



## Interim methodiek leidingfalen en dijkfalen

Integrale faalkansanalyse kruisingen gastransportleidingen met kistdam in  
kadeversterking Steendam - Tjuchem

22 december 2022 (definitief)

# Colofon

## Auteurs

Harry Schelfhout | Schelfhout Advies  
Jan Spiekhout | B&B Advisor  
Nisa Nurmohamed | Strategische Samenwerking Water- en Netbeheerders

## Inhoudelijke bijdrage specialisten

Dick Mastbergen | Deltares  
Piet Meijers | Deltares  
Marc Dröge | Gasunie

## Reviewers

Bert Bulsink | Provincie Groningen  
René Piek | Provincie Zuid Holland  
Gert Dijkstra, Wim Guijt, Erik Brink, Henk Kruse en Harm Snoeren | Werkgroep 1 Ontwerp  
Henk van Hemert | STOWA  
Marieke Hollebek, Martin Evers, Jan Paul Bras, Luuk Vergeldt  
en Jouke Bokma | Expertisenetwerk Leidingen in Waterstaatswerken  
Robert Slomp | Rijkswaterstaat  
Ruben Jongejan | Jongejan RMC

## Projectgroep

Alexander Kars, Sjaak Vis en Gabriël Rammeloo | Waterschap Hunze en Aa's  
Aat Glas en Paul Kassenberg | Gasunie  
Menno van Os, Derk-Jan Starke en Janny Mulder-Teunissen | Nederlandse Aardolie  
Maatschappij  
Harry Schelfhout | Schelfhout Advies  
Jan Spiekhout | B&B Advisor  
Nisa Nurmohamed | Strategische Samenwerking Water- en Netbeheerders

## Vaststelling door opdrachtgevers

Waterschap Hunze en Aa's, Gasunie en Nederlandse Aardolie Maatschappij

## Voorwoord

Voor u ligt het rapport Interim methodiek leidingfalen en dijkfalen, Integrale faalkansanalyse kruisingen gastransportleidingen met kistdam in kadeversterking Steendam – Tjuchem.

Dit product is tot stand gekomen vanuit de Strategische Samenwerking Water- en Netbeheerders (SSWN), een samenwerking die is voortgevloeid uit de Project Overstijgende Verkenning Kabels & Leidingen (POV K&L, Hoogwaterbeschermingsprogramma, 2017-2020). De SSWN vormt een blijvende verbinding tussen water- en netbeheerders en zet de werkwijze voort van de POV K&L. Hierbij is de behoefte uit de praktijk leidend voor de activiteiten van de SSWN. We begeleiden en faciliteren praktijkcasussen die kunnen worden ingebracht, waarbij we samen met water- en netbeheerders een gedragen oplossing zoeken en de inzet van specifieke experts organiseren. De resultaten vertalen we zoveel mogelijk naar een generieke toepassing. Het overdragen van kennis en expertise behoort eveneens tot onze taken.

Leidingen kunnen falen en hebben dan ook effect op de veiligheid van een waterkering. Het beoordelen van de veiligheid van een waterkering met leidingen vraagt dan ook om een integrale faalkansaanpak waarbij we zowel het gedrag van de leidingen als dat van de waterkering moeten beschouwen en de beïnvloeding daarvan op de faalkans van de waterkering. Dit vraagt om een integrale faalkansbenadering die is gebaseerd op de systematiek van het Veiligheidsraamwerk POV K&L [POV-KL, 2020a], een product van de POV K&L, dat succesvol in de praktijk is toegepast voor een aantal dijkversterkingsprojecten met aanwezige bestaande leidingen bij primaire waterkeringen.

Voor de praktijkcasus Steendam – Tjuchem is de systematiek van het Veiligheidsraamwerk POV K&L voor het eerst toegepast bij een regionale waterkering met kruisende gastransportleidingen en kistdam. Deze systematiek is nog niet algemeen toepasbaar en zal aan de hand van praktijkcasussen nog verder moeten worden ontwikkeld. Voor regionale waterkeringen is een belangrijk extra aandachtspunt dat de vigerende veiligheidsbenadering (nog) niet is gebaseerd op een faalkansaanpak.

Om de gewenste voortgang van de uitvoering van de kadeversterking bij Steendam – Tjuchem niet te hoeven belemmeren is voor de benodigde toepassing van het veiligheidsraamwerk een vereenvoudigde versie ontwikkeld in de vorm van een interim methodiek. De werkwijze van de interim methodiek is van grof naar fijn, waarbij telkens veilige aannamen en inschattingen zijn gedaan. Hierdoor kunnen uitgebreide complexe berekeningen achterwege blijven tegen lagere analysekosten. In essentie maakt een faalkansaanpak ook voor de regionale waterkeringen zichtbaar waar ‘verborgen’ marges aanwezig zijn zodat die verantwoord kunnen worden benut. Dat kan besparingen opleveren. De toepassing van de interim methodiek heeft voor Steendam-Tjuchem geleid tot een significante maatschappelijke kostenbesparing en een toonbeeld van duurzaamheid!

We zijn bijzonder trots op het resultaat wat er nu ligt. Dit was nooit gelukt zonder de constructieve bijdrage van Waterschap Hunze en Aa's, Gasunie en de Nederlandse Aardolie Maatschappij. Zij hebben de ontwikkeling van de interim methodiek samen mogelijk gemaakt, door het advies van de SSWN op te volgen en 2 topexperts van de POV K&L en andere interne en externe experts in te zetten. Met deze interim methodiek is een eerste stap gezet naar een bredere toepassing.

Hierbij willen we dan ook alle betrokkenen hartelijk bedanken voor de open houding, gedrevenheid en inzet om hier een succes van te maken!

Nisa Nurmohamed,

Projectmanager SSWN

**Strategische  
Samenwerking  
Water- en  
Netbeheerders**

## Samenvatting

Bij de planvoorbereiding van de kadeversterking van het traject Steendam-Tjuchem liepen Waterschap Hunze en Aa's, Gasunie en de Nederlandse Aardolie Maatschappij tegen de situatie aan dat ter plaatse van een aantal kruisende gastransportleidingen met kistdam het ontwerp op onderdelen niet voldeed aan de veiligheidseisen volgens de vigerende ontwerpinstrumenten en regelgeving. Dit betrof in belangrijke mate de eisen van NEN 3651 voor de kerende hoogte en de breedte van de kistdammen rond de leidingen. Ten tijde van de aanleg van de leidingkruisingen was de Pijpleidingcode 1972, revisie 2 van toepassing. Waarom deze destijds niet bij de vergunningverlening van het waterschap is betrokken kon niet meer worden achterhaald. In feite zijn de kistdammen destijds ontworpen als bouwkuip en zijn deze niet beoordeeld op basis van de eisen van de Pijpleidingcode (voorloper van NEN 3651). Als gevolg hiervan zouden kostbare maatregelen nodig zijn.

Om het nut en de noodzaak van verhoging en verbreding van de kistdammen te kunnen beoordelen is een faalkansanalyse uitgevoerd op basis van een interim methodiek. Die is gebaseerd op een vereenvoudigde versie van het Veiligheidsraamwerk Kabels & Leidingen, dat door de POV K&L is toegepast in diverse praktijkcasussen voor primaire waterkeringen, en nog niet algemeen toepasbaar is. De vereenvoudigde versie van het Veiligheidsraamwerk K&L met conservatieve, veilige aannames en faalkansschattingen noemen we een interim methodiek die in de praktijk meteen kan worden toegepast. De interim methodiek is in dit project voor het eerst ontwikkeld voor een regionale waterkering. Daarbij wordt de kans berekend op het gecombineerd falen van een gastransportleiding en een kistdam. Een extra aandachtspunt vormt de vigerende veiligheidsbenadering van de regionale waterkeringen die (nog) niet is gebaseerd op een faalkansaanpak op basis van overstromingskansen van normtrajecten.

Na het verzamelen van alle voor de faalkansanalyse benodigde basisgegevens van de leidingen, de kistdammen en waterkering, kan de interim methodiek worden toegepast. Daarbij is de werkwijze van grof naar fijn, met gebruikmaking van bestaande kennis (rekenmethoden en rekenregels). Indien nodig wordt de bestaande kennis aangevuld met nieuwe kennis, die voor primaire waterkeringen is ontwikkeld in de POV K&L, waarbij dan ook nog een vertaling nodig is voor toepassing bij regionale waterkeringen. Bij toepassing van de interim methodiek worden achtereenvolgens de volgende stappen doorlopen:

- Leidingfalen: kenmerken, conditie/kwaliteit, faaloorzaken/-manieren, faalkans leiding en verstoringszones.
- Hydraulische belastingen: overschrijdingskansen van buitenwaterstanden en de kans op herstel.
- Kistdamfalen (dijkfalen): kenmerken en faalkans kistdam.
- Veiligheidszone: stabiliteits-/pipingzone en verstoringszone.
- Interactie leidingfalen ↔ kistdamfalen: conditionele faalkans (kans op falen kistdam, gegeven faalkanskans leiding) en additionele faalkans: extra kansbijdrage van kistdamfalen, gegeven leidingfalen aan kans op falen waterkering.

De interim methodiek is gebaseerd op globale faalkansanalyses, waarbij wordt uitgegaan van conservatieve, veilige aannames. Daarbij wordt voor de regionale waterkeringen gebruik gemaakt van semi-probabilistische rekenresultaten op basis van de vigerende ontwerpinstrumenten, die worden doorvertaald naar faalkansschattingen. De onderliggende veiligheidsbenadering is bij regionale waterkeringen gebaseerd op een probabilistisch model, dat ook bij primaire waterkeringen wordt toegepast. Dit betekent dat de filosofie achter de veiligheidsbenadering voor primaire en regionale waterkeringen dezelfde is, maar dat de uitwerking daarvan verschillend is.

Bij een primaire waterkering moet de additionele faalkans voldoen aan de vereiste faalkans van het normtraject. Voor regionale waterkeringen is geen normtraject beschikbaar en ook geen vereiste

faalkans op normtrajectniveau. De veiligheidsnormen en ontwerpinstrumenten voor regionale waterkeringen zijn representatief voor het veilig kunnen keren van een hoge waterstand met een bepaalde overschrijdingsfrequentie in een dijkvak (dijkvakbenadering).

De veiligheidsbenadering van regionale waterkeringen wijkt af van die van primaire waterkeringen, waarbij wordt uitgegaan van overstromingskansen per normtraject en ook rekening wordt gehouden met de invloed van lengte-effecten van de dijkfaalmechanismen en het aantal (waterkerende en niet-waterkerende) objecten in het normtraject. De lengte van het normtraject is voor primaire waterkeringen afgeleid op basis van overstromingsberekeningen. Voor regionale waterkeringen bestaan de vigerende ontwerpinstrumenten uit verschillende leidraden van de Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA), waarin soms wordt doorverwezen naar de ontwerpinstrumenten voor primaire waterkeringen.

Voor toepassing van de interim methodiek bij een regionale waterkering is een faalkanseis nodig voor de beoordeling van de kans op een overstroming door het falen van de beschouwde leiding. Om hiertoe te komen is gekozen voor een aanpak die lijkt op de huidige praktijk bij primaire keringen. Het startpunt daarvan is een 'normtraject' en een faalkanseis voor dit normtraject. Voor het normtraject is bij de kadeversterking Steendam-Tjuchem gekozen voor de totale lengte van de boezemkade langs de beschouwde polder, voor het gedeelte langs de Duurswoldboezem dat langs het afwateringskanaal ligt. Deze lengte en de daarin aanwezige leidingkruisingen zijn in overleg met het waterschap en de leidingbeheerders bepaald.

De vereiste kans op falen van het gekozen normtraject voor de kadeversterking Steendam-Tjuchem is conform het rapport [STOWA, 2020 gelijkgesteld aan de overschrijdingsfrequentie volgens de norm, maal een factor 0,2. Deze factor is afkomstig uit [IPO, 1999] en "gefit" op het voorkomen van trendbreuk en is representatief voor een dijkdoorsnede en betreft een afkeurgrens.

Op basis van de uitgevoerde faalkansanalyses kan worden geconcludeerd dat de additionele faalkans van elke beschouwde leidingkruising met kistdam ruimschoots voldoet aan de faalkanseis, die op 0,1% van de toelaatbare faalkans van het normtraject is gesteld.

**Bepaling faalkanseis:**

- 1) Norm = overschrijdingsfrequentie MBP =  $1,0 \times 10^{-2}$  per jaar
- 2) Toelaatbare faalkans normtraject =  $0,2 \times \text{norm} = 2,0 \times 10^{-3}$  per jaar
- 3) Toelaatbare faalkans alle leidingkruisingen in normtraject = 1% van  $0,2 \times \text{norm} = 2,0 \times 10^{-5}$  per jaar
- 4) Aantal leidingkruisingen in normtraject =  $N_{\text{PL-KR}} = 10$  stuks
- 5) Faalkanseis per individuele leidingkruising = 1% van  $0,2 \times \text{norm} / N_{\text{PL-KR}} = 2,0 \times 10^{-6}$  per jaar

Dit is een arbitraire keuze. Door 1% van de toelaatbare faalkans te reserveren voor alle leidingkruisingen resteert er nog 9% voor 'overige mechanismen'. Het eindresultaat is dat de aanwezigheid van de kistdammen minstens een factor 1700 kleinere faalkans oplevert en dat de kans op verweking bij leidingfalen en aardbevingen kan worden verwaarloosd.

Bij de faalkansanalyse is een aantal verbeterpunten voor de werkwijze naar voren gekomen, zoals:

- 1) Toepassing van de standaard Bevb-correctiefactoren op de faalfrequenties van de leiding. Daarmee kan mogelijk al worden voldaan aan de faalkanseis en zou er geen faalkansanalyse nodig zijn. De Bevb-factoren zijn afgeleid op basis van faalkansen en gelden voornamelijk voor veldstrekkingen en niet specifiek voor kruisingen, alhoewel sommige factoren zoals bijvoorbeeld de wanddikte ook voor kruisingen relevant zijn. Aanbevolen wordt om daarvoor een specifieke set reductiefactoren te ontwikkelen en nader onderzoek te doen naar de analyse van faalkansen van leidingkruisingen specifiek en de consequenties van dijkfalen ten gevolge van leidingfalen. Ten tijde van de aanleg van de leidingkruisingen was de Pijpleidingcode 1972,

revisie 2 van toepassing. Waarom deze destijds niet bij de vergunningverlening van het waterschap is betrokken kon niet meer worden achterhaald.

- 2) Controle vooraf met de reguliere rekenregels van de faalmechanismen van de kistdam (waterkering), gegeven leidingfalen. Als de kistdam in deze situatie voldoet aan de huidige rekenregels is er geen faalkansanalyse nodig.
- 3) De kans op falen van de sterkte van de kistdammen is globaal ingeschat. Deze kunnen nader worden bepaald met specifieke software, zoals bijvoorbeeld D-Sheetpiling of gelijkwaardig.
- 4) Voor het falen van de sterkte van de kistdammen is conform NEN 3651, 2012 gebruik gemaakt van rekenregels uit de Eurocode, die representatief zijn voor een referentieperiode van 50 jaar. Voor regionale waterkeringen wordt uitgegaan van een referentieperiode van 1 jaar, zodat een vertaalslag nodig. Dat is echter geen gemakkelijke kwestie omdat de kans op falen niet van jaar op jaar hetzelfde is vanwege onder andere verouderingsprocessen en correlaties in het tijdsdomein. Omdat daarvoor rekenregels ontbreken is als veilige, conservatieve aanname de jaarkans gelijkgesteld aan levensduurkans (50-jaars-kans). Aanbevolen wordt om 8.1.7.1 Damwandconstructie van NEN 3651 aan te passen en rekenregels te ontwikkelen voor de omrekening van levensduurkansen naar jaarkansen en vice versa.
- 5) De vereenvoudigde formule van Bijlage A van NEN 3651 voor de berekening van de erosiekrater bij leidingfalen levert onrealistisch grote afmetingen op. Aanscherping daarvan levert een reductie van de berekende kraterlengte met minimaal een factor 2 op. NEN 3651 biedt daar de mogelijkheid voor. Aanbevolen wordt om daarvoor meer realistische rekenregels op te nemen in bijlage A van NEN 3651.
- 6) De voor de leidingen toegepaste faalfrequenties zijn representatief voor veldstrekkingen in Europa. Naar verwachting zijn die voor leidingen in waterkeringen een orde kleiner. Als er voldoende faalgevallen in dijken of vergelijkbare situaties beschikbaar zijn loont het de moeite om daarvoor een aparte database van leidingincidenten ter plaatse van kruisingen en/of waterkeringen te maken. Aanbevolen wordt om dit te combineren met een nadere analyse van de bruikbaarheid van bestaande databases.

Vanuit efficiëntie en economische overwegingen wordt aanbevolen om deze verbeterpunten ook in deze volgorde aan te pakken. Verder is bij de uitvoering van het project aandacht nodig voor het aanvulmateriaal in verband met optredende zettingen en voorkomen van opdrijven en de controle van de aanwezigheid van een kleikist ter plaatse van de doorvoer van de leidingkruisingen door de damwand.

Ten tijde van de aanleg van de leidingkruisingen was de Pijpleidingcode 1972, revisie 2 van toepassing. Waarom deze destijds niet bij de vergunningverlening van het waterschap is betrokken kon niet meer worden achterhaald. De toepassing van de interim methodiek in de kadeversterking Steendam - Tjuchem is kansrijk gebleken. Nieuwe beschikbare kennis, opgeleverd door de POV K&L (2017-2020) is toegepast bij een regionale waterkering. De benodigde inspanning hiervoor is de investering zeker waard geweest. De kadeversterking kan daardoor sneller, beter en goedkoper worden uitgevoerd.

# Inhoud

1.	Inleiding .....	10
1.1	Kader .....	10
1.2	Uitgangspunten .....	12
1.3	Aanpak .....	13
2.	Situatie en dwarsprofielen .....	15
3.	Faalkanseisen .....	17
4.	Review ontwerpdocumenten .....	20
5.	Toepassing interim methodiek .....	20
5.1	Leidingfalen.....	21
5.1.1	Kenmerken leidingen .....	21
5.1.2	Conditie leidingen en materiaalkwaliteit .....	21
5.1.3	Faaloorzaken.....	22
5.1.4	Faalmanieren.....	22
5.1.5	Faalfrequenties van leidingen .....	22
5.1.6	Invloed van aardbevingen .....	23
5.1.7	Invloed van verweking van de zandlagen.....	24
5.1.8	Correctiefactoren Bevb .....	24
5.1.9	Verstoringszones .....	25
5.2	Hydraulische belastingen .....	26
5.2.1	Overlopen .....	26
5.2.2	Overslag.....	27
5.2.3	Herstel vóór hoogwater .....	27
5.3	Kistdamfalen .....	28
5.3.1	Kenmerken kistdammen .....	28
5.3.2	Faalkans kistdammen.....	28
5.4	Veiligheidszone en centrale zone .....	33
5.5	Interactie tussen leidingfalen en kistdamfalen .....	33
6.	Toetsing van additionele faalkans aan faalkanseis .....	34
7.	Conclusies en aanbevelingen .....	35
7.1	Conclusies .....	35
7.2	Aanbevelingen .....	36
8.	Referenties .....	37

## Bijlagen

- Bijlage 1: Situatie en dwarsprofielen
- Bijlage 2: Resultaten review ontwerpdocumenten
- Bijlage 3: Conditieverklaringen en materiaalkwaliteit
- Bijlage 4: Controle verwekingsgevoeligheid zandlagen
- Bijlage 5: Kraterberekeningen
- Bijlage 6: Controle onder-/achterloopsheid kistdammen
- Bijlage 7: Faalpaden en gebeurtenissenbomen

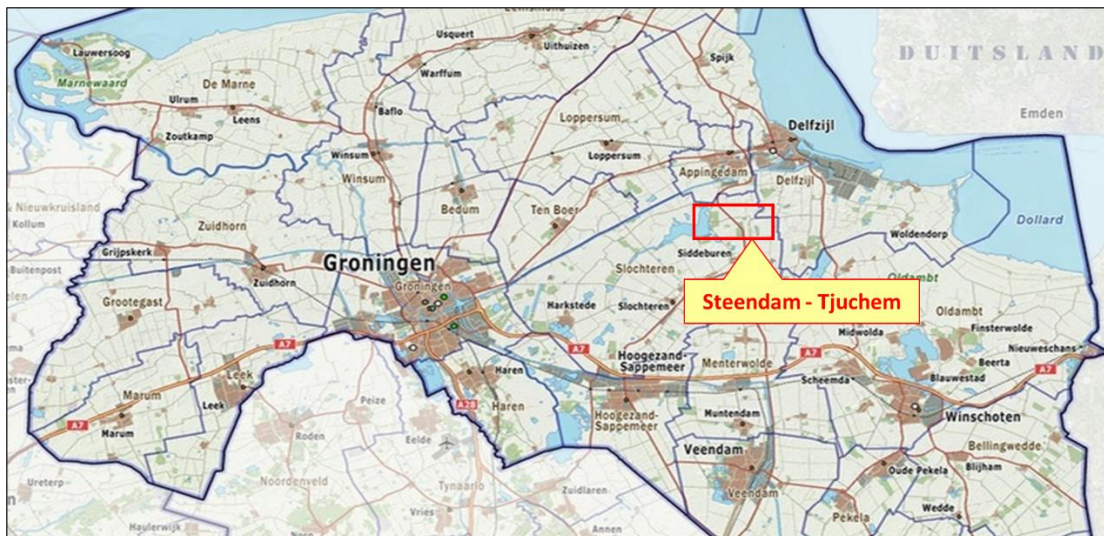
## 1. Inleiding

Bij de planvoorbereiding van de kadeversterking van het traject Steendam-Tjuchem liepen het Waterschap Hunze en Aa's, de Gasunie en de Nederlandse Aardolie Maatschappij tegen de situatie aan dat ter plaatse van een aantal kruisende gastransportleidingen met kistdam het ontwerp op onderdelen niet voldeed aan de veiligheidseisen volgens de huidige ontwerpinstrumenten en regelgeving. Dit betrof in belangrijke mate de eisen van NEN 3651 voor de kerende hoogte en de breedte van de kistdammen rond de leidingen. Ten tijde van de aanleg van de leidingkruisingen was de Pijpleidingcode 1972, revisie 2 van toepassing. Waarom deze destijds niet bij de vergunningverlening van het waterschap is betrokken kon niet meer worden achterhaald. In feite zijn de kistdammen destijds ontworpen als bouwkuip en zijn deze niet beoordeeld op basis van de eisen van Pijpleidingcode (voorloper van NEN 3651). Als gevolg hiervan zouden kostbare maatregelen nodig zijn.

Onder de vlag van de SSWN (Strategische Samenwerking Water- en Netbeheerders) zijn de 3 partijen gezamenlijk aan de slag gegaan met deze praktijkcasus, vanuit de behoefte om tot een gedragen oplossing te komen. Daarbij kon nieuwe kennis worden benut, die in de POV K&L (Project Overstijgende Verkenning K&L, 2017-2020) is ontwikkeld. De SSWN zet het werk voort van de POV K&L. In de SSWN zijn zowel waterbeheerders als netbeheerders vertegenwoordigd. Als projectmanager SSWN heeft Nisa Nurmohamed zich ingezet om de betrokken partijen (inhoudelijk) te verbinden. Met als hoofddoel om gezamenlijk tot een oplossing te komen van het geconstateerde veiligheidsprobleem, tegen de laagst mogelijke maatschappelijke kosten. Daarbij heeft zij er ook voor gezorgd dat de juiste expertise is ingezet.

### 1.1 Kader

De ligging van het kadeversterkingstraject Steendam – Tjuchem is weergegeven op de volgende overzichtskaart.



Figuur 1.1: Ligging versterkingstraject boezemkade Steendam – Tjuchem.

Informatie over de bestaande situatie en de dwarsprofielen van de leidingenkruisingen staat in *Bijlage 1: Situatie en dwarsprofielen*.

De leidingkruisingen zijn in eerste instantie beschouwd op basis van de vigerende ontwerpinstrumenten, zoals vastgelegd in de huidige wet- en regelgeving, normen en richtlijnen voor regionale waterkeringen en de NEN-norm voor buisleidingen [NEN, 2020]. Deze instrumenten zijn gebaseerd op een overschrijdingskansen in de doorsnede van een dijkvak of object en toepassing van overall of partiële veiligheidsfactoren. Daartoe is door de auteurs een review uitgevoerd op de ontwerpdocumenten die

in opdracht van het Waterschap waren opgesteld. De resultaten van de review zijn verwerkt in *Bijlage 2: Resultaten review ontwerpdocumenten*. Daarin is geconcludeerd dat de leidingen nog niet helemaal voldeden aan de huidige ontwerpisen van NEN 3651 en dat de kistdammen (waterkering) daarom zouden moeten worden verhoogd en verbreed.

De opdrachtgevers (Waterschap Hunze en Aa's, Gasunie en Nederlandse Aardolie Maatschappij) hebben vervolgens besloten om een integrale faalkansanalyse te laten uitvoeren over de invloed van het falen van de gastransportleidingen en de bijbehorende kistdammen met als doel om na te gaan of op basis daarvan de leidingkruisingen zonder ingrijpende en kostbare maatregelen toch veilig kunnen worden ingepast. De NEN 3650 reeks [NEN, 2020] biedt daar ook de mogelijkheid voor middels van het uitvoeren van een risicoanalyse.

Voor een integrale faalkansanalyse van leidingfalen en kistdamfalen (dijkfalen) is gebruik gemaakt van de systematiek van het Veiligheidsraamwerk K&L, dat in het kader van de POV K&L is ontwikkeld voor primaire waterkeringen aan de hand van praktijkcasussen en projectgebonden adviezen. De systematiek van het Veiligheidsraamwerk K&L wordt beschreven in het rapport 'Veiligheidsraamwerk POV K&L' [POV K&L, 2020a]. Omdat deze systematiek nog witte vlekken heeft en nog niet algemeen toepasbaar is, is verdere doorontwikkeling daarvan noodzakelijk. Meer informatie daarover is te vinden in het rapport 'Doorontwikkeling Veiligheidsraamwerk POV K&L' [POV K&L, 2020b].

Binnen de tijdsdruk van de reeds opgestarte planvoorbereiding van de kadeversterking Steendam-Tjuchem is de keuze gemaakt om alleen gebruik te maken van beschikbare kennis, ook al is die nog relatief nieuw. De systematiek van het Veiligheidsraamwerk K&L is complex, onvolledig en nog niet algemeen toepasbaar. Daarom is in de vorm van een interim methodiek, een vereenvoudigde toepassing van het Veiligheidsraamwerk K&L uitgewerkt, die nu kan worden toegepast met een werkwijze van grof naar fijn.

Voor regionale waterkeringen is de systematiek van het Veiligheidsraamwerk K&L nog niet eerder toegepast. De huidige veiligheidsbenadering voor regionale waterkeringen (overschrijdingskans per dijkvak) leent zich in principe niet goed voor de systematiek van het Veiligheidsraamwerk K&L, die is ontwikkeld voor primaire waterkeringen (overstromingskans per normtraject). Om de integrale faalkansanalyse voor Steendam - Tjuchem toch mogelijk te maken hebben we gebruik gemaakt van conservatieve, veilige aannames en faalkansschattingen, zoveel mogelijk gebaseerd op reeds uitgevoerd werk (opbrengst POV K&L) en waar nodig aangevuld met specialistische expertkennis.

De vereenvoudigde toepassing van het Veiligheidsraamwerk K&L met conservatieve, veilige aannames en faalkansschattingen noemen we een interim methodiek die in de praktijk meteen kan worden toegepast. De interim methodiek biedt met maatwerk een oplossing zolang er nog geen compleet en algemeen toepasbaar Veiligheidsraamwerk K&L beschikbaar is. De maatwerkoplossing kan gezien worden als een tijdelijke verantwoorde werkwijze. De interim methodiek sluit aan bij een door de POV K&L opgesteld projectgebonden advies over het ontwerp van een persleidingkruising met een bijbehorende damwandconstructie in een primaire waterkering langs de Waal. Het ontwerp van de damwand voldeed daar niet aan de eisen van NEN 3651 [NEN, 2020f], en zou daarom met enkele meters moeten worden verhoogd. Echter, op basis van maatwerk volgens een interim methodiek bleek de faalkans van de damwand zonder verhoging te voldoen aan de faalkanseis. Meer informatie daarover is te vinden in het daarover opgestelde projectgebonden advies [POV KL, 2020c].

Voor regionale waterkeringen betekent de interim methodiek ook een eerste voorzichtige stap op weg naar een mogelijk toekomstige overstromingskansbenadering. De specifieke situatie waarvoor we de interim methodiek voor Steendam - Tjuchem uitwerken betreft een regionale waterkering (boezemkade) met kruisende gastransportleidingen.

De essentie van de interim methodiek voor de kadeversterking Steendam - Tjuchem houdt in dat er een verbinding wordt gelegd tussen leidingfalen in combinatie met kistdamfalen (dijkfalen) en de vigerende veiligheidseisen voor de regionale waterkering. Hiermee kan het effect van leidingfalen op de veiligheid van de regionale waterkering worden gekwantificeerd. De interim methodiek maakt verder zichtbaar welke ‘verborgen’ marges aanwezig zijn en verantwoord kunnen worden benut, binnen de vigerende toets- en ontwerpinstrumenten en wet- en regelgeving, zowel voor de regionale waterkering als voor de leidingkruisingen. Onnodige maatregelen kunnen daarmee worden voorkomen met als gevolg dat tijd en geld wordt bespaard.

