaal
	<125 mm	125-200 mm	>200 mm	
Asbestcement	649	881	316	1846
Grijs gietijzer	3565	4411	1972	9948
Nodulair gietijzer	538	868	636	2042
Staal	4569	1346	437	6352
PE	2882	927	132	3941
PVC	8427	3983	454	12864
Grand Total	20841^a	12534^a	3972^a	37347^a

^{a)} Lekfrequentie alle gasleidingen, inclusief lekken waarvan het materiaal niet bekend is.

I.5.3 Aantal lekken als gevolg van externe oorzaken (2009-2018)

Aantal lekken als gevolg van externe oorzaken (2009-2018)				
Materiaal	Diameter			Per materiaal
	<125 mm	125-200 mm	>200 mm	
Asbestcement	72	62	24 ^b	158
Grijs gietijzer	176	171	71	418
Nodulair gietijzer	24 ^b	41 ^b	24 ^b	89
Staal	276	107	43 ^b	426
PE	1354	229	22 ^b	1605
PVC	6827	1510	96	8433
Grand Total	8760^a	2128^a	283^a	11171^a

^{a)} Lekfrequentie alle gasleidingen, inclusief lekken waarvan het materiaal niet bekend is.

^{b)} Het totaal aantal lekken in 10 jaar ligt tussen de 10 en 50, wat een lagere betrouwbaarheid betekent.



I.6 Aantal lekken per druk, materiaal en diameter (2009-2018)

I.6.1 Totaal aantal lekken (2009-2018)

Totaal aantal lekken (2009-2018)					
Druk	Materiaal	Diameter			Per materiaal
		<125 mm	125-200 mm	>200 mm	
30 - 100 mbar	Asbestcement	720	942	340	2002
	Grijs gietijzer	3712	4502	1807	10021
	Nodulair gietijzer	502	780	399	1681
	Staal	4141	828	185	5154
	PE	2483	731	107	3321
	PVC	15235	5474	548	21257
	Diametergroep:		27017^a	13367^a	3402^a
1 bar	Grijs gietijzer	24 ^d	67	228	319
	Nodulair gietijzer	26 ^b	38 ^b	250	314
	Staal	69	60	94	223
	PE	233	53	27 ^b	313
	Diametergroep:	352^a	218^a	599^a	1169^a
4 bar	Nodulair gietijzer	5 ^c	16 ^b	2 ^c	23^b
	Staal	73	66	32 ^b	171
	PE	1449	345	9 ^c	1803
	Diametergroep:	1527^a	427^a	43^{a,b}	1997^a
8 bar	Nodulair gietijzer	29 ^b	75	9 ^c	113
	Staal	562	499	169	1230
	PE	71	27 ^b	11 ^b	109
	Diametergroep:	662^a	601^a	189^a	1452^a

^a) Lekfrequentie alle gasleidingen in de drukgroep, inclusief lekken waarvan het materiaal niet bekend is.

^b) Het totaal aantal lekken in 10 jaar ligt tussen de 10 en 50, wat een lagere betrouwbaarheid betekent.

^c) Minder dan 10 lekken in 10 jaar, wat een lage betrouwbaarheid geeft.

^d) De populatie betreft minder dan 10 km, en wordt daarom niet als representatief beschouwd.



I.6.2 Aantal lekken, excl. externe oorzaken (2009-2018)

Aantal lekken, exclusief externe oorzaken (2009-2018)					
Druk	Materiaal	Diameter			Per materiaal
		<125 mm	125-200 mm	>200 mm	
30 - 100 mbar	Asbestcement	648	880	316	1844
	Grijs gietijzer	3536	4333	1745	9614
	Nodulair gietijzer	481	744	386	1611
	Staal	3946	774	171	4891
	PE	1473	552	89	2114
	PVC	8412	3968	452	12832
	Diametergroep:	18691^a	11354^a	3174^a	33219^a
1 bar	Grijs gietijzer	24 ^d	65	219	284
	Nodulair gietijzer	25 ^b	37 ^b	240	302
	Staal	58	57	89	204
	PE	175	43 ^b	26 ^b	244
	Diametergroep:	258^a	202^a	574^a	1034^a
4 bar	Nodulair gietijzer	5 ^c	15 ^b	1 ^c	21^b
	Staal	66	61	29 ^b	156
	PE	1183	315	9 ^c	1507
	Diametergroep:	1254^a	391^a	39^{a,b}	1684^a
8 bar	Nodulair gietijzer	27 ^b	72	9 ^c	108
	Staal	499	454	148	1101
	PE	51	17 ^b	8 ^c	76
	Diametergroep:	577^a	543^a	165^a	1285^a

^a) Lekfrequentie alle gasleidingen in de drukgroep, inclusief lekken waarvan het materiaal niet bekend is.

^b) Het totaal aantal lekken in 10 jaar ligt tussen de 10 en 50, wat een lagere betrouwbaarheid betekent.

^c) Minder dan 10 lekken in 10 jaar, wat een lage betrouwbaarheid geeft.

^d) De populatie betreft minder dan 10 km, en wordt daarom niet als representatief beschouwd.



I.6.3 Aantal lekken als gevolg van externe oorzaken (2009-2018)

Aantal lekken als gevolg van externe oorzaken (2009-2018)					
Druk	Materiaal	Diameter			Per materiaal
		<125 mm	125-200 mm	>200 mm	
30 - 100 mbar	Asbestcement	72	62	24 ^b	158
	Grijs gietijzer	176	169	62	407
	Nodulair gietijzer	21 ^b	36 ^b	13 ^b	70
	Staal	195	54	14 ^b	263
	PE	1010	179	18 ^b	1207
	PVC	6823	1506	96	158
	Diametergroep:	8326^a	2013^a	228^a	10567^a
1 bar	Grijs gietijzer	0 ^{c,d}	2 ^c	9 ^c	11 ^b
	Nodulair gietijzer	1 ^c	1 ^c	10 ^b	12 ^b
	Staal	11 ^b	3 ^c	5 ^c	19 ^b
	PE	58	10 ^b	1 ^c	69
	Diametergroep:	70^a	16^{a,b}	25^{a,b}	111^a
4 bar	Nodulair gietijzer	0 ^c	1 ^c	1 ^c	2 ^c
	Staal	7 ^c	5 ^c	3 ^c	15 ^b
	PE	266	30 ^b	0 ^c	296
	Diametergroep:	273^a	36^{a,b}	4^{a,c}	313^a
8 bar	Nodulair gietijzer	2 ^c	3 ^c	0 ^c	5 ^c
	Staal	63	45 ^b	21 ^b	129
	PE	20 ^b	10 ^b	3 ^c	33 ^b
	Diametergroep:	85^a	58^a	24^{a,b}	167^a

^a) Lekfrequentie alle gasleidingen in de drukgroep, inclusief lekken waarvan het materiaal niet bekend is.

^b) Het totaal aantal lekken in 10 jaar ligt tussen de 10 en 50, wat een lagere betrouwbaarheid betekent.

^c) Minder dan 10 lekken in 10 jaar, wat een lage betrouwbaarheid geeft.

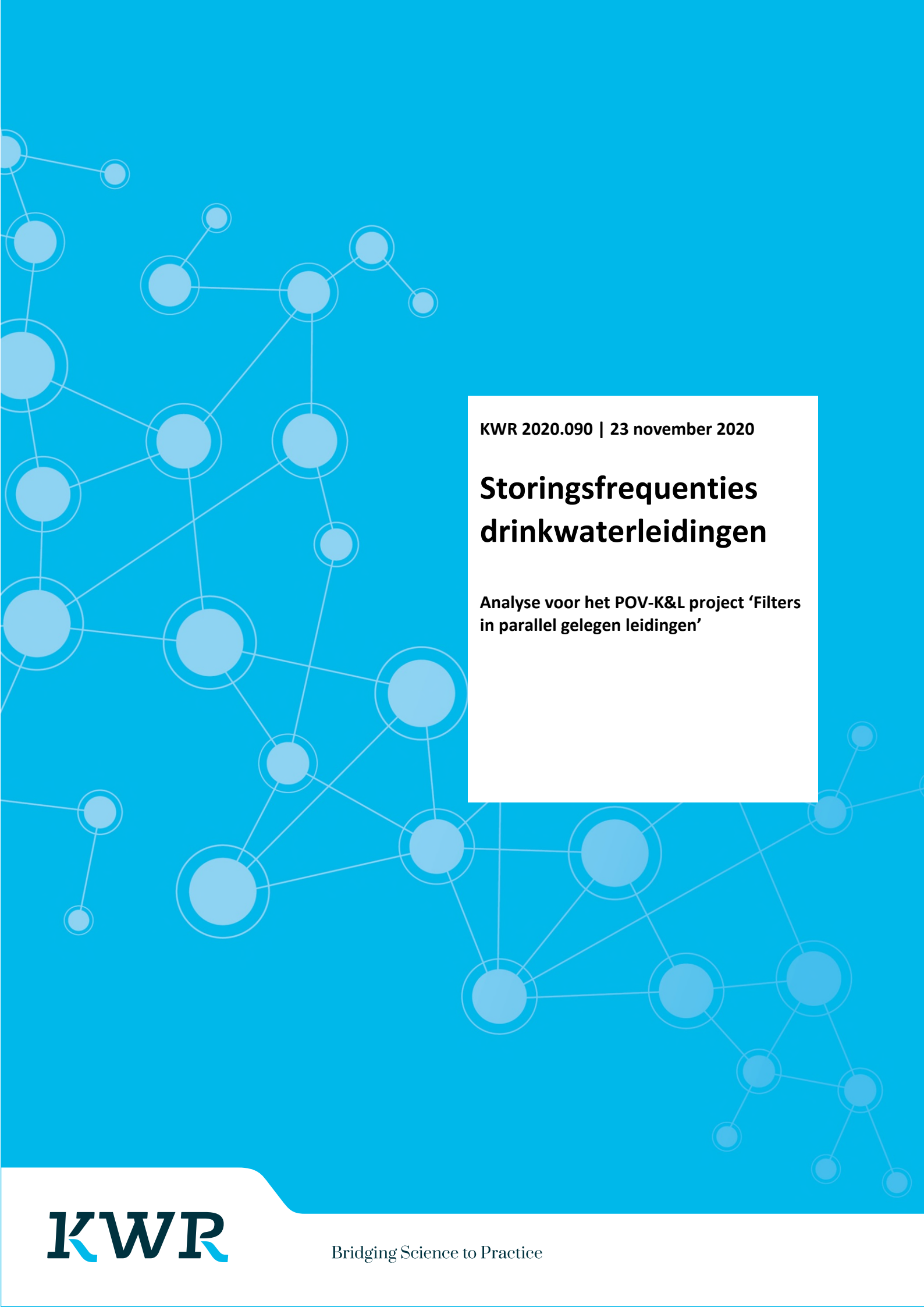
^d) De populatie betreft minder dan 10 km, en wordt daarom niet als representatief beschouwd.



II Definities

CODATA	Bij wet geregelde informatiecyclus voor het verstrekken van netgegevens door de netbeheerders aan de Minister van Economische Zaken.
Bedrijfsdruk	De druk die in het net heerst.
Externe oorzaken	Onder externe oorzaken vallen de volgende oorzaken: <ul style="list-style-type: none">• Activiteiten van een klant of aangeslotene• Graafwerkzaamheden• Vandalisme/diefstal
Gasdistributienet	Het gasnet vanaf het gasontvangststation tot en met de gasmeter bij de afnemer.
Hoofdleidingen	Dit betreft zowel de buizen als de voorkomende verbindingen en appendages in het gasdistributienet, maar exclusief stations en meet- en regelopstellingen. Aansluitleidingen (en storings daaraan) tellen niet mee. Het genoemde materiaal heeft betrekking op het materiaal van de buis en niet van de verbindingen of appendages.
Lek	Het onbedoeld lekken van gas uit het leidingsysteem naar de omgeving. Voor dit rapport beperkt tot de grotere, urgente lekken. Dat betekent dat lekken naar aanleiding van bovengronds lekzoeken, die gecategoriseerd zijn als categorie II, niet meetellen.
Lekfrequentie	aantal lekken per km per jaar Voor dit rapport tellen alleen lekken in hoofdleidingen mee. Lekken in aansluitleidingen, stations en gasmeter- en regelopstellingen worden in dit rapport buiten beschouwing gelaten (zie definities lek en hoofdleidingen).
Lekfrequentie alle lekken	Dit is gelijk aan: Lekfrequenties, excl. externe oorzaken + lekfrequenties externe oorzaken.
Lekfrequenties externe oorzaken	De lekfrequenties die uitsluitend zijn veroorzaakt door externe oorzaken.
Lekfrequenties, excl. externe oorzaken	De lekfrequenties van lekken die niet het gevolg zijn van externe oorzaken.
Maximale bedrijfsdruk	Maximale druk die in het net heerst. Deze druk is in het net aanwezig indien er geen afname is. Zodra er wel afname is, zal naarmate de afstand tot het station en de gasstroom groter is, de druk lokaal lager zijn als gevolg van drukverliezen.
MOP	Maximum Operating Pressure, de maximale bedrijfsdruk.
NESTOR	Landelijk storingsregistratiesysteem dat door alle gasnetbeheerders verplicht gebruikt wordt.

E Storingsfrequenties drinkwaterleidingen (rapport KWR)

A network diagram consisting of various sized light blue circles connected by thin white lines, set against a solid blue background. The circles vary in size and are scattered across the page, with some larger circles acting as hubs.

KWR 2020.090 | 23 november 2020

Storingsfrequenties drinkwaterleidingen

Analyse voor het POV-K&L project 'Filters
in parallel gelegen leidingen'

Storingsfrequenties drinkwaterleidingen

Analyse voor het POV-K&L project 'Filters in parallel gelegen leidingen'

KWR 2020.090 | 23 november 2020

Opdrachtnummer

403261

Projectmanager

ir. A. (Andreas) Moerman

Opdrachtgever

Deltares

Auteur(s)

ir. R.H.S. (Ralph) Beuken

Kwaliteitsborger(s)

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

Verzonden naar

dr. H.M.G. (Henk) Kruse (Deltares)

Dit rapport is niet openbaar en slechts verstrekt aan de opdrachtgevers van het adviesproject. KWR zal zich onthouden van verspreiding van dit rapport en het rapport derhalve niet verstrekken aan derden, tenzij partijen anders overeenkomen. Opdrachtgever is gerechtigd het rapport te verspreiden mits KWR daarvoor vooraf toestemming heeft verleend. Aan de toestemming voor de verspreiding van (onderdelen van) het rapport kan KWR voorwaarden verbinden.

Werkwijzen, rekenmodellen, technieken, ontwerpen van proefinstallaties, prototypen en door KWR gedane voorstellen en ideeën alsmede instrumenten, waaronder software, die in het onderzoeksresultaat zijn opgenomen, zijn en blijven het eigendom van KWR. Ook alle rechten die voortvloeien uit intellectuele- en industriële eigendom, alsmede de auteursrechten, blijven bij KWR berusten en derhalve eigendom van KWR.

Keywords

drinkwaterleidingen, waterkeringen, storingsregistratie, storingsfrequentie

Jaar van publicatie
2020

Meer informatie
Ir, Ralph Beuken
T +31306069649
E ralph.beuken@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

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

KWR

November 2020 ©

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

Samenvatting

In opdracht van Deltares heeft KWR Water Research Institute de kansen op storingen in drinkwaterleidingen bepaald ten behoeve van het POV K&L project 'Afronding Handelingsperspectief veiligheidsrisico K&L'.

Met behulp van USTORE, de vrijwillige storingsregistratie van Nederlandse drinkwaterbedrijven, waarbij gegevens zijn gebruikt van acht bedrijven, is voor dit project een schatting gemaakt van de storingsfrequenties van de zes belangrijkste leidingmaterialen, te weten: asbestcement, grijs gietijzer, nodulair gietijzer, staal, polyetheen en polyvinylchloride. Het totaal aantal storingen dat is betrokken in deze analyse betreft 22.352. De gemiddelde storingsfrequentie voor alle zes hier beschouwde drinkwaterleidingen bedraagt 0,05 storingen per km per jaar. Dit aantal betreft alle storingen. De storingsfrequentie exclusief oorzaak derden bedraagt 0,04 storingen per km per jaar. De storingsfrequentie kent aanzienlijke verschillen per leidingmateriaal, diameter en periode van aanleg.

Inhoud

Samenvatting	2
Inhoud3	
1 Inleiding	4
1.1 Aanleiding van dit rapport	4
1.2 Doelstelling en resultaat	4
1.3 Aanpak en leeswijzer	4
2 Registraties van leidingstoringen	6
2.1 Ontstaan van de storingsregistratie	6
2.2 Gehanteerde definities	7
2.3 Kanttekeningen bij het interpreteren van faalkansen	8
3 Indeling van storingen	10
3.1 Inleiding	10
3.2 Generieke indeling storingen, Niveau 1	10
3.3 Specifieke indeling storingen, Niveau 2	10
3.4 Categorisering oorzaak storingen	11
4 Berekende storingsfrequenties	12
4.1 Inleiding	12
4.2 Storingsfrequenties Niveau 1	12
4.3 Storingsfrequenties Niveau 2	15
4.3.1 Storingsfrequentie AC	15
4.3.2 Storingsfrequentie GGJ	16
4.3.3 Storingsfrequentie NGJ	17
4.3.4 Storingsfrequentie Staal	18
4.3.5 Storingsfrequentie PE	19
4.3.6 Storingsfrequentie PVC	20
4.4 Overige informatie over drinkwaterleidingen	22
5 Analyse van kratergrootte	23
6 Conclusies en aanbevelingen	26
7 Referenties	27
I Overzicht lengte drinkwaterleidingen	28
II Aantal geregistreerde storingen in USTORE	29

1 Inleiding

1.1 Aanleiding van dit rapport

De Project Overstijgende Verkenning Kabels en Leidingen (POV K&L) is een project dat wordt uitgevoerd met subsidie vanuit het Hoogwaterbeschermingsprogramma met als primair doel om het 'gedoe' met kabels en leidingen in dijkversterkingsprojecten op te lossen. In de POV K&L wordt onder andere een instrumentarium ontwikkeld voor het uitvoeren van een integrale faalkansanalyse voor waterkeringen met daarin niet-waterkerende objecten, waaronder drinkwaterleidingen. Dit instrumentarium betreft het Veiligheidsraamwerk Kabels & Leidingen (K&L), een eerste opzet is in 2018 ontwikkeld door Deltares. In de POV K&L wordt het Veiligheidsraamwerk verder ontwikkeld door toepassing in dijkversterkingsprojecten in de praktijk en hierdoor leerervaringen op te doen. Er wordt een aanpak gehanteerd van grof naar fijn, waarbij in eerste instantie zo veel mogelijk gebruik gemaakt wordt van een generieke benadering. Wanneer deze benadering leidt tot een beoordeling als een niet-toelaatbare situatie, wordt overgegaan naar een meer gedetailleerde berekening. Op deze wijze wordt een effectieve en efficiënte werkwijze verkregen om een groot aantal situaties te kunnen beoordelen. Een belangrijk onderdeel van dit instrumentarium betreffen de zogenaamde filters. Doel van de filters is om op eenvoudige wijze aan te tonen dat bepaalde combinaties van waterkeringen en leidingen evident veilig zijn, waardoor het uitvoeren van een meer gedetailleerde berekening niet nodig is. Deze filters worden gebaseerd op de resultaten van (integrale) faalkansanalyses waarin leidingfalen en dijksfalen tezamen worden beschouwd.

Om te komen tot filters voor drinkwaterleidingen in waterkeringen heeft Deltares aan KWR Water Research Institute gevraagd informatie aan te leveren over storingsfrequenties van drinkwaterleidingen op basis van de USTORE-registratie. De USTORE-registratie betreft een database met informatie over leidingbreuken en bijbehorende leidingen gebaseerd op data van 8 Nederlandse drinkwaterbedrijven en een registratieperiode vanaf 2009. Naast voorliggende analyse van de faalkansen van drinkwaterleidingen, voert Kiwa een vergelijkbare analyse uit naar faalkansen van lagedrukgasleidingen.

1.2 Doelstelling en resultaat

KWR stelt tabellen op van opgetreden storingsfrequenties van drinkwaterleidingen, gebaseerd op USTORE registraties zoals die door KWR in samenwerking met deelnemende drinkwaterbedrijven zijn verzameld. Door KWR zal een nadere duiding worden gegeven van de herkomst, betekenis en nauwkeurigheid van de gegevens van de tabellen.

1.3 Aanpak en leeswijzer

In samenspraak met het projectteam en Kiwa is een selectie gemaakt van leidingkarakteristieken als basis voor de op te stellen faalkansen en is aangegeven welke indelingen zijn gehanteerd voor het presenteren hiervan, zie hiervoor hoofdstuk 3. Omdat een juiste duiding van de gegevens belangrijk is, is in hoofdstuk 2 een beschrijving gegeven van de belangrijkste achtergronden van de storingsregistratie van drinkwaterleidingen en wordt het door de drinkwaterbedrijven gehanteerde begrip storingsfrequentie nader toegelicht en gerelateerd aan het in POV-verband gehanteerde begrip faalkans.

Het belangrijkste resultaat van dit rapport zijn tabellen van de belangrijkste leidingmaterialen, zijnde asbestcement (AC), grijs gietijzer (GGIJ), staal, PVC en PE, uitgesplitst naar diameterklassen en leeftijdsklassen. Deze worden weergegeven en nader toegelicht in hoofdstuk 4. Door één drinkwaterbedrijf zijn storingsregistraties uitgevoerd

waarbij ook is aangegeven of erosiekraters optraden en wat hiervan de afmeting was, zie hiervoor hoofdstuk 5. In hoofdstuk 6 zijn conclusies en aanbevelingen weergegeven.

2 Registraties van leidingstoringen

2.1 Ontstaan van de storingsregistratie

In 2009 zijn de vijf drinkwaterbedrijven Waterbedrijf Groningen, WMD, PWN, Dunea en WML gestart met het uniform en centraal registreren van storingen op drinkwaterleidingen. In de jaren daarna zijn Brabant Water, Waternet en Oasen gaan deelnemen aan USTORE. Op het moment van schrijven van dit rapport vinden er activiteiten plaats om ook de gegevens van Vitens over te zetten naar USTORE. De drinkwaterbedrijven nemen op vrijwillige basis deel aan USTORE met als doel om kennis op te bouwen over het falen van leidingen. In tegenstelling tot gasleidingen (zie rapportage Kiwa) is er geen verplichting tot deelname aan de centrale storingsregistratie.

In 2010 is de internetapplicatie USTOREweb in gebruik genomen waarmee drinkwaterbedrijven hun storingen volgens een voorgeschreven format kunnen uploaden. De gegevens zijn ondergebracht bij een professionele ICT-dienstverlener, waarbij voldaan wordt aan de huidige eisen van dataveiligheid. Voor het uitvoeren van analyses worden ook leidinggegevens geüpload. USTOREweb wordt beheerd door KWR. Drinkwaterbedrijven hebben beschikking tot de gegevens en kunnen zelf analyses uitvoeren met USTOREweb. De storings- en leidingnetgegevens verzameld in USTORE worden gebruikt voor het verkrijgen van:

- inzicht in het faalgedrag van individuele leidingen om daarmee saneringsbeslissingen te onderbouwen;
- kennis over de toestand en degradatie van groepen leidingmaterialen.

In 2009 is gestart met een afsprakenkader dat pragmatisch tot stand was gekomen en dat zich voornamelijk richtte op de te registreren items en de wijze van gegevensuitwisseling. Omdat drinkwaterbedrijven strategische en vitale informatie delen over storingen en leidingen en ook hun saneringsbeslissingen van leidingen deels baseren op collectief onderzoek en gegevens van collega-bedrijven, ontstond de behoefte aan een meer formeel afsprakenkader. Dit heeft geleid tot de Praktijkcode Drinkwater (PCD) voor het beheer van storingsregistratie van leidingnetten [1] die in 2017 is verschenen. Integraal onderdeel van deze PCD zijn overeenkomsten die zijn getekend tussen de deelnemende drinkwaterbedrijven en KWR en waarin onderlinge afspraken, rechten en plichten zijn vastgelegd. In deze PCD en bijbehorende overeenkomsten is onder andere vastgelegd:

- definities en systeemgrenzen met betrekking tot storingen aan leidingen;
- het uniform informatiemodel met beschrijvingen van parameters voor het vastleggen voor het vastleggen van informatie over storingen en leidingen;
- rollen en verantwoordelijkheden van drinkwaterbedrijven, KWR en de ICT-dienstverlener;
- de wijze van organiseren en communiceren met drinkwaterbedrijven;
- beveiligingsafspraken met oog op de data;
- procedures voor het afhandelen van interne problemen;
- delen van data met derden;
- afspraken over procesbeschrijvingen, evaluatie en kwaliteitsverbetering.