## 1.2 Uitgangspunten

Met de interim methodiek voeren we op vereenvoudigde wijze een integrale faalkansanalyse uit voor de kadeversterking Steendam-Tjuchem. We passen de systematiek van het Veiligheidsraamwerk K&L toe, waarbij ook nog een vertaling nodig is voor toepassing bij regionale waterkeringen. Daarvoor zijn onder andere getalswaarden nodig voor de lengte van het normtraject, de faalkanseis van het normtraject en de faalkanseis voor leidingfalen in combinatie met kistdamfalen (dijkfalen). Binnen de vigerende overschrijdingskansbenadering per dijkvak voor regionale waterkeringen zijn deze getalswaarden niet direct beschikbaar.

De volgende uitgangspunten zijn gehanteerd om tot conservatieve, veilige aannames en faalkansschattingen te komen.

- De huidige veiligheidsbenadering voor de regionale waterkeringen met de bijbehorende gehanteerde verdeling van de faalkansruimte (zie hoofdstuk 3) vormt de basis voor de te hanteren faalkanseis voor leidingfalen in combinatie met kistdamfalen (dijkfalen). Voor achtergronden van de huidige veiligheidsbenadering van regionale waterkeringen zie [STOWA, 2020].
- We kiezen als trajectnorm (vereist veiligheidsniveau) voor toepassing van de interim methodiek  $0,2 \times$  de getalswaarde van de huidige norm ( $=1/100$  per jaar = overschrijdingskans per dijkvak) van de regionale waterkering (zie hoofdstuk 3).
- We kiezen als trajectlengte voor toepassing van de interim methodiek voor de lengte van het normtraject, waar het kadeversterkingstraject onderdeel van is (zie hoofdstuk 3). Dit sluit aan bij de werkwijze voor primaire waterkeringen.
- We beschouwen de kistdam als waterkering in het geval dat de leiding faalt. Hiermee is de interactie tussen leidingfalen en kistdamfalen geschematiseerd als interactie tussen leidingfalen en dijkfalen.
- We beschouwen leidingfalen in combinatie met kistdamfalen als een faalmechanisme dat direct tot overstrooming kan leiden. In de POV K&L is dit benoemd als Optie 1: Falen NWO (Niet Waterkerend Object) als direct faalmechanisme (voor meer info zie [POV-KL, 2020a]). Dit uitgangspunt biedt de mogelijkheid om een faalkanseis te kunnen afleiden voor de combinatie van het falen van een leiding en een kistdam (als onderdeel van het NWO) voor een regionale waterkering (binnen de beschikbare faalkansruimte waar de NWO's onder vallen). We kunnen de faalkansverdeling van de diverse dijkfaalmechanismen dan buiten beschouwing laten. Bij de primaire waterkeringen bestaat ook de optie om een NWO als indirect faalmechanisme te beschouwen (Optie 2 in de POV K&L), waarbij wel een faalkansverdeling van de dijkfaalmechanismen nodig is. Voor de casus Steendam – Tjuchem is in navolging van de POV K&L uitgegaan van Optie 1 en is Optie 2, verder buiten beschouwing gelaten.
- We kiezen 1% van de maximaal toelaatbare kans op falen regionale waterkering ( $= 0,2$  maal de huidige norm als overschrijdingskans) als faalkanseis voor alle leidingkruisingen tezamen. Dit past binnen de beschikbare 10% voor falen door ‘overige mechanismen’ zoals in de verdeling

wordt gehanteerd bij regionale waterkeringen (zie hoofdstuk 3). De NWO's zijn onderdeel van de 'overige mechanismen'.

- Conform de systematiek van het Veiligheidsraamwerk K&L houden we rekening met alle leidingkruisingen in het gehele normtraject. Dit betekent dat de gekozen faalkanseis van 1% geldt voor het totaal aantal leidingkruisingen. Zodoende resteert er nog 9% voor de overige mechanismen. De faalkanseis per individuele leidingkruising wordt verkregen door 1% te delen door het aantal in het normtraject aanwezige leidingkruisingen.
- De faalkansen van de leidingen worden bepaald op basis van Europese statistiek van leidingincidenten van gastransportleidingen en een vertaalslag van beschikbare (semi-probabilistische) berekeningen op basis van partiële veiligheidsfactoren.

### 1.3 Aanpak

De werkwijze van de interim methodiek is van grof naar fijn en wordt gebaseerd op faalkansanalyses van de interactie tussen leidingfalen en kistdamfalen. De interim methodiek levert als resultaat op wat de bijdrage is van leidingfalen op de faalkans van de waterkering. Deze bijdrage wordt de additionele faalkans genoemd en moet voldoen aan de gestelde faalkanseis in het normtraject voor het falen van een NWO als direct faalmechanisme.

Voor de kadeversterking Steendam - Tjuchem is de interim methodiek voor het eerst toegepast bij kruisingen van gastransportleidingen met kistdam in een regionale waterkering. De gehanteerde werkwijze kan in principe ook worden toegepast bij kruisingen van gastransportleidingen zonder een kistdam of met een andere damwandwandconstructie. In dat geval zal in de uitwerking rekening moeten worden gehouden met andere bijkomende aspecten.

Op hoofdlijn worden achtereenvolgens de onderstaande stappen doorlopen.

#### Stap 1. Verzamelen gegevens

Om de kans op leidingfalen en de kans op kistdamfalen te kunnen bepalen is een compleet leidingen-, kistdam- en waterkeringdossier nodig met een aantal specifieke gegevens en kenmerken van de gastransportleidingen, de kistdammen en de waterkering. De kistdam is in feite een onderdeel van de waterkering, maar verzorgt de waterkerende functie in het geval dat de leiding faalt. Vandaar dat de kistdam expliciet apart wordt vermeld.

#### Stap 2. Leidingfalen

Op basis van de verzamelde leidinggegevens wordt een overzicht gemaakt van de kenmerkende gegevens, die essentieel zijn voor de bepaling van de kans op leidingfalen.

#### Stap 3. Hydraulische belastingen

Inzicht is nodig in normale, dagelijks voorkomende waterstanden (streefpeilen) en extreme waterstanden (maatgevend hoogwater of maatgevend boezempeil). Op basis daarvan kan, rekening houdend met een onzekerheidsmarge, de benodigde overschrijdingsfrequentie van de buitenwaterstand worden bepaald.

#### Stap 4. Kistdamfalen

De kistdam vormt de waterkering in het geval dat de leiding faalt. De strekkingslengte van de kistdammen is dusdanig klein dat deze zijn te beschouwen als een puntconstructie. Bij het bepalen van de faalkans van de kistdam worden de volgende aspecten behandeld: Overlopen/overslag, Sterkte constructie-onderdelen, Macro-instabiliteit en Onder-/achterloopsheid.

#### Stap 5. Veiligheidszone en centrale zone

De afmeting van de veiligheidszone is van belang om de bijdrage van leidingfalen (faalkans per strekkende meter leiding) over de veiligheidszones en de centrale zone te kunnen kwantificeren.

Hiermee wordt de leidingfaalkans op doorsnedeniveau geschematiseerd. In NEN 3651 [NEN, 2020f] staan rekenregels voor de bepaling van de veiligheidszone, waarbij beperkingen gelden en niet alle dijkfaalmechanismen zijn meegenomen. In de interim methodiek is een aangepaste veiligheidszone bepaald, waaraan een centrale zone in de kern van waterkering is toegevoegd.

#### Stap 6. Interactie leidingfalen ↔ kistdamfalen

In deze stap worden de kans op leidingfalen en de kans op kistdamfalen met elkaar gecombineerd tot een additionele faalkans. Het combineren van de faalkansen geschiedt met behulp van faalpaden/-scenario's en gebeurtenissenbomen.

#### Stap 7. Additionele faalkans

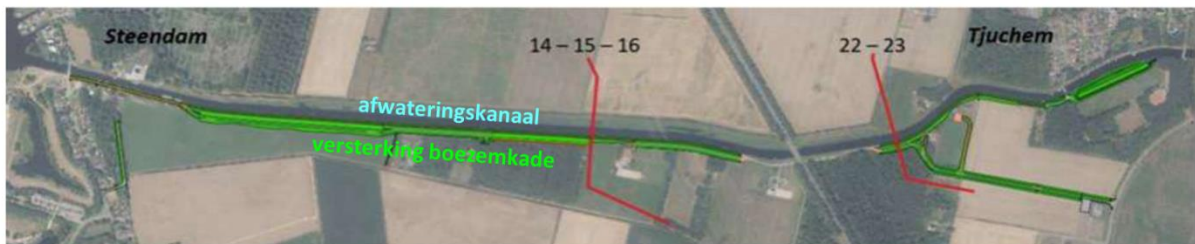
De additionele faalkans kan worden getoetst aan de gestelde faalkanseis voor het falen van een NWO volgens Optie 1.

De bovengenoemde 7 stappen resulteren in faalkansen van de leiding en van de kistdam, die met elkaar worden gecombineerd tot een additionele kans op falen van de waterkering. In de volgende hoofdstukken worden deze stappen nader toegelicht.

Van het voorliggende rapport is het concept ter review voorgelegd aan een breed aantal vertegenwoordigers vanuit verschillende instanties (zie Colofon). Hun inbreng is meegenomen bij het opstellen van het voorliggende document.

## 2. Situatie en dwarsprofielen

De ligging van de leidingkruisingen in het kadeversterkingstraject is weergegeven in de volgende figuren:



Leidingkruisingen NAM:

- nrs. 14, 15, 22 en 23 zijn 36" gastransportleidingen (faalkansanalyse nodig)
- nr. 16 is 4" condensaatleiding (wordt buiten beschouwing gelaten)

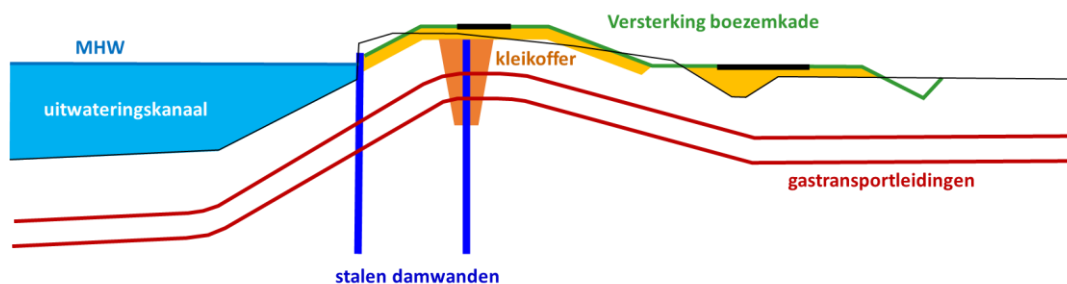


Leidingkruisingen Gasunie:

- nr. 20 is 48" is gastransportleiding (faalkansanalyse nodig)
- nr. 21 is 42" is gastransportleiding (faalkansanalyse nodig)

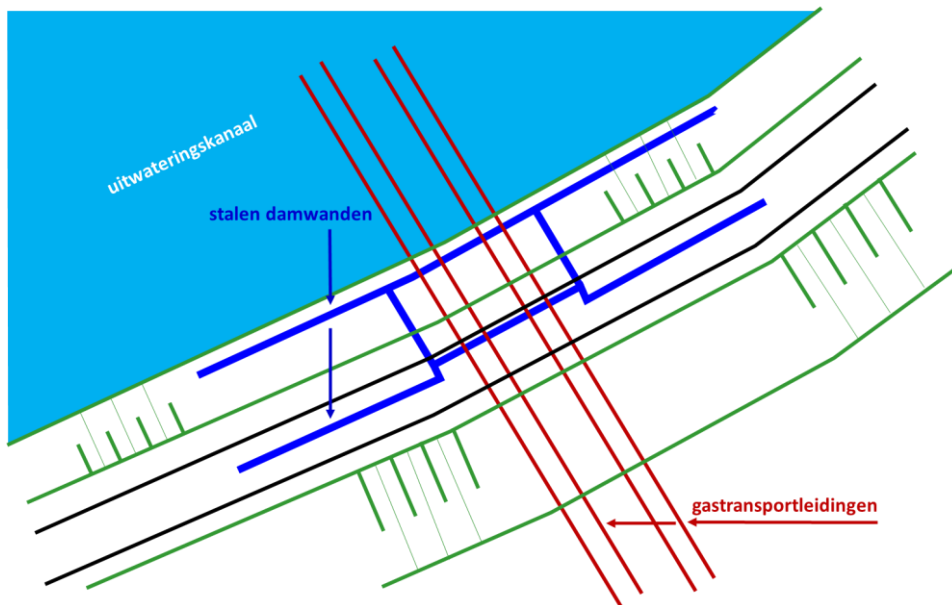
*Figuur 2.1: Ligging van de leidingkruisingen met een kistdam.*

De leidingen 14-15-16, 20-23 en 20-21, kruisen de kade in één kistdam. Leiding 16 wordt buiten beschouwing gelaten, maar kan wel een faalkansbijdrage leveren aan leidingfalen. Daarom is bij de bepaling van het aantal significante leidingkruisingen in het normtraject deze leidingkruising ook meegerekend. Ter illustratie is het dwarsprofiel van één van de leidingkruisingen met de kistdam, weergegeven in de volgende figuur.



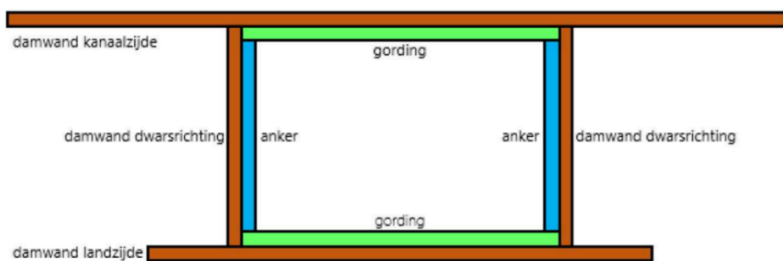
*Figuur 2.2: Dwarsprofiel leidingkruising met kistdam.*

Dit dwarsprofiel is qua principe kenmerkend voor alle leidingkruisingen Een versimpelde situatietekening van een leidingkruising met de kistdam is weergegeven in de volgende figuur.



*Figuur 2.3: Situatie leidingkruisingen met kistdam.*

Een schematische weergave van het bovenaanzicht van de kistdam is weergegeven in de volgende figuur.



*Figuur 2.4: Schematische weergave van de kistdam in bovenaanzicht.*

Voor meer gedetailleerde situatietekeningen en dwarsprofielen van alle leidingkruisingen zie *Bijlage 1: Situatie en dwarsprofielen*. De leidingkruisingen zijn in de periode van 1973 tot 1986 aangelegd in een kistdam, die oorspronkelijk was bedoeld als bouwkuip bij de overgang van de zinker naar de dijk kruising en de landleiding. Later kwam vanuit de Pijpleidingcode en de vervanging daarvan door de NEN 3650-reeks de eis van toepassing van een zogenoemde ‘vervangende waterkering’. Ten tijde van de aanleg van de leidingkruisingen was de Pijpleidingcode 1972, revisie 2 van toepassing. Waarom deze destijds niet bij de vergunningverlening van het waterschap is betrokken kon niet meer worden achterhaald. Bij de beoordeling van het ontwerp door de auteurs is de kistdam beschouwd als een vervangende waterkering, die tevens moet functioneren als afschermconstructie bij het ontstaan van een erosiekrater als gevolg van leidinglek-/breuk. Daarbij is ook rekening gehouden met de eis van NEN 3651 van een kwelscherm met kleikist vanwege de vereiste vrije ruimte onder de leiding ter plaatse van de doorvoer van de leiding door de damwand.

### 3. Faalkanseisen

De kade is een regionale waterkering met een veiligheidsnorm van  $1,0 \times 10^{-2}$  (1/100) per jaar. Deze waarde is representatief voor de overschrijdingsfrequentie van het Maatgevend Boezempeil (MBP) en moet worden beschouwd als een afkeurgrens, die is gebaseerd op een dijkvakbenadering met als uitgangspunt dat het MBP nog veilig moet kunnen worden gekeerd. In Module A: Algemeen gedeelte, onderdeel van de Leidraad Toetsen op Veiligheid Regionale waterkeringen [STOWA, 2015], staat hierover:

*“Conform de visie op de regionale keringen [IPO-UvW, 2004] is de veiligheidsnorm voor boezemkaden en keringen langs regionale rivieren uitgedrukt in een gemiddelde overschrijdingskans per jaar waarop elk dijkvak afzonderlijk moet zijn berekend. Deze benadering met afzonderlijke dijkvakken betreft de zogenaamde dijkvakbenadering.*

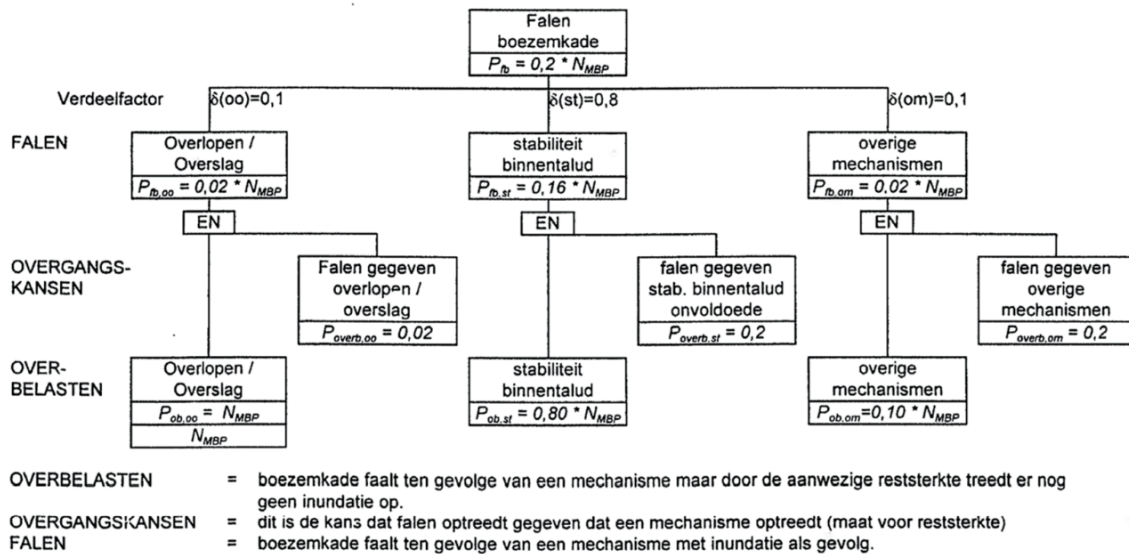
*(...)*

*Bij een toets op veiligheid wordt een regionale waterkering opgedeeld in dijkvakken. Per dijkvak wordt de sterkte vergeleken met de daarbij behorende belasting. De veiligheid wordt daarbij beoordeeld ten aanzien van meerdere faalmechanismen.”*

Het veiligheidsniveau voor boezemkaden is in [IPO, 1999] gekalibreerd op basis van schadeberekeningen, die rekening houden met de gevolgen bij doorbraak van een boezemkade. Daartoe is systematisch boezemkadeonderzoek uitgevoerd, gebaseerd op minimale trendbreuk voor een “gemiddelde” polder met de volgende uitgangspunten:

- overschrijdingsfrequentie Maatgevend Boezem Peil (MBP) = 1/100 per jaar;
- schadefactor = 0,9;
- verwachte genormeerde schade na inundatie = 75 – 155 miljoen gulden;
- kans op falen boezemkade (“gefit” op het voorkomen van trendbreuk) =  $0,2 \times 1/100 = 1/500$  per jaar.

Dit heeft invulling gekregen door bij het falen van een boezemkade uit te gaan van een faalkansverdeling, die aansluit bij de eisen die voor ‘overlopen/overslag’, ‘stabiliteit binnentalud’ en ‘overige mechanismen’ volgens de foutenboom van de volgende figuur.



*Figuur 3.1: Bij de normering van boezemkaden gehanteerde verdeling van de faalkansruimte (bron: [STOWA, 2020]).*

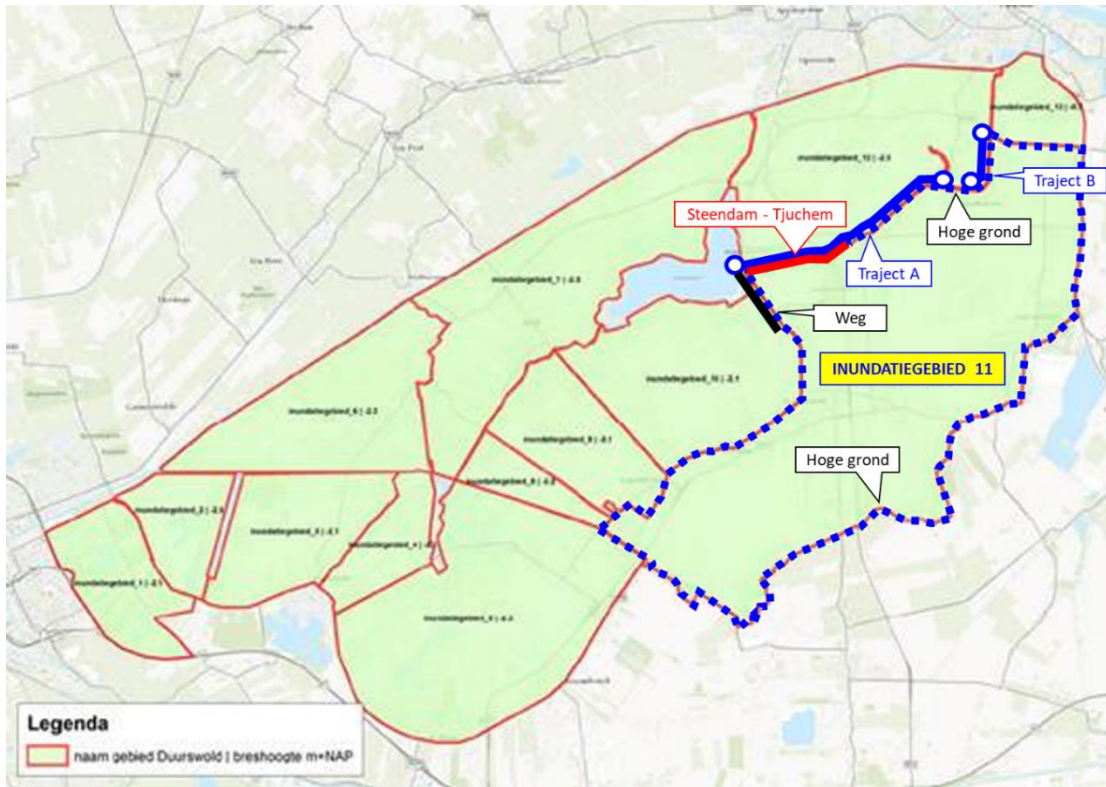
Opgemerkt wordt dat deze figuur representatief is voor een dijkvakbenadering. We gaan ervan uit dat de maximale overstromingskans van het dijktraject getalsmatig gelijk is aan  $0,2 \times$  IPO-norm (ongeacht het gegeven dat de IPO-norm op vak- of doorsnedeniveau geldt). Met dit uitgangspunt kiezen we een veilige waarde voor de overstromingskans van het dijktraject, die nodig is voor een faalkansaanpak. Vervolgens nemen we aan dat leidingfalen maar 1% aan deze overstromingskans mag bijdragen en introduceren we een lengte-effect voor de leidingen (aantal leidingkruisingen  $N_{PL,KR} = 10$ ) om een individuele leidingkruising te kunnen beoordelen.

Uit de foutenboom van figuur 3.1 blijkt dat 10% van de kans op falen van de boezemkade wordt gereserveerd voor 'overlopen/overslag', 80% voor, 'stabiliteit binnentalud' en 10% voor 'overige mechanismen'. Kabels en leidingen zijn niet-waterkerende objecten (NWO's), die onder de categorie 'overige mechanismen' vallen. Doordat wordt uitgegaan van een faalkansbegroting is verdere optimalisatie mogelijk door uit te gaan van een volledig probabilistische berekening van het hele systeem. Dat kan een interessante oplossingsrichting zijn als het verzamelen van alle benodigde data problematisch en/of duur is.

Bij de interim methodiek voor regionale waterkeringen wordt in lijn met de systematiek voor primaire waterkeringen, uitgegaan van een overstromingskans per normtraject. De lengte van een normtraject is bij de primaire waterkeringen afgeleid op basis van overstromingsberekeningen. Daarbij is een belangrijk uitgangspunt geweest dat het overstromingspatroon per normtraject niet wezenlijk verschilt bij diverse doorbraaklocaties binnen hetzelfde normtraject. Voor regionale waterkeringen zijn geen normtrajecten afgeleid. Voor de praktijkcasus Steendam - Tjuchem is voor de lengte van het normtraject een veilige waarde gekozen, waarbij is uitgegaan van de totale lengte van de waterkering langs het te beschermen gebied binnen de beschouwde polder. Verder is rekening gehouden met de invloed van het aantal leidingkruisingen in het normtraject.

Om aan het bovenstaande invulling te kunnen geven zijn door het Waterschap Hunze en Aa's nadere gegevens verstrekt over het te kiezen normtraject waar het kadeversterkingstraject onderdeel van is.

Ter verduidelijking hiervan is in figuur 3.2 het versterkingstraject Steendam – Tjuchem rood gemarkeerd en het gekozen normtraject (Traject A en Traject B) blauw gemarkeerd op basis van gegevens uit het rapport Veiligheidsklassen Regionale Waterkeringen, Actualiseren normering regionale waterkeringen, HKV, PR2329, 10 april 2013 [HKV, 2013].



Figuur 3.2: Gekozen normtraject op basis van gegevens uit [HKV, 2013].

Uit een globale inventarisatie (KLIC-melding) is gebleken dat er in het normtraject  $N_{PL,KR} = 10$  leidingkruisingen liggen die een significante bijdrage kunnen leveren aan de kans op leidingfalen.

Voor de bepaling van de faalkanseis is er verder voor gekozen om binnen de beschikbare 10% voor falen door ‘overige mechanismen’ 1% te reserveren voor het falen van alle leidingkruisingen in het normtraject. Zodoende blijft er nog 9% over voor het falen van andere ‘overige mechanismen’. Dit betekent dat voor het falen van alle leidingkruisingen 1% van de vereiste faalkans van het gehele normtraject wordt gereserveerd. De vereiste faalkans per individuele leidingkruising komt daarmee op 1% van  $0,2 \times \text{norm}$  (overschrijdingskansnorm) /  $N_{PL,KR} = 1\%$  van  $0,2 \times 1,0 \times 10^{-2} / 10 = 2,0 \times 10^{-6}$  per jaar.

Deze keuze voor 1% voor het falen van alle leidingkruisingen is arbitrair, waarbij er nog 9% resteert voor ‘overige mechanismen’. Voor Steendam - Tjuchem is dit de gekozen waarde, die in vergelijkbare situaties indien wenselijk kan worden bijgesteld. In de POV K&L is deze werkwijze ook toegepast bij het hanteren van een faalkanseis volgens Optie 1: Falen NWO als direct faalmechanisme (voor meer info zie [POV-KL, 2020a]). Daarbij worden enkel de lengte-effecten van de leidingen verdisconteerd en wordt geen rekening gehouden met de lengte-effecten van de dijkfaalmechanismen, omdat deze bij Optie 1 geen bijdrage leveren aan de additionele kans op leidingfalen.

In de POV K&L is bij de faalkanseis volgens Optie 1 als eerste stap ook uitgegaan van 1% van de vereiste faalkans van het gehele normtraject.

Opgemerkt wordt dat er daarnaast ook nog een 2<sup>e</sup> optie mogelijk is om een NWO als indirect faalmechanisme te beschouwen (Optie 2 in de POV K&L). Daarbij wordt per afzonderlijk dijkfaalmechanisme rekening gehouden met de lengte-effecten en het aantal daarin aanwezige leidingen. Voor meer informatie zie rapportages van de POV K&L [POV-KL, 2020a] en [POV-KL, 2020c]. Deze 2e optie is niet beschouwd omdat het een ingrijpende wijziging zou betekenen in de vigerende veiligheidsfilosofie van de regionale waterkeringen, waarvoor de bevoegdheid bij de provincies is belegd. Ook zijn er onvoldoende basisgegevens hiervoor beschikbaar en bestaat het risico dat de faalkanseisen strenger worden. Verder zou een dergelijke uitwerking te veel extra tijd vergen.

Bij de wettelijk vastgestelde veiligheidsnormen van primaire waterkeringen wordt onderscheid gemaakt in signaleringswaarden (van toepassing voor de beoordeling van de bestaande situatie) en ondergrenzen (van toepassing voor ontwerpen). Daarbij is, afhankelijk van het beschouwde normtraject, de ondergrens een factor 1 tot 3 hoger dan de signaleringswaarde.

## 4. Review ontwerpdocumenten

De resultaten van de review van de ontwerpdocumenten door de auteurs worden beschreven in *Bijlage 2: Resultaten review ontwerpdocumenten*. Daarin wordt geconcludeerd dat het ontwerp voor een deel niet voldoet aan de huidige eisen. Dat betreft de ontwerpmethodiek, de kerende hoogte en de breedte van de kistdammen, die niet voldoen aan de eisen van NEN 3651 [NEN, 2020f]. Dit betekent dat er maatwerk in de vorm van een faalkansanalyse nodig is om aan te tonen of het ontwerp voldoet aan een nog nader te bepalen faalkanseis.

## 5. Toepassing interim methodiek

De interim methodiek is gebaseerd op de interactie tussen leidingfalen en dijkfalen, waarbij van grof naar fijn wordt gewerkt. Daarbij zijn conservatieve faalkansschattingen het vertrekpunt en worden indien nodig gaandeweg aanscherpingen en verfijningen aangebracht. In de volgende paragrafen wordt ingegaan op de uitwerking daarvan op basis van de eerste globale stap van de interim methodiek met conservatieve, veilige uitgangspunten en faalkansschattingen.

Daarbij is voor het project Steendam – Tjuchem dijkfalen geïnterpreteerd als kistdamfalen, omdat de kistdam bij leidingfalen wordt geacht te functioneren als een volwaardige waterkerende constructie. Bij de toepassing van de interim methodiek worden hierna achtereenvolgens de volgende stappen toegelicht:

- Leidingfalen
- Hydraulische belastingen
- Kistdamfalen (dijkfalen)
- Veiligheidszone en centrale zone
- Interactie tussen leidingfalen en dijkfalen
- Additionele faalkans

## 5.1 Leidingfalen

### 5.1.1 Kenmerken leidingen

Uit de verzamelde basisgegevens blijkt dat leidingkruisingen de volgende voor de faalkansanalyse benodigde kenmerken hebben:

P+C5:123arameter	Kenmerken leidingkruisingen Steendam - Tjuchem					
	14	15	22	23	20	21
Leiding nummer	NAM 507005	NAM 501100	NAM 501071	NAM 501061	Gasunie A-610	Gasunie A-543
Leiding code	NAM 507005	NAM 501100	NAM 501071	NAM 501061	Gasunie A-610	Gasunie A-543
Aanlegmethode	zinker/open ongraving	zinker/open ongraving	zinker/open ongraving	zinker/open ongraving	zinker/open ongraving	zinker/open ongraving
Jaar van aanleg	1973	1973	1974	1974	1986	1974
Operationele status	reserve	in bedrijf	in bedrijf	in bedrijf	in bedrijf	in bedrijf
Diameter (inch)	36/914,4	36/914,4	36/914,4	36/914,4	42/1066,8	48/1219,2
Wanddikte in veiligheidszones en cntrale zone [mm]	19,05/15,9	19,05/15,9	19/15,9	19/15,9	22,29/16,59	16,8/14,3
Ontwerpdruk (MPa)	8,5	8,5	8,5	8,5	7,06	7,06
Medium	aardgas 1)	aardgas 1)	aardgas 1)	aardgas 1)	aardgas 1)	aardgas 1)
Materiaal	staal	staal	staal	staal	staal	staal
Staalkwaliteit	Gr. X60	Gr. X60	St. 60.7	St. 60.7	St. 415.7	St. 415.7
Verbindingen	gelast	gelast	gelast	gelast	gelast	gelast
Kathodische bescherming (KB)	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Uitwendige bekleding	bitumen	bitumen	bitumen	bitumen	PE	PE
<b>Conditieverklaringen en materiaal informatie</b>	ja	ja	ja	ja	ja	ja
<b>Verstoringszones explosie</b>						
Straal (t) explosiekrater [m]	niet berekend	niet berekend	niet berekend	niet berekend	niet berekend	niet berekend
Straal (t <sub>p</sub> ) plastische zone	niet berekend	niet berekend	niet berekend	niet berekend	niet berekend	niet berekend
Verwekingszone (E <sub>i</sub> )	niet berekend	niet berekend	niet berekend	niet berekend	niet berekend	niet berekend
<b>Verstoringszones erosie</b>						
Kraterlengte upstream [m] 2)	17,1	17,1	19,2	19,2	17,4	17,6
Kraterbreedte upstream uit as leiding [m]	8,55	8,55	9,6	9,6	8,7	8,8
Kraterlengte downstream	7,4	7,4	8,4	8,4	10,8	12,5
Kraterbreedte downstream uit as leiding [m]	3,7	3,7	4,2	4,2	5,4	6,25
Kraterdiepte t.p.v. kruin [m]	4,52	4,52	2,79	2,79	5,38	5,62
1) niet corrosief droog aardgas						
2) kraterafmeting upstream 19,2 m, afgerond 20 m bij leidingnummer 22 en 23 wordt maatgevend gesteld						

Tabel 5.1: Kenmerken leidingkruisingen.

De in tabel 5.1 vermelde gegevens van de leidingen zijn overgenomen uit de beschikbaar gestelde ontwerprapporten. Meer informatie over de conditieverklaringen en materiaal informatie staat in *Bijlage 3: Leidingconditie en materiaalkwaliteit*. Voor de onderbouwing van de verstoringszones (erosiekraters) zie par. 5.1.9 en *Bijlage 5: Kraterberekeningen*. Uit de bovenstaande tabel blijkt dat er één reserveleiding aanwezig is (leiding nummer 14). Die is momenteel niet in bedrijf en is ook niet aangesloten op het net. In het beheer en onderhoud wordt voor deze reserveleiding dezelfde monitoringsprocedure gevolgd als voor de nu in bedrijf zijnde leidingkruising nummer 15. Daarom is bij de faalkansanalyse leidingkruising nummer 14 buiten beschouwing gelaten.

### 5.1.2 Conditie leidingen en materiaalkwaliteit

De leidingkruisingen zijn aangelegd in de periode van 1973 t/m 1986. Daarom is het voor de analyse ook nodig om te weten wat de huidige conditie en kwaliteit van de veldleidingen en de kruisingen is. Beide worden door de NAM en Gasunie periodiek gecontroleerd en de resultaten daarvan worden geverifieerd door onafhankelijke, daartoe geaccrediteerde en aangewezen instituten/instellingen. Meer info daarover staat in *Bijlage 3: Conditieverklaringen en materiaaleigenschappen*. Daaruit kan worden afgeleid dat de conditie en materiaalkwaliteit van alle leidingen sinds de aanleg niet is achteruitgegaan en dat er periodiek ILI's (In-Line Inspecties) zijn uitgevoerd.

Verder is bij de kruisingen geverifieerd dat de mogelijke aanwezigheid van corrosief condensaat niet van toepassing is. Uitgangspunt bij de faalkansanalyse is dat de conditie en materiaalkwaliteit van de

leidingkruisingen na kadeversterking gedurende de komende 50 jaar niet achteruitgaat en dat dit door voortzetting van de huidige procedure van inspectie en verificatie van de leidingconditie en materiaalkwaliteit wordt gewaarborgd.

### 5.1.3 Faaloorzaken

Aangesloten wordt bij de internationaal door EGIG (**E**uropean **G**as pipeline **I**ncident data **G**roup) gedefinieerde faaloorzaken. Dit zijn faaloorzaken waardoor er als gevolg van een incident leidinglek/-breuk kan ontstaan, zoals:

- 1) Invloed van buitenaf (external interference).  
Graafwerkzaamheden en andere vormen van contact met de leiding.
- 2) Corrosie (corrosion).  
Onderscheid wordt gemaakt tussen inwendige en uitwendige corrosie van de leiding. Bij transportleidingen van droog aardgas kan er geen inwendige corrosie optreden.
- 3) Operationele fouten (hot tap made by error), zoals het foutief uitvoeren van een hot tap<sup>1</sup> en fouten in de bediening van afsluiters et cetera.
- 4) Mechanische gebreken (mechanical defects).  
Ontwerpfouten, uitvoeringsfouten, materiaal- en lasfouten.
- 5) Grondbeweging (ground movement)  
Grondafschuivingen. Voor de bepaling van de leidingfaalkansen wordt hiervan afgeweken. De reden daarvan is dat de situatie in Nederland wezenlijk anders is dan op basis van de EGIG-faalfrequenties (mogelijke uitzonderingen in Limburg: mijnverzakkingen en in Twente: zoutcavernes), die representatief zijn voor grote afschuivingen in mijnverzakkingen- en berggebieden. Bij de faalkansanalyse wordt voor deze faaloorzaak uitgegaan van de resultaten van uitgebreide sterkteberekeningen waarbij de Unity Check (UC = verhouding tussen de berekende spanningen en deflectie en de toelaatbare grenswaarde) via de bijbehorende betrouwbaarheidsindex wordt doorvertaald naar een schatting van de faalkans.

### 5.1.4 Faalmanieren

Dit betreft de manier van falen van een leiding, voortvloeiend uit de faaloorzaken, zoals:

- a) Scheurtje, klein gat (crack, pinhole)
- b) Groot gat (hole)
- c) Leidingbreuk, volledige afschuiving, guillotinebreuk (rupture)
- d) Doorgaande langsscheur (propagating split)

### 5.1.5 Faalfrequenties van leidingen

Voor de bepaling van de faalfrequenties wordt aangesloten bij de aanpak van de POV K&L voor een gastransportleiding in de praktijkcasus Wolferen-Sprok langs de Waal [POV-KL, 2020c] Daarin is voor de faaloorzaken 1) t/m 4) gebruik gemaakt van faalfrequenties van EGIG die representatief zijn voor hogedruk transportleidingen in heel Europa. Voor faaloorzaak 5) wordt uitgegaan van de resultaten van uitgebreide leidingsterkteberekeningen. Meer informatie daarover is te vinden in [POV-KL-2020c] en [POV-KL-2020e]. In [POV-KL, 2020c] wordt onderscheid gemaakt tussen faalfrequenties van leidingen met een kleine diameter ( $\varnothing < 17$  inch) en leidingen met een grote diameter ( $\varnothing \geq 17$  inch).

---

<sup>1</sup> Hot tap is methode om verbinding te maken met bestaande leidingen zonder die te onderbreken of leeg te maken. Dit is in feite geen 'operational error', maar hoort eigenlijk bij 'external interference'. Wat wel eens is voorgekomen is dat men bijvoorbeeld bij een waterleiding probeert om een hot tap op een gastransportleiding te realiseren.

Alle in de casus beschouwde leidingkruisingen hebben een diameter > 17 inch, zodat daarvoor de faalfrequenties van leidingen met een grote diameter ( $\varnothing \geq 17$  inch) worden toegepast.

De resulterende faalfrequenties per faaloorzaak en faalmanier zijn als volgt:

Faalfrequenties leidingkruisingen Steendam - Tjuchem				
Faaloorzaken leidingfalen			Faalfrequentie EGIG 2007-2016 alle $\varnothing$ [per 1000 km per jaar]	Aangepaste faalfrequentie EGIG 2007-2016 voor $\varnothing \geq 17''$ [per 1000 km per
Langsrichting	External interference (externe invloed)	Scheurtje, klein gat (crack, pin hole)	0,0166	0,0055
		Gat (hole)	0,0195	0,0065
		Breuk (rupture)	0,0058	0,0019
		Onbekend (unknown)	0,0007	0,0002
	Corrosion (corrosie)	Klein gat (pin hole)	0,0353	0,0118
		Gat of cluster (hole)	0,0007	0,0002
		Breuk van meerdere pijplengtes	0	0
		Onbekend (unknown)	0,0014	0,0005
	Hot tap (operationele fout)	Scheur, klein gat (crack, pin hole)	0,0043	0,0014
		Groot gat (hole)	0,0014	0,0005
		Breuk (rupture)	0	0
		Onbekend (unknown)	0	0
Omtreksrichting	Mechanical defects (mechanische gebreken)	Scheurtje, klein gat (crack, pin hole)	0,0224	0,0075
		Vervormingsgestuurde scheur (hole)	0,0014	0,0005
		Belastinggestuurde breuk (rupture)	0,0022	0,0007
		Onbekend (unknown)	0,0007	0,0002
	Groundmovement (grondbeweging) 2a en 2b)	Scheur, klein gat (crack, pin hole)	0,0065	0,00043
		Vervormingsgestuurde scheur (hole)	0,0079	0,00043
		Belastinggestuurde breuk (rupture)	0,0065	0,00043
		Onbekend (unknown)	0,0014	0,00043
<b>Som:</b>			<b>0,1347</b>	<b>0,0392</b>

2a) Faalfrequenties EGIG representatief voor grote afschuivingen in berg- en mijnverzakkingsgebieden (niet van toepassing voor Nederland).

2b) Faalfrequentie  $\varnothing \geq 17$  inch is afgestemd op betrouwbaarheidseisen van [TNO, 2003] ten behoeve van uitgebreide leidingsterkteberekeningen conform NEN 3650 – reeks [NEN, 2020].

Tabel 5.2: Faalfrequenties van transportleidingen met een grote diameter ( $\varnothing \geq 17$  inch).

Hieruit volgt dat de gesommeerde faalfrequentie gelijk is aan 0,0392 ( $3,9 \times 10^{-2}$ ) per 1000 km per jaar of per  $3,9 \times 10^{-8}$  per m per jaar.

Opgemerkt wordt dat er in dit stadium voor is gekozen om op de faalfrequenties van EGIG nog geen correctie-/reductiefactoren van de Bevb toe te passen. In het werken van grof naar fijn kan het de moeite lonen om bij de eerste grove stap al na te gaan of door toepassing van de standaard Bevb-factoren al aan de faalkanseis kan worden voldaan. De Bevb-factoren zijn afgeleid op basis van faalkansen en gelden voornamelijk voor veldstrekkingen en niet specifiek voor kruisingen, alhoewel sommige factoren (zoals bijvoorbeeld de wanddikte) ook voor kruisingen relevant zijn. Aanbevolen wordt om voor waterkeringen een specifieke set reductiefactoren te ontwikkelen en nader onderzoek te doen naar de analyse van faalkansen van leidingkruisingen specifiek en de consequenties van dijkfalen ten gevolge van leidingfalen.

### 5.1.6 Invloed van aardbevingen

De effecten van geïnduceerde bevingen door aardgaswinning zijn uitgebreid onderzocht en gerapporteerd door Deltares (zie de in deze paragraaf genoemde referenties).

Gelaste stalen aardgastransportleidingen zijn goed bestand tegen aardbevingen. Dit wordt overigens ook bevestigd door ervaringen uit het buitenland waar sterkere bevingen voorkomen. Falen vindt daar soms plaats ter plaatse van breuklijnen aan het aardoppervlak. Deze breuklijnen komen in Groningen niet voor. Voor wat betreft trillingen door aardbevingen is bij ondergrondse leidingen alleen extra

aandacht nodig voor leidingconfiguraties met T-stukken waar de T-stukken onderhevig zijn aan extra spanningen. Op stations moeten voor bovengrondse leidingdelen speciale pipingstressberekeningen gemaakt worden om het “schudeffect” in rekening te brengen. In detail is dit beschreven in een rapport van Spiekhout en Beks, waarnaar in de rapportage over buisleidingen [Deltares, 2013a] wordt verwezen.

Voor wat betreft het effect van mogelijke verweking van de ondergrond bij aardbevingen heeft een stalen leiding een groot incasseringsvermogen met verborgen reserve. Met name bij de overgang van vast ondersteund (onderheid) naar veldleiding is de sprongzakking door compactie van de ondergrond goed te bepalen en kunnen de extra spanningen worden berekend. Bij een kruising van waterkeringen zal de leiding extra belast kunnen worden door afschuiving van het dijklichaam. In NEN 3651 [NEN, 2020f] wordt de belasting op een leiding door bezwijken van de waterkering niet beschouwd en wordt die voor de faalkansanalyse niet relevant geacht. De motivatie daarvoor is dat door de aanwezigheid van de kistdam enkel boven de leiding gelegen schuifvlakken kunnen optreden en deze een verwaarloosbare invloed op leidingfalen hebben.

De gevolgen van geïnduceerde aardbeving voor waterkeringen in het Groningse zijn bestudeerd door Deltares en beschreven in de rapporten betreffende kades en dijken [Deltares 2013a, 2013b en 2013c]. Bijlage C.7 van NEN 3651-1 is niet toegepast omdat de studies van Deltares en DNV-GL voldoende bruikbare argumentatie leveren.

Op basis daarvan kan worden geconcludeerd dat de invloed van de kans op aardbevingen een verwaarloosbare bijdrage levert aan de kans op leidingfalen van de beschouwde leidingkruisingen. Daarom is bij de faalkansanalyse de bijdrage van de kans op aardbevingen niet meegenomen.

#### 5.1.7 Invloed van verweking van de zandlagen

De leidingkruisingen liggen deels in zandige ondergrond, waardoor er door trillingen als gevolg van leidingexplosie verweking van de zandlagen kan optreden. Volgens NEN 3651 moet dan de verwekingsgevoeligheid van de zandlagen worden gecontroleerd door bepaling van de pakkingsdichtheid van het zand op basis van sonderingen. Een dergelijke controle is door Deltares uitgevoerd en gerapporteerd in *Bijlage 4: Controle verwekingsgevoeligheid zandlagen*.

Daarin wordt geconcludeerd dat de betreffende zandlagen een pakkingsdichtheid hebben van 40% - 50% en daarom moeten worden geclassificeerd als ‘los gepakt zand’. Dit betekent dat het ontstaan van enige langere tijd aanwezige wateroverspanning niet is uit te sluiten. Wel is de verwachting dat volledige verweking minder waarschijnlijk is en dat de kans dat dit tot falen van de waterkering leidt verwaarloosbaar klein is. Daarom is in de faalkansanalyse de bijdrage van de kans op verweking door een leidingexplosie niet meegenomen.

#### 5.1.8 Correctiefactoren Bevb

In het kader van het Besluit externe veiligheid voor buisleidingen (Bevb) is er een handleiding beschikbaar [RIVM, 2021], die de mogelijkheid biedt om voor gastransportleidingen correctie- en reductiefactoren toe te passen op de faalfrequenties. In deze eerste globale stap van de interim methodiek is ervoor gekozen om daar geen gebruik van te maken. Dat betekent dat er in de faalfrequenties impliciet nog een bepaalde latente reserve aanwezig is. Het verdient aanbeveling om bij het werken van grof naar fijn al bij de eerste grove stap al na te gaan of door toepassing van de Bevb-factoren aan de faalkanseis kan worden voldaan en om een specifieke set reductiefactoren voor waterkeringen te ontwikkelen.

### 5.1.9 Verstoringszones

De verstoringszone is het gebied rondom een leidinglek/-breuk, waarin de grondeigenschappen worden verstoord en/of een explosie- of erosiekrater kan ontstaan. Voor de bepaling van de verstoringszones wordt gebruik gemaakt van de rekenregels van Bijlage A van NEN 3651 [NEN, 2020f], die onderdeel is van de NEN 3650 reeks [NEN 3650, 2020].

Onderdeel daarvan is controle van de verwekingsgevoeligheid van de zandlagen in de ondergrond. Op basis van *Bijlage 4: Controle verwekingsgevoeligheid zandlagen*, kan worden gesteld dat de verwekingszone als gevolg van explosie van de leidingen geen bijdrage levert aan de kans op leidingfalen.

Voor de beschouwde leidingen is gebleken dat een erosiekrater de grootste verstoringszone oplevert. De dimensies van de erosiekraters (lengte, breedte en diepte bij leidingbreuk) zijn in eerste instantie berekend door Deltares op basis van de vereenvoudigde formule van Bijlage A van NEN 3651 met een constante gasuitstroming gedurende 2 uur.

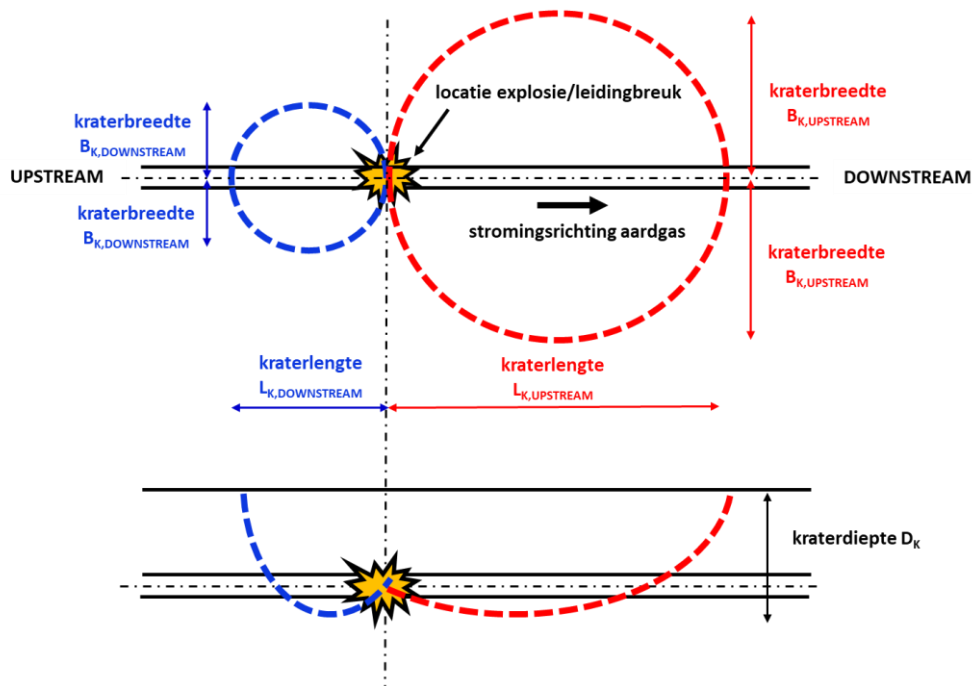
Daarnaast zijn er ook aangescherpte kraterberekeningen gemaakt met een dynamische tijdsafhankelijke gasuitstroming (op basis van netberekeningen van Gasunie). De NEN 3650 reeks biedt deze mogelijkheid, maar daarin wordt geen werkwijze beschreven om deze berekening uit te voeren. In *Bijlage 5: Kraterberekeningen* is opgenomen op welke manier kraterberekeningen met een constante en met een dynamische tijdsafhankelijke gasuitstroming kunnen worden uitgevoerd en zijn ook de resultaten daarvan vermeld voor de vijf kruisende gastransportleidingen.

Daaruit blijkt dat de dynamische tijdsafhankelijke berekeningen ten opzichte van de vereenvoudigde formule een flinke reductie (factor 2 tot 3) van de kraterlengte oplevert. Bij de integrale faalkansanalyse wordt uitgegaan van de aangescherpte kraterlengte/-breedte bij dynamische tijdsafhankelijke gasuitstroming. De bijbehorende kraterafmetingen kunnen als volgt worden samengevat:

Berekeningen Uitgebreide formule	NAM 15	NAM 22	NAM 23	GU 20	GU 21
<b>(na 2 uur dynamische gasuitstroming)</b>	(36", 85 bar)	(36", 85 bar)	(36", 85 bar)	(42", 70,6 bar)	(48", 70,6 bar)
Kraterlengte upstream $L_{K,UPSTREAM}$ [m]	17,1	19,2	19,2	17,4	17,6
Kraterlengte downstream $L_{K,DOWNSTREAM}$ [m]	7,4	8,4	8,4	10,8	12,5
Kraterdiepte onder maaiveld $D_K$ [m]	4,52	2,79	2,79	5,38	5,62
Kratervolume totaal [m <sup>3</sup> ]	1232	962	962	1772	2057

*Tabel 5.3: Kraterdimensies per kruisende gastransportleiding.*

De bijbehorende kraterform is gevisualiseerd in de volgende figuur.



Figuur 5.1: Kratervorm bij dynamische tijdsafhankelijke gasuitstroming in bovenaanzicht en langsdoorsnede.

## 5.2 Hydraulische belastingen

### 5.2.1 Overlopen

De bij het ontwerp toegepaste buitenwaterstanden zijn:

- Zomerpeil = NAP -1,27 m
- Winterpeil = NAP -1,07 m
- Maatgevend hoogwater: MHW = NAP -0,75 m

Lokale metingen en een overschrijdingsfrequentielijn van buitenwaterstanden zonder en met onzekerheden zijn niet beschikbaar. Daarom is pragmatisch een conservatieve inschatting gemaakt van de kans dat de kerende hoogte van de damwanden (0,12 tot 0,17 m boven MHW) wordt overschreden door een buitenwaterstand (WST) boven MHW. Daarbij zijn de volgende aannames gedaan:

- De overschrijdingsfrequentie van MHW = NAP -0,75 m is gelijk aan de overschrijdingsfrequentie van het Maatgevend Boezempeil  $N_{MBP} = 1/1.00$  ( $1,0 \times 10^{-2}$ ) per jaar
- De marge voor onzekerheden in buitenwaterstanden  $WST > MHW$  wordt conservatief aangenomen op 10 cm (waarschijnlijk is die al verdisconteerd in het MHW), wat een conservatieve, veilige rekenwaarde van  $WST = NAP -0,65$  m oplevert.
- De decimeringshoogte (verschil in buitenwaterstand bij een 10 maal kleinere overschrijdingsfrequentie) voor  $WST > MHW$  is gelijk aan 0,05 m

Het in rekening brengen van de decimeringshoogte gaat via de volgende relatie:

$$WST = A - \{B \times \log (N_{WST})\} \quad (1)$$

met:

$WST$  = buitenwaterstand (incl. onzekerheidsmarge van 0,10 m) = NAP – 0,65 m

$N_{WST}$  = overschrijdingsfrequentie buitenwaterstand = 1/100 per jaar

$A$  = constante factor

$B$  = decimeringshoogte = 0,05 m

Invulling daarvan geeft  $-0,65 = A - \{0,05 \times \log (1/100)\}$  of  $A = 0,75$ .

Relatie (1) wordt daarmee:  $WST = 0,75 - \{0,05 \times \log (P_{WST})\}$  of

$$P_{WST} = 10^{-(WST - 0,75) / 0,05} \quad (2)$$

Bij de faalkansanalyse wordt voor de bepaling van de kans op overlopen van de kistdammen uitgegaan van relatie (2).

### 5.2.2 Overslag

Vanuit het ontwerp zijn er geen overslaggegevens beschikbaar. Gezien de beperkte breedte van het uitwateringskanaal en de bij de damwanden aanwezige waakhoogte (0,15 m of 0,20) boven MHW zal overslag niet maatgevend zijn en naar verwachting een verwaarloosbaar kleine bijdrage leveren aan de kans op falen van de hoogte van kistdammen. Daarom is de kans op overslag buiten beschouwing gelaten. Indien nodig kan de kans op overslag worden berekend met de formule van Brettschneider in de rekenmodellen Promotor of Hydra-NL.

### 5.2.3 Herstel vóór hoogwater

In deze casus is de overschrijdingsfrequentie bepaald van buitenwaterstanden die hoger zijn dan de kerende hoogte van de damwanden.

De kans dat het jaarmaximum van de waterstand zich binnen of tijdens de herstelperiode voordoet, kan worden berekend met de volgende formule:

$$P \{HW \text{ vóór of tijdens herstel}\} = (T_{HW} + T_{HERSTEL}) / T_{REF}$$

waarin:

$P \{HW \text{ vóór of tijdens herstel}\}$  = kans op hoogwater vóór of tijdens herstel

$T_{HW}$  = tijdsduur hoogwater = 14 dagen

$T_{HERSTEL}$  = tijdsduur van detectie- en herstel leiding en waterkering = 3 dagen

$T_{REF}$  = tijdsperiode van een jaar = 365 dagen

Dit geeft voor de faalkansanalyse een waarde van  $P \{HW \text{ vóór of tijdens herstel}\} = 0,05$ .

## 5.3 Kistdamfalen

### 5.3.1 Kenmerken kistdammen

De bij het ontwerp gehanteerde kenmerken van de kistdammen kunnen als volgt worden samengevat:

Kenmerken kistdammen bij leidingkruisingen									
Parameter	NAM 14-15-16			NAM 22-23			Gasunie 20-21		
	Damwand buitenzijde	Ankers/gordingen	Damwand binnenzijde	Damwand buitenzijde	Ankers/gordingen	Damwand binnenzijde	Damwand buitenzijde	Ankers/gordingen	Damwand binnenzijde
Damwandprofiel	GU 50-500		GU 50-500	Larssen 22		Larssen 22	Larssen 23		Larssen 23 (opgedikt)
Profiel/type	U	HE 300 B	U	U	HE 300 B	U	U	HE 300 B	U
Profielbreedte [mm]	500		500	500		500	500		500
Profielhoogte [mm]	340		340	340		340	420		420
Flensdikte [mm]	10		10	10		10	11,5		11,5
Lijfdikte [mm]	9		9	9 mm		9	10,2		10,0/10,2
Staalkwaliteit	S 240 GP	S 355	S 240 GP	S 240 GP	S 355	S 240 GP	S 240 GP	S355	S 240 GP
Corrosie damwand[ buitenzijde [mm]	1		1	1,2		1,2	1		1,0/0,8
Corrosie damwand binnenzijde [mm]	?		?	?		?	?		?
Bovenkant damwand [m NAP]	-0,63		-0,58	-0,58		-1,2	-0,6		-0,6
Onderkant damwand [m NAP]	-8,35		-10,35	?		?	-12,3		-12,3
Afstand tussen damwanden [m]	7,84		7,84	3,72		3,72	4,56		4,56

Tabel 5.4: Kenmerken kistdammen bij leidingkruisingen

Daarbij zijn de ontwerpgegevens van de damwanden aan de buitenzijde (damwandprofiel, profielbreedte, profielhoogte, flensdikte en lijfdikte) waar nodig gecorrigeerd op basis van de resultaten van veldmetingen. Bij de ontwerpberoekeeningen van de kistdam en de integrale faalkansanalyse zijn de kenmerken van tabel 5.4 het uitgangspunt.

### 5.3.2 Faalkans kistdammen

#### Overlopen/overslag

De kerende hoogte van de kruin van de kade varieert tussen NAP +0,16 m en NAP +0,20 m. De kerende hoogte van de kistdammen varieert tussen NAP -0,58 m en NAP -0,63 m. In het ontwerp voldoet de hoogte van de kistdammen niet aan de door het Waterschap Hunze en Aa's gestelde eis van MHW = NAP -0,75 m plus 0,30 m (waakhoogte) = NAP -0,45 m. Conservatief is aangenomen dat er bij overloop direct sprake is van een overstroming. De kerende hoogte van de buitenste damwand van de kistdammen is -samen met de hersteltijd- bepalend voor de kans op overlopen/overslag in geval van schade aan het grondlichaam door leidingbreuk. In dit geval zal overslag vanwege de beperkte breedte van het uitwateringskanaal en de aanwezige waakhoogte (0,12 m tot 0,17 m) die groter is dan de minimum eis van 0,10 m niet maatgevend zijn en naar verwachting een verwaarloosbaar kleine kansbijdrage leveren. Daarom is overslag buiten beschouwing gelaten.