Onderdeel van de invoering van de praktijkcode is een aangepast informatiemodel waarbij enerzijds verbeterde en vereenvoudigde registraties mogelijk zijn en anderzijds analyses mogelijk zijn voor individuele leidingen. Voor het uitvoeren van analyses van individuele leidingen loopt een proces waar drinkwaterbedrijven leidinginformatie aanleveren op basis van individuele leidingen voorzien van XY-coördinaten. Hiermee is het mogelijk om GIS-analyses te maken voor leidingstoringen. Ten tijde van het schrijven van dit rapport is dit proces in de afrondende fase.

De Begeleidingsgroep USTORE is opgericht om de communicatie en afstemming tussen KWR en de drinkwaterbedrijven inzake USTORE te faciliteren en de kwaliteit te bewaken van USTORE en bijbehorende processen. De afspraak is dat drinkwaterbedrijven die deelnemen aan USTORE in alle gevallen eigenaar blijven van de gegevens die in USTORE zijn opgeslagen. Voor het publiceren van uitkomsten van analyses met USTORE-gegevens vraagt de publicerende partij (in dit geval KWR) via de Begeleidingsgroep USTORE goedkeuring aan de drinkwaterbedrijven waarvan USTORE gegevens gebruikt zijn. Tenzij anders overeengekomen met de drinkwaterbedrijven waarvan gegevens gebruikt zijn, worden bij het vermelden van resultaten van analyses geen bedrijfsnamen weergegeven. Voor het gebruik van gegevens voor dit project is goedkeuring gegeven door de Begeleidingsgroep USTORE van 8 juli 2020.

2.2 Gehanteerde definities

Voor USTORE hanteren de drinkwaterbedrijven een uniforme set aan definities en werkprocessen. Voor een juiste interpretatie van dit rapport, zijn de volgende definities en toelichtingen van belang.

- a De storingsregistratie heeft primair betrekking op drinkwaterleidingen voor transport en distributie. Onder transport wordt hier verstaan leidingen voor grootschalige waterverdeling, onder distributie kleinschalige waterverdeling op het niveau van wijken en straten. Op transportleidingen zijn in principe geen aansluitingen aangesloten. Optioneel kunnen drinkwaterbedrijven ook storingsregistreren voor ruwwater- en halffabricaatleidingen, maar storingsregistratie in deze categorie zijn buiten beschouwing gelaten in de analyse in dit rapport. Storingsregistratie op inwinningleidingen, terreinleidingen, spuileidingen en aansluitleidingen maken geen deel uit van de storingsregistratie.
- b De registraties aan drinkwaterleidingen voor transport en distributie hebben betrekking op buizen, verbindingen en appendages (T-stukken, bochten, verloopstukken, reparatieklemmen/manchetten etc.). Zij hebben geen betrekking op afsluiters, brandkranen en aanboringen voor huisaansluitingen.
- c De definitie van een storing is dusdanig gekozen dat deze zo veel mogelijk aansluit bij de werkprocessen van de drinkwaterbedrijven. In het kader van USTORE is er sprake van een storing aan een leiding als er een melding heeft plaatsgevonden die duidt op lekkage van een leiding, als monteurs ter plekke deze lekkage bevestigen en als deze valt onder bovengenoemde punten a en b.
- d Omdat een storing in principe een potentieel risico vormt voor besmetting, zullen drinkwaterbedrijven alle storingsregistratie op zo kort mogelijke termijn repareren. Dit wil zeggen dat de storingsfrequentie tevens de frequentie van reparatie betreft. Er is, enkele zeer bijzondere gevallen uitgezonderd, geen sprake van het gecontroleerd niet-repareren van geconstateerde storingsregistratie.
- e In dit rapport worden storingsfrequenties gepresenteerd van groepen leidingen. De storingsfrequentie is een rekenkundige benadering van het aantal storingsregistratie dat is opgetreden binnen een gespecificeerde groep in een kalenderjaar, gedeeld door de gesommeerde leidinglengte van die groep in dat kalenderjaar. Deze groep kan ook het gehele leidingnet betreffen, zie verder paragraaf 2.3.

Voor de berekening van een integrale risicoanalyse voor leidingen in waterkeringen, maakt Deltares gebruik van een faalkans van leidingen. Hierbij is de kans op schade aan de waterkering het product van de faalkans van de leiding en de kans dat dat de uitstroom tot falen van de kering leidt. De faalkans van de leiding is niet hetzelfde als de storingsfrequentie zoals in dit rapport berekend, aangezien het mogelijk is dat een niet-gedetecteerd lek leidt tot schade aan een waterkering. In het geval dat een initieel klein lek langzaam groter wordt, zal deze als hij een bepaalde omvang heeft bereikt alsnog gedetecteerd worden en in de storingsregistratie worden opgenomen. De faalkans is daarom te definiëren als de storingsfrequentie, vermeerderd met de frequentie van niet-detecteerbare lekken van een constante omvang. Overigens is het mogelijk om door intensievere monitoring (lekdetectie) de detectiegrens van lekken te verlagen, maar dat is voor de in dit rapport gepresenteerde storingsfrequenties niet het geval.

2.3 Kanttekeningen bij het interpreteren van faalkansen

Compleetheid van data

Hoewel USTORE bestaat sinds 2009, zijn niet alle storingsen van drinkwaterbedrijven die sinds dat moment zijn opgetreden erin opgenomen. Niet alle bedrijven zijn direct gaan deelnemen. In deze analyse zijn de storingsen beschouwd vanaf 2010, omdat 2009 als een 'aanloopjaar' wordt beschouwd. Verder is van één bedrijf bekend dat niet alle storingsen consequent worden meegenomen. Omdat dit tot een onderrepresentatie leidt van het aantal storingsen, is dit bedrijf in deze analyse niet meegenomen. De laatste jaren is het aantal aangeleverde storingsen lager dan voorheen. Volgens de drinkwaterbedrijven is dat omdat de aanpassing van ICT-systemen aan de nieuwe registratieafspraken veel tijd vergt. De berekening van de storingsfrequentie is dusdanig opgezet dat dit niet tot onderrepresentatie leidt.

Detecteerbare lekken

Zoals aangegeven bij de definitie van een storing, hebben deze betrekking op gemelde lekkages. Afgezien van bijzondere situaties voeren drinkwaterbedrijven geen actief lekzoekprogramma uit. De berekende storingsfrequenties zijn daarom exclusief niet-gedetecteerde lekken.

Berekening storingsfrequentie

Bij de berekening van de storingsfrequentie moet rekening worden gehouden met registraties van meerdere bedrijven met verschillende registratieperioden en met perioden die niet bestaan uit volledige jaren. Hierom wordt voor elk storingsjaar en elk bedrijf de storingsfrequentie gebaseerd op het aantal storingsen, de leidinglengte en de registratieduur volgens onderstaande formule. Voor een verdere toelichting op de rekenmethode wordt verwezen naar [1].

$$f = \frac{\sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^{T_i} N_{i,j}}{\sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^{T_i} (L_{i,j} \cdot V_{i,j})}$$

waarin:

f = storingsfrequentie [km⁻¹·jaar⁻¹]

C = aantal bedrijven

T_i = aantal registratiejaren voor bedrijf i [jaar]

N_{i,j} = aantal storingsen in jaar j voor bedrijf i [-]

L_{i,j} = aanwezige leidinglengte in jaar j voor bedrijf i [km]

V_{i,j} = volledigheid van registratie van de groep in jaar j voor bedrijf i [jaar], welke een waarde '1' heeft bij een volledig jaar en bijvoorbeeld een waarde '0,5' bij een registratie over een half jaar.

Onzekerheidsmarge storingsfrequentie

De betrouwbaarheid van een berekende storingsfrequentie is afgezien van de eerder genoemde detectiegrens, afhankelijk van het aantal storingsen waarop deze is gebaseerd. Bij een te gering aantal storingsen kan niet met zekerheid worden beweerd dat de berekende waarde representatief is voor de groep. Om die reden wordt bij USTORE voor elke berekening tevens een betrouwbaarheidsinterval bepaald, waarbij de aanname wordt gedaan dat het aantal storingsen voor een groep Poissonverdeeld is. De poissonverdeling wordt toegepast om een kansverdeling aan te geven bij discrete gebeurtenissen (aantallen storingsen), waarbij sprake is van een onafhankelijke relatie (er van uitgaande dat een storing niet het gevolg is van een eerdere storing) en die het voorkomen van bepaalde voorvallen telt gedurende een gegeven tijdsinterval, afstand, etc. (een jaar bij een bedrijf). Voor het bepalen van de onzekerheidsmarge van het aantal storingsen wordt uitgegaan van een betrouwbaarheidsinterval van 95%. Een en ander heeft tot gevolg dat bij een betrouwbaarheidsinterval van 95%

de betrouwbaarheid is uit te drukken met de marges zoals weergegeven in Tabel 1. Overigens is om redenen van overzichtelijkheid in dit rapport alleen het Poisson-gemiddelde aangegeven.

Tabel 1 Relatieve onder- en bovengrenzen bij een betrouwbaarheidsinterval van 95%

Aantal storingen	relatieve ondergrens	relatieve bovengrens
10	-52%	+84%
50	-26%	+32%
100	-19%	+22%
500	-8,6%	+9,2%
1000	-6,1%	+6,4%

3 Indeling van storingen

3.1 Inleiding

Samen met Kiwa is nagegaan welke informatie zowel voor drinkwaterleidingen als voor gasleidingen beschikbaar is. Deze informatie is in hoofdstuk 4 gepresenteerd als 'Niveau 1'. In hoofdstuk 4 is specifiek voor drinkwater een verdere onderverdeling gemaakt onder de noemer 'Niveau 2'.

3.2 Generieke indeling storingen, Niveau 1

De generieke indeling van storingsfrequenties vindt plaats door een onderscheid te maken naar materiaal en diameterklasse. Voor materialen zijn de volgende klassen onderscheiden (met tussen haakjes in dit rapport gehanteerde afkortingen) die 98,8% uitmaken van de lengte van het Nederlandse leidingnet (zie ook bijlage I):

- Asbestcement (AC);
- Grijs gietijzer (GGY);
- Nodulair gietijzer (NGY);
- Staal (ST);
- Polyetheen (PE);
- Polyvinylchloride (PVC).

De USTORE storingsregistratie maakt een verder onderscheid in sterkteklasse bij de materialen PE en PVC. Voor de analyse in dit rapport zou dat te veel detail opleveren, anders gezegd resulteren in subgroepen met een te beperkt aantal storingen om te komen tot betrouwbare uitspaken.

Naast het materiaal wordt er in de generieke indeling onderscheidt gemaakt in drie diameterranges:

- < 125 mm;
- 125-200 mm;
- > 200 mm.

3.3 Specifieke indeling storingen, Niveau 2

Bij de specifieke indeling worden de storingen verder uitgesplitst op basis van informatie die voor waterleidingen dan wel gasleidingen specifiek beschikbaar is. Voor gasleidingen wordt een onderscheid gemaakt naar drukklassen. Drinkwaternetten kennen geen onderscheid in drukklassen. Voor drinkwaterleidingen is een onderverdeling gemaakt op basis van de periode van aanleg, in perioden van 10 jaar. De in hoofdstuk 4 weergegeven tabellen bevatten de perioden waarin het specifieke materiaal is toegepast.

Drinkwaterleidingen hebben een groter bereik aan diameters dan gasleidingen. Om die reden is op Niveau 2 de onderverdeling in diameters voor drinkwaterleidingen verder uitgesplitst naar zes klassen, te weten:

- < 90 mm;
- 90-124 mm;
- 125-200 mm;
- 201-400 mm;
- 401-700 mm;
- > 700 mm.

Een en ander resulteert in tabellen per leidingmateriaal met een onderscheid naar diameterklasse en periode van aanleg. Tevens is per diameterklasse aangegeven wat de verhouding is tussen storingen op verbindingen en storingen op buisdelen.

3.4 Categorisering oorzaak storingen

Om de storingsoorzaak bij drinkwater en bij gas te kunnen vergelijken, is het belangrijk te begrijpen op welke wijze de registratie van storingsoorzaken plaatsvindt. In USTORE wordt onderscheid gemaakt tussen een verplichte en een optionele registratie. De verplichte registratie geldt voor oorzaken die een monteur objectief moet kunnen vaststellen en bevat een indeling naar 'spontane oorzaak', 'interne oorzaak' en 'externe oorzaak'. De optionele registratie bevat aspecten die minder makkelijk objectief zijn te herkennen maar die toegevoegde hebben voor kennisopbouw over het falen van leidingen. Niet alle registraties worden overigens door monteurs in het veld ingevoerd. Bijvoorbeeld bij 'Schade door beheer van pompen' wordt deze informatie achteraf toegevoegd. Voor een overzicht van categorieën voor storingsregistratie, zie Tabel 2. Onder externe oorzaak vallen bijvoorbeeld graafschaden door derden.

Tabel 2 Onderverdeling van oorzaken van storingen in USTORE

Verplichte registratie	Optionele registratie
Spontane oorzaak	<ul style="list-style-type: none"> • Aantasting (corrosie of uitloging) • Uitwendige belasting zoals verkeer, zetting, wortelingroei, storm, etc. • Onbekend
Interne oorzaak	<ul style="list-style-type: none"> • Aanleg / montagefout • Schade door monteurs of gecontracteerde aannemers • Schade door beheer pompen (verhoogde druk, drukstoten)
Externe oorzaak	Niet verder onderverdeeld

De storingsfrequenties worden in dit rapport als volgt gepresenteerd:

- inclusief externe oorzaken (spontane oorzaak, interne oorzaak en externe oorzaak);
- exclusief externe oorzaken (spontane oorzaak en interne oorzaak).

Voor deze indeling is gekozen zodat Deltares bij de integrale risicoanalyse zowel rekening kan houden met alle storingen, als met de storingen zonder externe oorzaak wat meer overeenkomt met een beschermde liggingssituatie zoals bij waterkeringen.

4 Berekende storingsfrequenties

4.1 Inleiding

Voor de berekening van de storingsfrequentie is in dit project uitgegaan van in USTORE registreerde storingen van zeven drinkwaterbedrijven vanaf 2010. In totaal zijn 22.352 storingen beschouwd inclusief externe oorzaak en 18.873 storingen exclusief externe oorzaak. Deze aantallen bevatten storingen van de zes leidingmaterialen genoemd in paragraaf 3.2. Storingen op andere leidingmaterialen, zoals koper, beton, GVK, zijn niet meegenomen. Deze leidingen betreffen slechts een zeer beperkt aantal van het geheel (0,8% in de USTORE database). Storingen met als kenmerk materiaal onbekend komen in de registratie niet voor.

Voor deze analyse zijn storingen geanalyseerd van zeven drinkwaterbedrijven die in totale lengte vertegenwoordigen van 56.155 km. De totale lengte van het leidingnet bedraagt 120.061 km (zie Bijlage I), wat inhoudt dat de geanalyseerde storingen betrekking hebben op 47% van het totale drinkwaterleidingnet. Er zijn geen redenen om aan te nemen dat de met USTORE verkregen storingsfrequenties niet representatief zouden zijn voor alle Nederlandse drinkwaterleidingen.

In de hieronder gepresenteerde tabellen zijn storingsfrequenties aangegeven in drie kleuren die verschillende betrouwbaarheidsklassen aangeven, zie ook Tabel 1. Dit betreft:

- grijs: deze hebben een lage betrouwbaarheid en zijn gebaseerd op minder dan 10 storingen;
- blauw: deze hebben een beperkte betrouwbaarheid en zijn gebaseerd 10 tot en met 49 storingen;
- zwart: deze hebben een hogere betrouwbaarheid en zijn gebaseerd op 50 of meer storingen.

In het geval er een '-' is weergegeven, zijn voor de specifieke groep geen storingen geregistreerd. Met name de grijs gemarkeerde storingsfrequenties dienen met grote omzichtigheid geïnterpreteerd te worden. In veel gevallen betreft dit slecht één registratie en invulfouten kunnen hiervoor niet uitgesloten worden.

De storingsfrequenties zijn gepresenteerd met een afronding van 2 cijfers achter de komma. Hiermee wordt voorkomen een nauwkeurigheid te veronderstellen die feitelijk niet aanwezig is. Wanneer de storingsfrequenties dusdanig laag zijn dat deze een waarde '0' zouden hebben, dan zijn drie cijfers achter de komma gehanteerd.

4.2 Storingsfrequenties Niveau 1

In Tabel 3 en Tabel 4 worden de storingsfrequenties gegeven, uitgesplitst naar materiaal en diameter. In de onderste rij worden de frequenties gegeven per diameterklasse, zonder onderscheid te maken naar materiaalsoort. In de rechterkolom wordt de frequentie gegeven per materiaalsoort, zonder onderscheid te maken naar diameterrange. Tot slot wordt in de cel rechtsonder de totale storingsfrequentie van alle leidingen gegeven. Voor het aantal storingen dat is gehanteerd voor de bepaling van de storingsfrequentie, wordt verwezen naar Bijlage II.

Tabel 3 Storingsfrequenties per materiaal en diametergroep, incl. externe oorzaken

Storings per km per jaar				
Materiaal	Diameter			Per materiaal
	40-124 mm	125-200 mm	201-2000 mm	
Asbestcement	0,09	0,09	0,03	0,08
Grijs gietijzer	0,08	0,05	0,02	0,06
Nodulair gietijzer	0,004	0,01	0,004	0,004
Staal	0,24	0,17	0,02	0,16
PE	0,01	0,02	0,01	0,01
PVC	0,02	0,03	0,02	0,02
Per diametergroep:	0,05	0,06	0,02	0,05

De storingsfrequenties uit Tabel 3 laten zien dat de storingsfrequentie van alle beschouwde leidingen 0,05 storings per km per jaar bedraagt. De storingsfrequentie is aanzienlijk lager bij diameters groter dan 200 mm en bij de materialen nodulair gietijzer, PE en PVC. De hoge storingsfrequentie voor stalen leidingen is opvallend. Deze hoge frequentie wordt voornamelijk veroorzaakt door de stalen leidingen met een diameter kleiner dan 125 mm en in mindere mate door de leidingen met een diameter tussen 125 en 200 mm. De storings in deze groepen betreffen met name de zogenaamde oude stalen leidingen die zijn toegepast in distributieleidingen tot 1980 (zie ook paragraaf 4.3.4). Omdat op deze leidingen geen gegarandeerde elektrische geleiding over de verbindingen gegarandeerd kan worden, is kathodische bescherming niet mogelijk.

AC-leidingen kennen een relatief hoge storingsfrequentie, met name bij diameters kleiner dan 200 mm.

Tabel 4 Storingsfrequenties per materiaal en diametergroep, excl. externe oorzaken

Storings per km per jaar				
Materiaal	Diameter			Per materiaal
	40-124 mm	125-200 mm	201-2000 mm	
Asbestcement	0,08	0,08	0,03	0,07
Grijs gietijzer	0,07	0,04	0,02	0,05
Nodulair gietijzer	0,003	0,005	0,003	0,003
Staal	0,24	0,17	0,02	0,16
PE	0,01	0,01	0,01	0,01
PVC	0,01	0,02	0,02	0,02
Per diametergroep:	0,04	0,05	0,02	0,04

De kenmerken van de storingsfrequentie zoals hierboven beschreven voor Tabel 3 gelden ook voor Tabel 4, waarbij de storings veroorzaakt door derden niet zijn meegenomen.

In Tabel 5 zijn de storingsfrequenties aangegeven van storingsen als gevolg van een externe oorzaak. Deze waarden zijn gelijk aan het verschil tussen de frequenties zoals aangegeven in Tabel 3 en Tabel 4.

Tabel 5 Storingsfrequenties per materiaal en diametergroep, als gevolg van externe oorzaken

Storings per km per jaar				
Materiaal	Diameter			Per materiaal
	40-124 mm	125-200 mm	201-2000 mm	
Asbestcement	0,012	0,007	0,003	0,009
Grijs gietijzer	0,007	0,004	0,002	0,005
Nodulair gietijzer	0,001	0,001	0,001	0,001
Staal	0,001	0,002	0,001	0,001
PE	0,005	0,006	0,001	0,004
PVC	0,009	0,007	0,003	0,008
Per diametergroep:	0,009	0,006	0,002	0,008

In Tabel 6 zijn de percentages weergegeven van storings die worden veroorzaakt door derden. Overall bedraagt dit 16%. Opvallend is dat dit percentage veel hoger is bij PE en PVC leidingen met een diameter van 200 mm of kleiner. Het percentage is veel lager bij grijs gietijzeren en stalen leidingen en alle leidingen met een diameter groter dan 200 mm. De waarschijnlijke oorzaak hiervoor is dat het aandeel storings door externe oorzaak relatief constant is, maar dat de storings zonder externe oorzaak bij PE en PVC juist laag zijn.

Tabel 6 Percentage storings met externe oorzaak ten opzichte van het totaal aantal storings.

Storings per km per jaar				
Materiaal	Diameter			Per materiaal
	40-124 mm	125-200 mm	201-2000 mm	
Asbestcement	14%	8%	9%	12%
Grijs gietijzer	9%	7%	8%	8%
Nodulair gietijzer	19%	15%	14%	17%
Staal	0%	1%	3%	1%
PE	40%	28%	12%	35%
PVC	40%	25%	13%	36%
Per diametergroep:	18%	10%	9%	16%

Vergelijking van de in dit rapport gepresenteerde storingsfrequenties met externe bronnen is beperkt mogelijk vanwege het ontbreken van vergelijkende studies. In Tabel 7 is een vergelijking gegeven met storingsfrequenties van de Verenigde Staten en Canada zoals verzameld door Folkman [3]. Tevens zijn er gegevens voor de gezamenlijke leidingmaterialen beschikbaar van de European Benchmarking Cooperation (EBC) [2]. Vergelijken van deze gegevens dient echter met voorzichtigheid plaats te vinden. De gegevens uit de VS en Canada bevatten geen storings op verbindingen en als gevolg van werkzaamheden. De gegevens van de EBC zijn afkomstig van 43 drinkwaterbedrijven. De gegevens van de tien Nederlandse drinkwaterbedrijven maken hiervan ook deel uit. Daarnaast geldt voor beide bronnen gegevens zijn verkregen op basis van incidentele vragenlijsten (dit geldt met name voor Folkman) en dat de betrouwbaarheid van de gegevens minder goed is te waarborgen als die van USTORE, waarvoor specifieke werkinstructies zijn opgesteld. Met inbegrip van bovengenoemde opmerkingen kan gesteld worden dat:

- er verschillen zijn tussen de waarden, echter niet van een dusdanige omvang dat dit er twijfels ontstaan over de juistheid hiervan;
- de gemiddelde storingsfrequentie van de bedrijven die deelnemen aan USTORE lager is dan uit de VS/Canada en lager is dan de bedrijven die deelnemen aan de EBC;
- de relatief hogere storingsfrequentie voor de VS/Canada voor een groot deel wordt bepaald door het hoog aantal storings in grijs gietijzeren leidingen.

Tabel 7 Vergelijking van storingsfrequenties per materiaal en diametergroep met externe bronnen

Storings per km per jaar			
	VS/Canada	EBC	USTORE
Materiaal			
Asbestcement	0,06		0,08
Grijs gietijzer	0,22		0,06
Nodulair gietijzer	0,03		0,004
Staal	0,05		0,16
PE	niet beschikbaar		0,01
PVC	0,01		0,02
Totaal:	0,09	0,13	0,05

4.3 Storingsfrequenties Niveau 2

4.3.1 Storingsfrequentie AC

In Tabel 8 en Tabel 9 zijn de storingsfrequenties weergegeven van AC leidingen. Duidelijk is te zien dat AC-leidingen uit de vijftiger jaren een hogere storingsfrequentie hebben dan jongere leidingen. Daarentegen zijn de storingsfrequenties van de oudste leidingen weer relatief laag. Verder blijkt dat de storingsfrequentie afneemt met toenemende diameter.