Per afzonderlijke kistdam is de kans overlopen en de kans op overslag-bepaald met de in paragraaf 5.2.1 afgeleide relatie (2). De resultaten zijn samengevat in de volgende tabel.

Parameter	Kistdam bij leidingkruising		
	NAM 15-16	NAM 22-23	GU 20-21
bovenkant kistdam [m NAP]	-0,63	-0,58	-0,60
kans op overlopen [per jaar]	4,0E-03	4,0E-04	1,0E-03
kans op overslag [per jaar]	<<	<<	<<
<b>Kans op overlopen/overslag:</b>	<b>4,0E-03</b>	<b>4,0E-04</b>	<b>1,0E-03</b>

*Tabel 5.5: Kans op overlopen/overslag van de kistdammen per leidingkruising.*

Bij de integrale faalkansanalyse wordt uitgegaan van de in tabel 5.5 vermelde kans op overlopen/overslag.

#### *Sterkte constructie-onderdelen*

Er is geen methodiek beschikbaar voor de bepaling van faalkansen voor de situatie met een kistdam en een erosiekrater als gevolg van leidingfalen. Daarom is ten behoeve van de faalkansanalyse gebruik gemaakt van de resultaten van de bij het ontwerp gemaakte sterkteberekeningen op basis van CUR-publicatie 166 Damwandconstructies [CUR, 2012] met een vertaalslag daarvan naar de kans op falen van de sterkte van de damwanden.

Bij de controle van de sterkte van de constructie-onderdelen is de breedte van de damwand medebepalend voor de betrouwbaarheidsindex  $\beta$ . Indien de damwandbreedte groter is dan 100 m moet er volgens CUR 166 in verband met lengte-effecten rekening worden gehouden met een verhoogde  $\beta$ -waarde. Als de damwandbreedte kleiner is dan 100 m kan de standaard  $\beta$  worden toegepast. In dit geval hebben alle damwanden een totale breedte van maximaal 20 m, zodat daarvoor geen verhoogde  $\beta$  hoeft te worden toegepast. Bovendien geldt in dit geval dat bij toepassing van de faalkanseisen volgens Optie 1 voor kruisende leidingen enkel rekening moet worden gehouden met de lengte-effecten van de leidingkruising.

Bij het ontwerp is conform [NEN 3651, 2012] uitgegaan van CUR 166 [CUR, 2012] en de Eurocode. De kistdam functioneert als een afschermconstructie, die bij een erosiekrater als gevolg van leidingbreuk tijdelijk de waterkerende functie moet vervullen. Voor de bepaling van de conditionele faalkans voor deze situatie ontbreken rekenregels. Bij de faalkansanalyse wordt gebruik gemaakt van de betrouwbaarheidseisen die bij het ontwerp zijn toegepast om tot een inschatting te komen van de (conditionele) faalkans van de kistdam binnen de herstelperiode, gegeven een erosiekrater als gevolg van leidingfalen.

Na schade aan de waterkering door een leidingbreuk zijn er twee belastingsituaties mogelijk die tot overstroming kunnen leiden:

- 1) 'kerend naar binnen' met een extreem hoge waterstand (MHW) aan de buitenzijde en een erosiekrater aan de binnenzijde;
- 2) 'kerend naar buiten' met een "normale" waterstand (Streefpeil, Zomerpeil of Winterpeil) aan de buitenzijde en een erosiekrater aan de buitenzijde.

Voor de situatie 'kerend naar binnen' zijn door Witteveen+Bos voor de kistdam verkennende berekeningen gemaakt (zie [W+B, 2020a] en [W+B, 2020b]). Daarbij is de methodiek van CUR publicatie Damwandconstructies [CUR, 2012] toegepast voor de belastingsituatie 'kerend naar binnen' met betrouwbaarheidseisen op basis van Betrouwbaarheidsklasse RC2 van de Eurocode. Toepassing van RC2 brengt met zich mee dat de sterkte van de constructie-onderdelen van de kistdam moet worden gecontroleerd door toepassing van berekeningen met partiële veiligheidsfactoren, behorend bij een vereiste betrouwbaarheidsindex van  $\beta = 3,8$  (faalkans  $7,2 \times 10^{-5}$ ) voor een referentieperiode van 50 jaar.

In de berekeningen is ervan uitgegaan dat de herstelreferentieperiode 50 jaar is, oftewel dat de waterkering continu in een door leidingfalen beschadigde conditie verkeerd. Uit de berekeningen blijkt dat de sterkte van de damwanden, ankers en gordingen bij alle kistdammen ook in dat geval voldoet aan de gestelde eisen. Het criterium daarvoor is een zogenoemde Unity Check (UC). Bij een Unity

check van  $UC \leq 1,0$  voldoet het betreffende constructie-onderdeel aan de gestelde betrouwbaarheidseis van  $\beta = 3,8$ ; bij  $UC > 1,0$  is dat niet het geval.

Voor de constructie-onderdelen van de kistdam zijn bij het ontwerp per leidingkruising de volgende waarden berekend:

Sterkte en vervormingen constructie-onderdelen kistdammen in UGT			
Faalmechanisme	NAM 15-16	NAM 22-23	GU 20-21
UC bij plankvloei	0,18	0,18	0,23
UC bij ankerbreuk	0,07	0,06	0,33
UC bij gordingbreuk	0,47	0,29	0,17
Vervormingen	15 mm	37 mm	54 mm

*Tabel 5.6: Maximale Unity Checks sterkte en vervormingen constructie-onderdelen kistdammen.*

Deze waarden, die gelden voor de uiterste grenstoestand (UGT) voldoen allemaal aan de gestelde eis van  $UC \leq 1,0$ . In het ontwerp zijn er geen eisen gesteld aan de berekende vervormingen. Voor de uiterste grenstoestand wordt conform de eis voor langsconstructies in [I&M, 2017] uitgegaan van een vervormingseis van maximaal  $1/50 \times L$  (verticale lengte damwand) of circa 200 mm. Alle kistdammen voldoen aan deze eis. Omdat alle berekende UC-waarden nog een aanzienlijke veiligheidsmarge hebben ten opzichte van de gestelde eis (de rekenwaarde van het belastingeffect is circa 2 - 5 maal kleiner dan de rekenwaarde van de sterkte) is er in de berekende faalkans nog een aanzienlijke latente reserve aanwezig. Opgemerkt wordt dat in het kader van het werken van “van grof naar fijn” de beoordeling hier afgebroken had kunnen worden. RC2 wordt ook bij normale constructies als ontwerpeis aangehouden en er wordt bij de Unity Checks geen rekening gehouden met de in dit geval zeer kleine kans op leidingbreuk.

Opgemerkt wordt dat een controle van de sterkte voor de bruikbaarheidsgrenstoestand niet is uitgevoerd. In de praktijk is gebleken dat deze nooit maatgevend is.

Uit de resultaten van tabel 5.6 kan worden afgeleid dat de aanwezige faalkans van de faalmechanismen van elk constructie-onderdeel kleiner is dan de vereiste faalkans van  $7,2 \times 10^{-5}$  per 50 jaar gegeven een continu aanwezige schade door leidingbreuk. Conservatief wordt hier aangenomen dat de aanwezige faalkans van ieder constructie-onderdeel gelijk is aan de vereiste faalkans. De aanwezige faalkans van de totale constructie volgt uit de optelsom van de faalkansen van de 3 constructie-onderdelen, die dan gelijk is aan  $3 \times 7,2 \times 10^{-5} = 2,2 \times 10^{-4}$  in 50 jaar.

Omdat de veiligheidseisen voor waterkeringen worden gedefinieerd als kansen per jaar is een vertaalslag nodig van de berekende faalkansen per 50 jaar naar kansen per 1 jaar. Echter er is geen eenduidig recept voor een dergelijke vertaalslag. Er kan wel een onder- en een bovengrens worden gedefinieerd, namelijk:

- 1) Ondergrens: onzekerheden in sterkteparameters dominant: faalkans per jaar = faalkans per 50 jaar / 50.
- 2) Bovengrens: onzekerheden in belastingparameters dominant: faalkans per jaar = faalkans per 50 jaar.

Bij de faalkansanalyse is als veilige waarde uitgegaan van 2) Bovengrens. Uitgaande van de vereiste  $UC = 1,0$  per constructie-onderdeel is dan de aanwezige faalkans van de kistdam als geheel gelijk aan  $2,2 \times 10^{-4}$  per 50 jaar =  $2,2 \times 10^{-4}$  per jaar.

Voor de situatie ‘kerend naar buiten’ zijn er geen ontwerpberekeningen gemaakt. Zeer waarschijnlijk is deze belastingssituatie niet maatgevend, en is er ook nog een bepaalde reserve aanwezig in de vorm van

het restprofiel na leidingfalen en kistdamfalen. Daarbij is er tevens voor de sterkte/stabiliteit van de damwand van uitgegaan dat de negatieve invloed van een erosiekrater aan de buitenzijde voor een deel wordt gecompenseerd door de hoge buitenwaterstand. Bij de faalkansanalyse is er pragmatisch van uitgegaan dat de kansbijdrage wordt gebaseerd op faalkansen behorende bij Betrouwbaarheidsklasse RC1 ( $\beta = 3,3$  met faalkans  $4,8 \times 10^{-4}$  per 50 jaar of  $4,8 \times 10^{-4}$  per jaar per constructie-onderdeel. De totale vereiste faalkans van de kistdam als geheel wordt dan  $3 \times 4,8 \times 10^{-4} = 1,5 \times 10^{-3}$  per 50 jaar =  $1,5 \times 10^{-3}$  per jaar.

#### *Macro-instabiliteit*

De faalkans van de waterkering door macro-instabiliteit binnenwaarts in een tijdsperiode van een jaar, gegeven een continu aanwezige schade door leidingbreuk is berekend met rekenregels en partiële veiligheidsfactoren conform [STOWA, 2009]. Om de kans op instabiliteit te kunnen bepalen moet de berekende stabiliteitsfactor (FS) nog worden gedeeld door de modelfactor ( $\gamma_d = 1,07$ , opdrukken, Spencer/van der Meij) en schematiseringsfactor ( $\gamma_b = 1,1$ ). Dat resulteert in een aanwezige schadefactor  $\gamma_n$ , die via omrekening van de bijbehorende betrouwbaarheidsindex  $\beta$  wordt doorvertaald naar een kans op macro-instabiliteit op doorsnedeniveau. De resultaten zijn samengevat in de volgende tabel.

Parameter	Macro-instabiliteit binnenwaarts kistdammen   erosiekrater		
	NAM 15-16	NAM 22-23	GU 20-21
Berekende stabiliteitsfactor FS	1,28	1,28	1,14
Modelfactor $\gamma_d$ (opdrukken, Spencer/van der Meij)	1,07	1,07	1,07
Schematiseringsfactor $\gamma_b$	1,1	1,1	1,1
Aanwezige schadefactor $\gamma_n = FS / (\gamma_d \times \gamma_b)$	1,09	1,09	0,97
Aanwezige betrouwbaarheidsindex $\beta$	4,67	4,67	3,76
Kans op macro-instabiliteit [/jaar]	1,48E-06	1,48E-06	8,56E-05

*Tabel 5.7: Overzicht partiële veiligheidsfactoren en aanwezige faalkansen macro-instabiliteit kistdammen.*

Opgemerkt wordt dat de berekende stabiliteitsfactoren FS representatief zijn voor de situatie met een ontgronding als gevolg van een erosiekrater aan de binnenzijde van de kistdam. Bij de analyse van kistdamfalen wordt gebruikt gemaakt van de in tabel 5.7 vermelde kans op macro-instabiliteit.

Opgemerkt wordt dat bij de faalkansanalyse is uitgegaan van een vertaalslag van de schadefactor  $\gamma_n$ , via de bijbehorende betrouwbaarheidsindex  $\beta$  naar de kans op instabiliteit. Daarbij is gebruik gemaakt van formules uit [I&M, 2017], die zijn gekalibreerd voor het faalmechanisme macro-instabiliteit binnenwaarts voor de situatie zonder verstoringszone als gevolg van leidingfalen. Daarom kunnen deze formules niet zonder meer worden toegepast voor de situatie met een erosiekrater bij leidinglek/-breuk. Bij de casus Zeeburgereiland [POV-KL, 2018] is dit onderzocht op basis van probabilistische stabiliteitsberekeningen. Daaruit is gebleken dat deze een grotere kans op instabiliteit kunnen opleveren dan volgens de gebruikte formules van [I&M, 2017]. Bij de STBI-berekeningen is de kans (op overstroming door macro-instabiliteit in een tijdsperiode van een jaar gegeven continu aanwezige schade) geschat. Deze kans wordt gebruikt in een faalpadenanalyse, waarin ook de kans op leidingbreuk en de kans op tijdig herstel nog een rol spelen. De uitkomst van de faalpadenanalyse is een dusdanig kleine faalkans, dat we een forse onnauwkeurigheid gemakkelijk kunnen accepteren zonder dat dit van invloed is op het beoordelingsresultaat.

### Onderloopsheid

Bij het ontwerp is er zowel voor de situatie zonder als met erosiekrater geen controle van de kistdam op onderloopsheid uitgevoerd. Daarom zijn daarvoor aanvullend enkele globale analyses uitgevoerd op basis van de rekenregel van Lane voor kunstwerken uit het Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen. De resultaten daarvan staan in *Bijlage 6: Controle onder-/achterloopsheid kistdammen*. De resultaten daarvan zijn samengevat in de volgende tabel.

Leidingkruising	Faalkans op jaarbasis zonder erosiekrater	Faalkans op jaarbasis gegeven een continu aanwezige erosiekrater buitenzijde	Faalkans op jaarbasis gegeven een continu aanwezige erosiekrater binnenzijde
NAM 501100 [nr. 15]	$9,76 \times 10^{-4}$	$5,12 \times 10^{-3}$	$2,96 \times 10^{-3}$
NAM 501071 [nr. 22] en 501061 [nr. 23]	$5,46 \times 10^{-4}$	$2,56 \times 10^{-3}$	$8,46 \times 10^{-3}$
Gasunie A-610 [nr. 20] en A-543 [nr. 21]	$7,28 \times 10^{-5}$	$4,20 \times 10^{-3}$	$4,12 \times 10^{-4}$

Tabel 5.8: Overzicht faalkansen onderloopsheid kistdammen.

De faalkansen uit deze tabel worden bij de faalkansanalyse toegepast voor de kans op onderloopsheid in de gebeurtenissenbomen van *Bijlage 7: Faalpaden en gebeurtenissenbomen*.

### Achterloopsheid (damwandbreedte bij erosiekrater)

In het ontwerp voldoet van een aantal kistdammen de breedte niet aan de huidige eisen van NEN 3651 [NEN, 2020]. Bij de analyse wordt op basis van de in paragraaf 5.1.7 afgeleide kraterdimensies nagegaan of de damwanden breed genoeg zijn als afschermconstructie voor de erosiekraters. De resultaten daarvan zijn samengevat in *Bijlage 6: Controle onder-/achterloopsheid kistdammen*. Daaruit kan worden afgeleid dat alle damwanden breed genoeg zijn, met uitzondering van de damwanden bij de leidingkruisingen Gasunie nummer 20-21, waar de breedte enkele meters te kort is. Omdat de kraterdimensies onder water vanwege de toestroming van grond kleiner zijn dan boven water kan de bestaande damwandbreedte als voldoende worden beschouwd. Daarin zit nog een latente veiligheidsmarge omdat er meer reactietijd beschikbaar is omdat het tijdstip van het optreden van zandmeevoerende wellen en het ontstaan van een erosiekrater niet samenvallen.

### Kwelweg langs de leiding

Ter plaatse van de doorvoer van de leidingen door de kistdam moet deze voldoen aan de eisen van NEN 3651. Daarin staat dat ter plaatse van de doorvoer door een damwand een kwelscherm met aan weerszijden een kleikist moet worden toegepast. Uit *Bijlage 1: Situatie en dwarsprofielen* blijkt dat bij alle kistdammen in de damwand aan de binnenzijde ter plaatse van de doorvoer van de leiding een kwelscherm middels een grondplaat met neopreenslab aanwezig is. Tevens moet contact met de leiding worden vermeden door toepassing van een vrije ruimte van 0,50 m tussen onderkant leiding en de daaronder aanwezige damwand. Omdat de vrije ruimte onder de leiding vanwege de zeer geringe zettingen ( $\leq 11$  mm) waarschijnlijk niet kritisch is dient enkel de aanwezigheid van een kleikist in het veld te worden geverifieerd. In principe moet ook rekening worden gehouden met de invloed van uitvoeringszakkingen volgens Bijlage C van NEN 3650-1 [NEN, 2020a]. De invloed van de uitvoeringszakkingen bij de overgang van constructiewijze, welke in het verleden zijn opgetreden, zijn in de gemeten zakkingen besloten. Nadat er geen zettingen meer zijn gemeten zijn de zak- en zetbaken verwijderd.

Bij de faalkansanalyse wordt ervan uitgegaan dat er een kleikist aanwezig is en dat kwel lang de leidingen geen bijdrage aan de faalkans levert. De aanwezigheid van een kleikist moet nog wel tijdens de uitvoering worden geverifieerd.

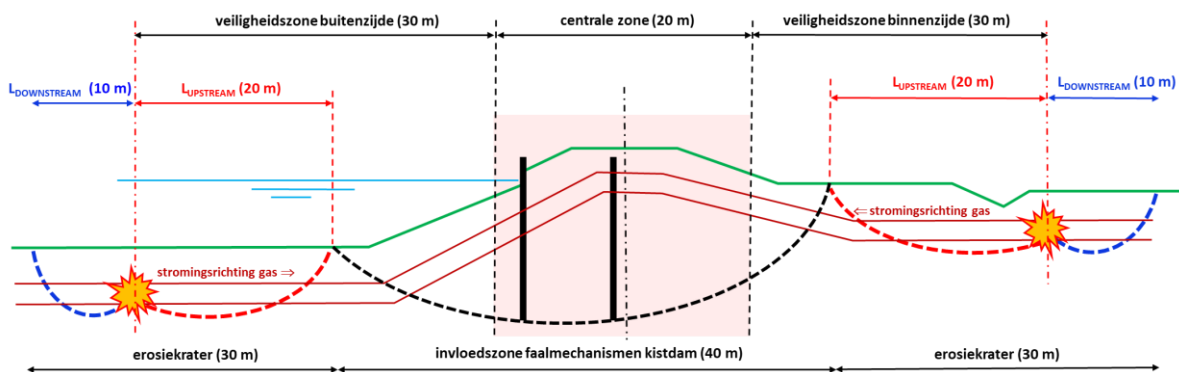
## 5.4 Veiligheidszone en centrale zone

In NEN 3651 [NEN, 2020f] staan rekenregels voor de bepaling van de veiligheidszone. Dit is de zone, direct grenzend aan de teen van de dijk, die bestaat uit een stabiliteitszone en een verstoringszone. Bij de interim methodiek wordt daarbij aangesloten en wordt dit uitgangspunt verder uitgewerkt en daartoe uitgebreid met het een centrale zone, die representatief is voor het faalmechanisme overlopen/overslag. Daarbij wordt de veiligheidszone van de buitenzijde naar de binnenzijde ingedeeld in 3 zones:

- Veiligheidszone buitenzijde (30 m), bestaande uit stabiliteits- en/of pipingzone (10 m) en de  $L_{UPSTREAM}$ -straal van de verstoringszone (20 m).
- Centrale zone (20 m).
- Veiligheidszone binnenzijde (30 m), bestaande uit stabiliteits- en/of pipingzone (10 m) en  $L_{UPSTREAM}$ -straal van de verstoringszone (20 m).

De tussen haakjes vermelde zonebreedtes zijn bepaald voor de leidingkruisingen NAM nummer 22-23 met de grootste verstoringszone ( $L_{UPSTREAM}$  = kraterlengte upstream). De stabiliteits- en/of pipingzone aan de binnenzijde is bepaald door gebruik te maken van leggerafmetingen van het waterschap, die zijn gebaseerd op geotechnische berekeningen. De stabiliteits-/pipingzone aan de buitenzijde is niet berekend. Daarvoor is pragmatisch de breedte van de stabiliteitszone aan de binnenzijde aangehouden.

De totale breedte van de veiligheidszone komt hiermee op 80 m en reikt aan de buitenzijde tot 40 m uit de as van de kruin en ook aan de binnenzijde tot 40 m uit de as van de kruin (zie figuur 5.3).



Figuur 5.3: Bepaling van de veiligheidszones en de centrale zone.

Daarbij is ervan uitgegaan dat de huidige stromingsrichting van het gas van noord naar zuid (van links naar rechts in de figuur) in de toekomst kan worden gewijzigd van zuid naar noord. Dat betekent dat bij de faalkansanalyse voor de bepaling van de kans op leidingfalen van een kruising wordt uitgegaan van een totale lengte van de kruising van 80 m, die aan weerszijden reikt tot 40 m uit de as van de kruin van de kade. Ter vergelijking: in [TNO, 2003] wordt voor de totale lengte van een kruising uitgegaan van 100 m.

## 5.5 Interactie tussen leidingfalen en kistdamfalen

In deze stap wordt per leidingkruising de kans op kistdamfalen gegeven leidingfalen bepaald, alsmede de jaarlijkse faalkans (= additionele faalkans) van de waterkring ten gevolge leidingbreuk door rekening te houden met de jaarlijkse kans op leidingfalen en de hersteltijd.

Per leidingkruising zijn de berekende faalkansen verwerkt in gebeurtenissenbomen, zie *Bijlage 7: Faalpaden en gebeurtenissenbomen*. De daaruit voortvloeiende additionele faalkansen zijn samengevat in de volgende tabel.

Leidingkruising	Additionele faalkans [per jaar]	Opmerking
NAM 501011 (nr. 15)	$6,7 \times 10^{-10}$	
Gasunie A-610 (nr. 20) en A-543 (nr. 21)	$6,6 \times 10^{-10}$	2 leidingkruisingen in één kistdam
NAM 501071 (nr. 22) en NAM 501061 (nr. 23)	$1,0 \times 10^{-9}$	2 leidingkruisingen in één kistdam

*Tabel 5.9: Additionele faalkansen per leidingkruising.*

## 6. Toetsing van additionele faalkans aan faalkanseis

De faalkanseis is gelijk aan  $2,0 \times 10^{-6}$  per jaar (zie hoofdstuk 3). Uit de resultaten van tabel 5.9 blijkt dat de additionele faalkans van alle leidingkruisingen ruimschoots voldoen aan de faalkanseis.

Hierin zit nog een latente reserve, omdat de Bevb-correctie-/reductiefactoren en de veiligheidsmarge in de sterkte van de kistdammen buiten beschouwing zijn gelaten.

## 7. Conclusies en aanbevelingen

### 7.1 Conclusies

Bij de praktijkcasus kadeversterking Steendam – Tjuchem is gebruik gemaakt van een onderbouwde tussentijdse interim methodiek als tussenstap op weg naar implementatie van het Veiligheidsraamwerk Kabels & Leidingen van de POV-K&L, dat nu nog niet algemeen toepasbaar is en nog verder moet worden doorontwikkeld. De toepassing van de interim methodiek in de praktijkcasus is kansrijk gebleken. Nieuwe beschikbare kennis, opgeleverd door de POV K&L (2017-2020) is in dit project voor het eerst toegepast bij een regionale waterkering. Daarbij is bij het kadeversterkingsontwerp rekening gehouden met de inpassing van bestaande leidingen, inclusief reststerkte na leidingfalen en is invulling gegeven aan witte vlekken in de NEN 3650 reeks en een andere veiligheidsbenadering voor regionale waterkeringen op basis van overstromingskansen. De benodigde inspanning hiervoor is de investering zeker waard geweest. De conclusie is dat een faalkansaanpak loont, omdat ‘verborgen’ aanwezige marges zichtbaar worden en verantwoord kunnen worden benut. Daardoor kan de kadeversterking sneller, beter en goedkoper worden uitgevoerd.

Op basis van een conservatieve beoordeling volgens de rekenregels uit de vigerende ontwerpnormen, leidraden en richtlijnen voldoen de 5 onderzochte bestaande kruisingen van gastransportleidingen met de waterkering met kistdammen niet helemaal aan de eisen. Om daaraan te kunnen voldoen zouden de kistdammen moeten worden verhoogd en verbreed.

De leidingkruisingen zijn aangelegd in de periode van 1973 tot 1986 toen de Pijpleidingcode 1972 al van toepassing was. Waarom deze toen niet is toegepast kon niet meer worden achterhaald. Uit een review van de ontwerpdocumenten is gebleken dat de gastransportleidingen qua sterkte voldoen aan de eisen van de NEN 3650 reeks, maar dat de stabiliteitszone, pipingzone en verstoringszones niet zijn bepaald. Verder is gebleken dat de kistdammen op basis van NEN 3651, 2012 zijn beoordeeld volgens CUR 166 Damwandconstructies en de Eurocode in plaats van het daarvoor in NEN 3651, 2020 genoemde Technisch Rapport Kistdammen en Diepwanden in Waterkeringen.

Op basis van maatwerk middels een faalkans-/risicoanalyse kan worden aangetoond of de additionele faalkans van het ontwerp voldoet aan de conservatieve faalkanseis voor een individuele leidingkruising in het normtraject. Dit is voor het ontwerp van de leidingkruisingen met kistdam onderzocht op basis van een interim methodiek, die in dit project voor het eerst is toegepast. De interim methodiek bestaat uit een integrale faalkansanalyse van leidingfalen in combinatie met kistdamfalen, waarbij van grof naar fijn wordt gewerkt en wordt uitgegaan van conservatieve, veilige faalkansschattingen. Het resultaat is een additionele faalkans per leidingkruising, die ruimschoots voldoet aan de faalkanseis die is gerelateerd aan de getalswaarde van de IPO-norm ( $0,2 \times 1\% / 10 = 0,02\%$  van de getalswaarde van de IPO-norm = 1/100 per jaar).

De conclusie is dat de bestaande kruisingen van de betreffende gastransportleidingen met de waterkering met kistdam veilig kunnen worden ingepast in de kadeversterking. Dat betekent dat de kistdammen niet hoeven te worden verhoogd en verbreed en er ook geen nieuwe ontwerpberekeningen van kistdammen nodig zijn. Daardoor worden ingrijpende maatregelen voorkomen en worden extra kosten bespaard.

Ter plaatse van de damwanddoorvoering is de aanwezigheid van de kleikist en van de vereiste vrije ruimte van 0,50 m (tussen de onderkant van de leiding en de bovenkant van de daaronder aanwezige damwand) onzeker. In dit geval zal vanwege de zeer geringe zettingen ( $\leq 11$  mm) de aanwezige vrije ruimte waarschijnlijk minder kritisch zijn. Bovendien zal eventueel contact tussen damwand en leiding bij de periodieke inspectie van de kathodische bescherming worden opgemerkt. Daarom dient in het veld enkel de aanwezigheid van de kleikist te worden geverifieerd.

## 7.2 Aanbevelingen

De resultaten van deze eerste toepassing van de interim methodiek voor kruisingen van gastransportleidingen in een regionale waterkering zijn veelbelovend. De toepassing daarvan is ook kansrijk voor kruisende en parallelle hoge- en lagedruk gas- en vloeistofleidingen in regionale en in primaire waterkeringen. Bij het werken van grof naar fijn is gebleken dat de werkwijze kan worden geoptimaliseerd. Voorbeelden daarvan zijn:

- 1) Toepassing van de standaard Bevb-correctie/-reductiefactoren op de faalfrequenties van de leiding. Daarmee kan mogelijk al worden voldaan aan de faalkanseis en zou geen faalkansanalyse nodig zijn. De Bevb-factoren zijn afgeleid op basis van faalkansen en gelden voornamelijk voor veldstrekkingen en niet specifiek voor kruisingen, alhoewel sommige factoren zoals bijvoorbeeld de wanddikte ook voor kruisingen relevant zijn. Aanbevolen wordt om een specifieke set reductiefactoren voor waterkeringen te ontwikkelen en nader onderzoek uit voeren naar de invloed van faalkansen van leidingkruisingen specifiek en de consequenties van dijkfalen ten gevolge van leidingfalen.
- 2) Controle vooraf met de reguliere rekenregels van de faalmechanismen van de kistdam, gegeven leidingfalen. In principe moet de kistdam berekend zijn op de toestand waarin de leiding is bezweken. Als de kistdam in deze situatie voldoet aan de eisen van CUR 166/Eurocode is geen faalkansanalyse nodig. Aanbevolen wordt om de bestaande rekenregels in 8.1.7.1 Damwandconstructie van NEN 3651 hierop aan te passen.
- 3) De kans op falen van de sterkte van de onderdelen van de kistdammen is globaal ingeschat. Deze kan nader worden bepaald met specifieke software, zoals bijvoorbeeld D-Sheetpiling of gelijkwaardig.
- 4) Voor het falen van de sterkte van de kistdammen is gebruik gemaakt van rekenregels uit de Eurocode, die representatief zijn voor een referentieperiode van 50 jaar. Voor regionale waterkeringen wordt uitgegaan van een referentieperiode van 1 jaar, zodat een vertaalslag nodig. Dat is echter geen gemakkelijke kwestie omdat de kans op falen niet van jaar op jaar hetzelfde is vanwege onder andere verouderingsprocessen en correlaties in het tijdsdomein. Omdat daarvoor rekenregels ontbreken is als veilige, conservatieve aanname de jaarkans gelijkgesteld aan 50-jaarskans. Aanbevolen wordt om rekenregels te ontwikkelen voor de doorvertaling van levensduurkansen naar jaarkansen en vice versa.
- 5) De vereenvoudigde formules voor de berekening van de erosiekrater bij leidingfalen leveren onrealistisch grote afmetingen op. Aanscherping daarvan levert een reductie op van de berekende kraterlengte met minimaal een factor 2. Overigens wordt in Bijlage A.1.1.3 van NEN 3651 [NEN, 2020f] deze mogelijkheid al genoemd. Aanbevolen wordt om Bijlage A.1.1.2. en Bijlage A 1.1.3 van NEN 3651 hierop aan te passen.
- 6) De voor de leidingen toegepaste faalfrequenties zijn representatief voor veldstrekkingen in Europa. Naar verwachting zijn die voor leidingen in waterkeringen een orde kleiner. Als er voldoende faalgevallen in dijken of vergelijkbare gevallen beschikbaar zijn loont het de moeite om daarvoor een aparte database van leidingincidenten te maken. Aanbevolen wordt om dit te combineren met nadere analyse van de bruikbaarheid van bestaande databases.