Voor POV is eerder een analyse uitgevoerd op een 300 mm AC leiding uit 1979 nabij Nieuwendam. Hiervoor is een storingsfrequentie bepaald van 0,0153 storings per km per jaar inclusief externe oorzaak en 0,0117 storings per km per jaar exclusief interne oorzaak. Deze waarden zijn van gelijke orde grootte als hier gepresenteerd, te weten respectievelijk 0,02 storings per km per jaar en 0,02 storings per km per jaar.

Tabel 8 Storingsfrequenties AC per periode van aanleg en diametergroep, incl. externe oorzaken

Storings per km per jaar, AC incl. externe oorzaken							
Periode	Diameter						Per periode
	40-89 mm	90-124 mm	125-200 mm	201-400 mm	401-700 mm	701-2000 mm	
1930-1939	0,09	0,10	0,10	0,35	-	-	0,11
1940-1949	0,07	0,07	0,16	0,18	-	-	0,10
1950-1959	0,11	0,17	0,17	0,18	0,07	-	0,17
1960-1969	0,11	0,08	0,08	0,04	0,01	-	0,07
1970-1979	0,10	0,07	0,05	0,02	0,003	-	0,05
1980-1989	0,09	0,04	0,03	0,01	0,002	0,01	0,03
1990-1999	0,30	0,05	0,03	0,01	0,01	-	0,04
Per diam.groep:	0,11	0,09	0,09	0,04	0,01	0,002	0,08

Toelichting: deze en vergelijkbare tabellen geven de storingsfrequenties weer zonder de bijbehorende leidinglengtes. Door verschil in leidinglengte per leidinggroep kan bijvoorbeeld een storingsfrequentie van 0,01 storings per km per jaar (leidingen uit de tachtiger jaren met een diameter groter dan 700 mm) resulteren in een storingsfrequentie van 0,002 storings per km per jaar voor de totale diametergroep. In dit geval zijn er groepen zonder storings die van invloed zijn op het resultaat van de groep als geheel.

Tabel 9 Storingsfrequenties AC per periode van aanleg en diametergroep, excl. externe oorzaken

Storingen per km per jaar, AC excl. externe oorzaken							
Periode	Diameter						Per periode
	40-89 mm	90-124 mm	125-200 mm	201-400 mm	401-700 mm	701-2000 mm	
1930-1939	0,06	0,09	0,10	0,33	-	-	0,10
1940-1949	0,05	0,06	0,16	0,18	-	-	0,10
1950-1959	0,10	0,16	0,17	0,17	0,06	-	0,16
1960-1969	0,10	0,06	0,07	0,03	0,01	-	0,06
1970-1979	0,07	0,05	0,04	0,02	0,002	-	0,04
1980-1989	0,07	0,03	0,03	0,01	0,001	0,01	0,02
1990-1999	0,18	0,04	0,02	0,01	0,005	-	0,03
Per diam.groep:	0,09	0,08	0,08	0,04	0,005	0,002	0,07

In Tabel 10 is voor AC de verhouding weergegeven van storingen op verbindingen versus storingen op buisdelen. Voor alle AC-leidingen geldt dat er aanzienlijk meer storingen optreden op buisdelen dan op verbindingen. Dit geldt vooral voor de meest voorkomende diameters, namelijk tussen 90 en 124 mm. Verder geldt hoe groter de diameter hoe meer storingen er relatief optreden aan verbindingen ten opzichte van leidingen.

Tabel 10 De verhouding van storingen op verbindingen ten opzichte van buisdelen voor AC leidingen per diametergroep, incl. externe oorzaken

Aantal storingen op verbindingen gedeeld door storingen op buisdelen, AC							
Verhouding	Diameter						Per materiaal
	40-89 mm	90-124 mm	125-200 mm	201-400 mm	401-700 mm	701-2000 mm	
Verhouding	0,35	0,20	0,43	0,98	2,00	-	0,29

4.3.2 Storingsfrequentie GGII

In Tabel 11 en Tabel 12 zijn de storingsfrequenties weergegeven van GGII leidingen. De storingsfrequentie van leidingen aangelegd voor 1980 lijkt onafhankelijk van het aanlegjaar te zijn. De relatief hoge storingsfrequenties van leidingen van na 1980 is opvallend omdat dit materiaal in die periode nauwelijks meer is toegepast. Nadere analyse van deze storingen laat zien dat het hier om een beperkt aantal storingen gaat, net boven de tien storingen per groep, op een beperkte leidinglengte. Verder blijkt dat de storingsfrequentie afneemt met toenemende diameter.

Tabel 11 Storingsfrequenties grijs gietijzer per periode van aanleg en diametergroep, incl. externe oorzaken

Storingen per km per jaar, GGII incl. externe oorzaken							
Periode	Diameter						Per periode
	40-89 mm	90-124 mm	125-200 mm	201-400 mm	401-700 mm	701-2000 mm	
1890-1899	-	0,12	-	0,04	-	-	0,04
1900-1909	0,03	0,04	0,03	0,02	0,04	-	0,04
1910-1919	-	0,05	0,08	0,21	-	-	0,07
1920-1929	0,04	0,10	0,03	0,04	-	-	0,05
1930-1939	0,16	0,08	0,05	0,02	0,01	0,01	0,05
1940-1949	0,17	0,10	0,06	0,02	-	-	0,07
1950-1959	0,21	0,08	0,05	0,02	0,02	-	0,06
1960-1969	0,22	0,05	0,03	0,02	0,08	-	0,04
1970-1979	0,17	0,10	0,07	0,03	-	-	0,08
1980-1989	1,37	0,14	0,16	0,04	-	-	0,16
1990-1999	-	0,76	0,05	0,05	-	-	0,11
Per diam.groep:	0,12	0,08	0,05	0,02	0,01	0,01	0,06

Tabel 12 Storingsfrequenties grijs gietijzer per periode van aanleg en diametergroep, excl. externe oorzaken

Storingen per km per jaar, GGJ excl. externe oorzaken							
Periode	Diameter						Per periode
	40-89 mm	90-124 mm	125-200 mm	201-400 mm	401-700 mm	701-2000 mm	
1890-1899	-	0,12	-	-	-	-	0,03
1900-1909	0,03	0,04	0,02	0,01	0,04	-	0,03
1910-1919	-	0,04	0,08	0,17	-	-	0,06
1920-1929	0,04	0,09	0,03	0,04	-	-	0,05
1930-1939	0,16	0,07	0,04	0,02	0,01	0,01	0,05
1940-1949	0,17	0,10	0,06	0,02	-	-	0,06
1950-1959	0,18	0,07	0,04	0,02	0,02	-	0,05
1960-1969	0,16	0,05	0,03	0,02	0,08	-	0,04
1970-1979	0,15	0,09	0,07	0,03	-	-	0,08
1980-1989	1,09	0,13	0,16	0,04	-	-	0,15
1990-1999	-	0,55	0,05	-	-	-	0,08
Per diam.groep:	0,11	0,07	0,04	0,02	0,01	0,01	0,05

In Tabel 13 is voor GGJ de verhouding weergegeven van storingen op verbindingen versus storingen op buisdelen. Voor GGJ leidingen geldt dat er aanzienlijk meer storingen optreden op buisdelen dan op verbindingen, nog meer dan bij AC leidingen. De meest voorkomende diameters (tussen 90 en 124 mm) hebben het laagste aandeel storingen op verbindingen. Hoe groter de diameter hoe meer storingen er relatief optreden op verbindingen.

Tabel 13 De verhouding van storingen op verbindingen ten opzichte van buisdelen voor GGJ leidingen per diametergroep, incl. externe oorzaken

Aantal storingen op verbindingen gedeeld door storingen op buisdelen							
Verhouding	Diameter						Per materiaal
	40-89 mm	90-124 mm	125-200 mm	201-400 mm	401-700 mm	701-2000 mm	
Verhouding	0.24	0.12	0.23	0.54	3.50	-	0.18

4.3.3 Storingsfrequentie NGIJ

In Tabel 14 en Tabel 15 zijn de storingsfrequenties weergegeven van NGIJ leidingen. Omdat de totale lengte van deze leidingen en het aantal storingen erg laag is, zijn maar van weinig subgroepen betrouwbare gegevens beschikbaar. Vanwege het lage aantal storingen is de storingsfrequentie uitgedrukt in drie cijfers achter de komma. Opvallend is de relatief hoge storingsfrequentie voor de leidingen die zijn aangelegd na 2010. De omvang van deze groep is echter relatief klein (totaal aantal van 18 storingen). Wellicht is dit toe te wijzen aan aanlegfouten, met daarbij de kanttekening dat NGIJ vaker wordt toegepast in relatief moeilijke omstandigheden, zoals bij hoge spanningen en in verontreinigde grond.

Tabel 14 Storingsfrequenties nodulair gietijzer per periode van aanleg en diametergroep, incl. externe oorzaken

Storingen per km per jaar, NGIJ incl. externe oorzaken							
Periode	Diameter						Per periode
	40-89 mm	90-124 mm	125-200 mm	201-400 mm	401-700 mm	701-2000 mm	
1950-1959	-	0,12	-	0,16	-	-	0,10
1960-1969	-	0,05	-	0,17	-	-	0,06
1970-1979	-	0,01	0,02	0,01	-	-	0,01
1980-1989	-	0,02	0,02	0,01	-	-	0,01
1990-1999	-	0,00	0,003	0,001	0,002	0,002	0,002
2000-2009	0,06	0,003	0,01	0,01	0,003	-	0,004
2010-2019	0,06	0,02	0,02	0,01	0,01	-	0,02
Per diam.groep:	0,04	0,004	0,01	0,004	0,003	0,002	0,004

Tabel 15 Storingsfrequenties nodulair gietijzer per periode van aanleg en diametergroep, excl. externe oorzaken

Storingsen per km per jaar, NGIJ excl. externe oorzaken							
Periode	Diameter						Per periode
	40-89 mm	90-124 mm	125-200 mm	201-400 mm	401-700 mm	701-2000 mm	
1950-1959	-	0,12	-	0,16	-	-	0,10
1960-1969	-	-	-	0,17	-	-	0,03
1970-1979	-	0,01	0,02	0,01	-	-	0,01
1980-1989	-	0,02	-	0,01	-	-	0,01
1990-1999	-	0,002	0,002	0,001	0,002	0,002	0,002
2000-2009	0,03	0,003	0,01	0,003	0,003	-	0,003
2010-2019	0,03	0,01	0,02	0,01	0,005	-	0,01
Per diam.groep:	0,02	0,003	0,005	0,004	0,003	0,002	0,003

In Tabel 16 is voor NGIJ de verhouding weergegeven van storingsen op verbindingen versus storingsen op buisdelen. Voor NGIJ leidingen met een diameter van 90 mm tot 125 mm geldt dat er even veel storingsen plaatsvinden op verbindingen als op buisdelen. Voor leidingen met een grotere diameter treden er meer storingsen op op verbindingen dan op buisdelen. Het beperkt aantal storingsen op NGIJ noopt echter tot voorzichtigheid bij het trekken van conclusies.

Tabel 16 De verhouding van storingsen op verbindingen ten opzichte van buisdelen voor NGIJ leidingen per diametergroep, incl. externe oorzaken

Aantal storingsen op verbindingen gedeeld door storingsen op buisdelen, NGIJ							
Verhouding	Diameter						Per materiaal
	40-89 mm	90-124 mm	125-200 mm	201-400 mm	401-700 mm	701-2000 mm	
Verhouding	-	1,00	1,60	1,17	-	-	1,27

4.3.4 Storingsfrequentie Staal

In Tabel 17 en Tabel 18 is te zien dat groepen stalen leidingen groter dan 400 mm (transportleidingen) en aangelegd na 1980, onvoldoende storingsen hebben om een storingsfrequentie met voldoende betrouwbaarheid te presenteren. Het storingsgedrag van de in deze tabellen weergegeven leidingen, zijn daarom grotendeels toe te schrijven aan de 'oude stalen leidingen', zie ook paragraaf 4.2. De gesommeerde storingsfrequenties van leidingen tussen 1980 en 2000, die hoge kwaliteit stalen leidingen representeren, zijn aanzienlijk lager. Opvallend is dat de berekende storingsfrequenties in Tabel 17 en Tabel 18 vrijwel identiek zijn, wat duidt op een zeer laag aandeel storingsen van derden. Dit blijkt ook uit Tabel 6.

Voor POV is eerder een analyse uitgevoerd op een 1219 mm stalen leiding uit 1973 nabij Vuren (POV project GoWa). Hiervoor is een storingsfrequentie vastgesteld op 0,001 storingsen per km per jaar (inclusief externe oorzaak). Deze waarde komt overeen met de waarden in Tabel 17, te weten 0,002 storingsen per km per jaar. De in Tabel 17 gepresenteerde waarden zijn ook gebaseerd op een zeer beperkt aantal storingsen en hebben derhalve een zeer beperkte betrouwbaarheid. Dit geldt overigens ook voor de voor GoWa bepaalde waarde.

Tabel 17 Storingsfrequenties staal per periode van aanleg en diametergroep, incl. externe oorzaken

Storingsen per km per jaar, staal incl. externe oorzaken							
Periode	Diameter						Per periode
	40-89 mm	90-124 mm	125-200 mm	201-400 mm	401-700 mm	701-2000 mm	
1920-1929	0,29	0,29	0,11	0,11	-	-	0,20
1930-1939	0,24	0,18	0,18	0,07	-	-	0,18
1940-1949	0,31	0,22	0,10	0,06	-	-	0,15
1950-1959	0,22	0,23	0,19	0,10	-	-	0,20
1960-1969	0,25	0,25	0,18	0,17	0,01	0,01	0,21
1970-1979	0,17	0,42	0,17	0,03	-	-	0,13
1980-1989	0,15	0,15	0,12	0,04	0,01	-	0,04
1990-1999	-	0,25	0,13	0,06	-	-	0,01
2000-2009	0,23	-	-	0,06	-	-	0,01
2010-2019	-	-	-	-	0,01	-	0,00
Per diam.groep:	0,24	0,25	0,17	0,09	0,002	0,002	0,16

Tabel 18 Storingsfrequenties staal per periode van aanleg en diametergroep, excl. externe oorzaken

Storingsen per km per jaar, staal excl. externe oorzaken							
Periode	Diameter						Per periode
	40-89 mm	90-124 mm	125-200 mm	201-400 mm	401-700 mm	701-2000 mm	
1920-1929	0,17	0,34	0,21	0,13	-	-	0,20
1930-1939	0,28	0,29	0,11	0,11	-	-	0,20
1940-1949	0,24	0,18	0,18	0,07	-	-	0,18
1950-1959	0,31	0,22	0,10	0,06	-	-	0,15
1960-1969	0,22	0,23	0,18	0,10	-	-	0,20
1970-1979	0,25	0,25	0,18	0,17	0,004	0,01	0,21
1980-1989	0,17	0,42	0,17	0,03	-	-	0,13
1990-1999	0,15	0,12	0,12	0,04	-	-	0,04
2000-2009	-	0,22	0,13	0,06	-	-	0,01
2010-2019	0,23	-	-	0,06	-	-	0,01
Per diam.groep:	0,24	0,25	0,17	0,09	0,001	0,002	0,16

In Tabel 19 is voor staal de verhouding weergegeven van storingsen op verbindingen versus storingsen op buisdelen. Het blijkt dat verreweg de meeste storingsen optreden op buisdelen. Dit komt overeen met het schadebeeld van 'oude stalen leidingen' dat zich kenmerkt door veel putcorrosie.

Tabel 19 De verhouding van storingsen op verbindingen ten opzichte van buisdelen voor stalen leidingen per diametergroep, incl. externe oorzaken

Aantal storingsen op verbindingen gedeeld door storingsen op buisdelen, staal							
Verhouding	Diameter						Per materiaal
	40-89 mm	90-124 mm	125-200 mm	201-400 mm	401-700 mm	701-2000 mm	
Verhouding	0,07	0,07	0,08	0,23	-	-	0,08

4.3.5 Storingsfrequentie PE

In Tabel 20 en Tabel 21 zijn de storingsfrequenties weergegeven van PE leidingen. De storingsfrequentie van PE leidingen is relatief laag in verhouding tot andere veel gebruikte leidingmaterialen (AC, GGJ en PVC). Vanwege het beperkt aantal storingsen is de betrouwbaarheid relatief laag. De storingsfrequentie van leidingen aangelegd voor 1980 is relatief hoger.

Tabel 20 Storingsfrequenties PE per periode van aanleg en diametergroep, incl. externe oorzaken

Storingsen per km per jaar, PE incl. externe oorzaken							
Periode	Diameter						Per periode
	40-89 mm	90-124 mm	125-200 mm	201-400 mm	401-700 mm	701-2000 mm	
1960-1969	0,02	0,07	0,02	0,03	-	-	0,03
1970-1979	0,01	0,05	0,06	0,03	-	-	0,02
1980-1989	0,003	0,03	0,03	0,01	-	-	0,01
1990-1999	0,003	0,01	0,01	0,01	-	-	0,01
2000-2009	0,01	0,01	0,01	0,01	-	-	0,01
2010-2019	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	-	0,02
Per diam.groep:	0,01	0,02	0,02	0,01	0,002	-	0,01

Tabel 21 Storingsfrequenties PE per periode van aanleg en diametergroep, excl. externe oorzaken

Storingsen per km per jaar, PE excl. externe oorzaken							
Periode	Diameter						Per periode
	40-89 mm	90-124 mm	125-200 mm	201-400 mm	401-700 mm	701-2000 mm	
1960-1969	0,02	0,05	0,02	0,03	-	-	0,03
1970-1979	0,004	0,04	0,05	0,03	-	-	0,02
1980-1989	0,002	0,02	0,03	0,01	-	-	0,01
1990-1999	0,001	0,01	0,01	0,01	-	-	0,005
2000-2009	0,004	0,01	0,01	0,004	-	-	0,00
2010-2019	0,01	0,01	0,002	0,01	0,01	-	0,01
Per diam.groep:	0,004	0,01	0,01	0,01	0,002	-	0,01

In Tabel 22 is voor PE de verhouding weergegeven van storingsen op verbindingen versus storingsen op buisdelen. Het blijkt dat voor leidingen met een diameter kleiner dan 125 mm de meeste storingsen plaatsvinden op buisdelen. Voor grotere leidingen treden de meeste storingsen op op verbindingen. Dit geldt met name voor diameters groter dan 200 mm.

Tabel 22 De verhouding van storingsen op verbindingen ten opzichte van buisdelen voor PE leidingen per diametergroep, incl. externe oorzaken.

Aantal storingsen op verbindingen gedeeld door storingsen op buisdelen, PE							
Verhouding	Diameter						Per materiaal
	40-89 mm	90-124 mm	125-200 mm	201-400 mm	401-700 mm	701-2000 mm	
Verhouding	0,42	0,78	1,22	3,00	-	-	0,78

4.3.6 Storingsfrequentie PVC

In Tabel 23 en Tabel 24 zijn de storingsfrequenties weergegeven van PVC leidingen. PVC leidingen uit de jaren vijftig, zeventig en tien hebben de hoogste storingsfrequentie. De storingsen uit de jaren vijftig hebben betrekking op de oudste leidingen, toen het productieproces nog in ontwikkeling was. Hier hebben vooral de grotere diameters een hogere storingsfrequentie. De storingsen uit de jaren zeventig betreffen vooral leidingen met een relatief grote diameter, waarvan bekend is dat het productieproces in die periode niet optimaal was. De recente storingsen zijn waarschijnlijk te wijten aan fouten door derden in het aanlegproces (zwaar transport op bouwterrein), immers de storingsfrequentie zonder externe oorzaak is minder extreem. Hier treden de meeste storingsen op bij diameters kleiner dan 90 mm.

Tabel 23 Storingsfrequenties PVC per periode van aanleg en diametergroep, incl. externe oorzaken

Storingen per km per jaar, PVC incl. externe oorzaken							
Periode	Diameter						Per periode
	40-89 mm	90-124 mm	125-200 mm	201-400 mm	401-700 mm	701-2000 mm	
1950-1959	0,04	0,10	0,13	0,10	-	-	0,05
1960-1969	0,03	0,05	0,04	0,03	-	-	0,03
1970-1979	0,03	0,03	0,05	0,06	0,08	-	0,04
1980-1989	0,02	0,01	0,02	0,01	0,03	-	0,02
1990-1999	0,02	0,01	0,01	0,01	0,003	-	0,01
2000-2009	0,02	0,02	0,02	0,01	0,005	-	0,02
2010-2019	0,05	0,03	0,03	0,02	0,01	-	0,04
Per diam.groep:	0,03	0,02	0,03	0,02	0,01	-	0,02

Tabel 24 Storingsfrequenties PVC per periode van aanleg en diametergroep, excl. externe oorzaken

Storingen per km per jaar, PVC excl. externe oorzaken							
Periode	Diameter						Per periode
	40-89 mm	90-124 mm	125-200 mm	201-400 mm	401-700 mm	701-2000 mm	
1950-1959	0,03	0,07	0,13	0,10	-	-	0,04
1960-1969	0,02	0,03	0,03	0,02	-	-	0,02
1970-1979	0,02	0,02	0,05	0,05	0,08	-	0,03
1980-1989	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	-	0,01
1990-1999	0,01	0,01	0,01	0,01	0,003	-	0,01
2000-2009	0,01	0,01	0,01	0,01	0,005	-	0,01
2010-2019	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	-	0,02
Per diam.groep:	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	-	0,02

In Tabel 25 is voor PVC de verhouding weergegeven van storingen op verbindingen versus storingen op buisdelen. Het blijkt dat de meeste storingen optreden op buisdelen.

Tabel 25 De verhouding van storingen op verbindingen ten opzichte van buisdelen voor PVC leidingen per diametergroep, incl. externe oorzaken

Aantal storingen op verbindingen gedeeld door storingen op buisdelen, PVC							
Verhouding	Diameter						Per materiaal
	40-89 mm	90-124 mm	125-200 mm	201-400 mm	401-700 mm	701-2000 mm	
Verhouding	0,56	0,57	0,52	0,47	0,37	-	0,55

4.4 Overige informatie over drinkwaterleidingen

Voor de POV K&L is naast informatie over storingsfrequenties ook algemene informatie nodig over drinkwaterleidingen.

- De dekking van drinkwaterleidingen is niet in alle gevallen bekend. Om bevriezing tegen te gaan geldt als ontwerpeis dat de dekking minimaal 1,0 meter moet zijn. Voor de meeste leidingen wordt daarom een dekking van 1,0 meter aangehouden. Transportleidingen en leidingen in agrarisch land worden vaak dieper gelegd.
- Voor vrijwel alle leidingen geldt dat deze worden aangelegd in een zandbed. Hiermee wordt voorkomen dat er puntbelastingen ontstaan als gevolg van scherpe voorwerpen tegen de buiswand. Ook worden hiermee ongelijkmatige zettingen tegengegaan. Voor de samenstelling van de bodem rondom het zandbed kunnen geografische kaarten worden geraadpleegd. Deze geven echter beperkte informatie over stedelijke gebieden waar veel grondroering heeft plaatsgevonden. Verder geldt voor veel uitbreidingswijken dat er een zandbed op de oorspronkelijke ondergrond aangebracht.
- Drinkwaterleidingnetten kennen geen verschillende drukregimes zoals gebruikelijk in bijvoorbeeld het gasnet. De netten worden ontworpen zodat bij de aansluitingen een minimale druk heerst van 2 bar. De uitgaande druk op het pompstation varieert afhankelijk van de situatie in de meeste gevallen tussen 3,5 en 6 bar.

5 Analyse van kratergrootte

In 2020 is door een drinkwaterbedrijf extra informatie over storingen op drinkwaterleidingen aangeleverd. Dit betrof circa 12.000 storingen over de periode van 24-6-2015 t/m 24-2-2020. Van deze storingen is door monteurs aangegeven of er zich erosiekraters hebben voorgedaan en zo ja wat hiervan de afmetingen waren. De informatie is relevant voor de POV, omdat het een statistische onderbouwing geeft van de kans van optreden van een erosiekrater als gevolg van een storing van een drinkwaterleiding. Omdat er ten tijde van de analyses geen gegevens waren van de bijhorende leidingen, kunnen deze gegevens niet worden vertaald naar storingsfrequenties. De uitspraken moeten dus gelezen worden als 'gegeven een storing op leidingmateriaal x, dan is de kans op het optreden van een erosiekrater y%'.

De verkregen storingsdata is geverifieerd, door een nadere controle van de extreme waarden, aangezien deze een belangrijke rol spelen in de bevindingen. Alle storingen met een krateroppervlakte groter of gelijk aan 10 m² zijn apart bekeken. Hierbij zijn onlogische records verwijderd, zoals een leidingbreuk in een 100 mm AC leiding, resulterend in een kraterafmeting van 10 bij 5 meter. De verwachting is dat dit invulfouten betreft.

Van de resterende 11.318 storingen die in de analyse zijn meegenomen, is voor 10.156 storingen (90%) aangegeven dat er geen sprake is van een krater. Voor 169 storingen (1,5%) is de krater groter dan 10 m². Bij de storingen waar geen krater is opgetreden was er wel sprake van dat water aan de oppervlakte kwam, het incident heeft immers geleid tot een gerapporteerde storing. Uit Tabel 26 blijkt dat storingen op een AC leiding vaker dan gemiddeld een krater tot gevolg hebben. De achtergrond hiervan vergt nader onderzoek.

Tabel 26 Overzicht van storingen met en zonder krater voor de belangrijkste leidingmaterialen.

Materiaal	Aantal storingen	Kratervorming	percentage kratervorming
Alle materialen	11341	1185	10,4%
AC	5219	753	14,4%
GIJ	1652	126	7,6%
PVC	3862	286	7,4%
PE	443	11	2,5%
Overig	165		

Voor de vier belangrijkste leidingmaterialen zijn de gegevens over erosiekraters nader geanalyseerd.

AC-leidingen

- Bij 14% van de storingen treedt een erosiekrater op, bij 2,1% van de storingen is de krater groter dan 10 m².
- Het hoogste aandeel kraters komt voor in de diameterklasse 100-150 mm (15% van de storingen), bij toenemende diameter neemt het aandeel kraters af. Bij toenemende diameter is er sprake van een toenemende kratergrootte.
- Er lijken geen noemenswaardige verschillen in de krateromvang op basis van het aanlegjaar.

GIJ-leidingen

- Bij 7% van de storingen treedt een erosiekrater op, bij 0,8% van de storingen is de krater groter dan 10 m².
- Het grootste aandeel kraters komt voor in de diameterklasse 150-400 mm (10% van de storingen), bij toenemende diameter neemt het aandeel kraters toe. In de diametersklasse 400-700 mm is het aandeel kraters 17% van de storingen, dit betreft echter een zeer beperkt aantal storingen. Bij toenemende diameter is er sprake van een toenemende kratergrootte, deze toename is sterker dan bij AC.

- c Het aandeel kraters is relatief hoog bij GGIIJ dat is aangelegd na 1940 (8% van de storingen). Ook is de gemiddelde kratergrootte groter bij leidingen die zijn gelegd na 1940.

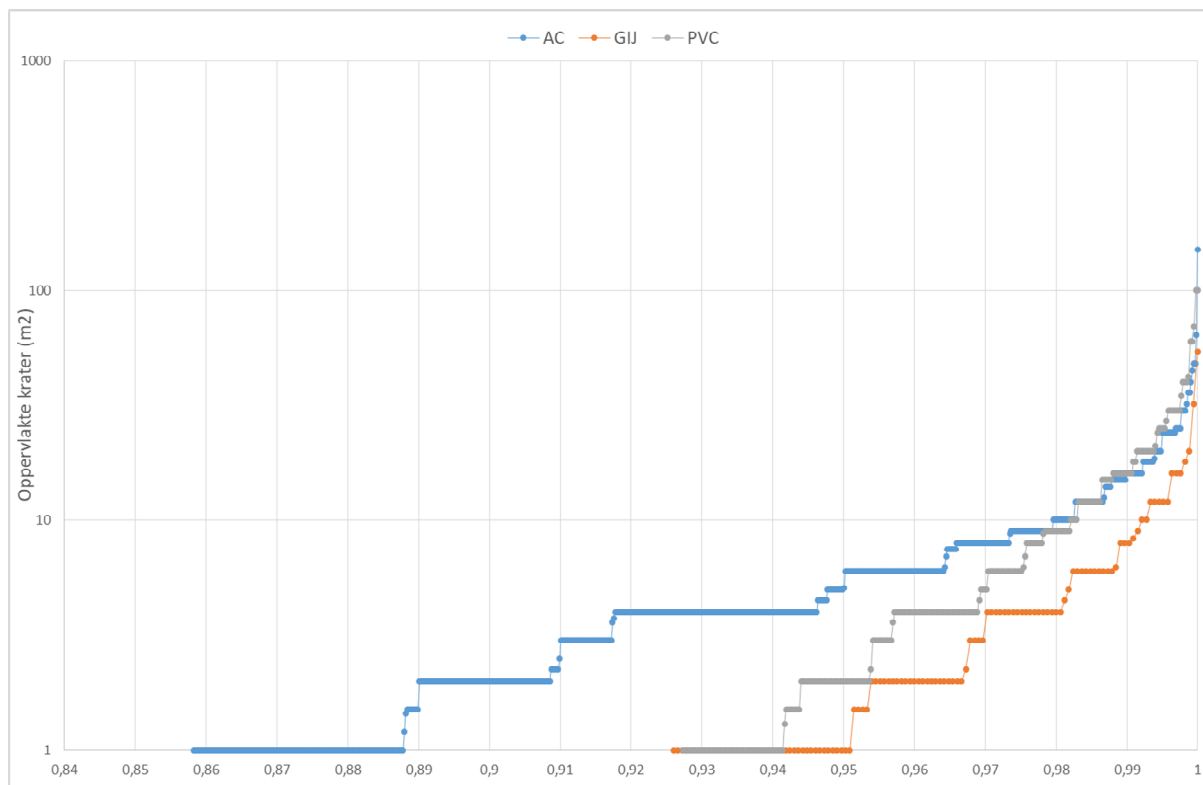
PVC-leidingen

- a Bij 7% van de storingen treedt een erosiekrater op, bij 1,8% van de storingen is de krater groter dan 10 m².
- b Het aandeel kraters neemt toe bij toenemende diameter (dit in sterkere mate dan bij GIJ). Dit bedraagt 3% van de storingen bij de leidingen kleiner dan 90 mm en 31% bij de leidingen groter dan 400 mm. Bij toenemende diameter is er sprake van een toenemende kratergrootte, deze toename is sterker dan bij AC en bij GGIIJ.
- c Leidingen die zijn aangelegd tussen 1970 en 1979 hebben relatief vaker kraters en deze zijn relatief groter dan leidingen aangelegd voor 1970 of na 1980. Leidingen aangelegd voor 1970 hebben in 5% van de storingen een krater. Leidingen aangelegd vanaf 1980 hebben in 6% van de storingen een krater. Daarentegen hebben leidingen aangelegd tussen 1970 en 1979 in 13% van de storingen een krater. In deze laatste groep zijn ook de oppervlakten relatief groot.

PE-leidingen

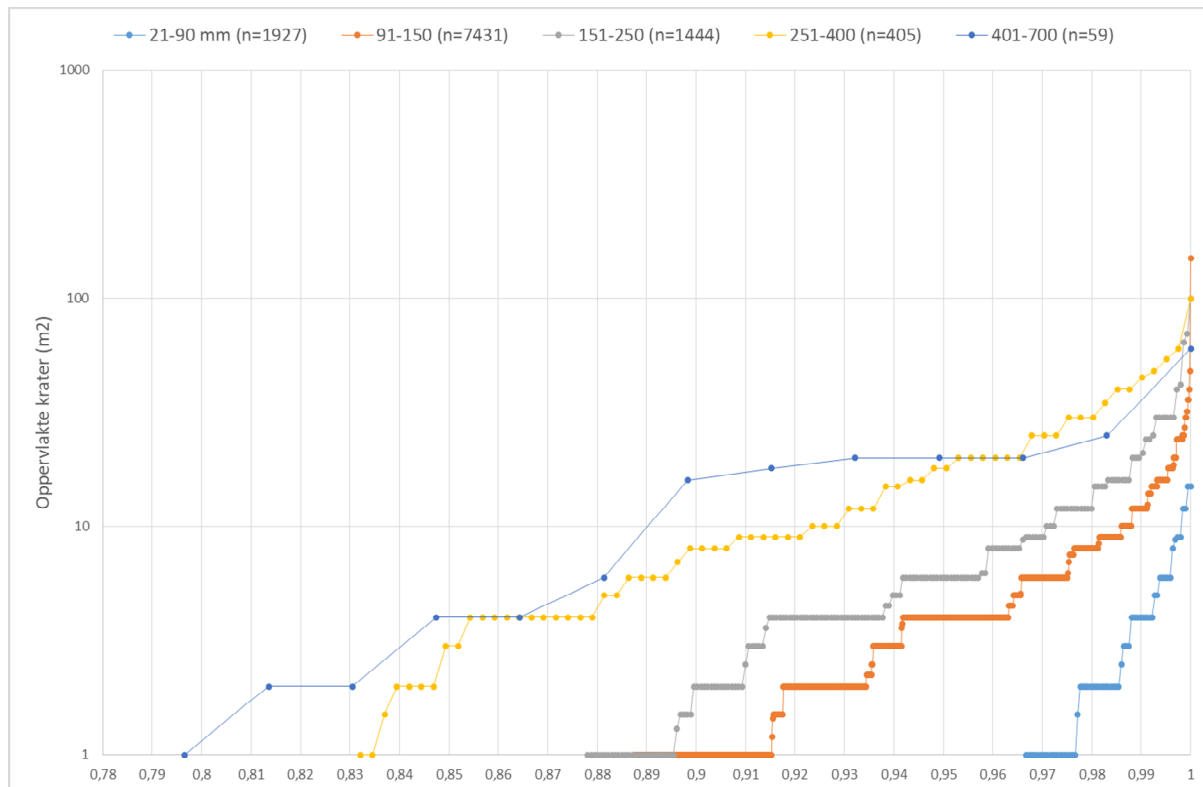
- a Bij 3% van de storingen treedt een erosiekrater op. In geen enkel geval heeft de krater een oppervlakte groter dan 10 m².
- b Er zijn geen kraters opgetreden in leidingen met een diameter groter of gelijk aan 150 mm.
- c Het aantal storingen is te beperkt om hier verder conclusies aan te verbinden.

De gegevens over erosiekraters zijn in Figuur 1 en Figuur 2 vertaald naar cumulatieve frequentieverdelingen voor de materialen AC, GIJ en PVC. Voor PE is dit gezien de beperkte omvang van het aantal storingen niet zinvol. In Figuur 1 is te zien dat overeenkomstig Tabel 26 er geen kraters zijn gemeten bij 86% van de AC-storingen, 92% van de GIJ-storingen en 93% van de PVC-storingen. Een krateroppervlak van 2 m² of minder is gemeten bij 89% van de AC-storingen, 97% van de GIJ-storingen en 95% van de PVC-storingen. Een krateroppervlak van 10 m² of minder is gemeten bij 98% van de AC-storingen, 99% van de GIJ-storingen en 98% van de PVC-storingen.



Figuur 1 Cumulatieve frequentieverdeling van erosiekraters voor de materialen AC, GGIIJ en PVC.

In Figuur 2 is te zien dat op leidingen met een diameter van 90 mm en kleiner in 97% van de storingen geen kraters zijn gemeten. Een krateroppervlak van 2 m² of minder is gemeten bij 99% van de storingen en van 10 m² of minder is gemeten bij vrijwel 100% van de storingen. Voor storingen op leidingen van 91 tot en met 150 mm, betreft dit respectievelijk 89%, 93% en 99%. Voor storingen op leidingen van 151 tot en met 250 mm, betreft dit respectievelijk 88%, 91% en 97%. Voor storingen op leidingen van 251 tot en met 400 mm, betreft dit respectievelijk 83%, 85% en 93%. Voor storingen op leidingen van groter dan 400 mm, betreft dit respectievelijk 80%, 83% en 89%.



Figuur 2 Cumulatieve frequentieverdeling van erosiekraters voor verschillende diameterklassen.

De informatie die in dit hoofdstuk is beschreven, bevat informatie die afkomstig is uit de registratie van één drinkwaterbedrijf. Bij het optreden van erosiekraters spelen ook andere factoren dan hier beschreven een rol, zoals de volumestroom van het lekkende water, bodembekleding, diepteligging en grondsoort. Bij een nadere analyse zouden deze factoren verkend kunnen worden.

6 Conclusies en aanbevelingen

Met behulp van USTORE, de vrijwillige storingsregistratie van Nederlandse drinkwaterbedrijven, waarbij gegevens zijn gebruikt van acht bedrijven, is voor dit project een schatting gemaakt van de storingsfrequenties van de zes belangrijkste leidingmaterialen, te weten: asbestcement, grijs gietijzer, nodulair gietijzer, staal, polyetheen en polyvinylchloride. Het totaal aantal storingen dat is betrokken in deze analyse betreft 22.352. De gemiddelde storingsfrequentie voor alle zes hier beschouwde drinkwaterleidingen bedraagt 0,05 storingen per km per jaar. Dit aantal betreft alle storingen. De storingsfrequentie exclusief oorzaak derden bedraagt 0,04 storingen per km per jaar. De storingsfrequentie kent aanzienlijke verschillen per leidingmateriaal, diameter en periode van aanleg. Hiervoor wordt verwezen naar hoofdstuk 4.

Er is sprake van een storing als er een melding heeft plaatsgevonden die duidt op lekkage van een leiding, die door monteurs ter plekke is bevestigd. Afgezien van bijzondere situaties voeren drinkwaterbedrijven geen actief lekzoekprogramma uit. Bovenstaande storingsfrequenties zijn daarom exclusief niet-gedetecteerde lekken.

De registratie van storingen volgens USTORE, mag beschouwd worden als relatief betrouwbaar. Bij alle deelnemende bedrijven is de storingsregistratie een integraal onderdeel van de werkinstructies en bijbehorende ICT-processen. Monteurs worden ook regelmatig geïnstrueerd over de registratie van storingen en de ingevoerde gegevens worden achteraf gecontroleerd.

De hier gepresenteerde storingsfrequenties kunnen worden ingezet in de door Deltares uit te werken integrale risicoanalyse. Deze storingsfrequenties zijn tevens te gebruiken bij het beoordelen van faalkansen van leidingen in waterkeringen. Aan NEN wordt aanbevolen om te komen tot een herziening van de huidige lekkagefrequentie in de NPR 3659 en de in dit rapport gepresenteerde frequenties te hanteren.

Uit metingen van één drinkwaterbedrijf is informatie verkregen over het optreden van een erosiekrater in het geval zich een storing heeft voorgedaan. Uit deze gegevens blijkt dat in ongeveer 10% van de storingen er een erosiekrater optreedt en in 1,5% is de krater groter dan 10 m². Verder blijkt dat het aandeel kraters naar verhouding groter is bij AC-leidingen en PVC leidingen uit de jaren zeventig.

7 Referenties

- [1] Beuken, R.H.S. en A. Moerman, Uniforme storingsregistratie – USTORE (2017). Praktijkcode voor het beheer van storingsregistratie van leidingnetten, PCD-9: 2017, KWR, Nieuwegein.
- [2] European Benchmarking Co-operation (2019) “Learning from International Best Practices, 2019 Water & Wastewater Benchmark”:
<http://www.waterbenchmark.org/handlers/ballroom.ashx?function=download&id=3057&rnd=0.19186797652157717>
- [3] Folkman, S. (2019), “Water Main Break Rates In the USA and Canada: A Comprehensive Study March2018,”:
https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1173&context=mae_facpub
- [4] Vewin Drinkwaterstatistiek 2017:
<https://www.vewin.nl/SiteCollectionDocuments/Publicaties/Cijfers/Drinkwaterstatistieken-2017-NL.pdf>

I Overzicht lengte drinkwaterleidingen

Om de in dit rapport bepaalde storingsfrequenties te kunnen duiden, is hier een overzicht gegeven van de lengte van het Nederlandse leidingnet. Deze informatie is afkomstig van Vewin. Deze gegevens zijn tevens vergeleken met het aantal leidingen dat is gebruikt voor de in dit rapport berekende storingsfrequenties.

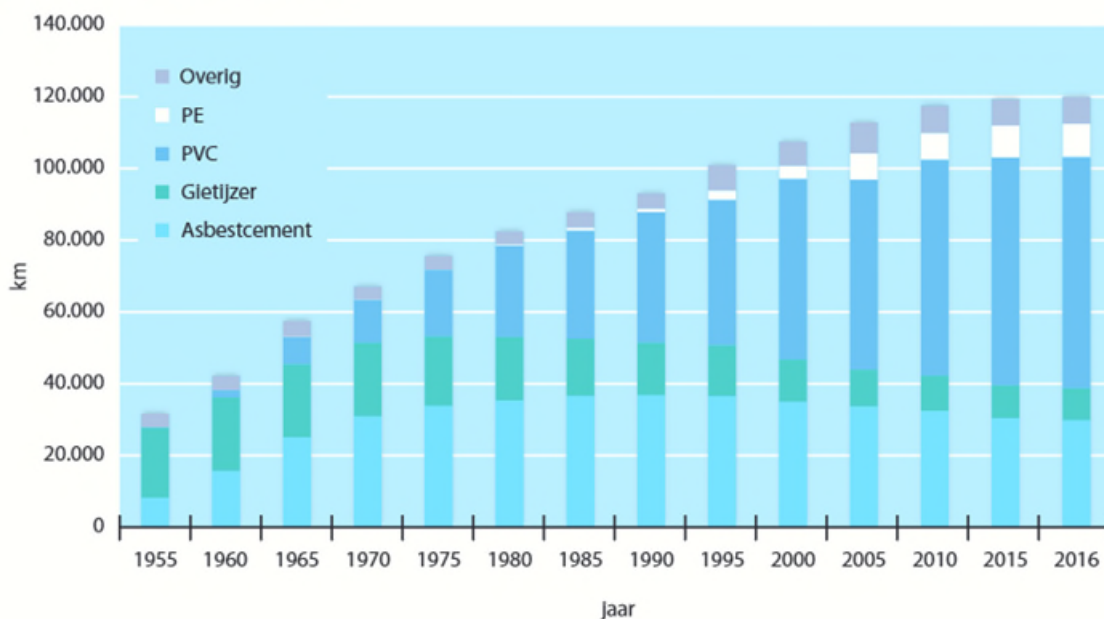
Cijfers afkomstig uit Drinkwaterstatistiek 2017, Vewin [4]

Lengte en samenstelling van het transport- en hoofdleidingnet 2016 (kilometer)

Tabel 1.5

	Totaal	PVC	Asbest- cement	Gietijzer	PE	Nodulair gietijzer	Staal	Beton	Overig
Brabant Water	18.139	9.967	6.326	1.291	306	69	92	46	42
Dunea	4.834	2.768	653	670	372	232	34	93	10
Evides Waterbedrijf	13.473	7.553	2.991	419	1.306	11	1.008	108	77
Oasen	4.203	2.333	261	111	1.240	67	188	2	2
PWN	9.948	2.477	4.085	610	1.862	499	178	195	41
Vitens	47.303	30.259	9.260	3.735	3.559	105	163	77	145
Waternet	3.130	944	61	718	243	506	114	358	184
Waterbedrijf Groningen	5.085	2.275	1.624	898	125	-	123	21	20
WMD Drinkwater	5.164	3.912	923	-	183	145	1	-	-
WML	8.782	1.931	3.622	525	91	1.750	858	2	2
Nederland	120.061	64.420	29.807	8.977	9.288	3.385	2.759	902	524

Figuur 1.8 Ontwikkeling drinkwaternet



II Aantal geregistreeerde storingen in USTORE

Om inzicht te krijgen in de verdeling van het aantal storingen over leidingmaterialen en diameters, is in deze bijlage het aantal storingen weergegeven dat als basis dient voor de berekende storingsfrequentie in respectievelijk Tabel 3, Tabel 4 en Tabel 5.

Tabel 27 Aantal in USTORE geregistreeerde storingen, incl. externe oorzaken

Storingen per km per jaar				
Materiaal	Diameter			Per materiaal
	40 124 mm	125-200 mm	201-2000 mm	
Asbestcement	8545	3720	726	12991
Grijs gietijzer	1245	667	156	2068
Nodulair gietijzer	48	27	21	96
Staal	1642	437	101	2180
PE	188	71	17	276
PVC	3524	941	247	4712
Per diametergroep:	15205	5878	1269	22352

Tabel 28 Aantal in USTORE geregistreeerde storingen, excl. externe oorzaken

Storingen per km per jaar				
Materiaal	Diameter			Per materiaal
	40 124 mm	125-200 mm	201-2000 mm	
Asbestcement	7387	3439	658	11484
Grijs gietijzer	1138	617	144	1899
Nodulair gietijzer	39	23	18	80
Staal	1635	432	98	2165
PE	113	51	15	179
PVC	2114	708	216	3038
Per diametergroep:	12438	5285	1150	18873

Tabel 29 Aantal in USTORE geregistreeerde storingen als gevolg van externe oorzaken

Storingen per km per jaar				
Materiaal	Diameter			Per materiaal
	40 124 mm	125-200 mm	201-2000 mm	
Asbestcement	1158	281	68	1507
Grijs gietijzer	107	50	12	169
Nodulair gietijzer	9	4	3	16
Staal	7	5	3	15
PE	75	20	2	97
PVC	1410	233	31	1674
Per diametergroep:	2767	593	119	3479

F Beschouwing faalkansen distributieleidingen voor aardgas en water (notitie Vrouwenvelder & Spiekhout)

Notitie: Beschouwing faalkansen distributieleidingen voor aardgas en water

Opsteller: A.C.W.M. Vrouwenvelder, J. Spiekhout

Ten behoeve van: POV Kabels en Leidingen

Datum: 06-10-2020

Status: definitief, versie 0

Inleiding

Door KWR en KIWA is in het kader "Filters POV Kabels en leidingen" gerapporteerd over de faalkansen uit de storingsrapportage voor water- en gasdistributieleidingen (ref. 1 en 2). In deze notitie worden de gerapporteerde faalkansen nader beschouwd en wordt een kwalitatieve verklaring gegeven voor de verschillen.

Vergelijking water- en gasdistributie Nederland

In de volgende tabel zijn de faalkansen als gerapporteerd in ref. 1 en 2 (water- en gasdistributie) vermeld.

Materiaal	Water USTORE (per km.jaar)	Gasdistributie NESTOR (per km.jaar)
Asbestcement	0.08	0.16
Grijs gietijzer	0.06	0.23
Nodulair gietijzer	0.004	0.13
Staal	0.16	0.04
PE	0.01	0.03
PVC	0.02	0.03

Tabel 1 – Faalkansen gasdistributie en water in Nederland (per km.jaar)

In grote lijn geven de faalkansen voor gasdistributie en water eenzelfde trend. In de onderzoeken door KWR en KIWA bleken de faalkansen sterk afhankelijk van het materiaal en daarnaast afhankelijk van de diameter. Met name de materialen met een lage breuktaaiheid scoorden qua faalkansen beduidend hoger. Bij toenemende diameter bleek de faalkans af te nemen. Omdat de database voor gasdistributie groter is (landelijke dekking) lijken de daaruit afgeleide faalkansen betrouwbaarder. Bijvoorbeeld voor asbestcement zou een wat grotere waarde voor water worden verwacht dan bij gasdistributie, omdat bij asbestcement veroudering door uitloging van binnen uit speelt en bij gasdistributie niet. Overigens verschillen de waarden niet significant. Voor grijs gietijzer zouden de verschillen tussen gas en water minder moeten zijn. Storingsrapportages bevatten mogelijk fouten wat betreft materiaalaanduiding. Wellicht zijn storingsrapportages voor nodulair gietijzer gerapporteerd als staal, als ook opgemerkt in genoemde onderzoeken. Met de invoering van GIS systemen, waar de materialen in zijn vastgelegd, zou dit voor de laatste jaren niet meer moeten spelen. Door KWR wordt nog vermeld dat het storingspercentage voor grijs gietijzer leidingen van na 1940 wat hoger ligt dan ervoor. Dit kan te maken hebben met het beschikbaar komen van langere lengtes buisstukken (ref. 5). Nodulair gietijzer scoort met name een lage faalkans bij water. Nodulair gietijzer is een nieuwer materiaal dan grijs gietijzer. In eerste instantie is er sprake geweest van storingsrapportages door corrosie, maar door toepassing van betere coatings zijn de storingsrapportages door corrosie veel minder geworden. Staal scoort qua faalkansen met name bij water hoog. Dit is mogelijk ten gevolge van onterechte vermelding van staal als materiaal in plaats van nodulair gietijzer, als eerder vermeld.