Aanbevolen wordt om de interim methodiek verder uit te dragen en te verbreden door praktische toepassing daarvan in dijkversterkingsprojecten van regionale en primaire waterkeringen. Daarbij dient onderscheid te worden gemaakt in leidingen zonder en met damwandconstructies of kistdammen.

## 8. Referenties

- [Deltares, 2013a] Effecten geïnduceerde aardbevingen op het Gasunienetwerk in Groningen  
Deltares  
Rapport 1208092-000-GEO-0005  
2013
- [Deltares, 2013b] Groningse kades en dijken bij geïnduceerde aardbevingen  
Deltares  
Rapport 1208624-002-GEO-0003  
2013
- [Deltares, 2013c] Effecten aardbevingen op kritische infrastructuur – Verwekingstudie Deltares  
Rapport 1208624-007-GEO-0001  
2013
- [HKV, 2013] Veiligheidsklassen Regionale Waterkeringen  
Actualiseren normering regionale waterkeringen  
HKV LIJN IN WATER  
Rapport PR2329  
10 april 2013
- [I&M, 2017] Handreiking ontwerpen met overstromingskansen  
Veiligheidsfactoren en belastingen bij nieuwe overstromingskansnormen  
Versie OI2014v4  
Rijkswaterstaat – Ministerie van Infrastructuur en Milieu  
Februari 2017
- [IPO, 1999] IPO-richtlijn ter bepaling van het veiligheidsniveau van boezemkaden  
Interprovinciaal Overleg  
30 november 1999
- [CUR, 2012] CUR Publicatie 166 Damwandconstructies  
CUR Bouw & Infra  
6<sup>e</sup> herziene druk, deel 1 en deel 2  
Juli 2012
- [NEN, 2020] NEN 3650 reeks bestaande uit:  
a) NEN 3651-1:2020 Eisen voor buisleidingsystemen – Deel 1: Algemene eisen  
b) NEN 3650-2:2020 Aanvullende eisen voor leidingen van staal  
c) NEN 3650-3:2020 Aanvullende eisen voor leidingen van kunststof  
d) NEN 3650-4:2020 Aanvullende eisen voor leidingen van beton  
e) NEN 3650-5:2020 Aanvullende eisen voor leidingen van gietijzer  
f) NEN 3651:2020 Aanvullende eisen voor buisleidingen in of nabij belangrijke  
waterstaatswerken  
Nederlands Normalisatie Instituut  
Januari 2020
- [NPR, 2006] Nederlandse Praktijkrichtlijn NPR 3659  
Ondergrondse pijpleidingen – Grondslagen voor de sterkteberekening  
Correctieblad NPR 3659/A1:2003/C1  
Januari 2006
- [RIVM, 2021] Handleiding risicoberekeningen Bevb

Versie 3.2  
Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu  
Januari 2021  
(te downloaden via [HRBevb versie 3.2 | RIVM](#))

- [POV-KL, 2018] Faalkansanalyse bij dijkontwerp Zeeburgereiland met parallelle waterleiding  
Eerste toepassing van het Veiligheidsraamwerk K&L  
Project Overstijgende Verkenning Kabels & leidingen  
11 september 2018  
(te downloaden via [POV K&L Wegwijzer voor dijkprojecten met kabels en leidingen \(povkabelsenleidingen.nl\)](#))
- [POV-KL, 2020a] Veiligheidsraamwerk POV K&L - Toepassing in de praktijk  
Project Overstijgende Verkenning Kabels & Leidingen  
3 december 2020  
(te downloaden via [POV K&L Wegwijzer voor dijkprojecten met kabels en leidingen \(povkabelsenleidingen.nl\)](#))
- [POV-KL, 2020b] Doorontwikkeling Veiligheidsraamwerk Kabels & Leidingen  
Project Overstijgende Verkenning Kabels & Leidingen  
3 december 2020  
(te downloaden via [\[POV K&L Wegwijzer voor dijkprojecten met kabels en leidingen \(povkabelsenleidingen.nl\)\]](#))
- [POV-KL, 2020c] Faalkansanalyse dijkontwerp Wolferen-Sprok met kruisende gasleiding A-505  
Derde praktijktoepassing van het Veiligheidsraamwerk Kabels & leidingen  
Project Overstijgende Verkenning Kabels & Leidingen  
29 oktober 2020  
(te downloaden via [POV K&L Wegwijzer voor dijkprojecten met kabels en leidingen \(povkabelsenleidingen.nl\)](#))
- [POV-KL, 2020d] Advies aan Waterschap Brabantse Delta  
Ontwerp dijk kruising lagedruk persleidingen te Waalwijk  
Project Overstijgende Verkenning Kabels & Leidingen  
4 december 2020  
(te downloaden via [POV K&L Wegwijzer voor dijkprojecten met kabels en leidingen \(povkabelsenleidingen.nl\)](#))
- [POV-KL, 2020e] Omrekening van Unity Check naar faalkans  
Project Overstijgende Verkenning Kabels & Leidingen  
TNO Innovation for life  
Rapport TNO 2020 R12179  
3 december 2020  
(te downloaden via website [POV K&L Wegwijzer voor dijkprojecten met kabels en leidingen \(povkabelsenleidingen.nl\)](#))
- [POV-KL, 2020f] Faalkansanalyse primaire waterkering Nieuwendam met parallelle waterleiding  
Project Overstijgende Verkenning Kabels & Leidingen  
3 december 2020  
(te downloaden via website [POV K&L Wegwijzer voor dijkprojecten met kabels en leidingen \(povkabelsenleidingen.nl\)](#))

- [PROV-G, 2016] Omgevingsverordening Provincie Groningen 2016  
Bijlage 3 Veiligheidsnormen regionale waterkeringen  
Kaart 3.2 Duurswoldboezem  
2016
- [STOWA, 2009] Materiaalfactoren boezemkaden  
Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer  
Rapport 2009-05 ORK  
23 maart 2009
- [STOWA, 2015] Leidraad Toetsen op Veiligheid Regionale waterkeringen  
Module A: Algemeen gedeelte  
Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer  
Rapport 2015-15  
28 mei 2015
- [STOWA, 2020] De veiligheidsbenadering regionale keringen  
Ontstaan, achtergronden en toepassing van de huidige veiligheidsbenadering  
voor regionale waterkeringen  
Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer  
Rapport 2020-07  
2020
- [STOWA, 2021] Herbeschouwing veiligheidsbenadering regionale waterkeringen  
Rapportage gebiedspilot polder Heerhugowaard  
Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer  
November 2021
- [TAW, 1999] Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen  
Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen  
Maart 1999
- [WBI, 2018] WBI Veiligheidsraamwerk Kabels en Leidingen  
Generieke uitgangspunten als vertrekpunt voor nadere uitwerking in (pilot)  
projecten  
Deltares  
28 mei 2018
- [W+B, 2020a] Notitie Beoordeling waterveiligheid kruisende kabels en leidingen NAM  
Kadeverbetering Steendam - Tjuchem  
Witteveen+Bos  
30 oktober 2020
- [W+B, 2020b] Notitie Beoordeling waterveiligheid kruisende kabels en leidingen Gasunie  
Kadeverbetering Steendam - Tjuchem  
Witteveen+Bos  
30 oktober 2020

# Bijlage 1: Situatie en dwarsprofielen

Kruisingen gastransportleidingen NAM en Gasunie  
in kadeversterking Steendam - Tjuchem

Opgesteld door: Harry Schelfhout

Datum: 9 september 2022 (definitief)

## 1. Inleiding

In deze bijlage wordt inzicht gegeven in de situatie en de dwarsprofielen van de in het kadeversterkingstraject Steendam – Tjuchem liggende bestaande gastransportleidingen met kistdammen.

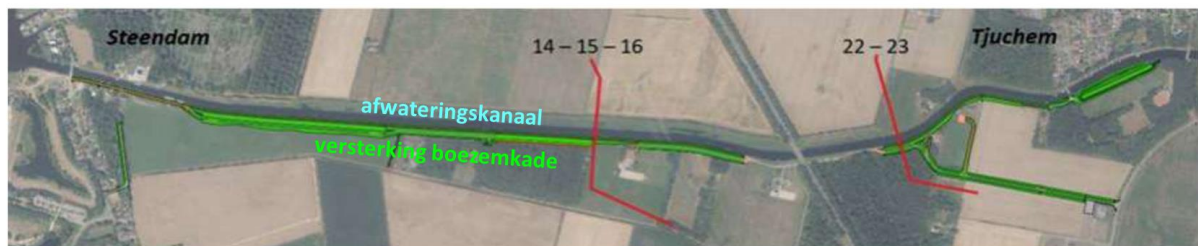
Het ontwerp van de kadeversterking is aangepast met als uitgangspunt dat de huidige leidingkruisingen kunnen worden gehandhaafd en dat de kistdammen zouden moeten worden verhoogd en verbreed. Uit de faalkansanalyse is gebleken dat de sterkte van de leidingkruisingen voldoet aan de eisen van de NEN 3650 reeks en dat verhoging en verbreding van de kistdammen niet nodig is.

Het versterkingsplan voorziet ter plaatse van de leidingkruisingen in toepassing van licht ophoogmateriaal en verificatie van de waterdichte afsluiting (kleikist + kwelscherm) en de vrije ruimte tussen onderkant leiding en damwand ter plaatse van de doorvoer van de leidingen door de damwand.

De leidingkruisingen van de NAM in één kistdam liggen zo dicht bij elkaar dat er sprake is van een overlap van verstoringszone met het risico van domino-effecten als gevolg van onderlinge beïnvloeding. In dat geval moeten de faalkansen van beide leidingen bij elkaar worden opgeteld.

## 2. Situatie

De ligging van de leidingkruisingen in het kadeversterkingstraject Steendam – Tjuchem is weergegeven in de volgende figuur.



Leidingkruisingen NAM:

- nrs. 14, 15, 22 en 23 zijn 36" gastransportleidingen (faalkansanalyse nodig)
- nr. 16 is 4" condensaatleiding (wordt buiten beschouwing gelaten)



Leidingkruisingen Gasunie:

- nr. 20 is 48" is gastransportleiding (faalkansanalyse nodig)
- nr. 21 is 42" is gastransportleiding (faalkansanalyse nodig)

*Figuur 2.1: Situatie kruisende gastransportleidingen in kadeversterkingstraject Steendam – Tjuchem*

De leidingen kruisen de boezenkade door middel van een kistdam. Van de 7 in figuur 1 weergegeven kruisingen zijn er 5 gastransportleidingen, waarvoor een faalkansanalyse is uitgevoerd volgens de interim methodiek.

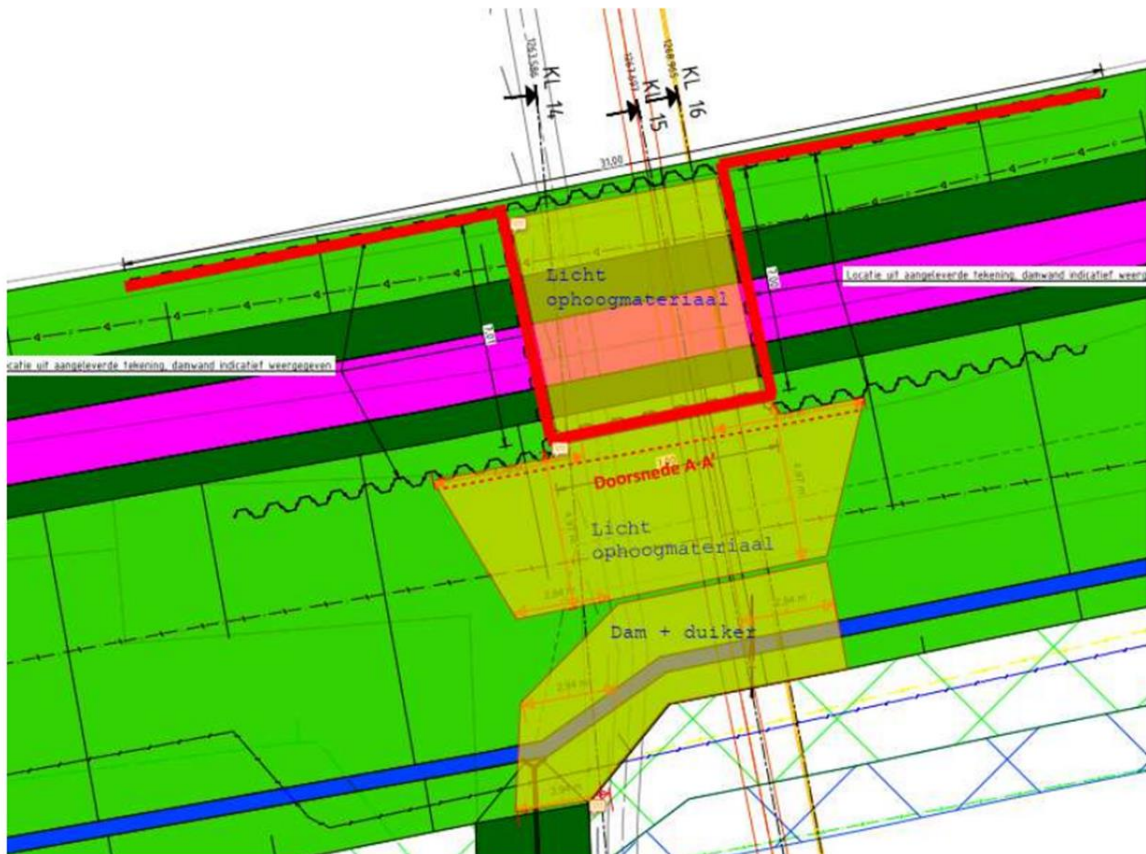
Het gaat daarbij om de volgende kruisingen van gastransportleidingen van NAM en Gasunie:

- nr. 15 = NAM 501100
- nr. 22 = NAM 501071

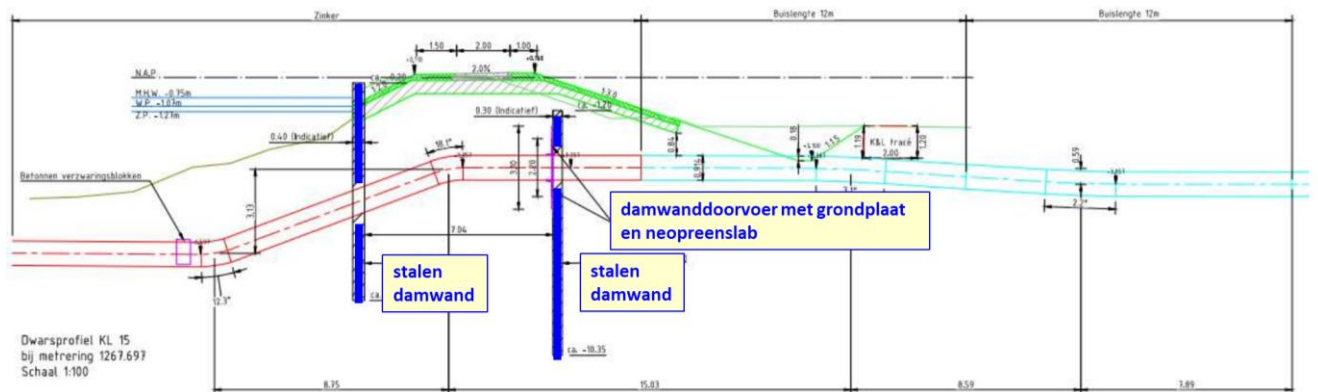
- nr. 23 = NAM 501061
- nr. 20 = Gasunie A-610
- nr. 21 = Gasunie A-543

Daarvan kruisen de leidingclusters 14-15-16, 22-23 en 20-21 één kistdam. Hierna wordt een overzicht gegeven van de situatie en dwarsprofielen van deze leidingkruisingen. De betreffende figuren zijn overgenomen uit de ontwerpdocumenten [W+B, 2020a] en [W+B, 2020b].

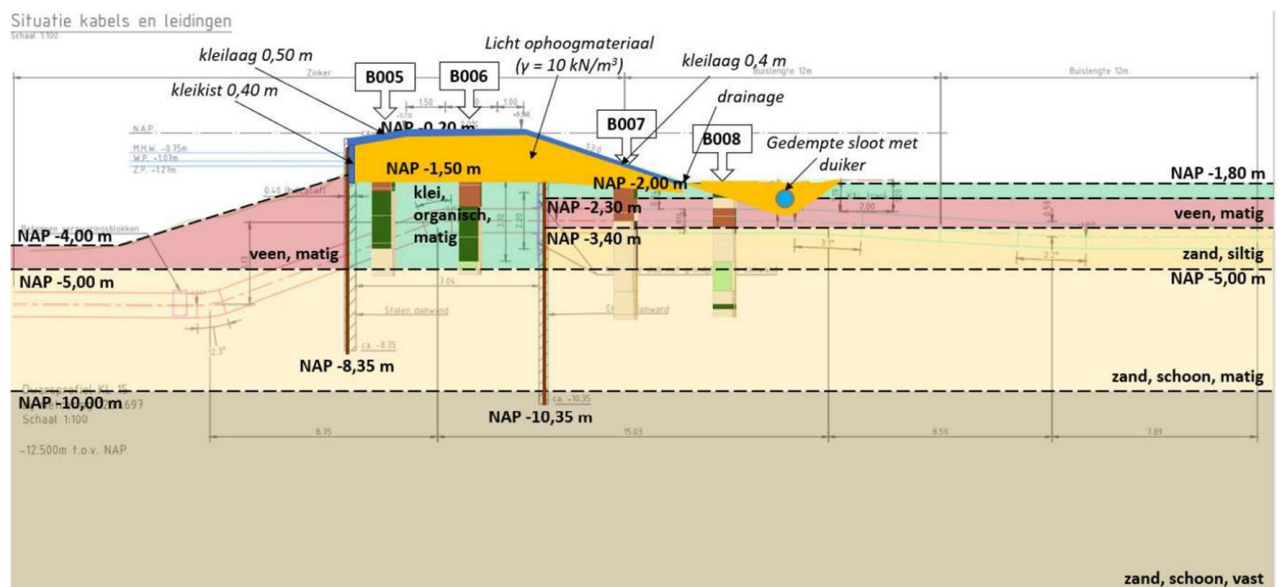
## 2.1 NAM 501100 (nr. 15)



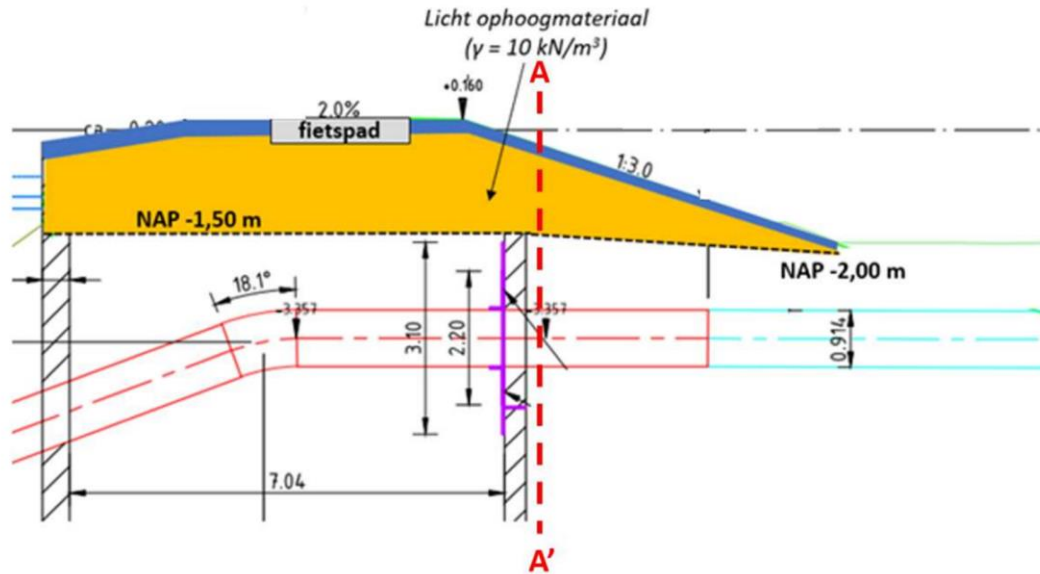
Figuur 2.2: Overzichtstekening aangepast ontwerp leidingkruisingen 14-15-16



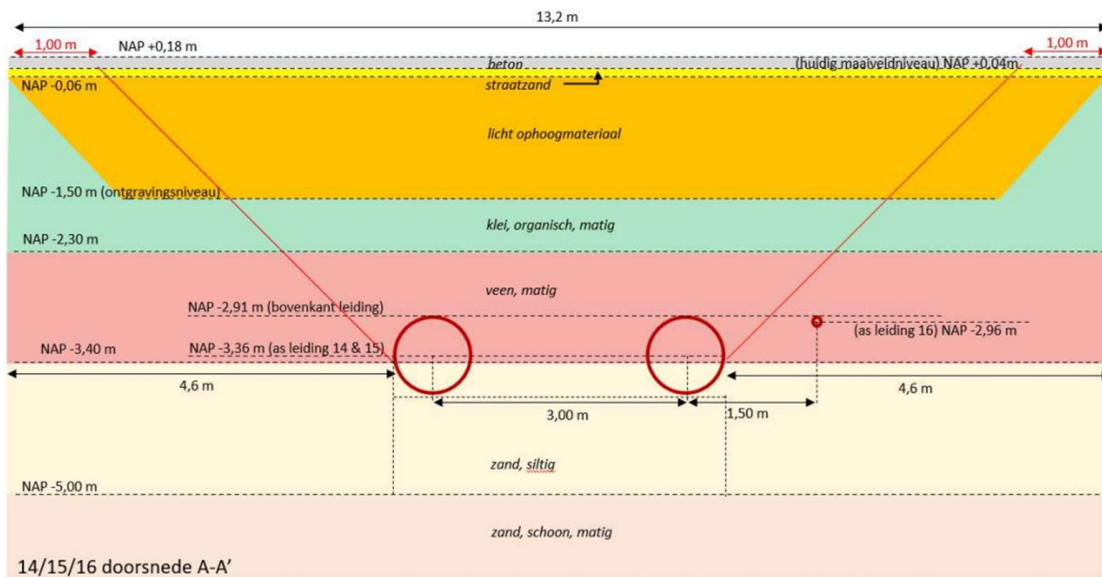
Figuur 2.3: Ontwerptekening leidingkruising NAM 501100 (nr. 15)



Figuur 2.4: Schetsontwerp met bodemopbouw leidingkruising NAM 501100 (nr. 15)

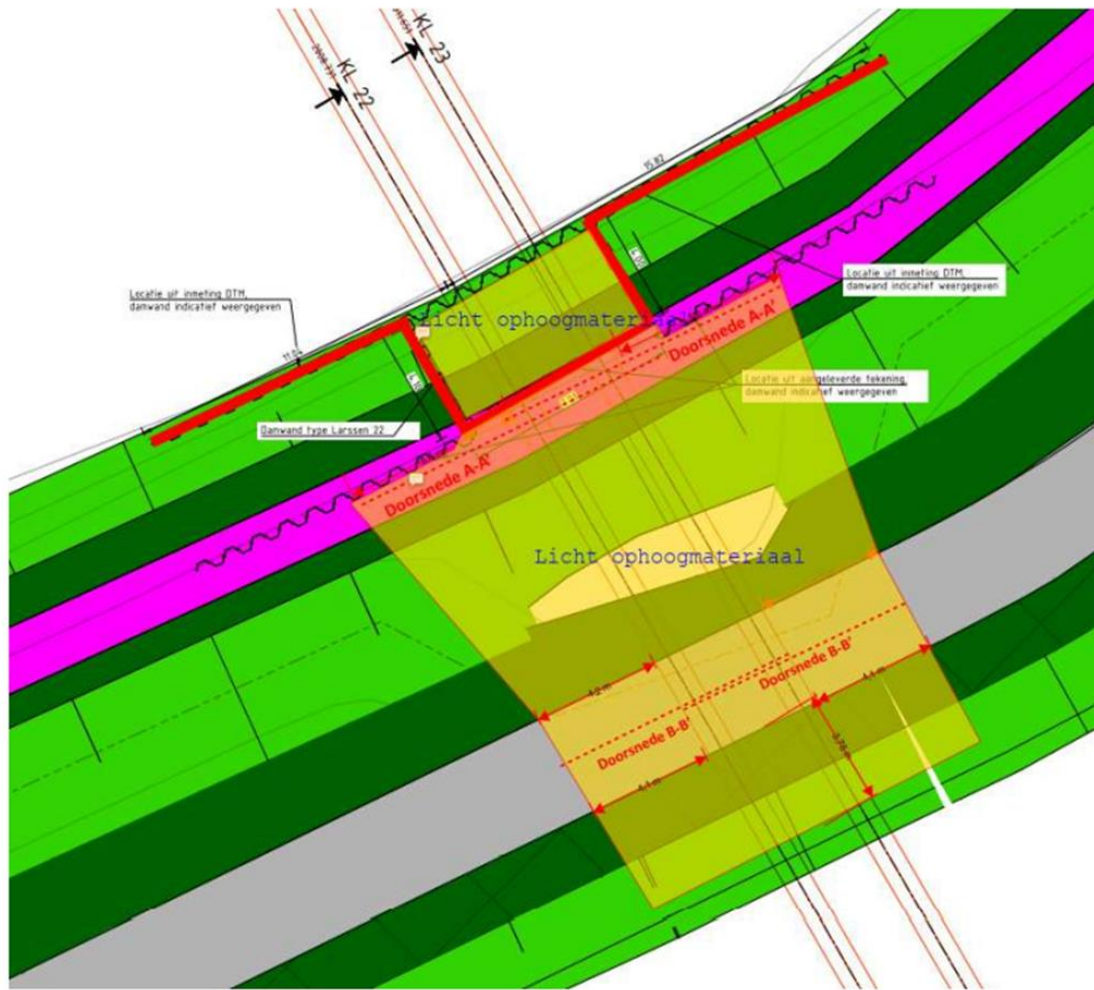


Figuur 2.5: Doorsnede aangepast ontwerp leidingkruising NAM 501100 (nr. 15)

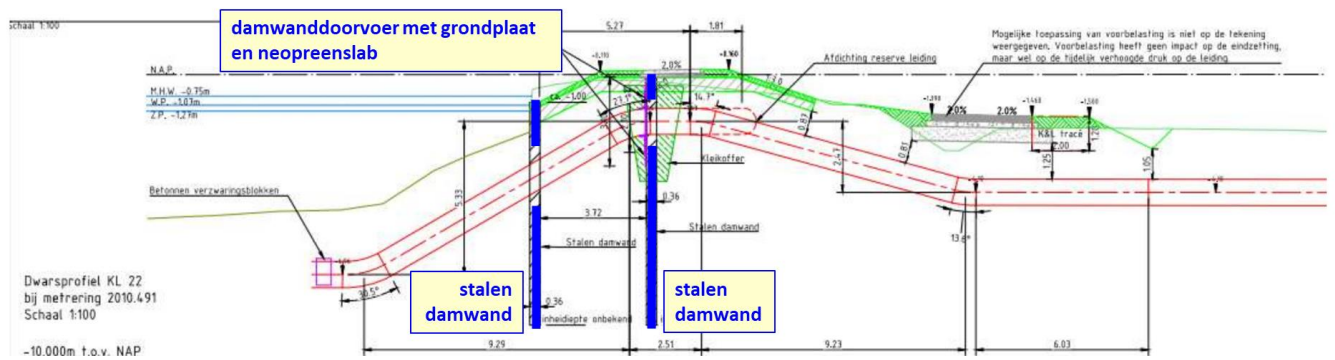


Figuur 2.6: Doorsnede A-A' aangepast ontwerp leidingkruising NAM 501100 (nr. 15)

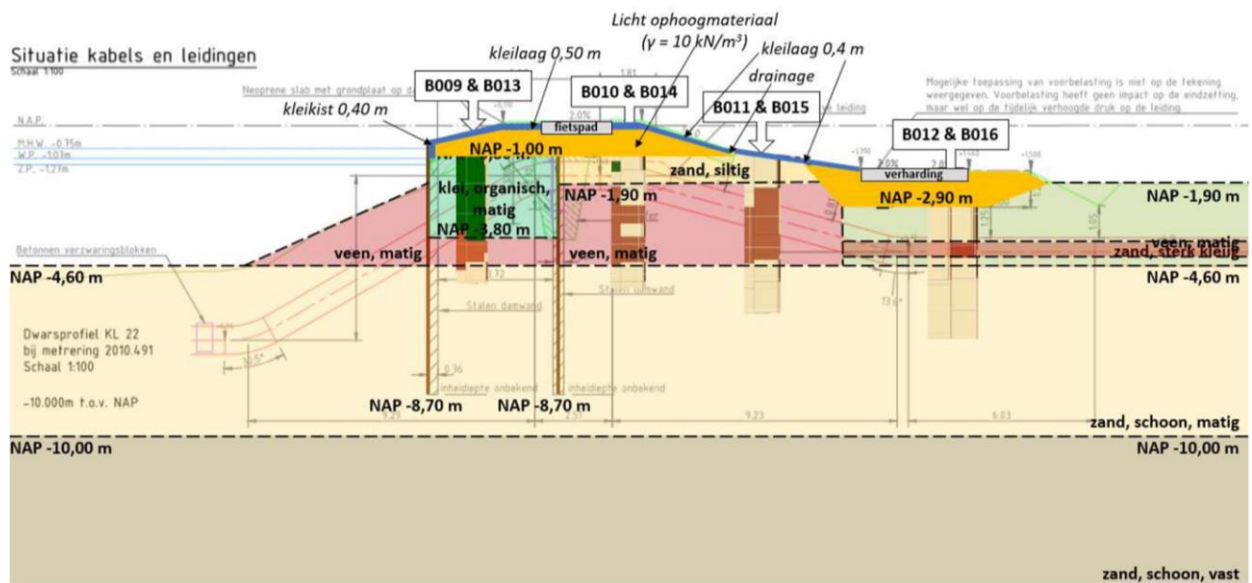
## 2.2 NAM 501071 (nr. 22) en NAM 501061 (nr. 23)



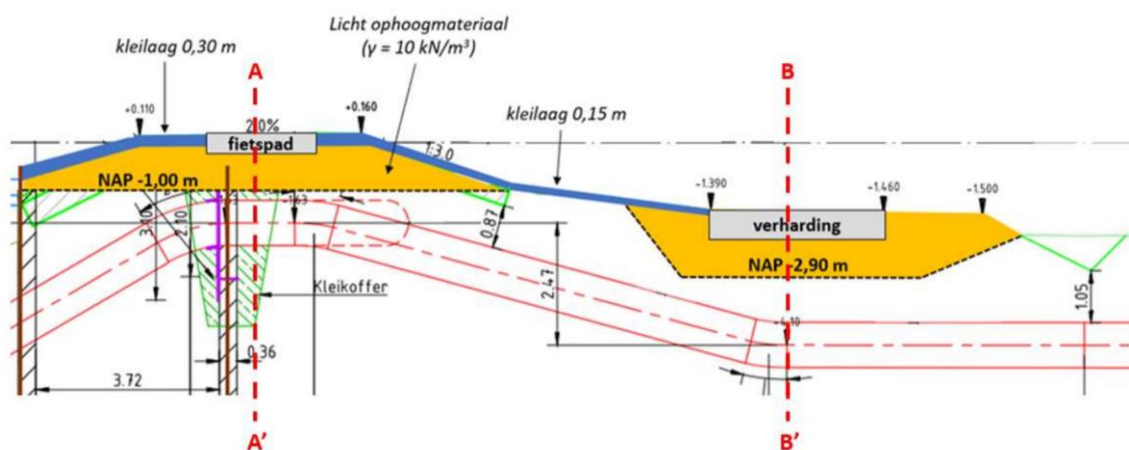
Figuur 2.7: Situatie leidingkruisingen NAM 501071 (nr. 22) en NAM 501061(nr. 23)



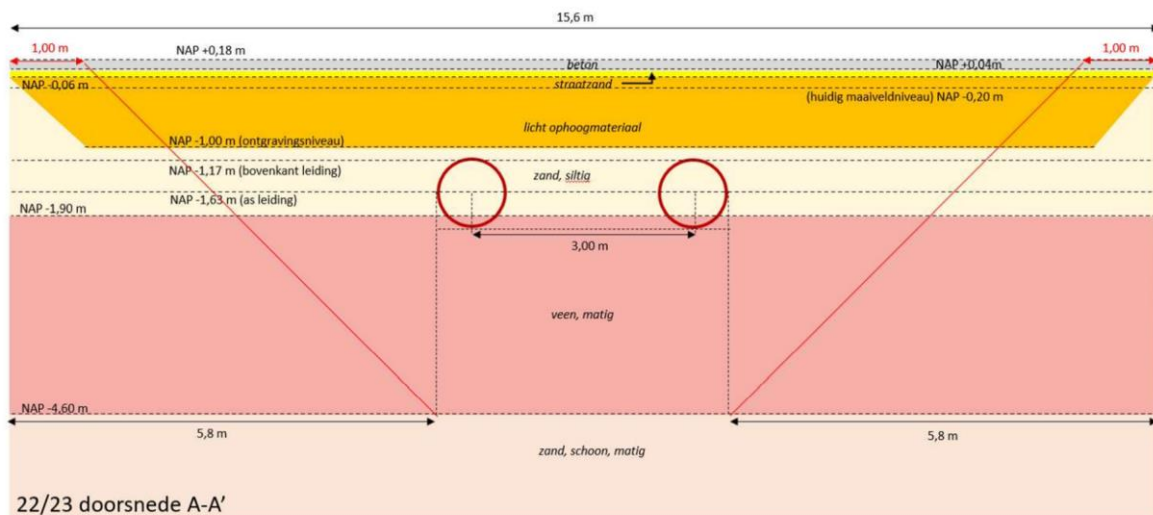
Figuur 2.8: Ontwerpprofiel kade bij leidingkruising NAM 501071 (nr. 22)



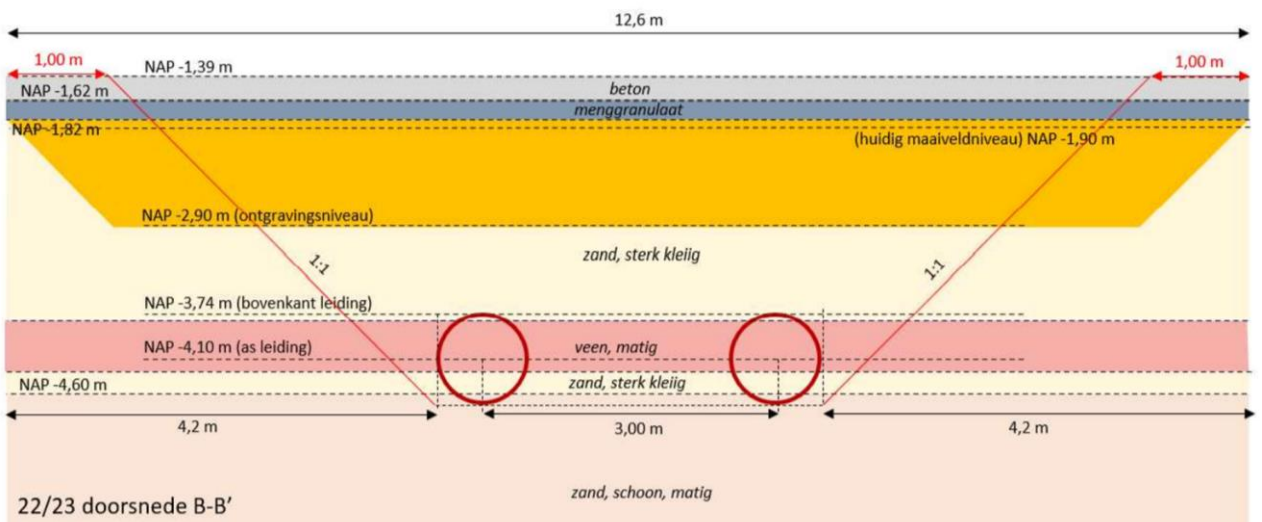
Figuur 2.9: Schetsontwerp met bodemopbouw leidingkruising NAM 5010710 (nr. 22)



Figuur 2.10: Doorsnede aangepast ontwerp leidingkruising NAM 5010710 (nr. 22)

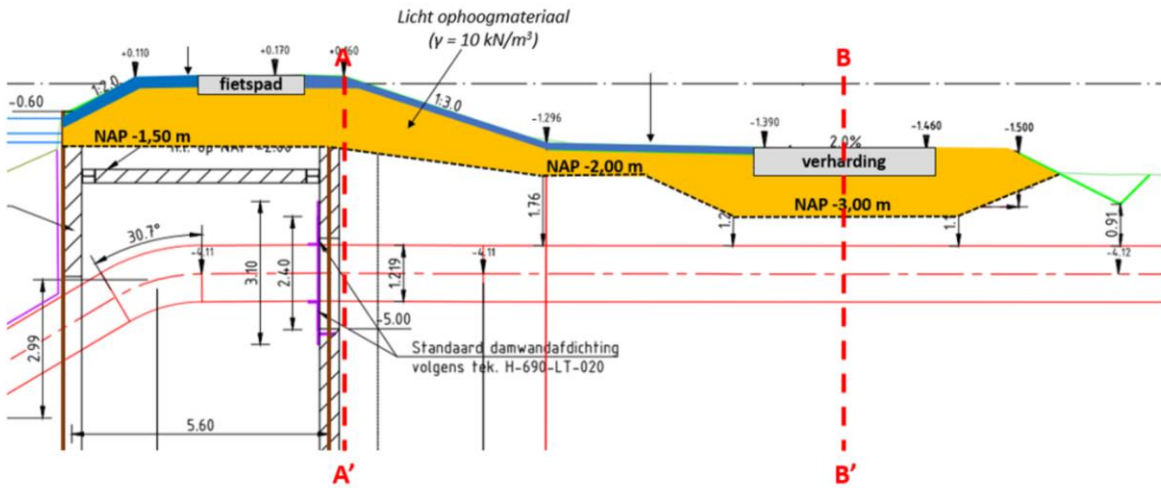


Figuur 2.11: Doorsnede A – A' aangepast ontwerp leidingkruising NAM 5010710 (nr. 22)

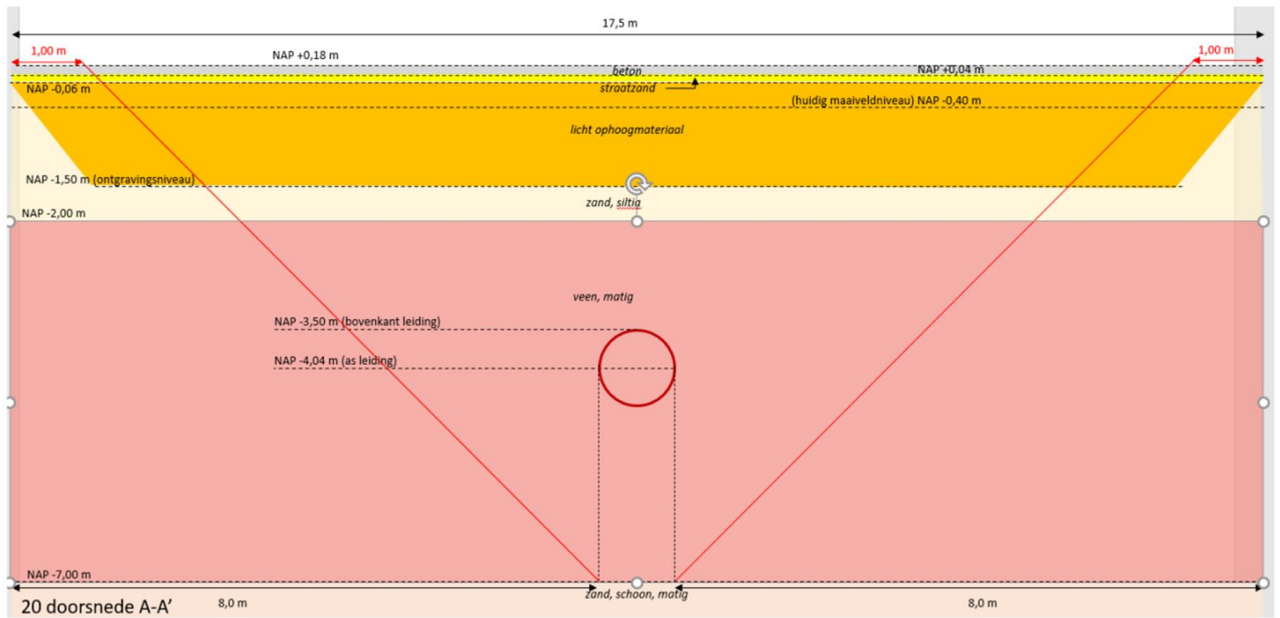


Figuur 2.12: Doorsnede B – B' aangepast ontwerp leidingkruising NAM 5010710 (nr. 22)

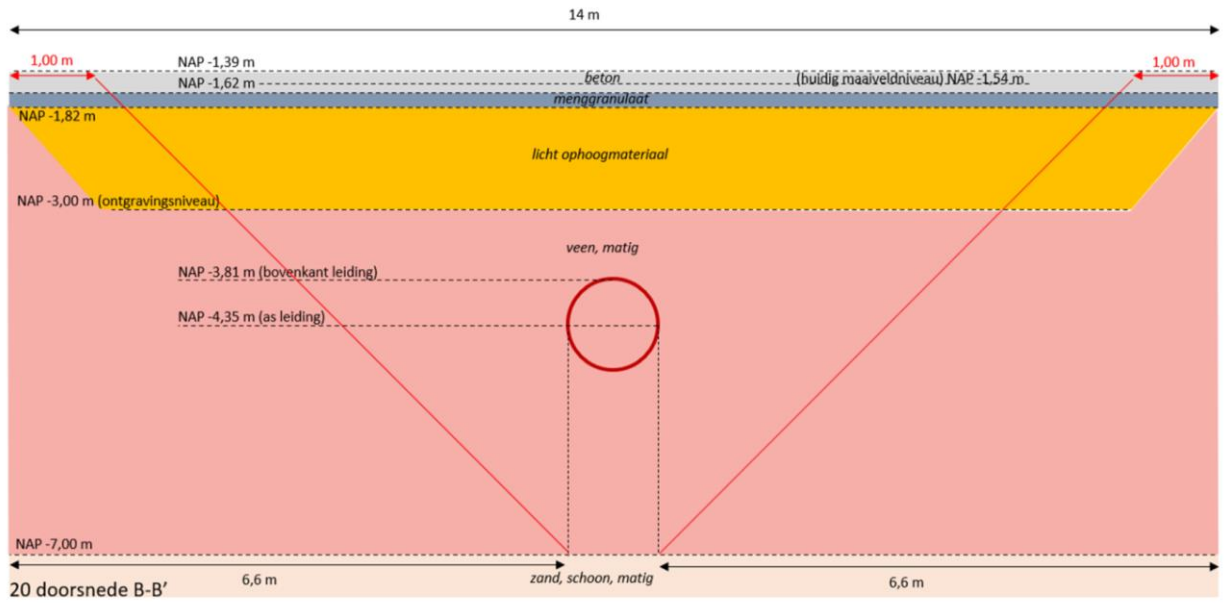




Figuur 3.3: Doorsnede aangepast ontwerp leidingkruising Gasunie A-610 (nr. 20)



Figuur 3.4: Doorsnede A – A' aangepast ontwerp leidingkruising Gasunie A-610 (nr. 20)



Figuur 3.5: Doorsnede B - B' aangepast ontwerp leidingkruising Gasunie A-610 (nr. 20)

## **Bijlage 2: Resultaten review ontwerpdocumenten**

### **Beoordeling leidingkruisingen en kistdammen in kadeversterking Steendam - Tjuchem**

Opgesteld door: Harry Schelfhout en Jan Spiekhout

Datum: 9 september 2022 (definitief)

## 1. Inleiding

In deze bijlage worden de resultaten gepresenteerd van de door Harry Schelfhout en Jan Spiekhout uitgevoerde review van de ontwerpdocumenten. De nadruk ligt daarbij op de beoordeling van 5 bestaande kruisingen van gastransportleidingen met kistdam.

De bij de ontwerpdocumenten toegepaste methodieken en rekenregels zijn gebaseerd op de huidige wet- en regelgeving en de daarvoor beschikbare leidraden, technische rapporten en richtlijnen voor regionale waterkeringen.

Bij de resultaten van de review wordt eerst ingegaan op de beoordeling van de leidingkruisingen en daarna op de beoordeling van de kistdammen.

## 2. Beoordeling leidingkruisingen

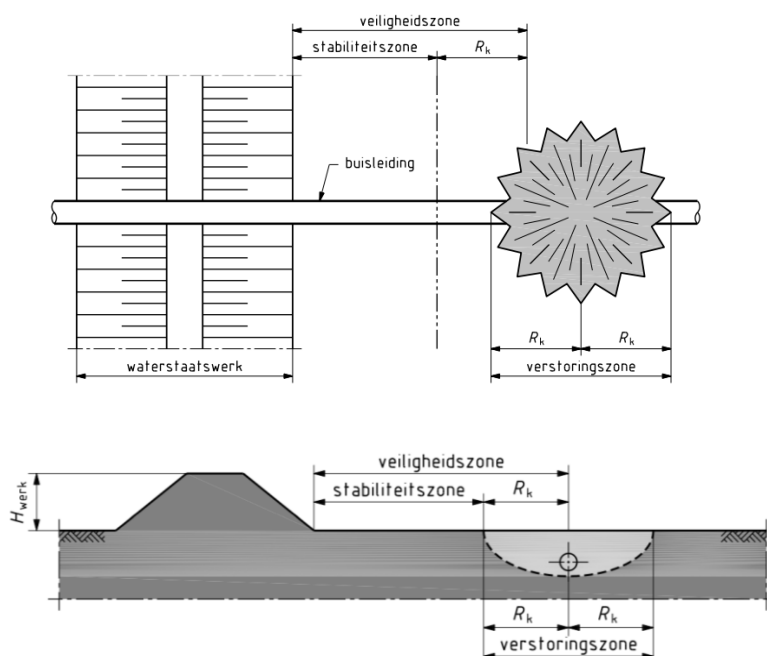
Voor het ontwerp van buisleidingen staan rekenregels in de NEN 3650 - reeks [NEN 3650, 2020]. Onderdeel daarvan is NEN 3651 [NEN, 2020f] met specifieke eisen en rekenregels voor leidingkruisingen in regionale waterkeringen.

In de volgende paragrafen wordt nagegaan in hoeverre het ontwerp van de leidingkruisingen voldoet aan de eisen van de NEN 3650 - reeks in het algemeen en NEN 3651 in het bijzonder.

### 2.1 Leidingkruisingen NAM

#### 2.1.1 Veiligheidszone

De veiligheidszone is een strook langs de teen van de dijk, waarin verstoring van de ondergrond door leidinglek/-breuk invloed heeft op de stabiliteit van de waterkering. De veiligheidszone bestaat uit een stabiliteitszone en een verstoringszone.



Figuur 2.1: Veiligheidszone bij een kruisende en een parallel gelegen leiding (bron: NEN, 2020f)

Leidingkruisingen moeten binnen de veiligheidszone voldoen aan de eisen van NEN 3651. In de ontwerpdocumenten ontbreken gegevens over de afmetingen van stabiliteitszone en de veiligheidszones.

### 2.1.2 Relatieve sterkte

In NEN 3651 wordt een eis aan de relatieve sterkte gesteld. Dat betekent dat de leiding in de kruising (binnen de veiligheidszone) voor inwendige druk 20% sterker moet zijn dan in de aangrenzende veldstrekking. Bij het ontwerp is de relatieve sterkte-eis niet van toepassing verklaard. De eis van relatieve sterkte is niet relevant voor de faalkansanalyse. Daarbij wordt bij de bepaling van de kans op leidingfalen rekening gehouden met de in de veiligheidszone aanwezige wanddikten, als functie van de Unity Check UC uit de PLE4Win - sterkteberekeningen.

### 2.1.3 Wanddikte en importantiefactor

In NEN 3651 worden in verband met mechanische beschadiging van leidingen door derden eisen gesteld aan de wanddikte en toepassing van de importantiefactor  $S$ . De nominale diameter van de NAM-leidingen in de kruising is 36 inch (914 mm) met een wanddikte van 15,9 of 19,0 mm.

Volgens NEN 3651 kan bij een leiding met een nominale diameter van 900 mm en een wanddikte van 13 mm een importantiefactor van  $S = 1,0$  worden toegepast. De NAM-leidingen voldoen aan deze eis. Bij de sterkteberekeningen wordt daar rekening mee gehouden.

### 2.1.4 Sterkteberekeningen

De NEN 3650 - reeks stelt eisen aan de sterkteberekeningen van buisleidingen en geeft daarvoor vereenvoudigde en uitgebreide formules. Voor hogedrukleidingen (inwendige druk  $\geq 1$  MPa c.q.  $\geq 10$  bar) zijn de uitgebreide formules van toepassing.

Bij het ontwerp zijn er met het gevalideerde rekenprogramma Ple4Win leidingsterkteberekeningen gemaakt op basis van de huidige NEN 3650 reeks. Uit de rapportages van de sterkteberekeningen volgt dat de NAM - kruisingen voldoen aan de eisen van de NEN 3650 - reeks.

Daarbij moet wel worden opgemerkt dat de bij de sterkteberekeningen ingevoerde zettingen zeer gering (enkele cm's) zijn. Door toepassing van licht ophoogmateriaal zijn de uitvoeringszakkingen verwaarloosbaar klein en hoeven die hier niet apart in rekening te worden gebracht (zie NEN 3651). Dat roept wel de vraag op of bij de zettingsprognoses ook rekening is gehouden met historische zettingen als gevolg van profielwijzigingen in het verleden en de bij de kadeversterking geplande grondaanvullingen. Door het Waterschap is aangegeven dat er in het verleden geen profielwijzigingen hebben plaatsgevonden en dat de geplande grondaanvullingen met licht materiaal zullen worden uitgevoerd. De toegepaste zettingsprognoses kunnen daarom als realistisch worden beschouwd. Zie ook *Bijlage 3: Conditieverklaringen en materiaalkwaliteit* onder 2.4 ten aanzien van specifieke aandachtspunten.

## 2.2 Leidingkruisingen Gasunie

### 2.2.1 Veiligheidszone

In de ontwerpdocumenten van de Gasunie-leidingen is geen informatie gevonden over de afmetingen van stabiliteitszone en de verstoringszones.

### 2.2.2 Relatieve sterkte

Bij het ontwerp is de eis van relatieve sterkte niet van toepassing verklaard. Zie ook paragraaf 2.1.2.

### 2.2.3 Wanddikte en importantiefactor

De nominale diameter van de kruisingen van de Gasunie-leidingen is 42 inch (1067 mm) respectievelijk 48 inch (1219 mm) met een wanddikte van 16,8/14,3 mm respectievelijk 22/19,0 mm.

Volgens NEN 3651 kan bij een leiding met een nominale diameter van 1050 mm respectievelijk 1200 mm en een wanddikte van 13,5 mm respectievelijk 14 mm een importantiefactor van  $S = 1,0$  worden toegepast. De Gasunie-leidingen voldoen aan deze eis. Bij de leidingsterkteberekeningen wordt rekening gehouden met deze eis.

#### 2.2.4 Sterkteberekeningen

Bij het ontwerp van de Gasunie-leidingen zijn er met het gevalideerde rekenprogramma Ple4Win leidingsterkteberekeningen gemaakt op basis van de huidige NEN 3650 - reeks. Uit de rapportages van de sterkteberekeningen is gebleken dat de Gasunie-kruisingen voldoen aan de eisen van de NEN 3650 reeks. Zie verder 2.1.4.

### 3. Beoordeling kistdammen

#### 3.1 Kerende hoogte

In NEN 3651 wordt als eis gesteld dat de kerende hoogte van een damwandconstructie minstens gelijk aan de dijktafelhoogte moet zijn. Het waterschap heeft als eis gesteld dat dit minstens MHW plus 0,30 m moet zijn. De kerende hoogte van de kistdammen voldoet niet aan deze eisen.

#### 3.2 Sterkte constructie-onderdelen

In NEN 3651 wordt voor het ontwerp van kistdammen in boezemkaden doorverwezen naar het Technisch Rapport Kistdammen en Diepwanden in Waterkeringen [TAW, 2004]. Bij het ontwerp is uitgegaan van CUR 166 Damwandconstructies [CUR, 2012] bij een vereiste betrouwbaarheid volgens Reliability Class RC2 van de Eurocode.

Bij het ontwerp is rekening gehouden met een corrosie-afname van 1 mm, gedurende de planperiode. Daarbij zijn tevens de bevindingen van veldmetingen van de wanddikte van de damwanden meegenomen (zie rapportages over visuele inspectie door Witteveen en Bos [W+B, 2020a en W+B, 2020b]).

Opgemerkt wordt dat enkel de belastingsituatie ‘kerend naar binnen’ met een erosiekrater als gevolg van leidingbreuk aan de binnenzijde is beoordeeld. De belastingsituatie ‘kerend naar buiten’ met een erosiekrater als gevolg van leidingbreuk aan de buitenzijde is niet beschouwd.

#### 3.3 Macrostabieliteit damwanden

De binnenwaartse macrostabieliteit is beoordeeld volgens de rekenregels van [STOWA, 2015] met de bijbehorende partiële veiligheidsfactoren. De damwanden voldoen aan de vereiste stabiliteitsfactor.

#### 3.4 Breedte damwandconstructie

In NEN 3651 worden er eisen gesteld aan de breedte van een damwandconstructie, die minstens tot 10 m uit de zijkant van de kruisende leiding moet reiken. Bij het ontwerp wordt niet bij alle kistdammen aan deze eis voldaan.

## 4. Conclusies

Uit de review van de ontwerpdocumenten volgt dat de sterkte van de kruisende gastransportleidingen voldoet aan de eisen van de NEN 3650 reeks. Informatie over de afmetingen van de stabiliteitszone en de verstoringszones conform NEN 3651 is niet aangetroffen.

De kerende hoogte en de breedte van kistdammen voldoen niet aan de eisen van NEN 3651. De constructieve sterkte van de constructie-onderdelen van de kistdammen is beoordeeld op basis van CUR 166 Damwandconstructies met betrouwbaarheidseisen volgens Reliability Class RC2 van de Eurocode.

Dit wijkt af van de beoordeling volgens [NEN 3651, 2020], die daarvoor doorverwijst naar het Technisch Rapport Kistdammen en Diepwanden in Waterkeringen. Bij de faalkansanalyse is gebruik gemaakt van de resultaten van de gemaakte ontwerpberekeningen.

## **Bijlage 3: Beoordeling conditieverklaringen en materiaalkwaliteit**

**Kruisingen gastransportleidingen met kistdam  
in kadeversterking Steendam - Tjuchem**

Opgesteld door: Jan Spiekhout

Datum: 9 september 2022 (definitief)

## 1. Scope van de te beoordelen kruisingen

In de volgende tabel zijn de te beoordelen kruisingen van gastransportleidingen met de belangrijkste parameters aangegeven.

Buisleiding	NAM	NAM	NAM	NAM	Gasunie	Gasunie
Kruising nummer	14	15	22	23	21	20
Leidingnummer	507005	501100	501071	501061	A-543	A-610
Diameter (inch)	36	36	36	36	48	42
Wanddikte (mm) 1)	15,9/19,05	15,9/19,05	15,9/19,0	15,9/19,0	16,59/22,29	14,30/16,80
Staalkwaliteit	X60	X60	St 60.7	St 60.7	St.415.7	St.415.7
Product 2)	Aardgas	Aardgas	Aardgas	Aardgas	Aardgas	Aardgas
Ontwerpdruk (bar)	85	85	85	85	70,6	70,6
Bouwjaar	1973	1973	1974	1974	1974	1986
Status	Reserve	In bedrijf	In bedrijf	In bedrijf	In bedrijf	In bedrijf
Verbindingen	Gelast	Gelast	Gelast	Gelast	Gelast	Gelast

- 1) wanddikte in veiligheidszones en centrale zone
- 2) droog, niet corrosief aardgas

Tabel 1 – Overzicht van de te beoordelen leidingkruisingen

Leidingkruising NAM 507005 is een reservezinker. Deze is volgens opgave van NAM losgekoppeld van de leiding en aan beide zijden afgesloten en is drukloos. De reservezinker is kathodisch beschermd. De reservezinker wordt bij de faalkansanalyse buiten beschouwing gelaten.

## 2. Conditieverklaringen

### 2.1 Algemeen

De huidige leidingconditie dient op het niveau te zijn zoals NEN 3650 dat vereist. Met andere woorden: In de kruising mogen geen onacceptabele corrosie of andere schade of defecten aanwezig zijn. Hiertoe worden detectie- en inspectiemethodes ingezet, zoals:

- Periodieke leiding inspectie via lopen of vliegen
- Meting van de effectiviteit van de kathodische bescherming (KB)
- Intelligent pigging: ILI (In-Line Inspection)
- No pig inspectie: DC (Direct Current) voltage gradient of current mapping

Zowel het ontwerp, aanleg en beoordeling van de leidingconditie bij Gasunie en NAM (en zoals bij de meeste operators van leidingen, die Groep I - stoffen transporteren) valt onder toezicht van een inspectie instelling. Dit is een Eigen Inspectiedienst, een externe inspectie instelling/instituut of een inspectie afdeling onder toezicht van een externe inspectie instelling. Het geheel van inspectie en toezicht daarop valt onder accreditatie door de Raad voor Accreditatie, Aanwijzing door het Ministerie van SZW (Sociale Zaken en Werkgelegenheid), alsmede SODM (Staatstoezicht Op De Mijnen). Voor ingebruikname van een leiding (leidingdeel) wordt na ontwerp, aanleg en testen, een

Conformiteitsverklaring, BOB (Verklaring van Onderzoek en Beproeving) of BVT (Bewijs Van Toezicht) afgegeven.

De conditie van de leiding wordt gemonitord in het Buisleidingbeheerssysteem van het betreffende bedrijf. Onder dit gebeuren valt ook de drukbeheersing/-beveiliging van de leiding. Op aanvraag kan een Conditieverklaring worden afgegeven, opgesteld of van akkoord voorzien door de eerdergenoemde inspectie-instellingen.