Toelichting 1

Waar bij grijs gietijzer in geval van corrosie vooral grafietcorrosie optreedt, is dit bij nodulair gietijzer vooral putcorrosie. Een storing ten gevolge van grafietcorrosie is meestal breken of barsten (de grafietmatrix welke overblijft na het corrosieproces is zeer bros). Ingeval van put corrosie is dit het optreden van een lek.

Toelichting 2

De afwezigheid van kathodische bescherming of slechte kathodische bescherming bij stalen leidingen speelt ook een belangrijke rol. Er kan daarbij worden opgemerkt dat lange tijd lekzoeken en het bijhouden van het aantal lekken per leidingsectie, de belangrijkste tool voor onderhoud was.

Vergelijking waterleidingen Nederland – VS/Canada

Informatie uit Noord-Amerika

Uit Noord Amerika (ref. 4) is bekend dat voor de niet metalen en grijs gietijzer leidingen de weerstand tegen uitwendige beschadigingen minder is dan voor stalen leidingen als toegepast bij hoge druk transport van olie en gas. Daarnaast ligt een groot deel van de distributieleidingen in bebouwde gebieden. Uitwendige corrosie speelt verder een grote rol. In Noord Amerika is meer dan 90% van de incidenten bij metalen leidingen het gevolg van corrosie. Voor 1970 was er geen eis om de leidingen te voorzien van een coating of om kathodische bescherming toe te passen. Als voor oudere leidingen later kathodische bescherming is toegepast kunnen ze voordien onderhevig geweest zijn aan corrosie. Veel leidingeigenaren hebben voor die tijd wel vrijwillig coating toegepast maar er zijn ook leidingen ongecoat aangelegd. Voor Europa zal de praktijk niet veel anders geweest zijn. Voor Nederland zou altijd gecoat zijn (de oude voorschriften vermelden een “dompellaag van bitumen”).

In de volgende tabel zijn de faalkansen tussen water en de VS/Canada gerapporteerd (voor faalkansen VS/Canada zie ref. 1 en 9).

Materiaal	Water USTORE (per km.jaar)	Water VS/Canada (per km.jaar)
Asbestcement	0.08	0.06
Grijs gietijzer	0.06	0.22
Nodulair gietijzer	0.004	0.03
Staal	0.16	0.05
PE	0.01	-
PVC	0.02	0.01

Tabel 2 – Faalkansen water in Nederland en Noord Amerika (per km.jaar)

In grote lijn wordt net als bij de vergelijking van gasdistributie en water in tabel 1, in tabel 2 bij de vergelijking van water in Nederland en Noord Amerika, een gelijksoortige trend waargenomen.

Voor asbestcement zijn volgens tabel 2 de faalfrequenties ongeveer gelijk. Voor grijs gietijzer zijn de faalfrequenties in de VS en Canada hoger en komen ongeveer overeen met die bij gasdistributie. Ook voor nodulair gietijzer ligt de faalfrequentie in de VS en Canada hoger. Voor staal ligt de faalfrequentie in de VS en Canada lager en komt die nagenoeg overeen met die voor gasdistributie. Voor PVC komen de faalfrequenties nagenoeg overeen.

Toelichting 3

De omstandigheden tussen Nederland en de VS/Canada zijn los van de criteria en manier van faalgegevens opvragen, natuurlijk verschillend, zoals:

- Opvries en opdooi door grote vorstindringing in de winter in Canada en het noorden van de VS, als grote oorzaak van breken van grijs gietijzer leidingen (vanwege de grotere vorstindringing is wel een grotere dekking voorgeschreven)
- Aanwezigheid van zwelklei in sommige gebieden in Noord Amerika
- Aanwezigheid van corrosieve gronden in Noord Amerika
- Andere coatingpraktijken en ook aanleg van onbeklede leidingen
- Voor drinkwater: hogere drukken, minder toepassen van een zandbed en met name slecht beheer

Toelichting 4

Voor Nederland kan voor het veel toegepast grijs gietijzer kennis ontleend worden uit ref. 3 (gasexplosie Czaar Peterstraat).

Vergelijking beschadigingsoorzaak "graven" gastransport en - distributie

Tussen gasdistributie en -transport is minstens een orde grootte verschil in de faalkans "graven" (zie ref. 7 voor gastransport). In het volgende is dit vergeleken voor stalen leidingen.

De oorzaken moeten worden gezocht in:

- grotere dekking van transportleidingen
- transportleidingen liggen meer in buitengebieden en weinig in de bebouwde kom
- transportleidingen kennen een relatief duidelijke markering (vliegpalen)
- bij transportleidingen worden regelmatig vlieginspecties uitgevoerd
- graafwerkzaamheden op en nabij transportleidingen worden begeleid door het betreffende transportbedrijf
- grijs gietijzer en asbest cement zijn gevoelig voor impact wat eerder tot breuk leidt. Bij meer ductiele materialen is de weerstand tegen beschadigingen groter en treedt meer lek op in plaats van breuk
- PE en PVC hebben beduidend minder sterkte dan staal (de moderne kunststoffen, die zijn echter nog maar weinig toegepast, kunnen grote vervormingen doorstaan)

Vergelijking staal gastransport en -distributie

Voor gastransportleidingen en olietransportleidingen ligt voor de kleine diameters de faalfrequentie in de orde van 0.5 per 1000 km.jaar. Voor gasdistributie en water is dit 0.04 per km.jaar. Hiermee ligt de faalkans voor stalen leidingen in distributie bijna twee ordegroottes hoger.

De reden van de significant veel lagere faalfrequentie voor groep I transportleidingen zijn de volgende:

- Er wordt door het management van transportbedrijven al jarenlang gestuurd op veiligheid en milieu (doelstellingen: geen lek, nul incidenten of kwaliteitsindicatoren voor gebeurtenissen aangaande veiligheid en milieu)
- Extra goedkeuringseisen voor toe te passen pijpleidingmaterialen
- Naast het normaal constructietoezicht, onafhankelijke verificatie en inspectie door een separate inspectiedienst
- 100% niet destructief onderzoek van de lassen
- Een zwaar onderhouds- en inspectieregime met sterke aandacht voor kathodische bescherming, intelligent pigging en vlieginspecties in de operationele fase. Alles is gericht op het voorkomen van lekkage
- Bij distributie gaat het vooral om het detecteren van lekkage (lekzoeken), vastleggen van het aantal lekkages per leidingsectie en het handhaven van de gestelde criteria voor toelaatbare lekkage

Referenties

- 1 - KWR 2020.090; "Storingsfrequenties drinkwaterleidingen - Analyse voor het POV-K&L project 'Filters in parallel gelegen leidingen', Storingsfrequenties drinkwaterleidingen", September 2020
- 2 - KIWA GT-200187 Analyse voor het POV-project 'Filters in parallel gelegen leidingen', Storingsfrequentie gasdistributieleidingen", 4 September 2020
- 3 - Raad voor de Transportveiligheid; "Gasexplosie na breuk gasdistributieleiding" , September 2002
- 4 – "Pipeline Corrosion", FINAL REPORT Submitted to U.S. Department of Transportation, Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, Office of Pipeline Safety, Integrity Management Program, Under Delivery Order DTRS56-02-D-70036, Submitted by Michael Baker Jr., Inc., November 2008
- 5 – B.S. Lochbaum PSE&G Develops Models To Predict Main Breaks, Pipeline & Gas Journal July 1993
- 6 – External Corrosion and Protection of Ductile iron Pipe, ?
- 7 - EGIG; "Gas pipeline incidents, 10th report of the European Gas Pipeline Incident Data Group, period 1970-2016"
- 8 – Concawe; "Performance of European cross-country oil pipelines – Statistical summary of reported spillages in 2016 and since 1971", Report no. 6/18
- 9 – Utah State University; "Water Main Break Rates In The USA and Canada: A Comprehensive Study – An Asset Management Tool", March 2018

G Beschouwing referentielengte (notitie Spiekhout & Vrouwenvelder)

Notitie: Beschouwing referentielengte

Opsteller: J. Spiekhout, A.C.W.M. Vrouwenvelder

Ten behoeve van: POV Kabels en Leidingen

Datum: 14-10-2020

Status: Definitief, versie 0

Inleiding

De toetsing van de faalkansbijdrage vanuit leidingfalen wordt gebaseerd op de totale faalkansbijdrage van de leidingen t.o.v. de overstromingskansnorm van het dijktraject. Hierbij wordt getoetst op het niveau van een representatieve doorsnede, horend bij een leiding-referentielengte van DL = 50 m. Deze referentielengte is de lengte waarover de parameters sterk gecorreleerd zijn. De vraag is of deze referentielengte voor alle faalkansmechanismen gezamenlijk mag worden toegepast.

Argumentatie bij DL=50m.

De DL=50 m. heeft in eerste plaats te maken met fluctuaties in de ondergrond.

Overschrijden van de gestelde spanningen of rekken heeft voor een groot deel te maken met verplaatsingen (zoals zettingen) in de ondergrond. Ook bezwijken ten gevolge van lasfouten in rondlassen geschiedt doordat spanningen of rekken, die kritiek zijn voor de betreffende fouten/beschadigingen (veelal met behulp van de breukmechanica te berekenen) worden overschreden. Ook bij bijvoorbeeld leidingen voor groep II stoffen als grijs gietijzer ingeval van bezwijken door (grafiet-) corrosie geschiedt dit vaak door overschrijden van spanningen ten gevolge van zetting (ref.2).

Ingeval van barsten, bezwijken door de inwendige druk, niet grond gerelateerd dus, dit speelt met name bij de groep I leidingen (hoge druk) en hier met name bij graafwerkzaamheden. De kans op deze gebeurtenis in een dijk is echter laag (reductiefactor Handleiding BEVB).

De referentie lengte moet in de voorgestelde procedure over alle mechanismen gezamenlijk worden toegepast

Conclusie

Grosso modo moet men uitgaan van de mechanismen met de grootste bijdragen en dat zijn met name de grond gerelateerde mechanismen (met name zetting).

Voorlopig lijkt 50 m. lijkt laag en dus conservatief.

Referenties

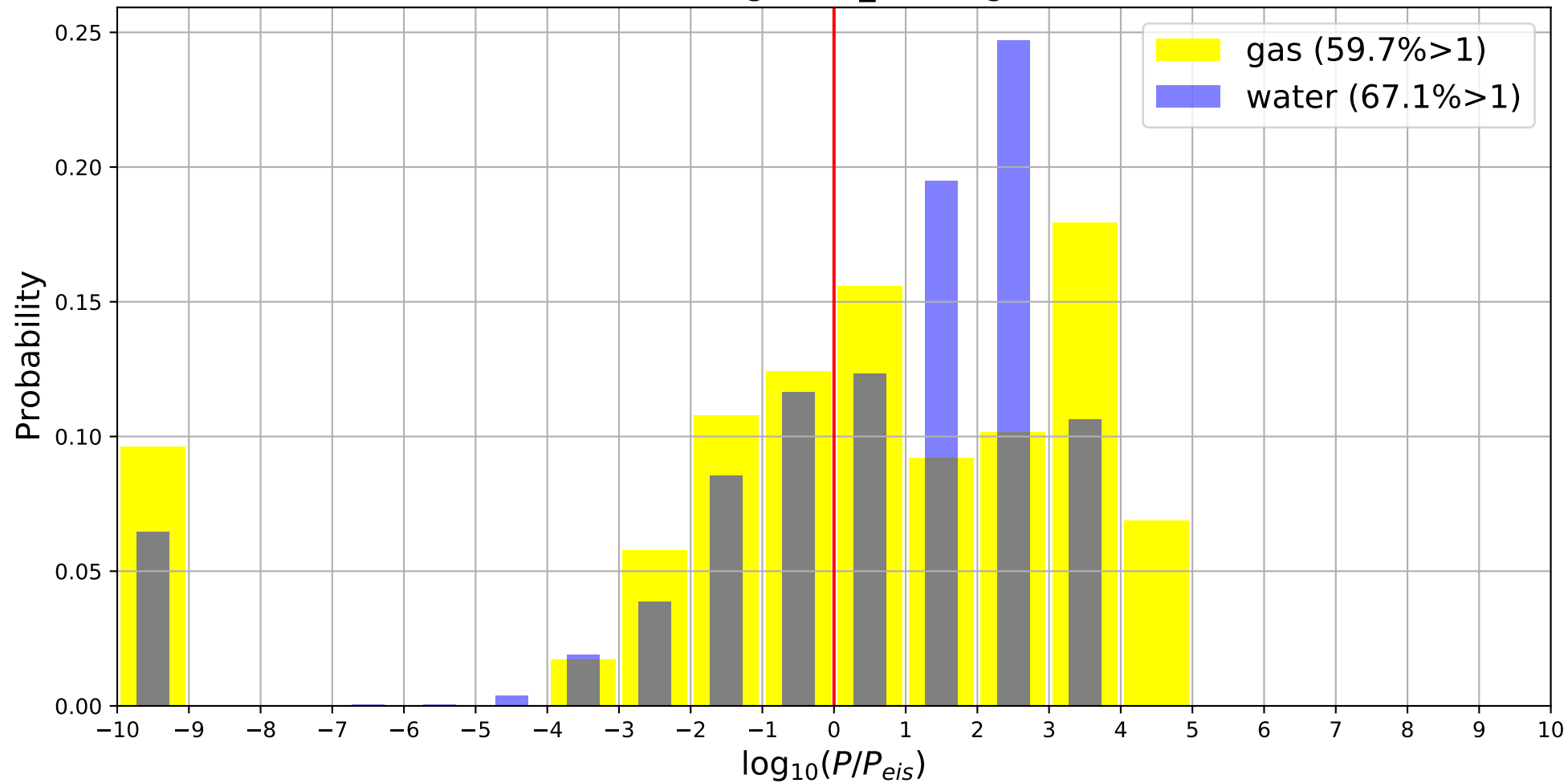
1. TNO rapport "Herziening rekenfactoren en spanningscorrectiefactoren in NEN 3650", 2003-CI-R0031
2. Raad voor de Transportveiligheid; "Gasexplosie na breuk gasdistributieleiding", September 2002

H Histogrammen resultaten faalkansanalyses

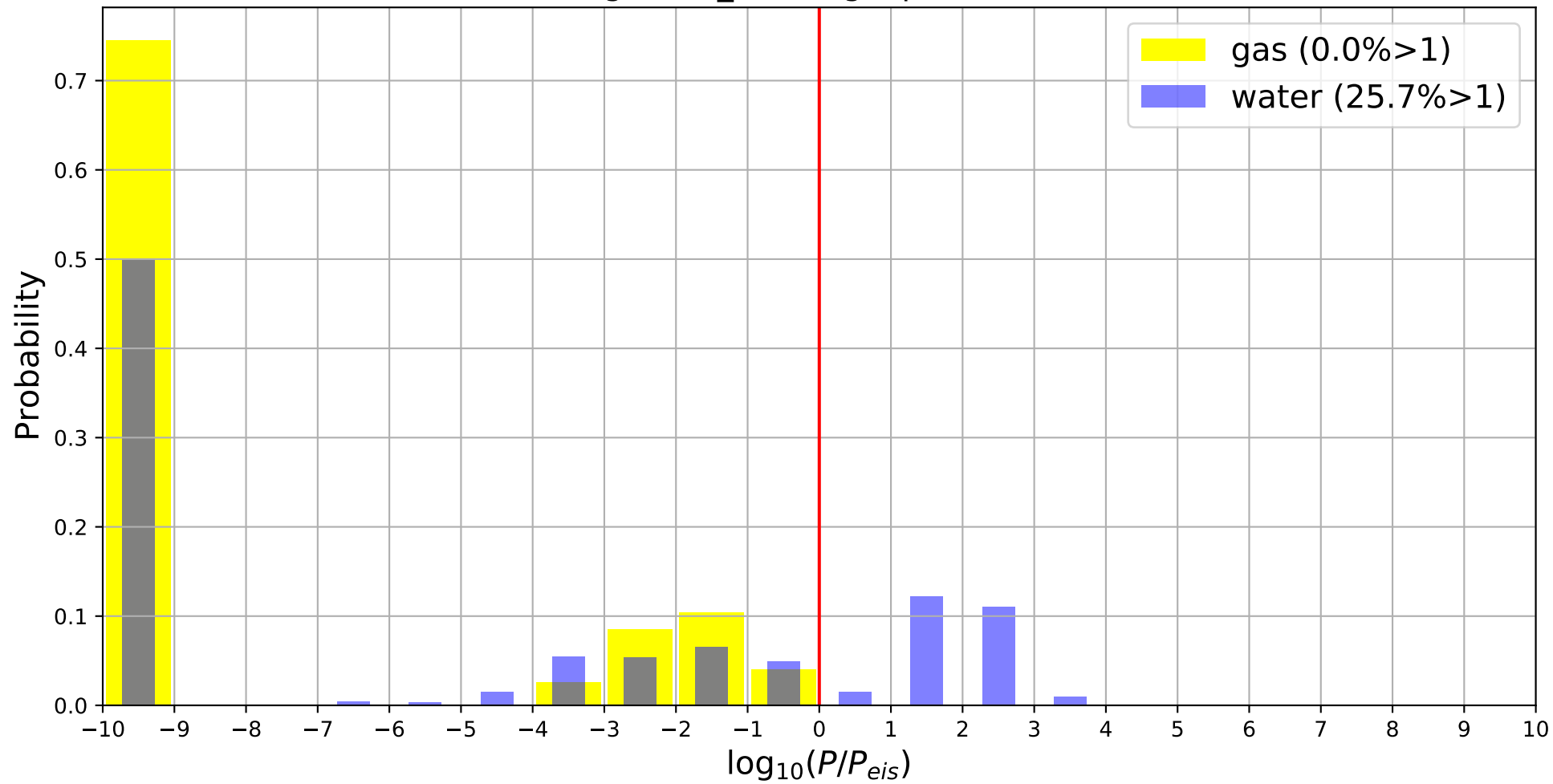
Met behulp van histogrammen en Machine Learning classificatie zijn per leidinglocatie beslisbomen opgesteld. In deze bijlage is een aantal histogrammen opgenomen, waarin op de X-as “bins” zijn weergegeven van de ratio tussen de berekende additionele bijdrage aan de faalkans, P_f uit vergelijking (Eq 10) en de faalkanseis P_{eis} uit vergelijking (Eq 17), zoals gedefinieerd in paragraaf 2.6, en op de Y-as de kans op beschouwde cases per bin (som = 1)⁷. Alle cases die links van de rode lijn liggen voldoen aan de eis, alle cases rechts van de lijn voldoen niet (Er zijn dijkprofielen met een variërende P_{norm} beschouwd; zoals beschreven in paragraaf 2.6). In bijlage H worden ook de verschillende posities van de leidingen in het dijkprofiel beschouwd. De leidingpositie wordt aangeduid met label.

⁷ Bij oneindig kleine bins zouden de histogrammen de probability density function (pdf) weergeven

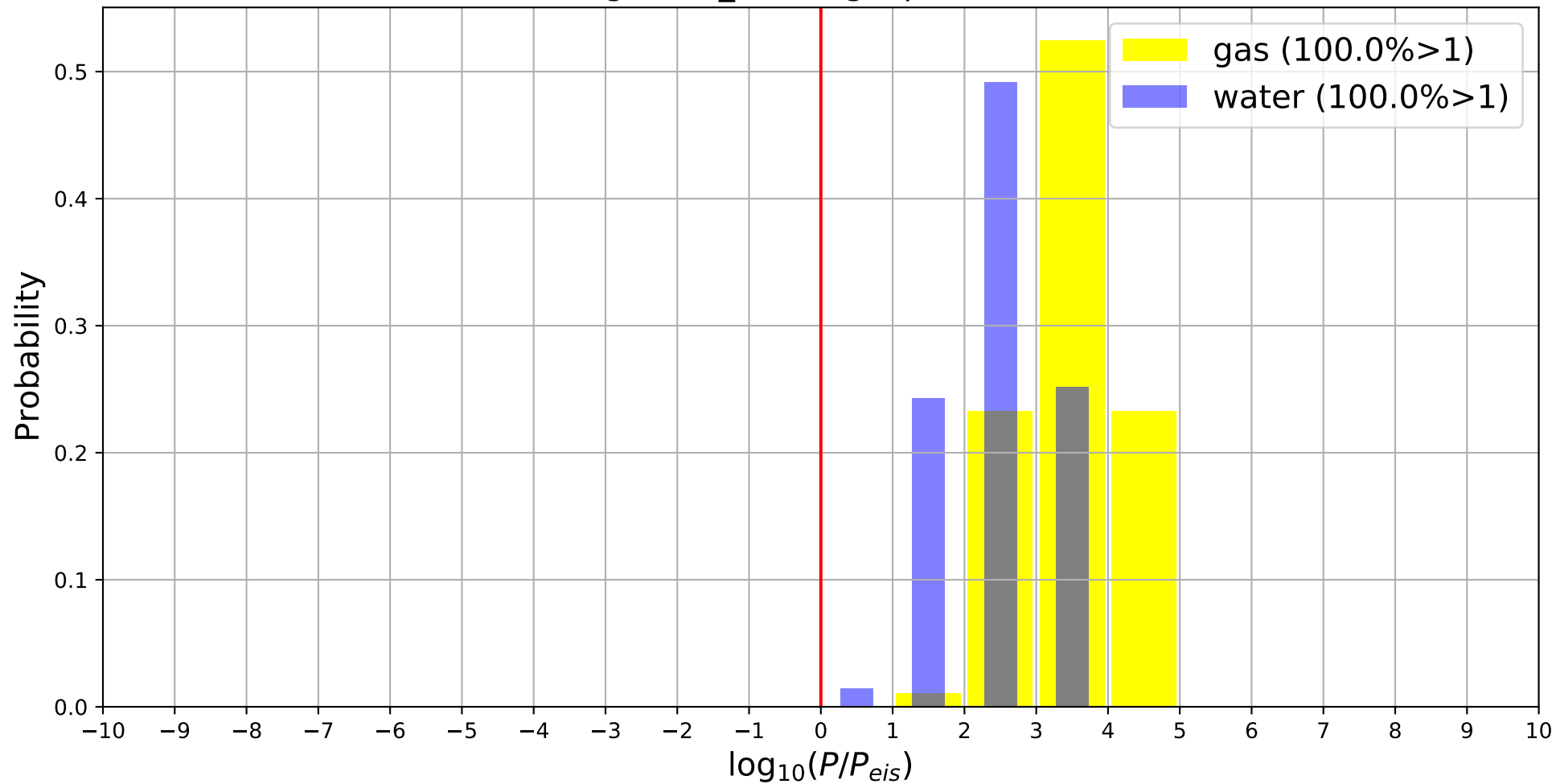
Histogram P_flooding



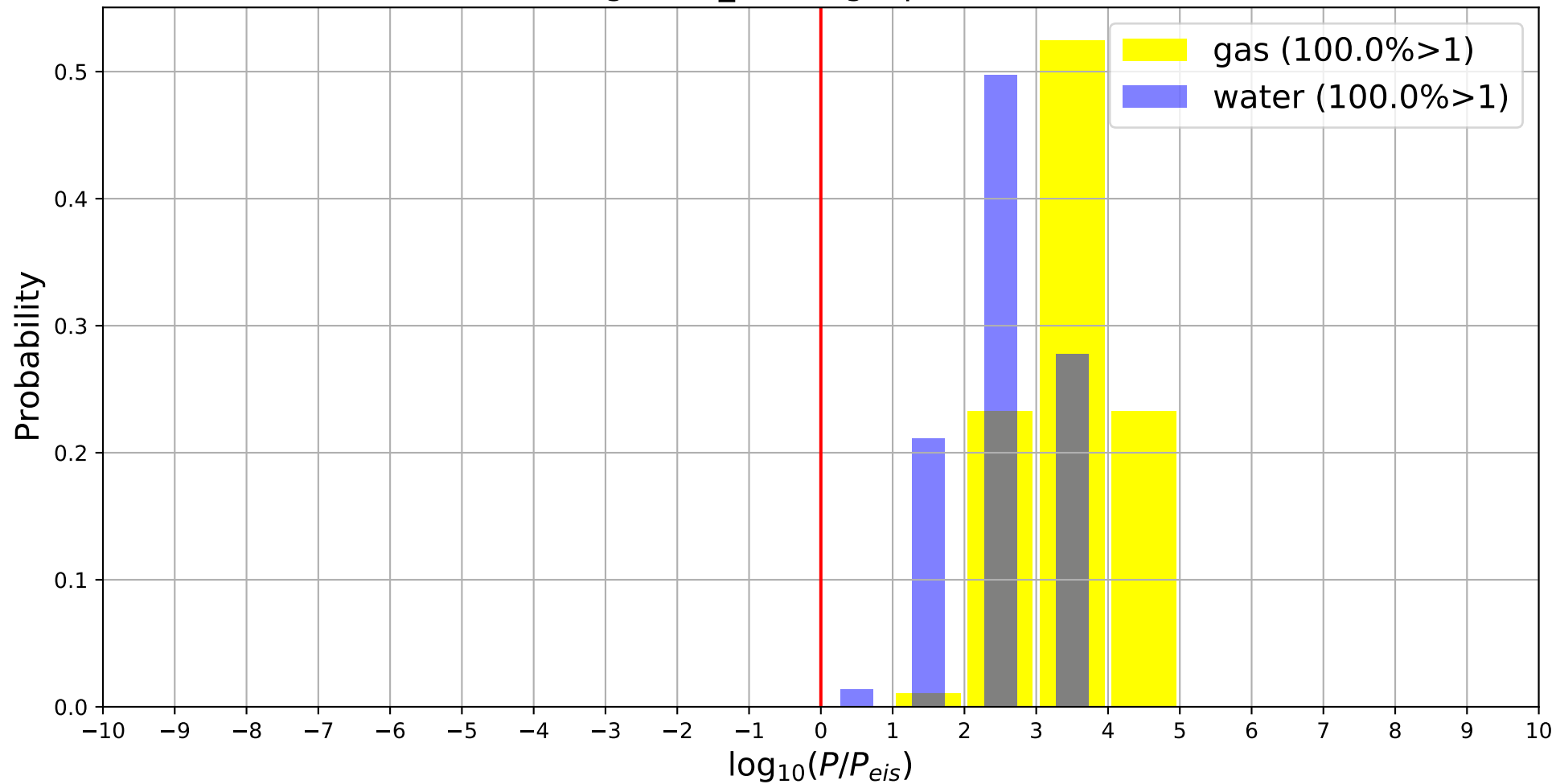
Histogram P_flooding Pipeline label 1



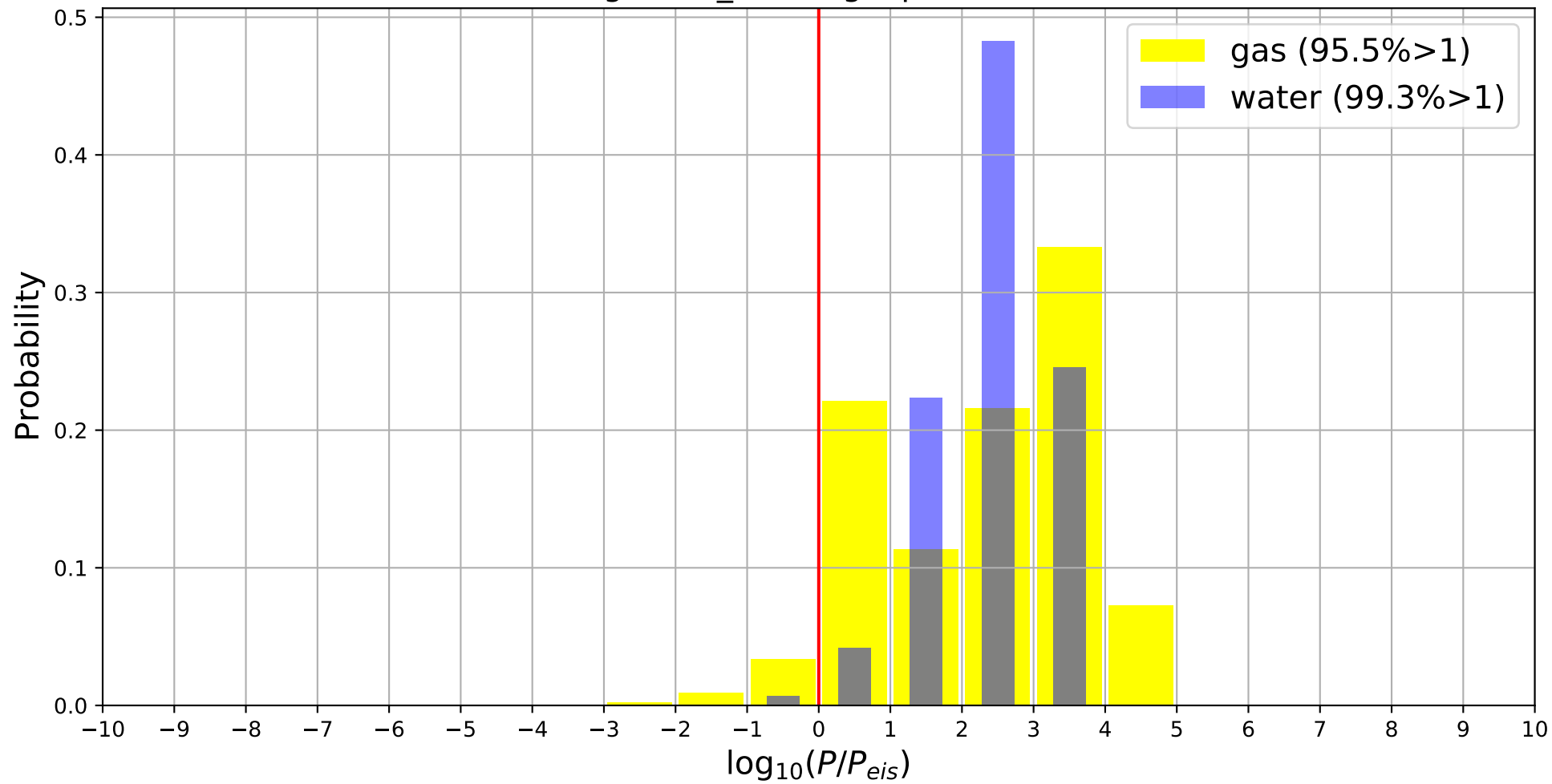
Histogram P_flooding Pipeline label 2



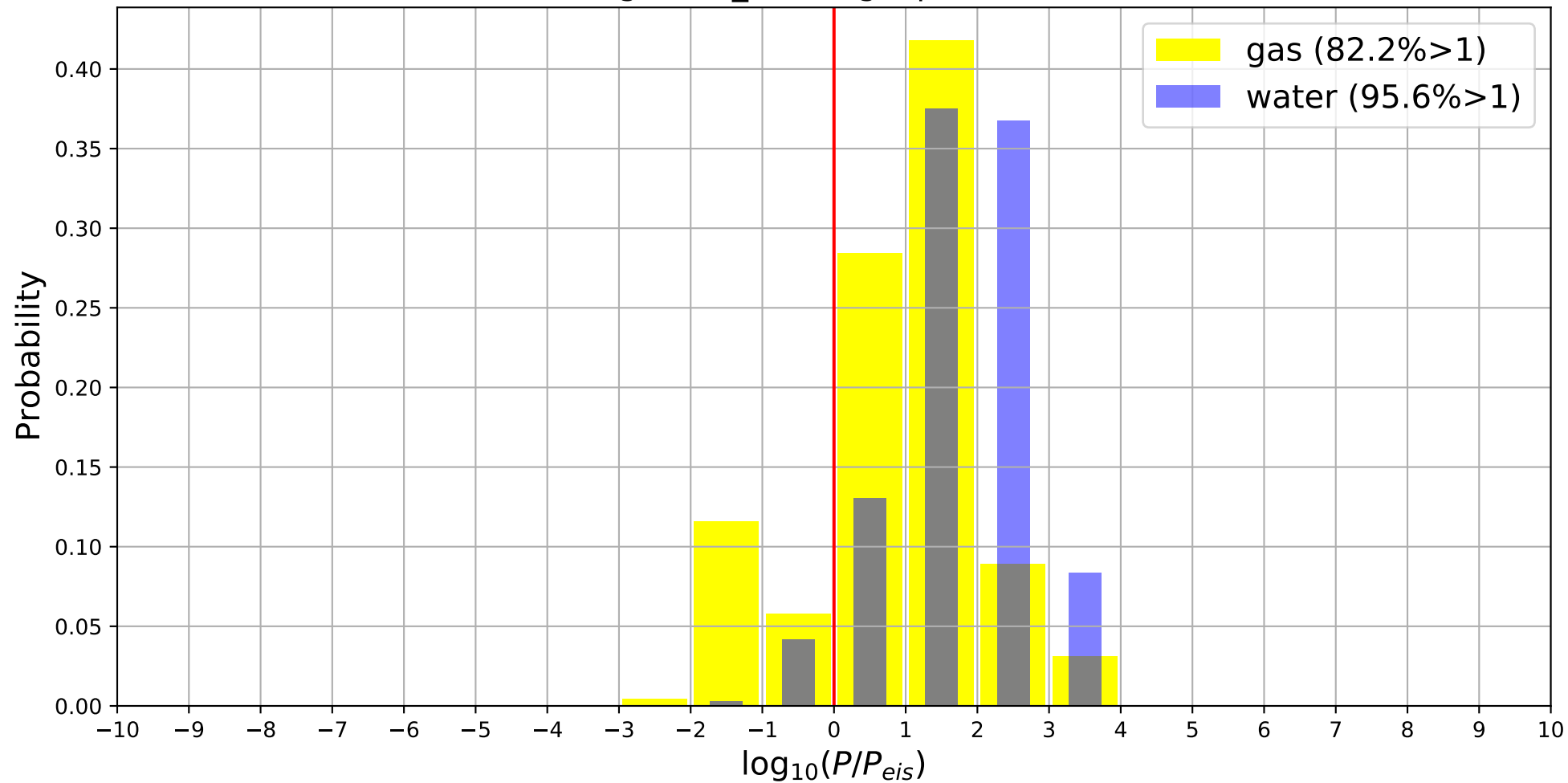
Histogram P_flooding Pipeline label 3



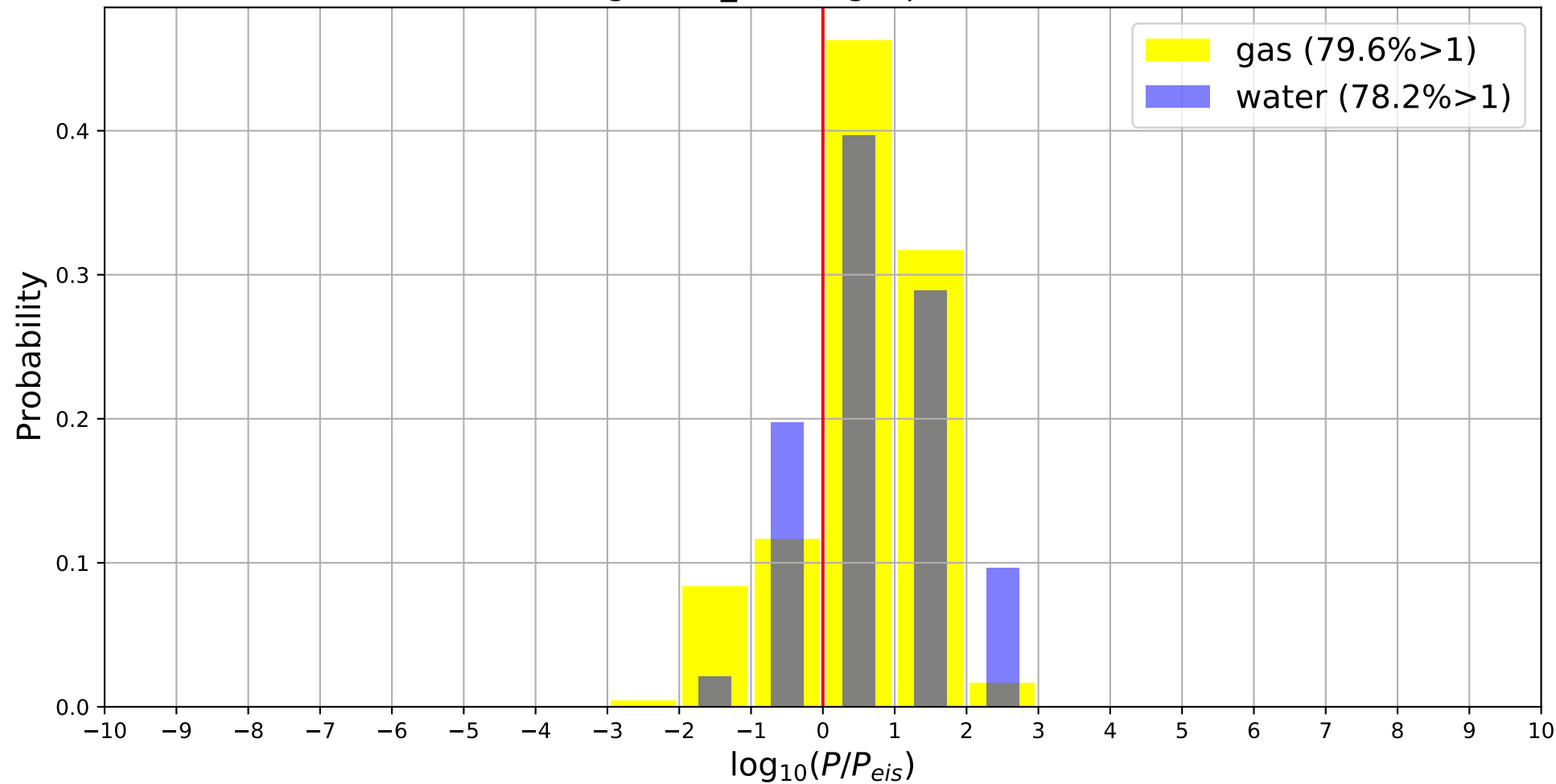
Histogram P_flooding Pipeline label 4



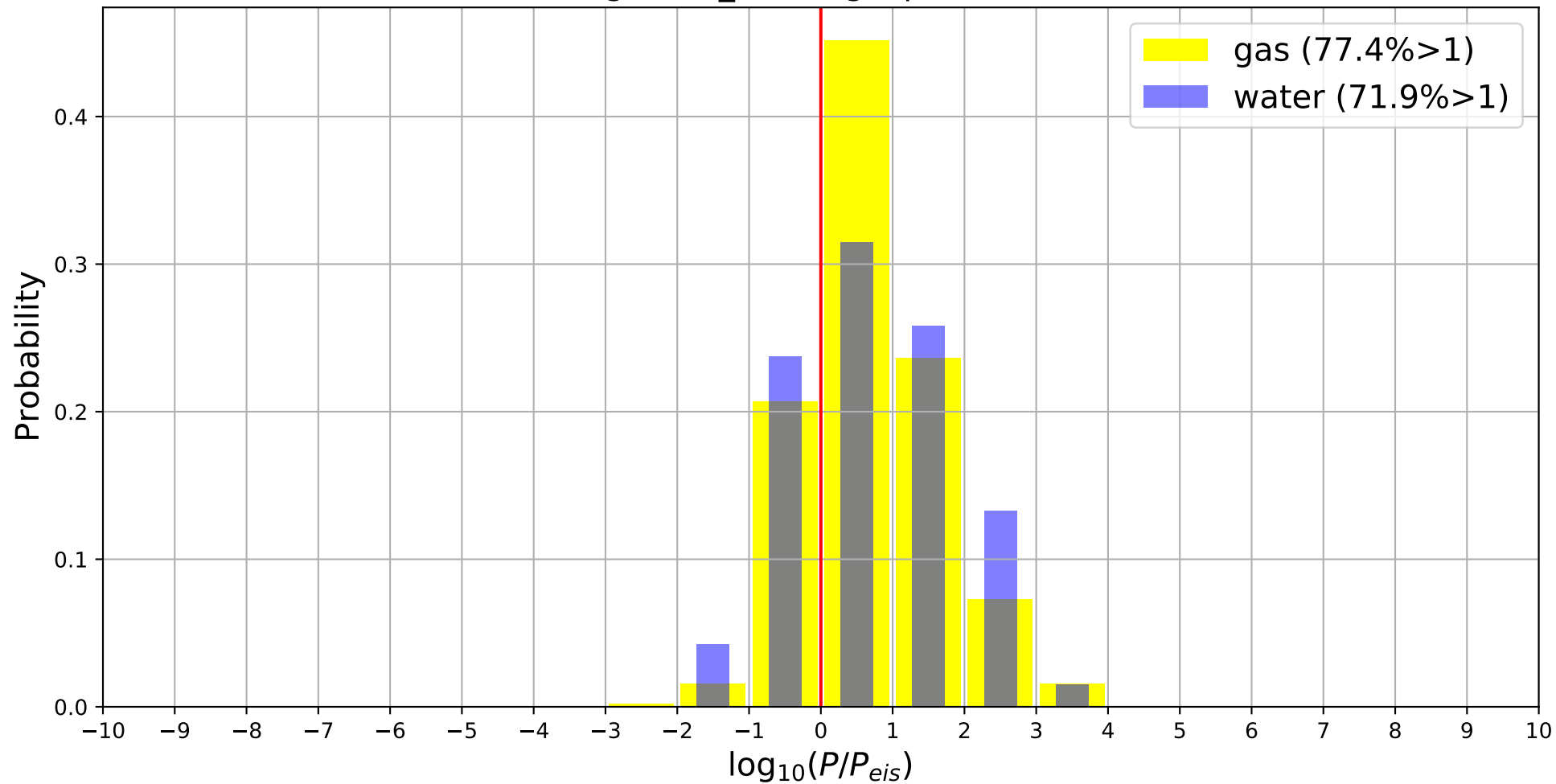
Histogram P_flooding Pipeline label 5



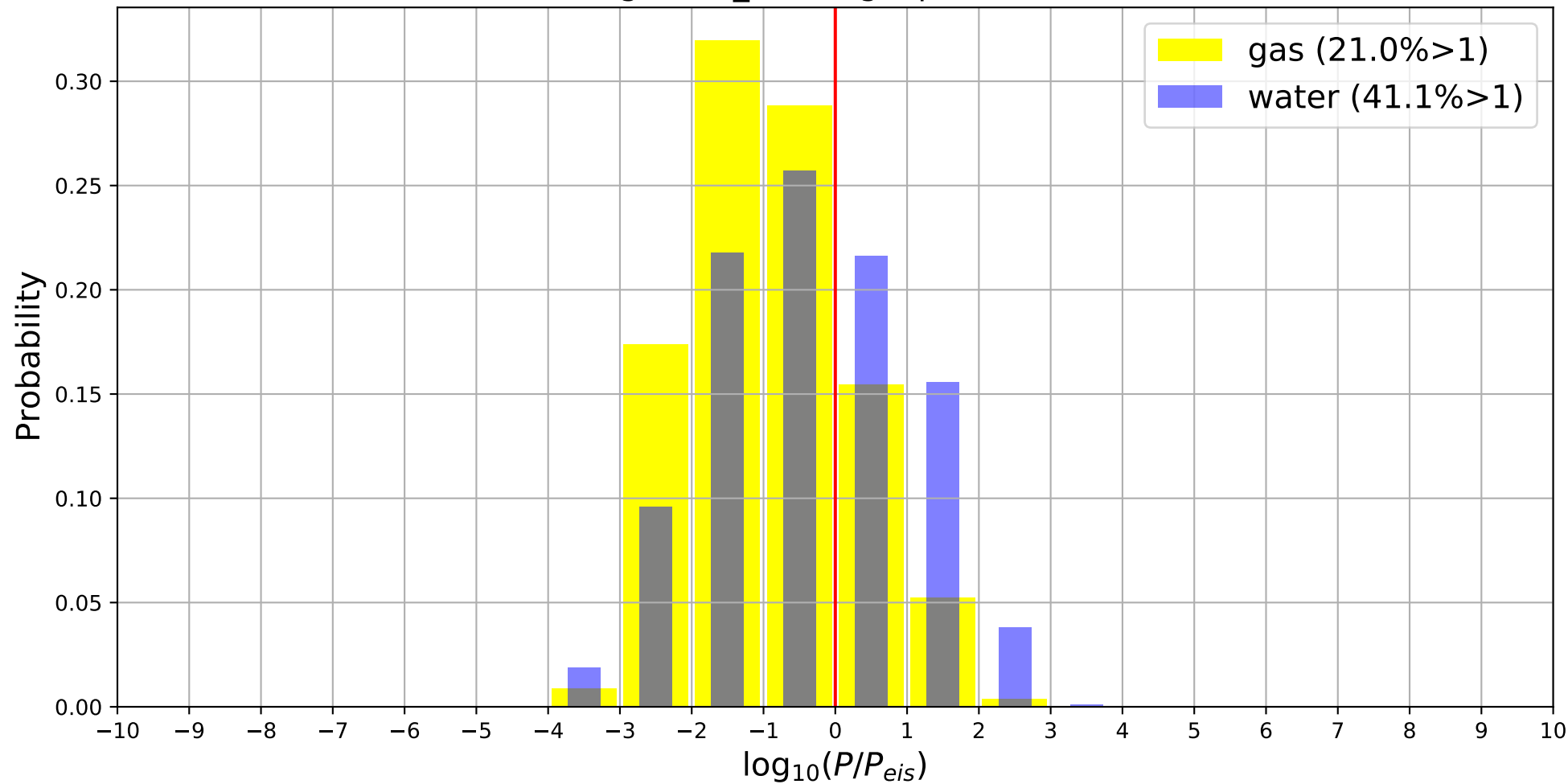
Histogram P_flooding Pipeline label 6



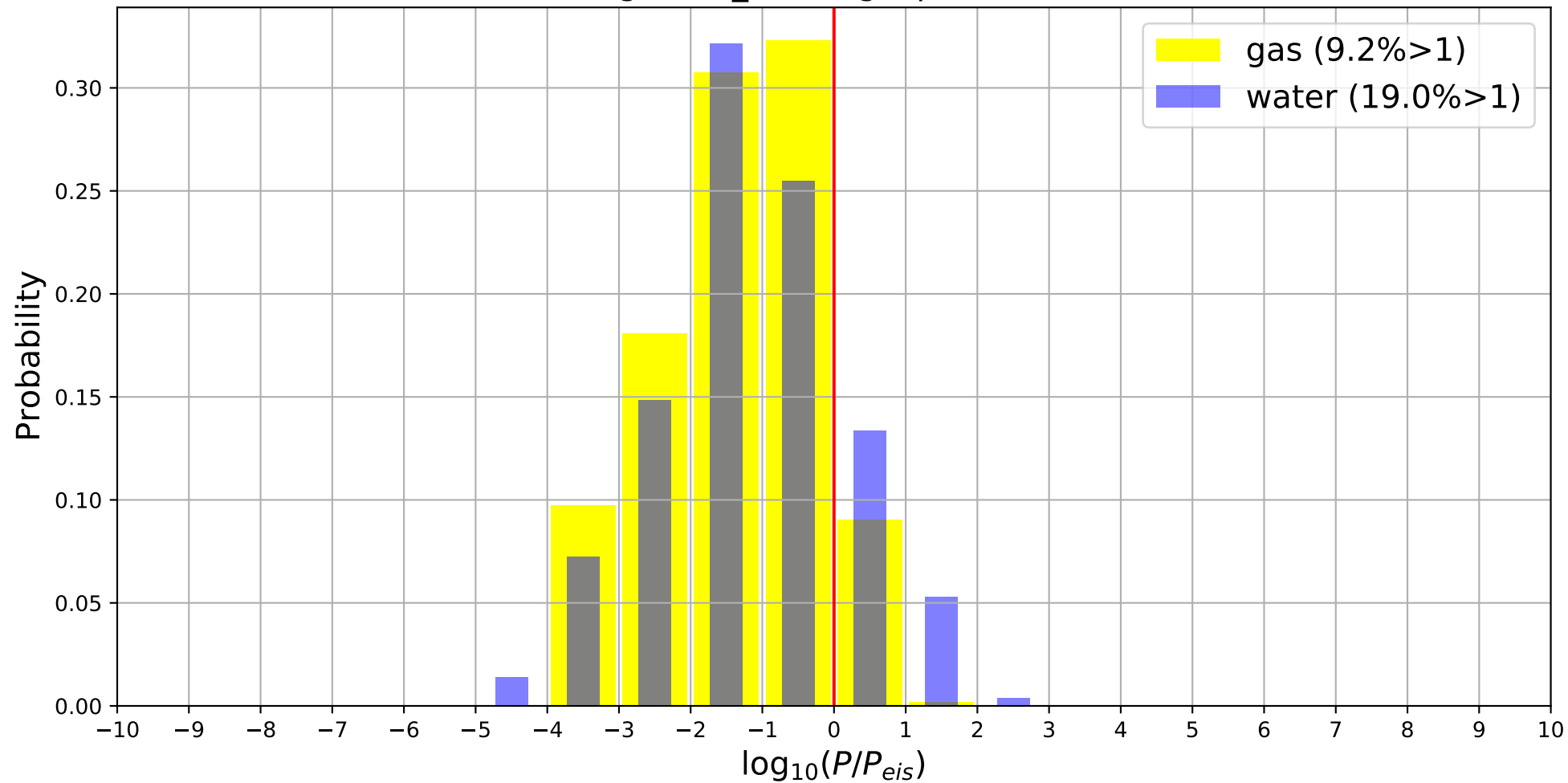