## 2.2 Bevindingen per leidingkruising

Per leidingkruising zijn uit de scope, zoals aangegeven in tabel 1, in het volgende de bevindingen aangegeven:

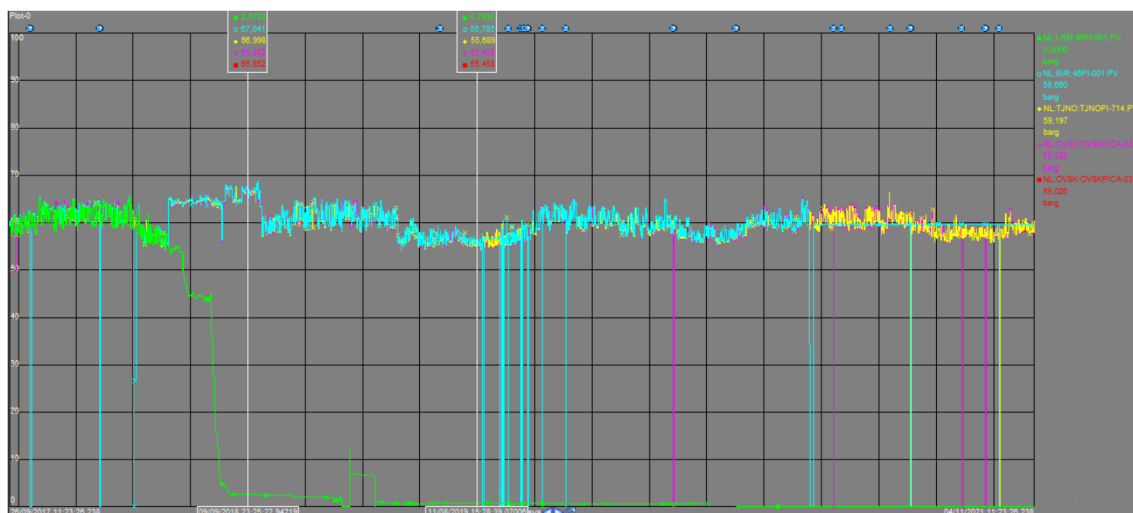
- NAM: 507005 – Reservezinker, niet in bedrijf. De meetgegevens betreffende de kathodische - bescherming zijn gecontroleerd. Hierover zijn geen opmerkingen.
- NAM: 501100 - Opgesteld door de NAM Technical Authority Pipelines en geaccordeerd door de NAM Technical Authority Inspection Body, NAM document EP202110202196. De conditieverklaring is gecontroleerd en geeft geen aanleiding tot vragen. De rapportage betreft de gehele leiding waar de kruising onderdeel van is.
- NAM: 501071 - Opgesteld door de NAM Technical Authority Pipelines en geaccordeerd door de NAM Technical Authority Inspection Body, NAM document EP202110202196. De conditieverklaring is gecontroleerd en geeft geen aanleiding tot vragen. De rapportage betreft de gehele leiding waar de kruising onderdeel van is.
- NAM: 501061 - Opgesteld door de NAM Technical Authority Pipelines en geaccordeerd door de NAM Technical Authority Inspection Body, NAM document EP202110202196. De conditieverklaring is gecontroleerd en geeft geen aanleiding tot vragen. De rapportage betreft de gehele leiding waar de kruising onderdeel van is.
- GU: A-543 - De conditieverklaring is opgemaakt door de Eigen Inspectiedienst van Gasunie en heeft als nummer Gasunie VA 21.0422. De conditieverklaring is gecontroleerd en geeft geen aanleiding tot vragen.
- GU: A-610 - De conditieverklaring is opgemaakt door de Eigen Inspectiedienst van Gasunie en heeft als nummer Gasunie VA 21.0423. De conditieverklaring is gecontroleerd en geeft geen aanleiding tot vragen.

## 2.3 Bedrijfsdrukken

Zowel bij NAM als bij Gasunie zijn de bedrijfsdrukken lager dan de gestelde ontwerpdrukken (= Maximaal Toelaatbare Bedrijfsdruk). Bij de faalkansanalyse wordt voor de leidingsterkteberekeningen en de kraterberekeningen uitgegaan van de ontwerpdrukken.

### 2.3.1 Bedrijfsdrukken NAM

In de onderstaande figuur zijn de bedrijfsdrukken als gemonitord voor de NAM leidingen aangegeven. De bedrijfsdrukken blijven voor de NAM leidingen beneden de 70 bar. Hogere drukken zijn niet te verwachten vanwege depletie van het Groningen gasveld.



Figuur 2.1 – Drukken afname Groningen veld

### 2.3.2 Bedrijfsdrukken Gasunie

Gasunie heeft aangegeven dat de ontwerpdruk aangehouden moet worden. De leidingen transporteren hoog calorisch gas afkomstig van compressorstation Spijk (Noors gas). De stromingsrichting van het gas is van noord naar zuid.

## 2.4 Zettingen

Om de zettingen te beperken is ter plaatse van de kruisingen voorzien in een ophoging van licht ophoogmateriaal en wordt er zover uitgegraven dat op het niveau van de uitgegraven grond de vlaktedrukken voor ontgraven en na ontgraven en aanvullen met het lichte ophoogmateriaal, ongeveer gelijk zijn. Voor het lichte ophoogmateriaal is uitgegaan van de toepassing van bims (vulkanisch puimsteen) met een soortelijk gewicht van  $10 \text{ kN/m}^3$ . De gerapporteerde zettingen zijn gering. Er wordt echter niets over historische zettingen gezegd.

Uit nadere informatie van het Waterschap Hunze en Aa's is gebleken dat er in het verleden enkel onderhouds- en reconstructiewerkzaamheden van de asfaltweg hebben plaatsgevonden. In het verleden zijn er sinds de aanleg van de leidingkruisingen geen profielwijzigingen geweest zodat het zettingsgedrag van de kade in feite niet is veranderd. Bij de zettingsprognoses is rekening gehouden met licht ophoogmateriaal en de invloed van doorgaande zettingen tot 50 jaar na de kadeversterking.

Opgelet moet worden dat er bij de kade versterking geen materiaal met een hoger soortelijk gewicht dan  $10 \text{ kN/m}^3$  wordt toegepast, of dat het aanvulmateriaal zodanig wordt verdicht dat het soortelijk gewicht toeneemt. De ontgraving met aanvulling van licht ophoogmateriaal moet over voldoende breedte worden doorgezet om ter plaatse van de kruising geen beïnvloeding te krijgen van de ophoging van de kade verder weg.

## 2.5 Sterkteberekeningen

De leidingsterkteberekeningen zijn uitgevoerd met het gevalideerde rekenmodel Ple4Win. Er is gebruikt gemaakt van de elastische rekenmodule; van de mogelijkheid van aanscherping op basis van de plastische rekenmodule is geen gebruik gemaakt.

### 2.5.1 Gecontroleerde rapporten

De volgende rapporten zijn gecontroleerd:

- Sterkteberekening Kadeversterking Steendam – Tjuchem, Leidingkruising 14, 36" NAM leiding 507005, 28 oktober 2020, Ordernummer: 54824.00, Bilfinger Tebodin Netherlands B.V., Documentnummer: 54824-00-1931001, Revisie: 0.
- Sterkteberekening Kadeversterking Steendam – Tjuchem, Leidingkruising 15, 36" NAM leiding 501100, 28 oktober 2020, Ordernummer: 54824.00, Bilfinger Tebodin Netherlands B.V., Documentnummer: 54824-00-1931002, Revisie: 0.
- Sterkteberekening Kadeversterking Steendam – Tjuchem, Leidingkruising 22, 36" NAM leiding 501071, 29 oktober 2020, Ordernummer: 54824.00, Bilfinger Tebodin Netherlands B.V., Documentnummer: 54824-00-1931005, Revisie: 0.
- Sterkteberekening Kadeversterking Steendam – Tjuchem, Leidingkruising 23, 36" NAM leiding 501061, 29 oktober 2020, Ordernummer: 54824.00, Bilfinger Tebodin Netherlands B.V., Documentnummer: 54824-00-1931006, Revisie: 0.
- Sterkteberekening Kadeversterking Steendam – Tjuchem, Leidingkruising 21, 48" Gasunie leiding A-543, 2 november 2020, Ordernummer: 54824.00, Bilfinger Tebodin Netherlands B.V., Documentnummer: 54824-00-1931004, Revisie 0.
- Sterkteberekening Kadeversterking Steendam – Tjuchem, Leidingkruising 20, 42" Gasunie leiding A-610, 2 november 2020, Ordernummer: 54824.00, Bilfinger Tebodin Netherlands B.V., Documentnummer: 54824-00-1931003, Revisie: 0.

### 2.5.2 Resultaten sterkteberekeningen

Onderstaand zijn de resultaten van de sterkteberekeningen aangegeven:

- NAM: 507005 – spanningsratio 0,73, belastingcombinatie BC 4\*, locatie bovenbocht.
- NAM: 501100 – spanningsratio 0,78, belastingcombinatie BC4\*, locatie bovenbocht.
- NAM: 501071 - spanningsratio 0,84, belastingcombinatie BC4\*, locatie bovenbocht.
- NAM: 501061 - spanningsratio 0,84, belastingcombinatie BC4\*, locatie bovenbocht.
- GU: A 543 – spanningsratio 0,96, belastingcombinatie BC 4\*, locatie bovenbocht.
- GU: A 610 – spanningsratio 0,98, belastingcombinatie BC4\*, locatie bovenbocht.

*\*Belastingcombinatie BC 4: Uitwendige belastingen met inwendige druk en (maximum) temperatuurverschillen*

In alle gevallen wordt bij de opgegeven zettingen voldaan aan de criteria en zijn de berekende spanningen kleiner dan de toetsspanning.

## 2.6 Materiaalkwaliteit

De materiaalsterkte van het staal is een belangrijke parameter in verband met de sterkteberekening van de leidingkruisingen. Belangrijk is verder de breuktaaiheid (Charpy-V) om te beoordelen of aan de eisen voor scheurstopcapaciteit uit de NEN 3650 (ISO 3183) wordt voldaan en de eis uit NEN 3651, of dat rekening moet worden gehouden met langere scheurlengtes. Met name belangrijk is het jaar 1972 als omslagpunt, waarna door verbeterde productietechnieken stalen beschikbaar kwamen met betere taaiheideigenschappen.

Alle leidingen lijken wat betreft jaartal te voldoen aan het criterium van ná 1972. Wel is bekend dat ná 1972 nog overgebleven materiaal van voor die tijd is verwerkt. Verder betekent "Als uitgevoerd", dat de aanleg het jaar daarvoor kan hebben plaatsgevonden en de productie van de buizen nog een jaar eerder (gerekend met circa 1 jaar levertijd) heeft plaatsgevonden.

Van de NAM leidingen zijn er geen materiaalcertificaten beschikbaar. Voor de leidingen is destijds door de inspectie instelling een verklaring afgegeven door de Dienst voor het Stoomwezen (is opgegaan in Lloyd's Register). Onderdeel van de verklaring is een review van de materiaalcertificaten. De verklaringen zijn de volgende:

- NAM: 507005 - reserve zinker, niet in bedrijf.
- NAM: 501100 - BVT Lloyd's Register.
- NAM: 501071 - BVT Lloyd's Register.
- NAM: 501061 - BVT Lloyd's Register.

Voor de Gasunie leidingen zijn materiaalcertificaten aanwezig, te weten:

- A 543 – De beschikbare materiaal informatie (7216 A – TÜV Prüf-Nr. 26 75493 fabrikant Mannesmann) geeft de volgende opmerkingen:
  - de sterktes liggen boven de toegepaste sterkte voor de berekeningen
  - de kerfslagwaarden voldoen aan de gestelde waarden in NEN 3650 (ISO 3183)
- A 610 – De beschikbare materiaal informatie (9703 – fabrikant Mannesmann – Nr. 08171806 7 003) geeft de volgende opmerkingen:
  - de sterktes liggen boven de toegepaste sterkte voor de berekeningen
  - de kerfslagwaarden voldoen aan de gestelde waarden in NEN 3650 (ISO 3183)

## **Bijlage 4: Controle verwekingsgevoeligheid zandlagen**

**Kruisingen gastransportleidingen met kistdam  
in kadeversterking Steendam - Tjuchem**

# 1 Inleiding

Voor de versterking van de kade van het kanaal Steendam-Tjuchem is door Witteveen+Bos een ontwerp gemaakt. Op drie plaatsen kruisen gasleidingen de kade, bij deze kruisingen is een damwandconstructie aanwezig. Bekeken wordt of deze constructies nog voldoen volgens NEN 3651. Eén van de faalmechanismen van een onder druk staande gasleiding is het openbarsten daarvan. Door de schokgolf die daarbij ontstaat kan verweking van zandlagen ontstaan. Aan Deltares is gevraagd om een expert opinion te geven over het risico van verweken bij openbarsten van de gasleiding.

## 2 Situatie

### 2.1 Plaats kruising

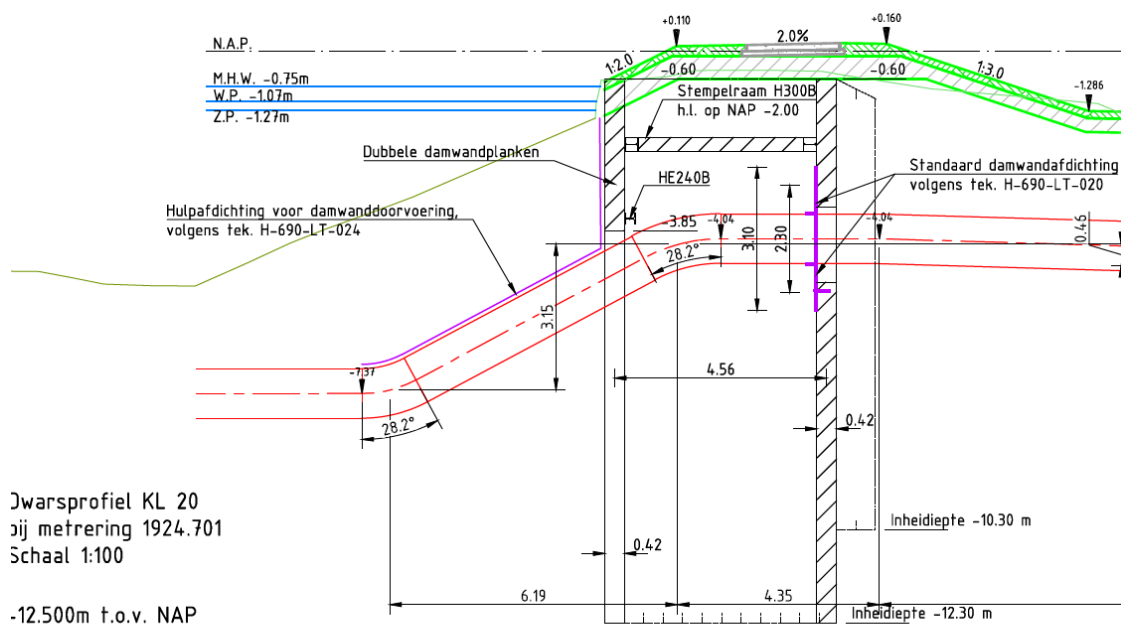
In totaal zes gasleidingen kruisen de damwand. Qua locatie zijn deze op drie plaatsen geclusterd. Tabel 1 geeft een overzicht.

Tabel 1 Locatie kruisingen gasleidingen

Nr	km	operator	Diepteligging 1) [m + NAP]	Grondprofiel W+B 1)
14	1266	NAM	-6,5 / -3,356	VO-04
15	1271	NAM	-6,5 / -3,356	VO-04
22	1976	NAM	-6,96 / -1,63	VO-06
23	1976	NAM	-6,96 / -1,63	VO-06
20	1930	Gasunie	-7.26 / -4,11	VO-06
21	1945	Gasunie	-7,2/ -4,04	VO-06

1) nummer grondprofiel zoals door Witteveen en Bos gebruikt

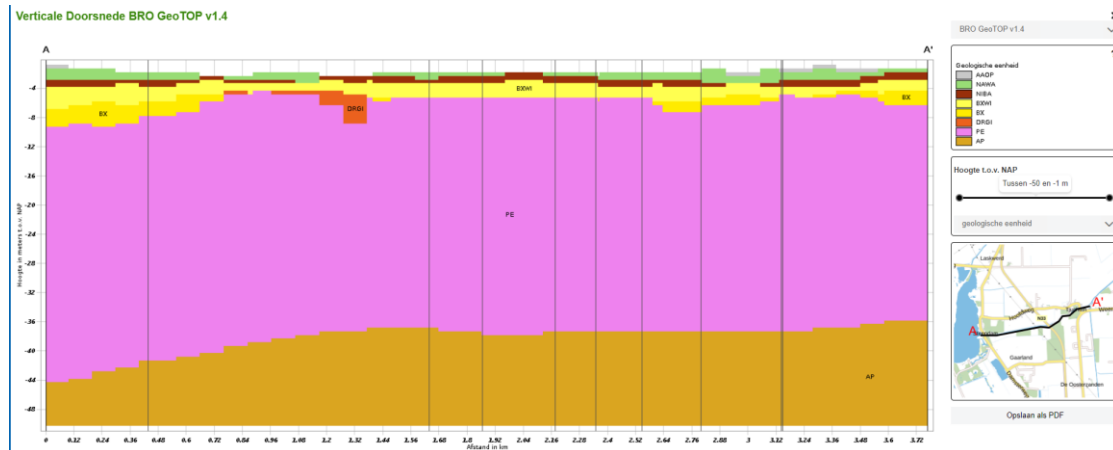
De kruinhoogte is NAP+ 0,16 m. De kanaalbodem ligt op ongeveer NAP – 5m.



Figuur 2-1 Kruising 20

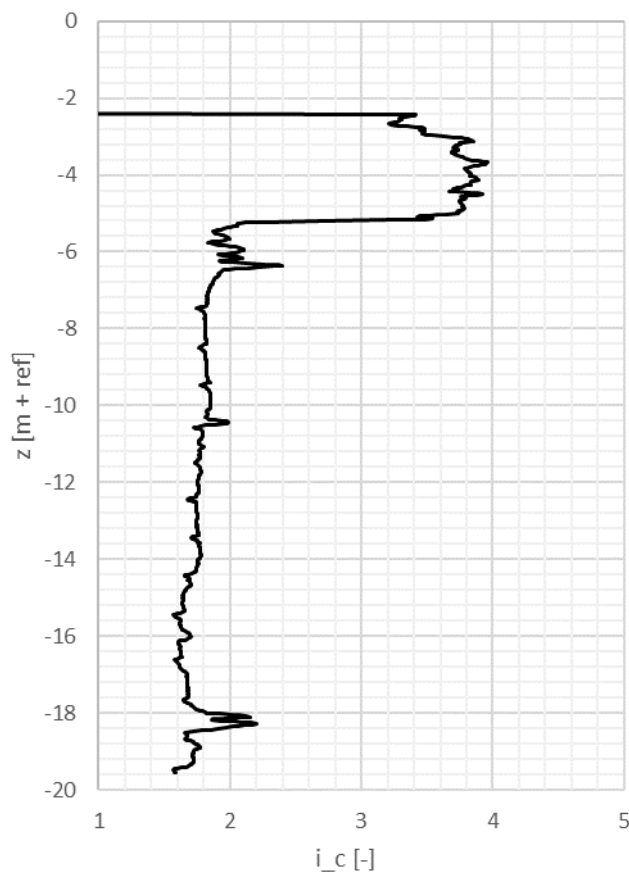
## 2.2 Ondergrond

De ondergrond bestaat globaal uit een holocene toplaag (veen) met daaronder zand. Volgens GeoTOP horen de bovenste meters tot de formatie van Naaldwijk. Vanaf ongeveer NAP – 4 m komt de formatie van Boxtel voor en vanaf ongeveer NAP – 6 m de formatie van Peelo.

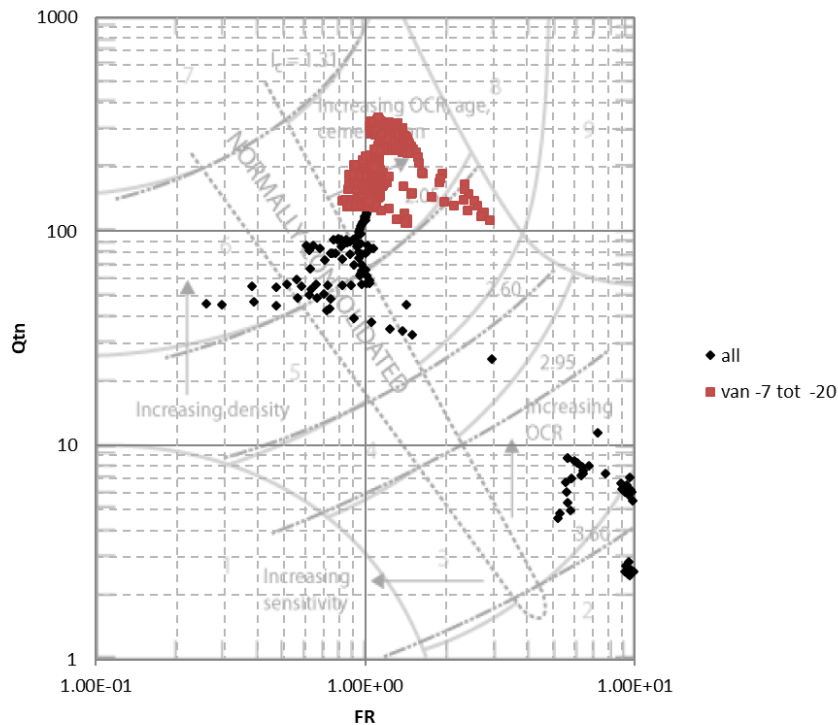


Figuur 2-2 Geologisch profiel langs kade Steendam-Tjuchem

Op basis van een sondering in de omgeving (DINO-loket, nr CPT000000164673\_IMBRO) is een grondclassificatie uitgevoerd volgens de methode Robertson (2009). De resultaten staan in Figuur 2-3 en Figuur 2-4. In Figuur 2-4 zijn de punten voor het diepe (Peelo) zand apart aangegeven.



Figuur 2-3 I<sub>c</sub> (Soil behavior type index) als functie van de diepte



Figuur 2-4 Classificatie volgens Robertson (2009)

De classificatie geeft drie onderscheidende gebieden. De toplaag geeft een hoge  $I_c$ -waarde, die correspondeert met slappe grond (in dit geval veen). De laag tussen NAP – 5 m en NAP – 7 m lijkt redelijk normaal geconsolideerd zand ( $I_c = 2$ ), maar de laag daaronder is volgens deze classificatiemethode overgeconsolideerd zand. Dat betekent dat de standaard correlaties tussen de conusweerstand en grondeigenschappen niet direct gebruikt kunnen worden omdat deze opgesteld zijn voor NC (normaal geconsolideerd) zand.

Bij het uitgevoerde onderzoek naar de verwekingsgevoeligheid van zand in Groningen (Deltares 2021) is bij een locatie met Pleistoceen zand (locatie Foxhol, Eem formatie) ook geconstateerd dat toepassing van de standaard correlaties de relatieve dichtheid en de weerstand tegen verweking sterk overschat.

Overgeconsolideerd zand betekent dat de horizontale spanning hoog is. Mogelijk is er ook sprake van enige lichte cementatie. Bekend is dat een hoge horizontale spanning tot een hogere conusweerstand leidt.

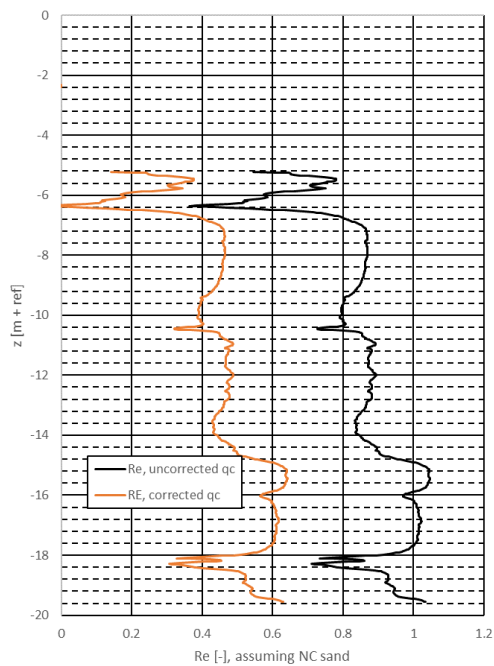
Om toch gebruik te kunnen maken van de standaard correlaties is een schatting gemaakt van de mogelijke horizontale spanning. Uitgangspunt daarbij was de wens dat na correctie van de conusweerstand voor deze hogere horizontale spanning de classificatie volgens Robertson op de lijn voor normaal geconsolideerd zand ligt. Daarmee is berekend een  $K_0$  waarde van  $K_{0,oc} = 2$  en een correctiefactor op de conusweerstand van 3,25. (Lunne Christoffersen 1983).

## 2.3 Relatieve dichtheid en state parameter

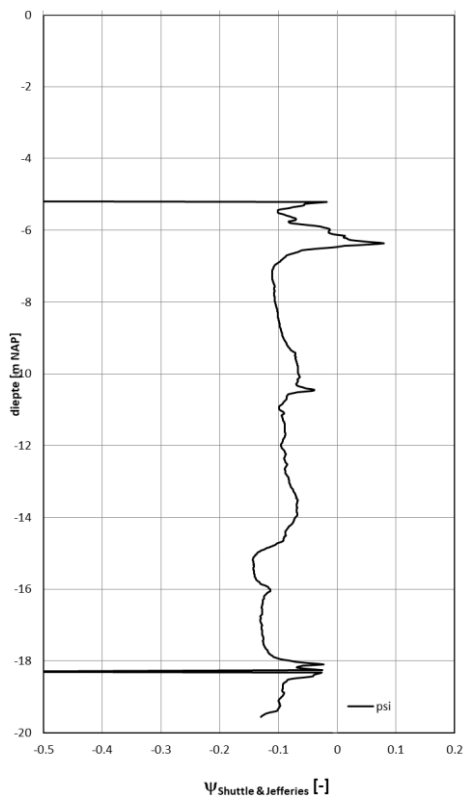
Voor de geselecteerde sonderingen zijn de relatieve dichtheid en de zogenaamde state parameter bepaald uit een correlatie met de conusweerstand. Voor de bepaling van de relatieve dichtheid is de methode van Lunne en Christoffersen (1983) gebruikt.

Voor de bepaling van de state parameter is de methode van Shuttle en Jefferies (1998) gebruikt. De state parameter is een parameter die aangeeft of bij grote schuifrekken het zand

zich contractant of dilatant gedraagt. Een negatieve waarde duidt op dilatant gedrag bij grote schuifrekken. De resultaten zijn in Figuur 2-5 en Figuur 2-6 weergegeven.



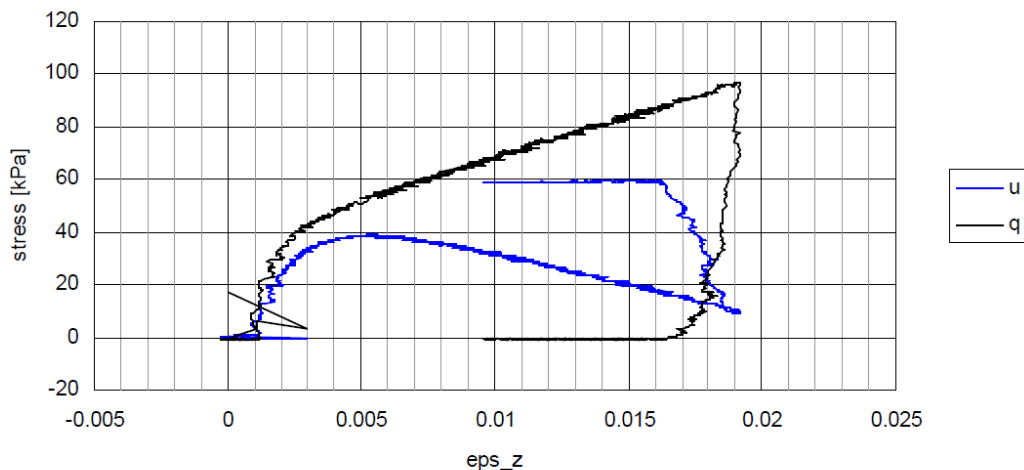
Figuur 2-5 Schatting relatieve dichtheid volgens Lunne en Christoffersen (1983); ter vergelijking is ook de schatting weergegeven als geen correctie wordt toegepast.



Figuur 2-6 Schatting state parameter, na correctie conusweerstand voor overconsolidatie.

### 3 Beoordeling

Een state parameter van  $\psi = -0,1$  is hoopgevend. Bij grote schuifvervormingen, zoals die bij een explosie verwacht mogen worden, wordt dilatantie verwacht. Uit eerder bij Deltares uitgevoerde triaxiaalproeven (Meijers, 2007) waarbij zowel de belastingfase als de ontlastingsfase is beschouwd is echter gebleken dat in losgepakt zand met name bij de ontlastingsfase hoge wateroverspanningen ontstaan. Een voorbeeld is in Figuur 3-1 gegeven.



Figuur 3-1 Verloop waterspanningen en deviatorspanning bij belasten, gevolgd door ontlasten als functie van de axiale rek; los zand ( $Re = 0,3$ ), consolidatiespanning  $\sigma' = 100$  kPa, langzame belasting.

Op basis van dit resultaat is de beste inschatting dat het ontstaan van blijvende wateroverspanning bij een explosie niet uit te sluiten is. Of er sprake zal zijn van volledige verweking is twijfelachtig.