Histogram P_flooding Pipeline label 7



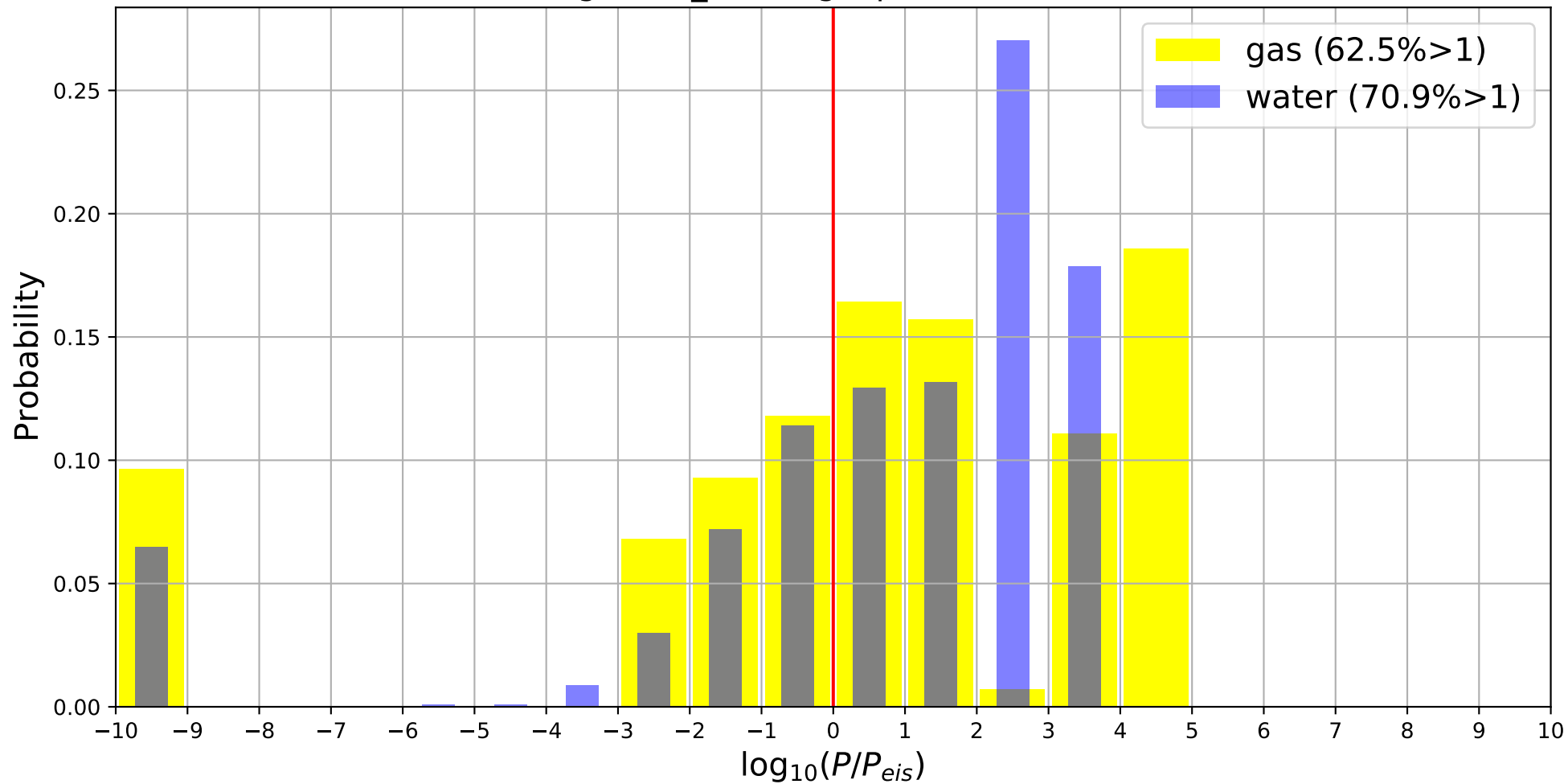
Histogram P_flooding Pipeline label 8



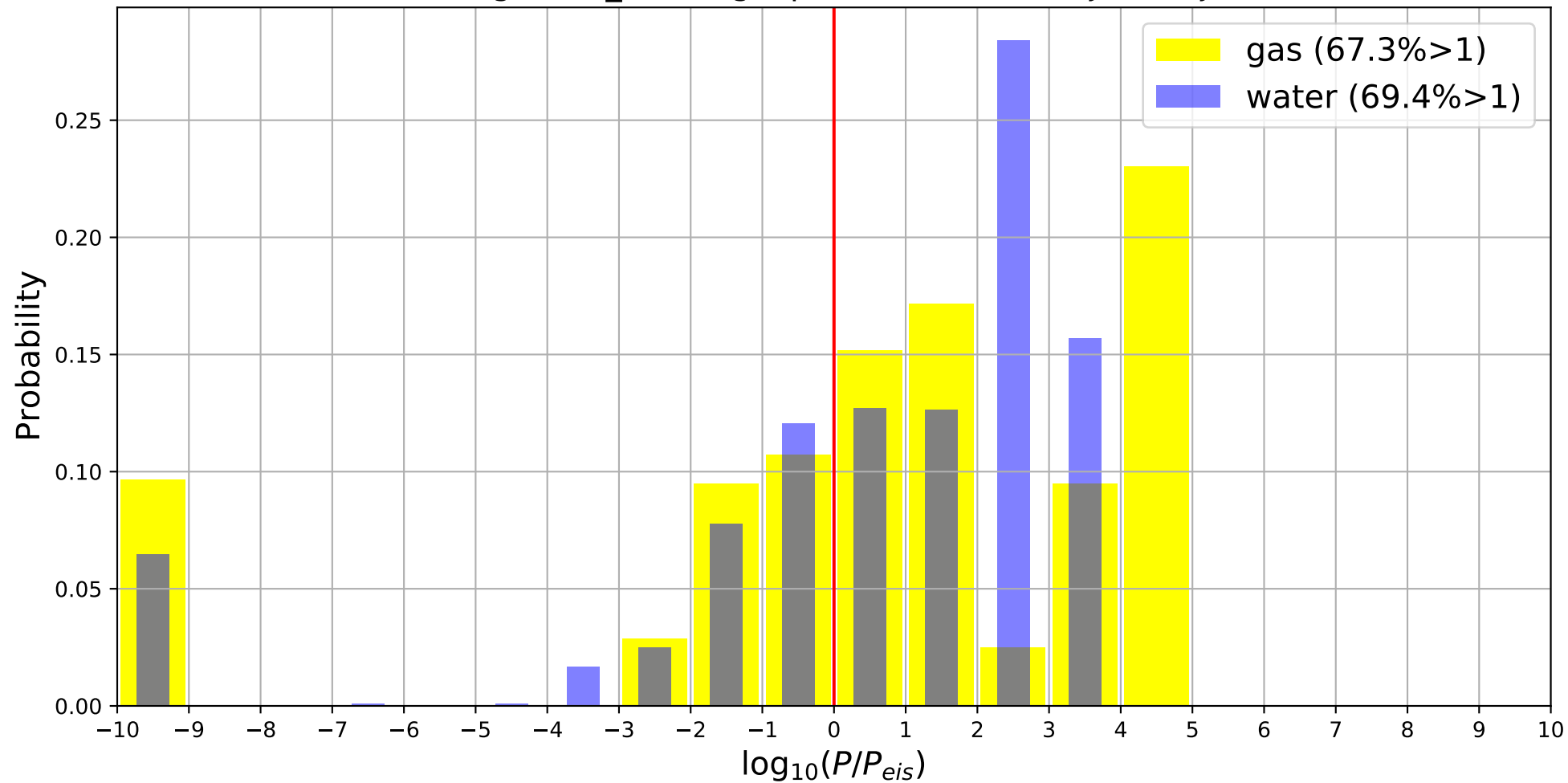
Histogram P_flooding Pipeline label 9



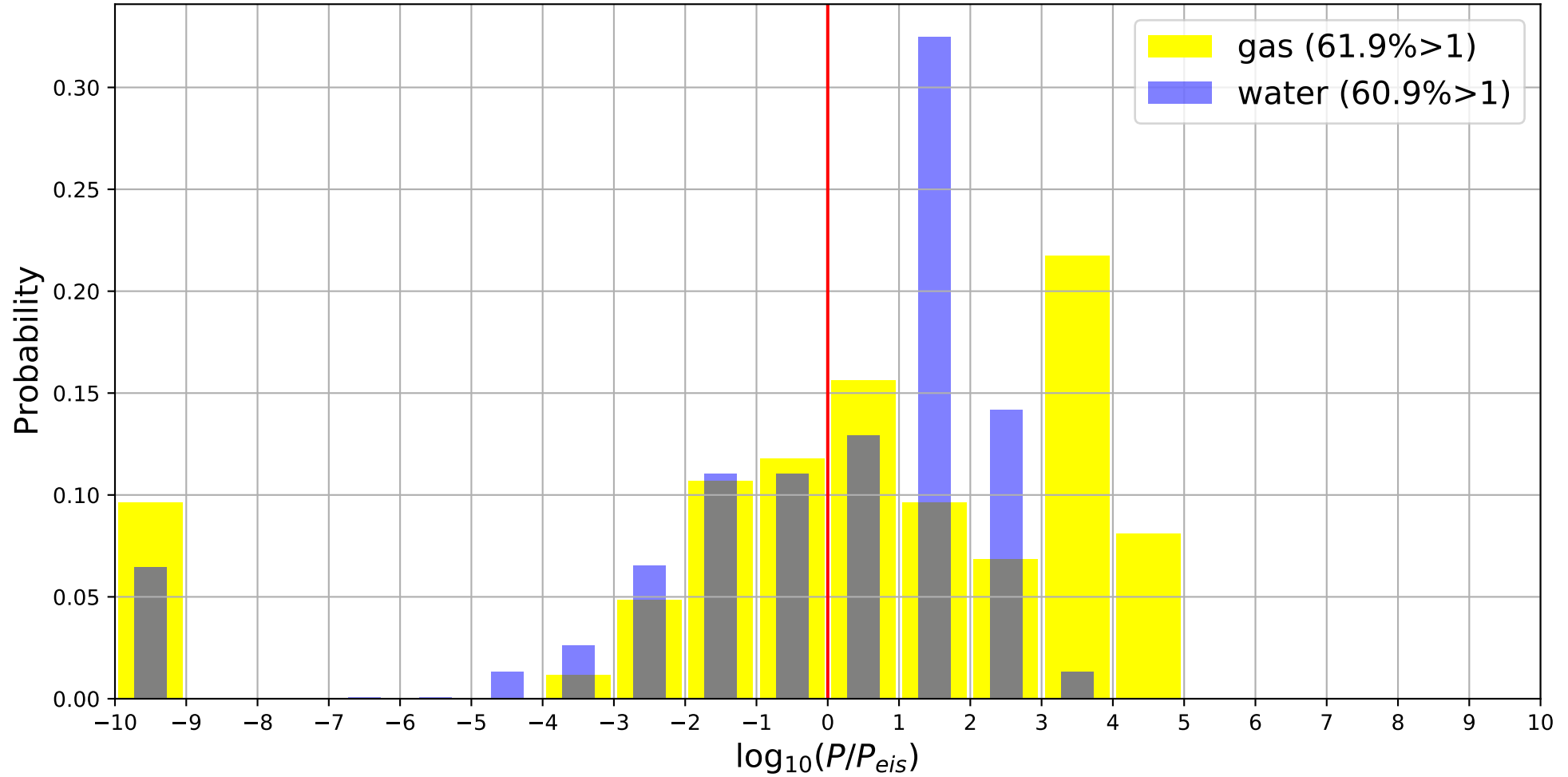
Histogram P_flooding Pipeline material AC



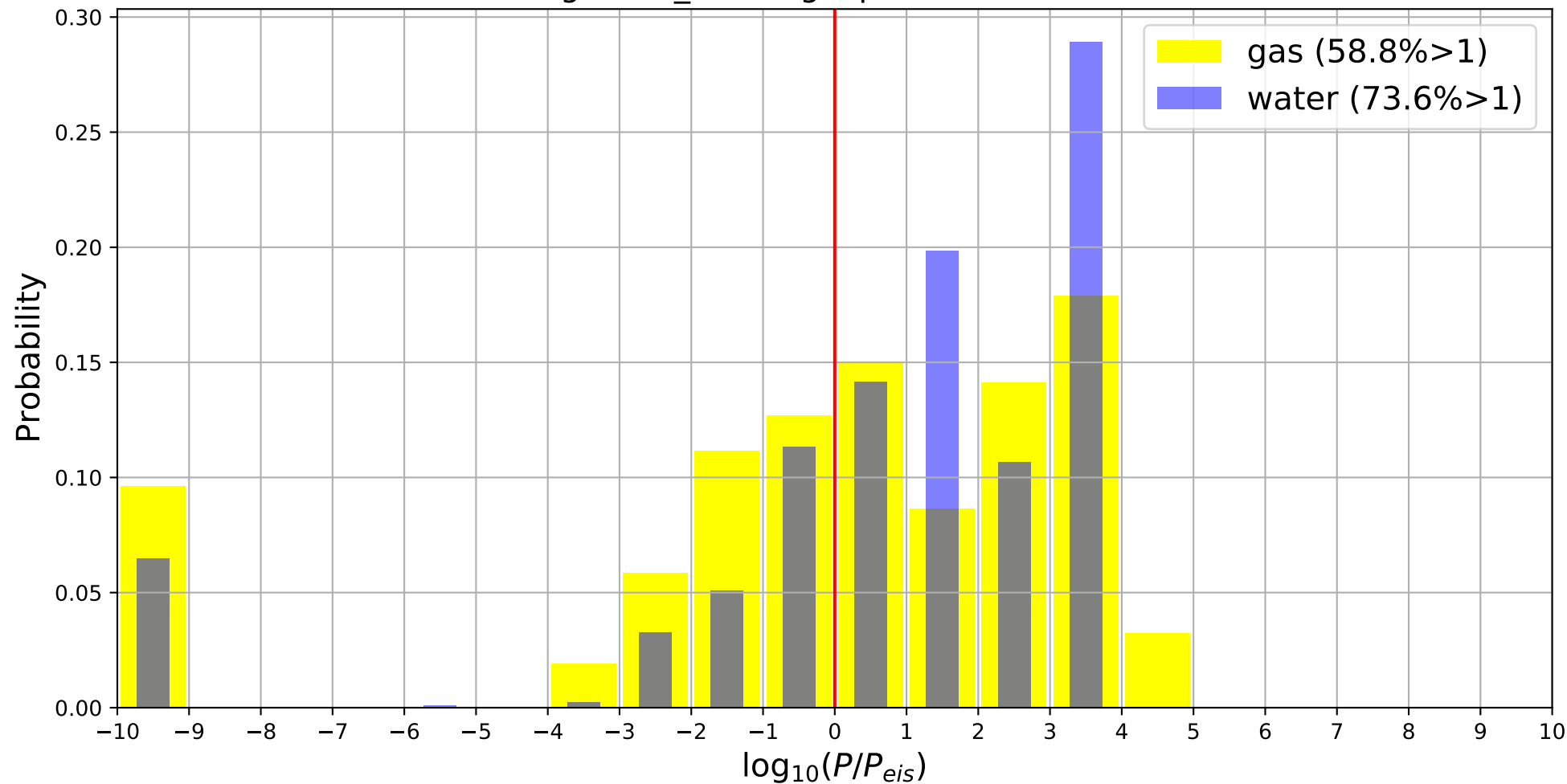
Histogram P_flooding Pipeline material Grijs Gietijzer



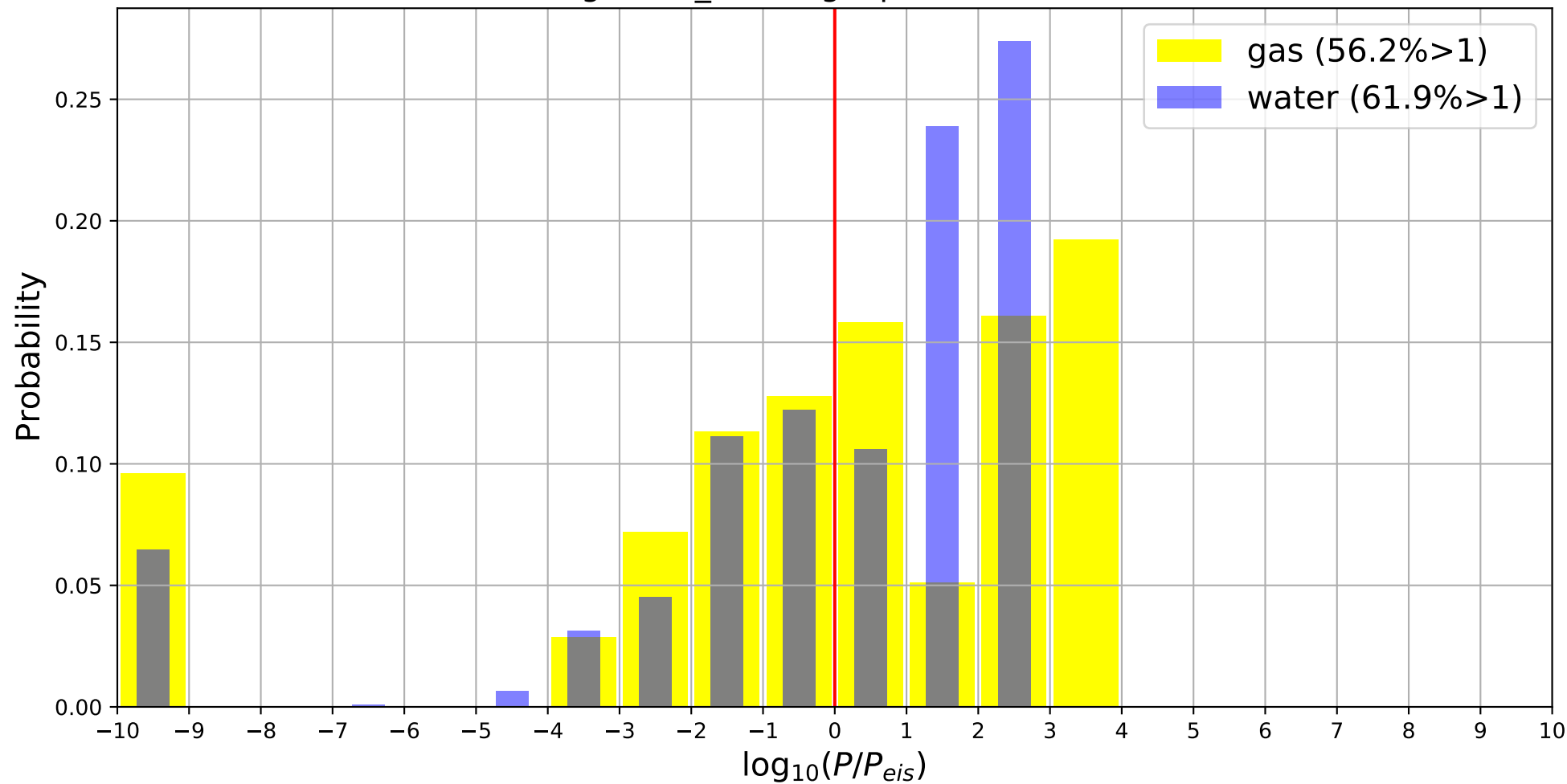
Histogram P_flooding Pipeline material Nodulair Gietijzer



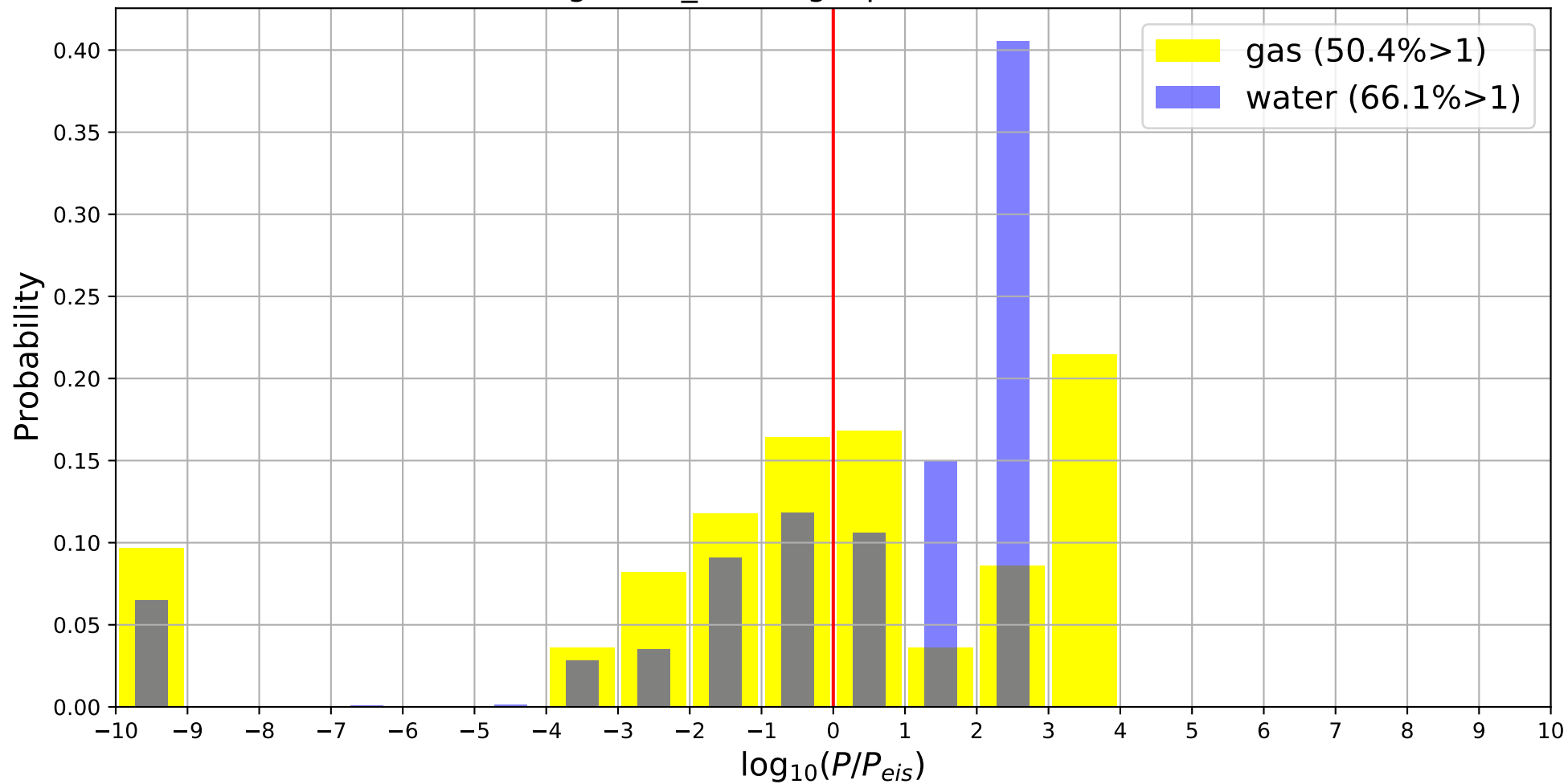
Histogram P_flooding Pipeline material Staal



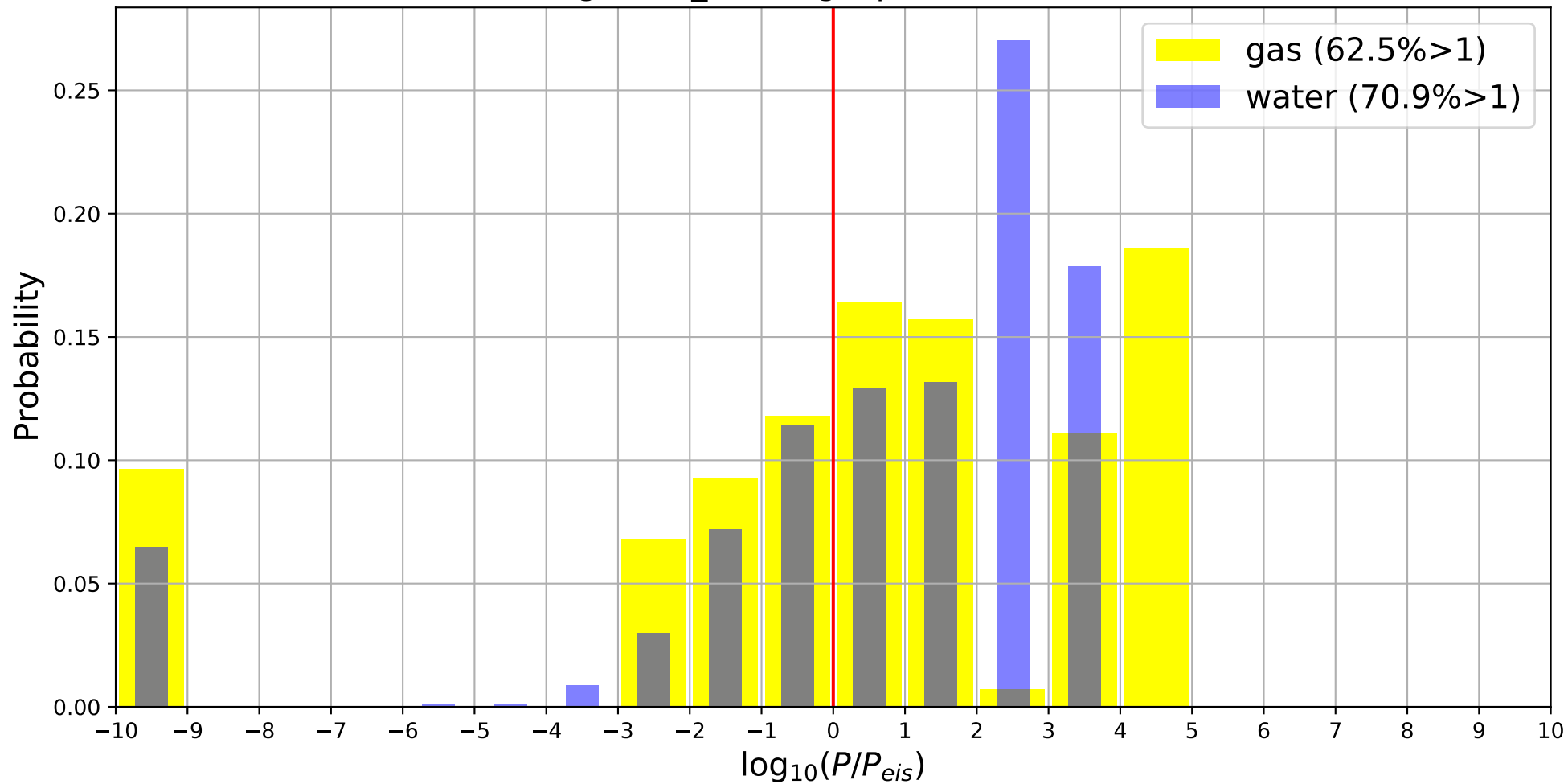
Histogram P_flooding Pipeline material PE



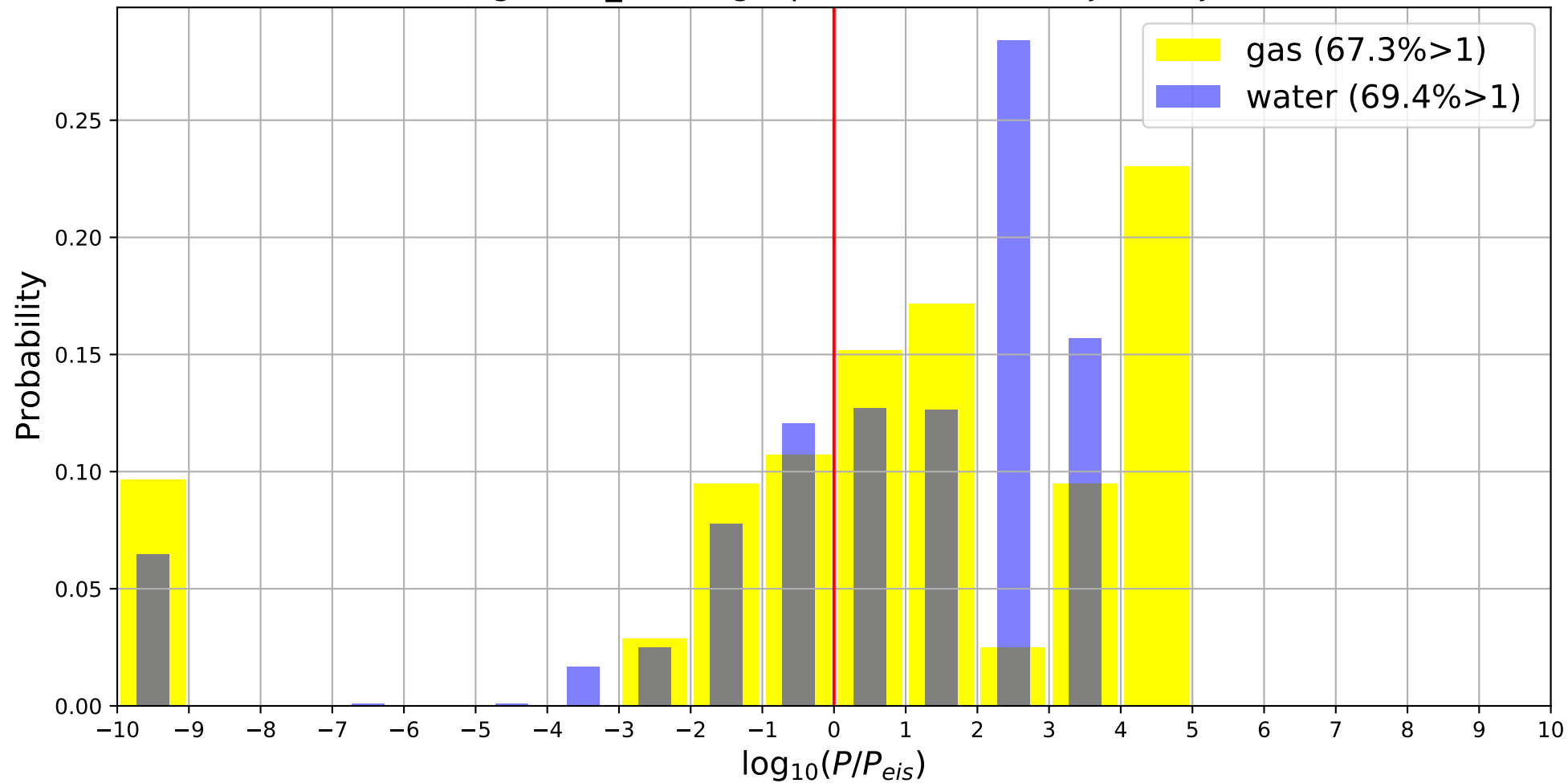
Histogram P_flooding Pipeline material PVC



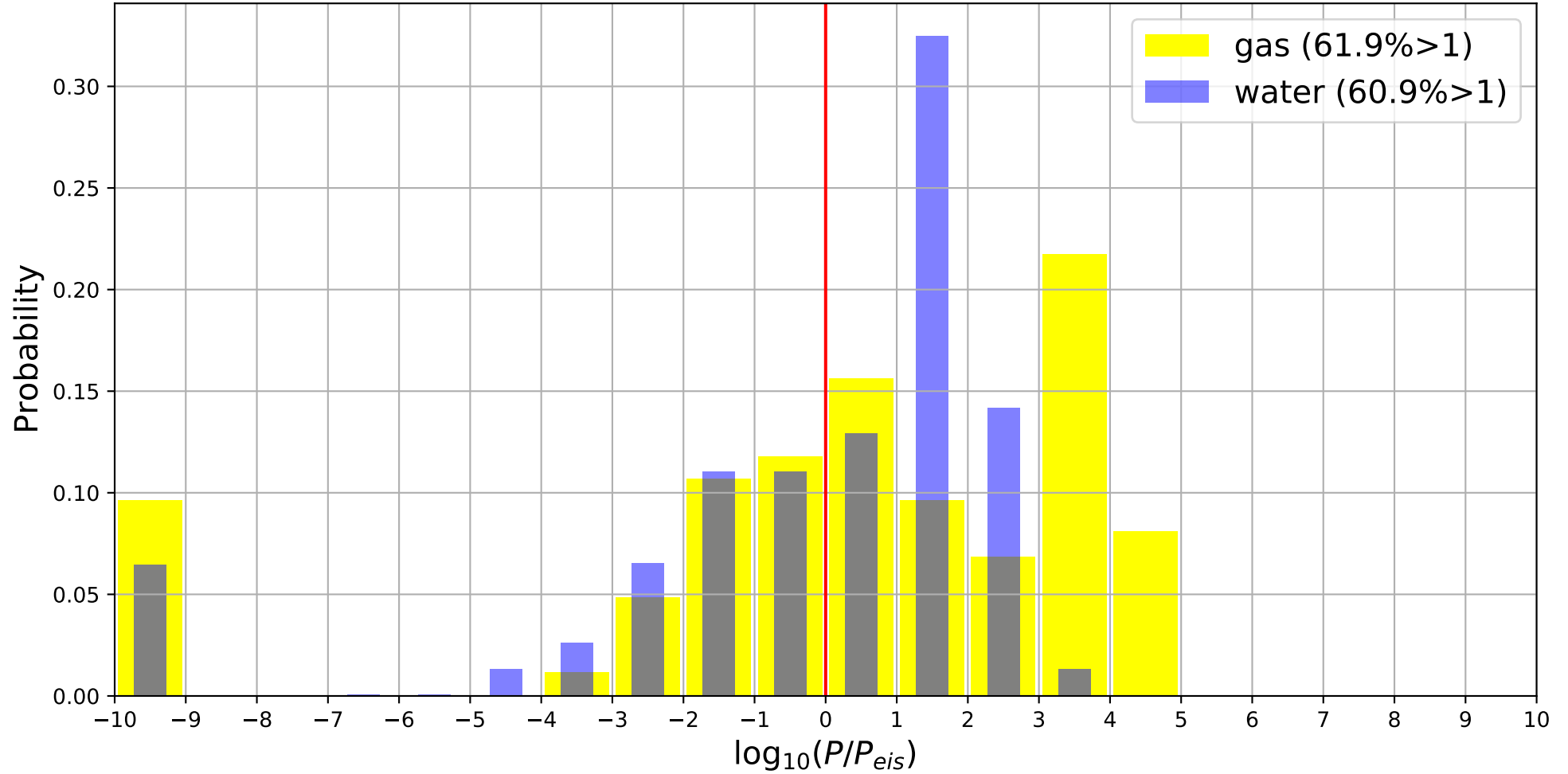
Histogram P_flooding Pipeline material AC



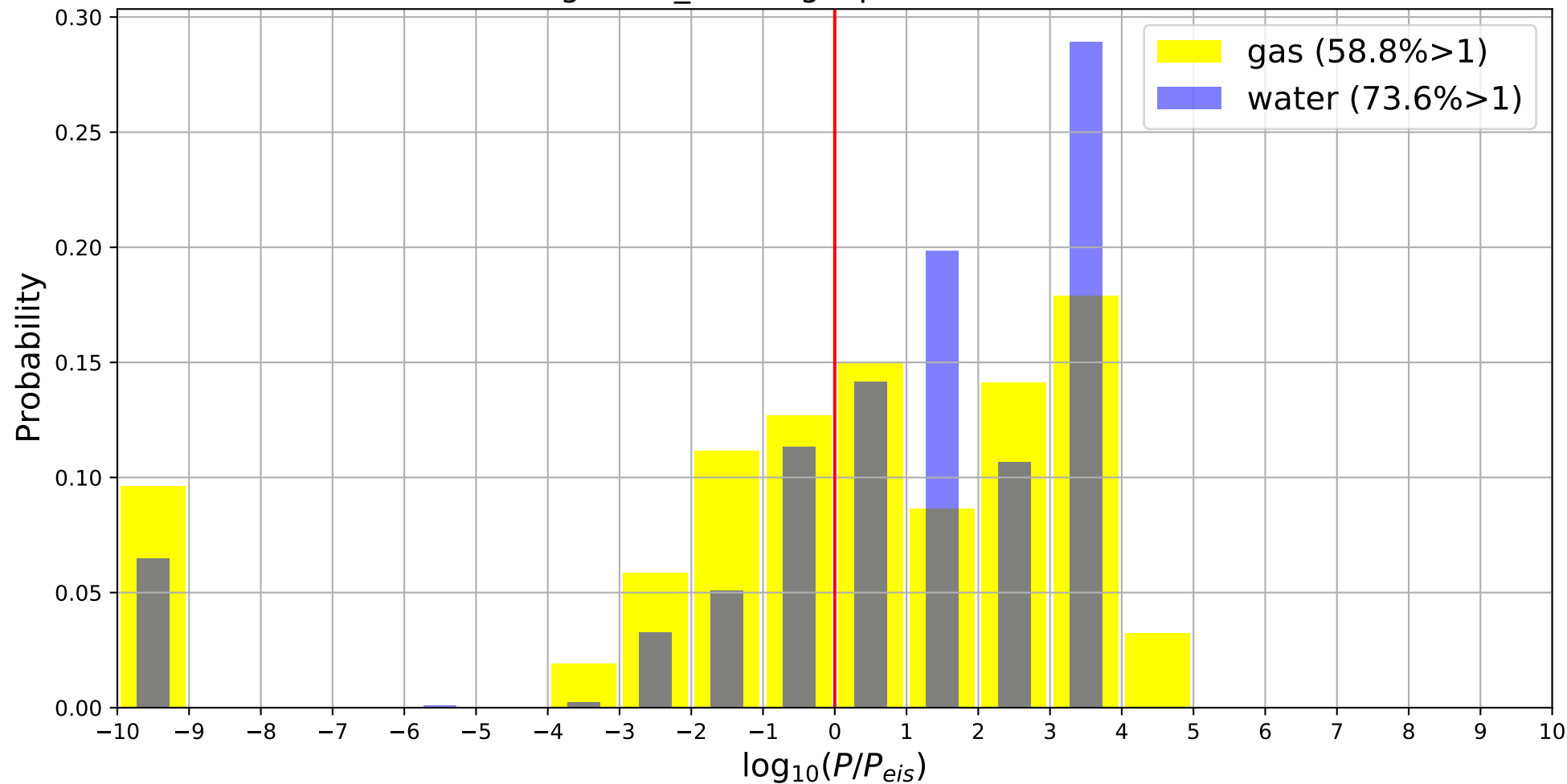
Histogram P_flooding Pipeline material Grijs Gietijzer



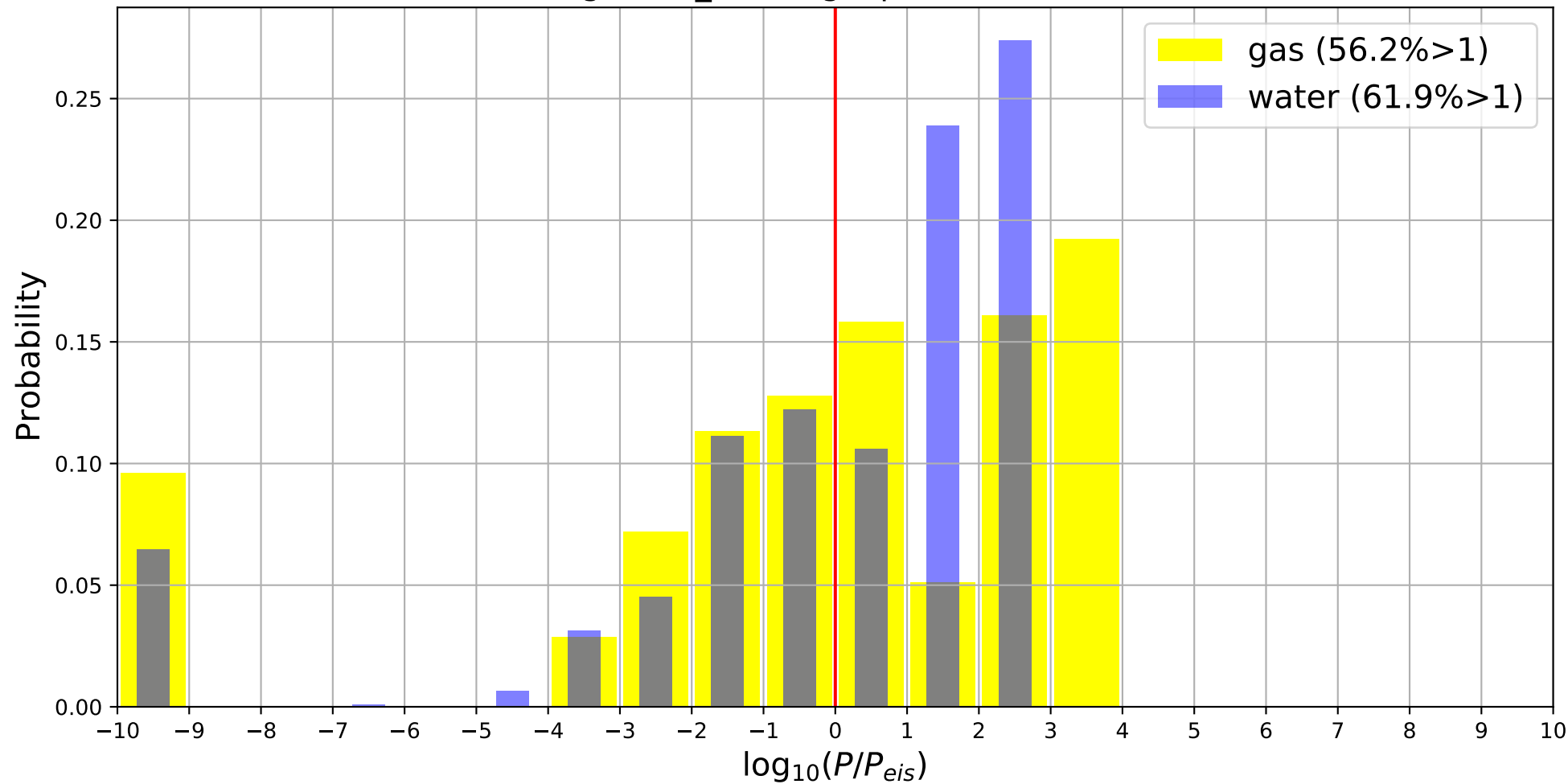
Histogram P_flooding Pipeline material Nodulair Gietijzer



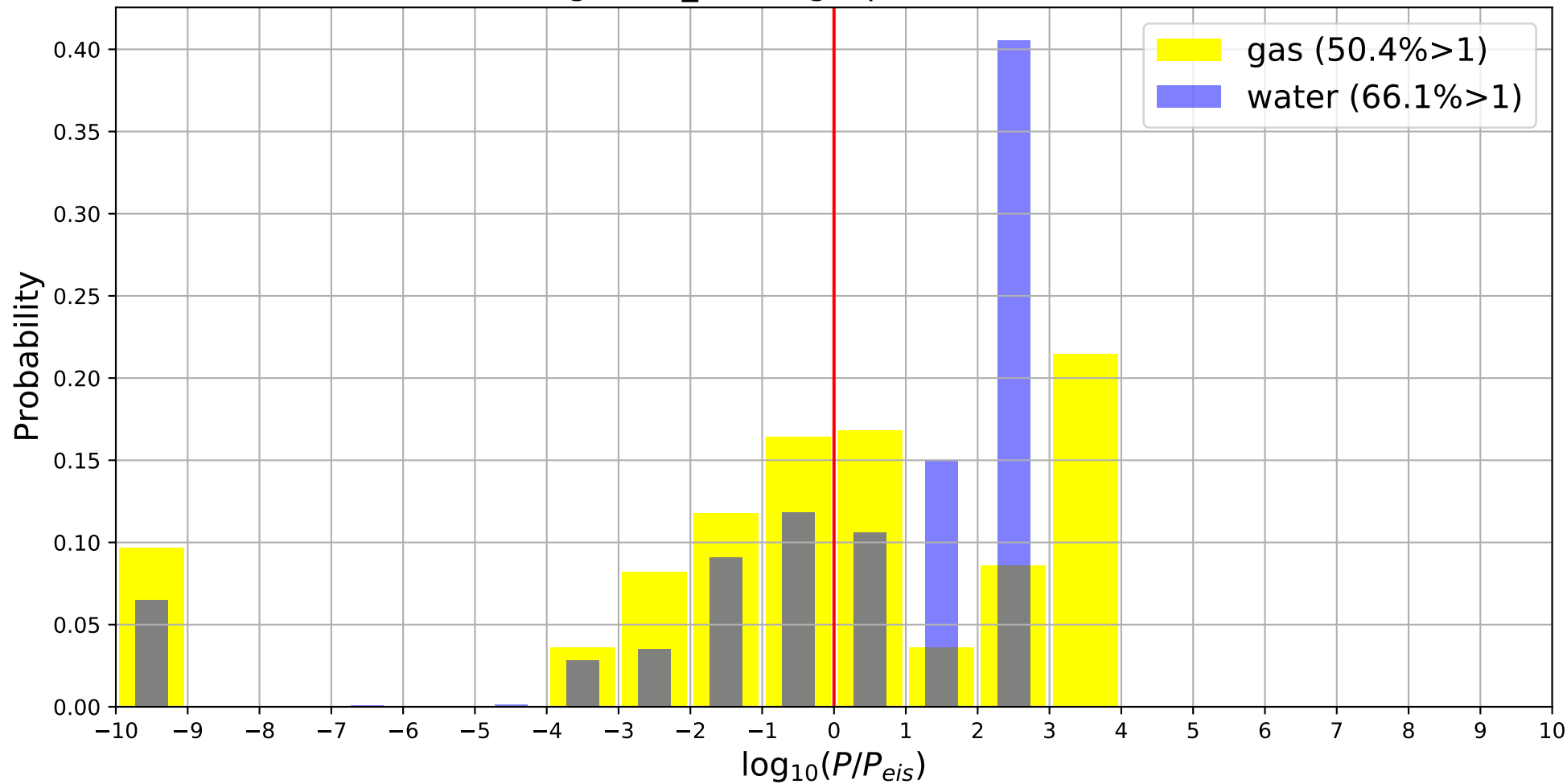
Histogram P_flooding Pipeline material Staal



Histogram P_flooding Pipeline material PE



Histogram P_flooding Pipeline material PVC



Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl

Colofon

Auteur

Geeralt van den Ham | Deltares

Betrokkenen

Arjan Krikke | Waterschap Rivierenland

Eeuwe Schaap | Waterschap Rivierenland

Reviews

Jan Spiekhout | B&B Advisor

Ronald Koets | Waterschap Scheldestromen

Harry Schelfhout | namens Hoogheemraadschap van Delfland

Vaststelling

Stuurgroep POV Kabels & Leidingen