Dissipatie van eventuele wateroverspanning is beperkt door de afsluitende laag aan de bovenzijde. Dat zal de duur dat wateroverspanningen ongunstig beïnvloeden. Door herverdeling van waterspanningen kan zich direct onder de afsluitende laag een hoge relatieve wateroverspanning opbouwen.

### 4 Consequenties verweking

Verweking van zand betekent dat de effectieve spanning in de grond praktisch afwezig is, en dat daardoor de grond weinig schuifspanning kan overdragen. Uit onderzoek voor aardbevingen is wel gebleken dat er desondanks nog enige reststerkte over is, maar deze is beperkt en zal voor taluds onvoldoende zijn.

Volledige verweking zal optreden in de nabijheid van de explosie. Bij het beoordelen van de gevolgen van verweking op een waterkering moet dus de afstand tot de waterkering mede in beschouwing worden genomen. De in NEN 3651 genoemde verwekingszone is de zone waarin sprake is van wateroverspanning. Met het toenemen van de afstand tot de explosie neemt de wateroverspanning, en daarmee het verlies van sterkte, af. Een optimalisatie in de risico kwantificering is dus om rekening te houden met de grootte van de wateroverspanning als functie van de afstand tot de explosie.

De (tijdelijke) afname van de sterkte van de ondergrond heeft gevolgen voor de stabiliteit van de damwanden.

De damwandconstructie is een kistdam. Waarschijnlijk heeft deze een hoge veiligheid tegen bezwijken. Er is niet onderzocht wat het bezwijkmechanisme bij verweking, wat daarbij de

optredende vervormingen zijn en wat het restprofiel is. Hier zit mogelijk nog de nodige reserve tussen openbarsten van de gasleiding en falen van de waterkering.

Aan de polderzijde ligt de gasleiding relatief hoog (NAP – 4 m, NAP – 3,35 m en NAP – 1,6 m). Hier ligt de leiding dus in een pakket slappe lagen. Bij de leidingkruisingen 20/21 ligt de leiding in een veenpakket, bij de overige kruisingen in of op het zandpakket.

Verwacht wordt dat bij de leidingkruisingen 20/21 het slappe veenpakket de uitbreiding van schokgolven naar de ondergrond sterk dempt, zodat hier de kans op verweking beperkt wordt. Bij de overige leidingen is dat niet het geval.

Wel zal bij alle situaties de damwand aan de polderzijde een beperking geven aan de uitbreiding van de schokgolven en daarmee aan de kans op verweking onder de kruin van de kade en van de grond direct achter de damwand aan de kanaalzijde. Dit beperkt de kans op falen van de waterkering.

## 5 Conclusie

Aan de kanaalzijde ligt de leiding op ongeveer NAP – 7 m. Dat betekent dat de leiding direct op of in het zand ligt. Vanuit de geologie is bekend dat het zand tot de formatie van Boxtel en van Peelo hoort. Een eerste classificatie van een sondering uit de omgeving geeft aan dat het zand waarschijnlijk overgeconsolideerd is. Daarmee zijn de standaard correlaties voor diverse grondparameters met de conusweerstand niet direct toepasbaar. Voor een correcte interpretatie is informatie over de horizontale spanning nodig, een parameter die momenteel niet bekend is. Daarom is deze zo goed mogelijk geschat, uitgaande van de veronderstelling dat na correctie het zand volgens de classificatie van Robertson normaal geconsolideerd moet zijn.

Hiermee wordt de relatieve dichtheid van het zand geschat op 40 – 50% en de zogenaamde state parameter op  $\psi = -0,1$ . Een negatieve state parameter duidt op dilatant gedrag bij schuifvervorming. Voor zettingsvloeiingen wordt vaak een waarde van  $\psi = -0,05$  of  $-0,10$  gezien als de grens tussen wel of niet ontstaan van verweking.

Resultaten van uitgevoerde triaxiaalproeven op zand met zowel belasten als ontlasten geven echter aan dat voor losgepakt zand de meeste wateroverspanning ontstaat tijdens de fase van ontlasten, een fase die bij zettingsvloeiingen niet aanwezig is. Of een state parameter van  $\psi = -0,1$  voldoende is om het ontstaan van wateroverspanning te voorkomen is onzeker. Dit betekent dat het ontstaan van enige langere tijd aanwezige wateroverspanning niet is uit te sluiten. Wel is de verwachting dat volledige verweking minder waarschijnlijk is.

Verweking hoeft niet te betekenen dat de waterkering faalt. Door de constructie als kistdam is hier naar verwachting de nodige marge aanwezig. Een analyse van de kans op bezwijken van de kistdamconstructie en het resterende restprofiel bij bezwijken zou hier meer inzicht in kunnen geven.

## Referenties

Deltares (2021)

Cyclic testing on undisturbed sand samples from Groningen, Analysing and interpretation of test results

Deltares, report 1230541-034-GEO-0002,

<https://www.nam.nl/over-nam/onderzoeksrapporten.html#iframe=L3JlcG9ydHMvb3ZlcnZpZXcvZ3JvbmluZ2VuLyMvNy8x>

Lunne, T., Christoffersen, H.P., (1983)

Interpretation of cone penetrometer data for offshore  
Paper 4464, Proc. OTC Houston, 1983

Meijers, P., (2007)

Bijzondere belastingen, Rapport R2: soil response  
Consortium DC-COB, tussenrapport TC211-06-09

Robertson, P.K., (2009)

Interpretation of cone penetration tests — a unified approach  
Canadian Geotechnical Journal, Volume 46, Number 11, November 2009

RWS (2019)

Schematiseringshandleiding zettingsvloeiing

Shuttle, D.A., Jefferies, M.G. (1998)

Dimensionless and unbiased CPT interpretation in sand  
International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 22, pp. 351 – 391, 1998

## Bijlage 5: Kraterberekeningen

Kruisende gastransportleidingen met kistdam  
in kadeversterking Steendam - Tjuchem

Opgesteld door: Dick Mastbergen (Deltares)  
Datum: 4 april 2022 (definitief)

# 1 Kraterberekeningen bij gasleidingbreuk

Kruisingen gastransportleidingen in kadeversterking Steendam-Tjuchem

Dick Mastbergen, 4 april 2022, Deltares, project 11207821

## 1.1 Inleiding

In opdracht van het waterschap Hunze en Aa's is door Witteveen + Bos een ontwerp gemaakt voor de versterking van de regionale boezemkade van het traject Steendam – Tjuchem in Groningen met bestaande kruisingen van hogedruk gastransportleidingen van NAM en Gasunie. Het ontwerp van de kadeversterking wordt gereviewed door externe reviewers (J. Spiekhout en H. A. Schelfhout), die ook opdracht hebben voor het uitvoeren van integrale faalkansanalyses.

In dit kader heeft Deltares opdracht gekregen van Gasunie voor het uitvoeren van gedetailleerde kraterberekeningen voor het faalmechanisme leidingbreuk, voor vijf locaties van leidingkruisingen, zie Tabel 1, volgens de meest recente inzichten zoals eerder gepresenteerd in de POV Kabels & Leidingen, op basis van de beschikbare informatie over grondgesteldheid, gronddekking, leiding- en gaskarakteristieken.

De leidingen zijn ingegraven en ter plaatse van de vijf kruisingen versterkt met damwanden (voor de reserveleiding wordt geen berekening uitgevoerd, immers daar is geen sprake van kratervorming bij breuk). Voor deze hogedruk gastransportleidingen wordt aangenomen dat het maatgevende faalmechanisme bestaat uit volledige leidingbreuk ter plaatse van de kade.

In deze bijlage worden de berekeningen van Deltares volgens de eenvoudige en gedetailleerde methode, zoals genoemd in de NEN 3651 (2020), gerapporteerd. De berekening van de gasuitstroming en druk bij volledige breuk, benodigd voor de kraterberekeningen, is door Gasunie uitgevoerd op basis van netberekeningen.

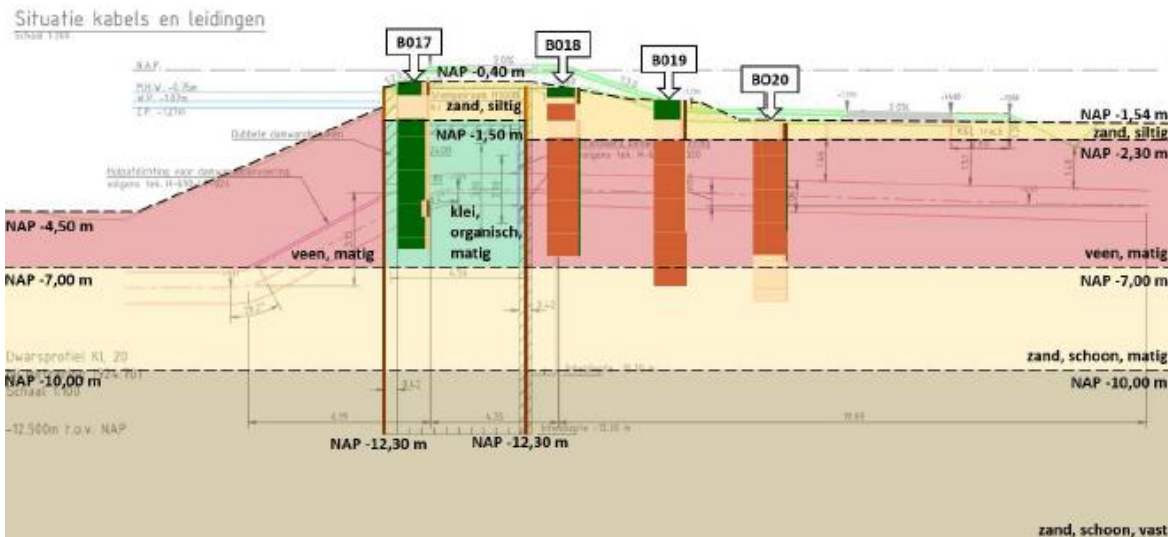
De gedetailleerde methode leidt tot aanzienlijk kleinere kraterafmetingen dan volgens de vereenvoudigde methode. In deze bijlage wordt de toegepaste methode besproken, zodat deze ook in andere gevallen door derden toepasbaar is. Dit zou dan ook in de NEN 3651 opgenomen kunnen worden.

Tabel 1 Belangrijkste parameters kruisingen buisleiding kade Steendam-Tjuchem.

Beheerder	NAM	NAM	NAM	NAM	Gasunie	Gasunie
Leidingnummer	507005	501100	501071	501061	A-543	A-620
Diameter [inch]	36	36	36	36	48	42
Product	Aardgas*	Aardgas*	Aardgas*	Aardgas*	Aardgas*	Aardgas*
Ontwerpdruk (bar)	85	85	85	85	70.6	70.6
Bouwjaar	1973	1973	1974	1974	1974	1986
Status	Reserve	In bedrijf	In bedrijf	In bedrijf	In bedrijf	In bedrijf
Kruisingnummer	14	15	22	23	21	20
Verbinding	Gelast	Gelast	Gelast	Gelast	Gelast	Gelast

\* - droog, niet corrosief aardgas

De leidingkruisingen zijn versterkt met een kistdamconstructie, waarbij de ruimte tussen de damwanden is opgevuld met klei en afgedekt met zand, zie Figuur 1 als voorbeeld. Hieruit volgen diepteligging, grondwaterstand en grondsoorten ter plaatse van de kruin van de kade. Aangenomen is dat het maaiveld horizontaal is.



Figuur 1: Dwarsdoorsnede kade met damwanden en grondsoorten. Leidingkruising Gasunie nr. 20 (uit Witteveen + Bos)

## 1.2 Formules modelonderzoek

In 1971 is bij WL Delft modelonderzoek gedaan naar ontgronding door gasleidingbreuk in opdracht van Rijkswaterstaat. De berekeningsmethode in de voormalige Pijpleidingcode, NPR 3659 en NEN 3651 zijn afgeleid van dit onderzoek.

De berekeningsmethode is gebaseerd op modelproeven met perslucht op vochtig en droog zand (WL, 1972). Een vereenvoudigde rekenmethode wordt beschreven in NEN 3651:2012 en de latere versie NEN 3651:2020.

Uit het modelonderzoek kwam naar voren dat het erosieproces bij constante gasuitstroming geleidelijk plaatsvond en er niet direct sprake was van een stationaire situatie, zoals bijvoorbeeld wel het geval was bij proeven van ontgronding bij perswaterleidingbreuk. De kuildiepte was min of meer onafhankelijk van de gasuitstroming. De volgende formules zijn afgeleid voor de kuildiepte  $\eta$ :

$$\eta = 3D + \delta \quad \text{voor } w < 2\%$$

$$\eta = 40R(w)D + \delta \quad \text{voor } 2\% < w < 5\%$$

$$\eta = 1,6D + \delta \quad \text{voor } w > 5\%$$

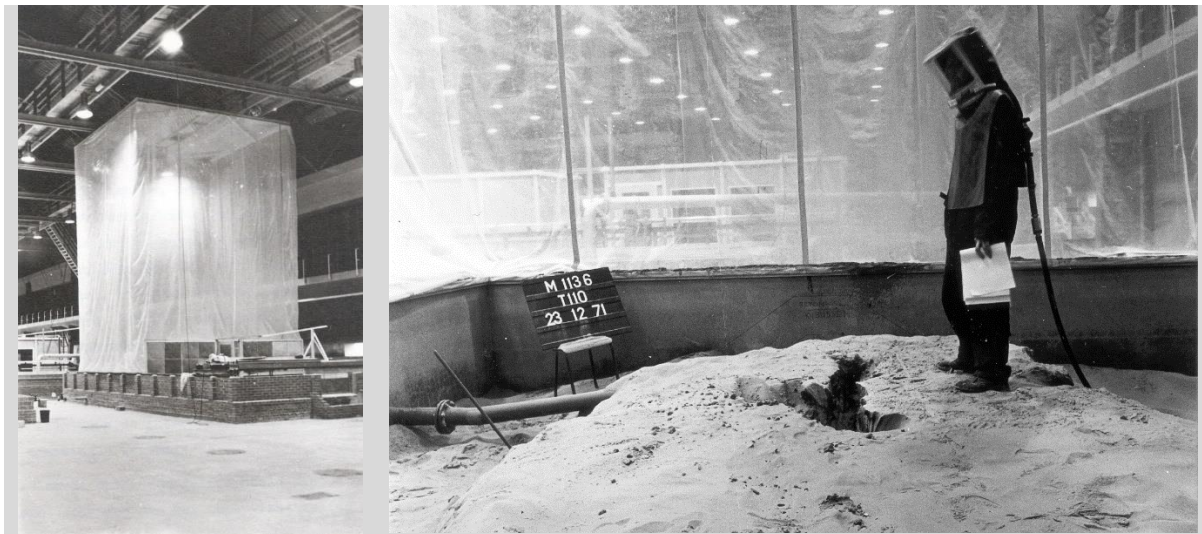
Waarin  $D$  de leidingdiameter,  $\delta$  de gronddekking,  $R(w)$  een grond- of zandeigenschap afhankelijk van het vochtgehalte  $w$ .

Voor de kuillengte  $L$ , gerekend vanaf de breuk in de richting van de straalstroming, is op basis van de metingen en de theorie voor ontgronding door stralen de volgende formule afgeleid:

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

Waarin  $I$  de impulsflux van de gasuitstroming (in N),  $t$  de tijd,  $g$  de zwaartekrachtversnelling,  $\rho_{\text{omg}}$  de dichtheid van het gas bij omgevingsdruk.

Figuur 2: Modelproeven ontgroning door gasleidingbreuk, WL Delft, 1971



De berekening van de flow / transport en de impuls van de gasuitstroming als functies van de druk in de leiding en de leiding- en gaskarakteristieken (druk, inwendige diameter, diepteligging, dichtheid gas) volgens de stationaire thermodynamische theorie staat beschreven in o.m. de NEN 3651 (2020) en in Deltares (2010).

$R(w)$  is een empirisch afgeleide grootte op basis van de modelproeven, af te lezen uit een grafiek (NEN en Deltares, 2010). Voor nat zand ( $w > 5\%$ ) en teelaarde wordt aangehouden een waarde van 0,025. In klei of veen zijn indertijd geen modelproeven uitgevoerd, verondersteld wordt dat de ontgrondingskuilen in deze grondsoorten aanzienlijk geringer zijn dan in fijn zand, zodat de aangehouden waarden voor  $R(w)$  conservatief zijn.

Indien de uitstroomflux in de tijd afneemt zal de groeisnelheid van de kuil sneller afnemen. We kunnen dit berekenen door te veronderstellen dat dynamische of traagheidseffecten verwaarloosd kunnen worden (quasi-stationair) en dat de verdere kuilontwikkeling zich direct aanpast aan de veranderde gasuitstroom. Dit geeft een tijdafhankelijke berekening van de kuilontwikkeling onder aanname van stationaire gasuitstroming als functie van een stapsgewijs in de tijd verlopende druk, gasuitstroming en impuls (bijv. een explosiescenario met snel afnemende druk), zie ook WL (1991 in opdracht van Gasunie), Deltares (2010 in opdracht van NEN) en POV K&L (2020). Er volgt:

$$L_{i+1} = \left[ (L_i)^4 + (R(w))^4 \left\{ \frac{g}{\eta^2} \left( \frac{I}{\rho_{\text{omg}} g} \right)^3 \right\}^{1/2} (t_{i+1} - t_i) \right]^{1/4}$$

met  $L_i$  = lengte ontgrondingskuil, gerekend vanaf punt van gasuitstroming (m),  $\eta$  = kuildiepte (m),  $I$  = impuls gasuitstroming (N),  $\rho_{\text{omg}}$  = dichtheid gas bij omgevingsdruk ( $\text{kg/m}^3$ ),  $t$  = tijd vanaf breuk of lek (s),  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ,  $R(w)$  = empirische coëfficiënt grondgedrag als functie vochtgehalte  $w$  (%).

Op basis van de gemeten kuilvorming is verder afgeleid dat de kuilbreedte globaal gelijk is aan  $\frac{1}{2}$  lengte van de ontgrondingskuil.

### 1.3 Eenvoudige methode

In Tabel 2 zijn de resultaten van de berekeningen, volgens o.m. de vereenvoudigde methode opgenomen, conform NEN 3651 Bijlage A.1 voor een volledige breuk of afschuiving met maximale stationaire uitstroming. Voor de tijdsduur van de lekkage wordt 2 uur aangehouden zoals aangegeven in de NEN 3651. Binnen deze periode van 2 uur zal volgens Gasunie de calamiteit zeker geconstateerd zijn en zal afsluiting van het leidingdeel plaatsvinden of zal de uitstroming al vanzelf zijn gestopt. Er wordt uitgegaan van een gronddekking voor de 48"-kruising nr. 21 van 3,67 m (deze leiding ligt behoorlijk diep t.o.v. de kruin van de kade), zie Tabel 2. De grondsoort bestaat uit zandige klei en ligt onder het grondwaterniveau, dus  $R(w) = 0,025$ .

De totale kuilafmetingen bij tweezijdige uitstroming zijn dan voor de 48" leiding, gerekend vanaf de breuk 37,5 m x 18,7 m x 5,62 m diep (een ronde schijf met straal 18,7 m). In een vrije bodem (zonder damwanden) met tweezijdige uitstroming zou deze kuil aan beide zijden van de leidingbreuk ontstaan (8-vormig). Zie NEN 3651 Bijlage A.1 Gasleidingen, A.1.1 Ontgroning / erosie door uitstromend gas.

*N.B.: de NEN 3651 is in 2012 aangepast na advies van Deltares. In de oude versie stond een formule, eveneens gebaseerd op het modelonderzoek van 1971, die een nog veel grotere uitkomst gaf, omdat veiligheidshalve daarin impliciet een nog veel langere tijdsduur met maximale uitstroming werd verondersteld (Deltares, 2010).*

In Bijlage A.1.2 van de NEN 3651 wordt een formule gegeven voor de explosiekrater die ontstaat bij het barsten van de leiding (N.B. dus niet door ontbranding van het gas!), gebaseerd op de Dambrunformule uit WO1. De ontgrondingskrater door erosie is meestal maatgevend, de explosiekrater wordt dan a.h.w. 'opgegeten' door de erosiekrater.

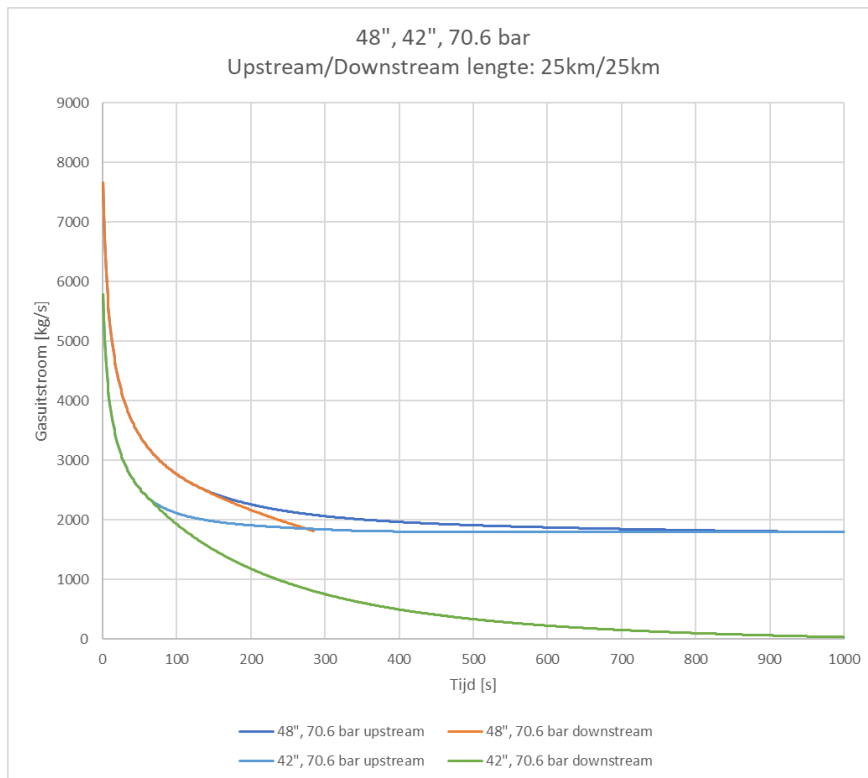
Verder wordt in de NEN 3651 genoemd de kans op verweking van de ondergrond, waarbij de draagkracht verminderd wordt. Dit is alleen mogelijk in fijn nat (waterverzadigd) en voldoende los gepakt zand. Een beoordeling van boringen en sondeerwaarden kan uitsluitsel geven over dit risico.

### 1.4 Dynamische gasuitstromingsberekeningen

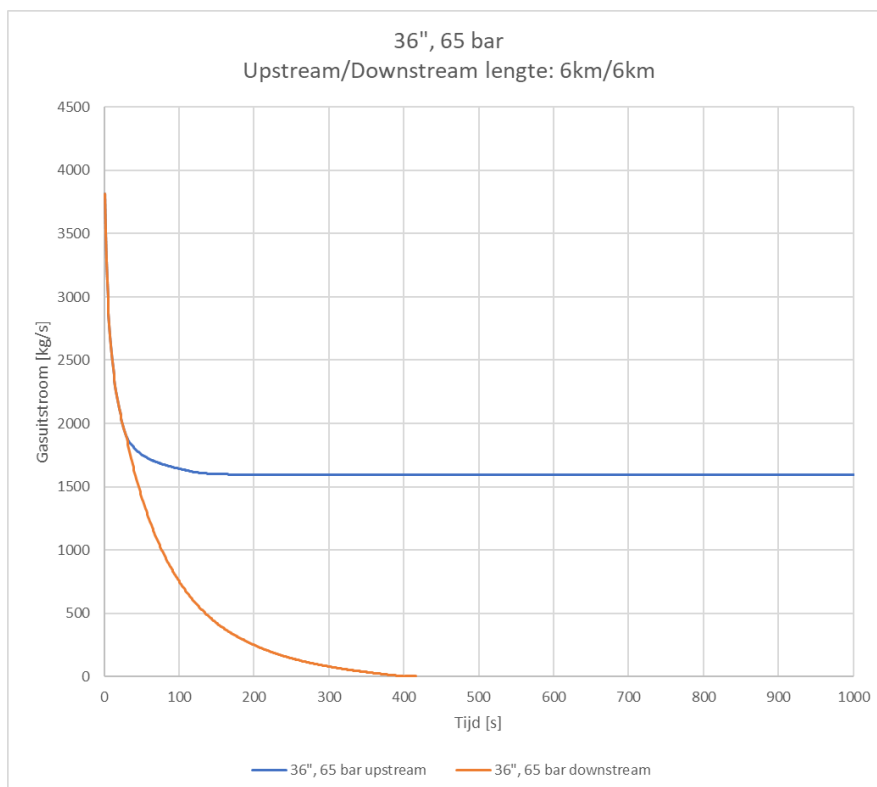
Uit ervaring met incidenten van gasleidingbreuk wordt meestal gerapporteerd dat de breuk en gasuitstroming met ontgroning zeer kortstondig zijn (volgens het zogenoemde explosiescenario). Een constante maximale uitstroming gedurende 2 uur lijkt daarom niet erg waarschijnlijk. Praktijkgevallen voor zover beschikbaar, wijzen meestal ook op een relatief kortdurende kuilontwikkeling. Een meer realistische benadering is dan om het dynamische karakter van de gasuitstroming bij leidingbreuk te beschouwen. Door de hoge druk en de expansie van het gas wordt de uitstroming vooral bepaald door het volume van de leidingen en niet door voeding door pompen of condensoren.

Door Gasunie is een dynamische berekening van de gasuitstroming van de betreffende leidingen (drie 36"-NAM leidingen en 42" en 48" van Gasunie, zie Tabel 1) uitgevoerd voor een volledige leidingbreuk ter plaatse van de kadekruising. Deze berekening wordt als uitgangspunt genomen voor de kraterberekening volgens de stapsgewijze formule. Voor de kanaal-/dijkkruisingen nr. 20 en 21 is een afstand van 25 km relevant. Figuur 3 geeft de gasuitstroming in de bovenstroomse (noordelijke) en de benedenstroomse (zuidelijke) zijde van de leiding bij de breuk en Figuur 4: de gasuitstroom voor de kruisingen nr. 15, 22 en 23 als functies van de tijd gerekend vanaf het moment van breuk. Voor de NAM-leidingen was de ontwerpdruk 85 bar, maar de maximale werkdruk is nu 65 bar.

Kenmerkend is dat de druk en het transport aanvankelijk zeer hoog zijn maar ook zeer snel afnemen. Na enkele minuten is de uitstroming van de benedenstroomse zijde al vrijwel tot 0 afgenomen. Aan de bovenstroomse zijde blijft een geringe maar constante flow aanwezig.



Figuur 3: Berekende gasuitstroming bij volledige breuk op 25 km voor 42" en 48" aardgasleiding (Gasunie, 2021)



Figuur 4: Berekende gasuitstroming bij volledige breuk op 6 km voor 36" NAM aardgasleiding (Gasunie, 2021).

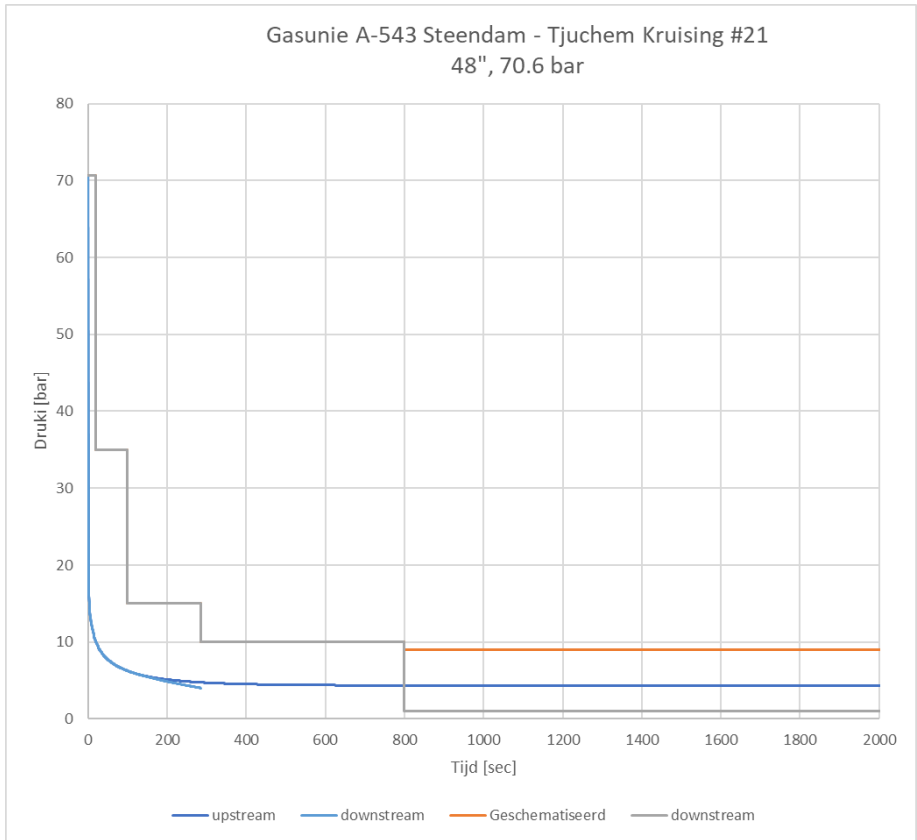
## 1.5 Dynamische berekening ontgrondingskuil

De dynamische berekening van de kuilontwikkeling bij leidingbreuk geeft waarschijnlijk een meer realistische waarde voor de bij incidenten waargenomen kuilgrootte. Mogelijk dekt dit mechanisme ook de in de NEN 3651 opgenomen formule voor fysische explosie van de leiding.

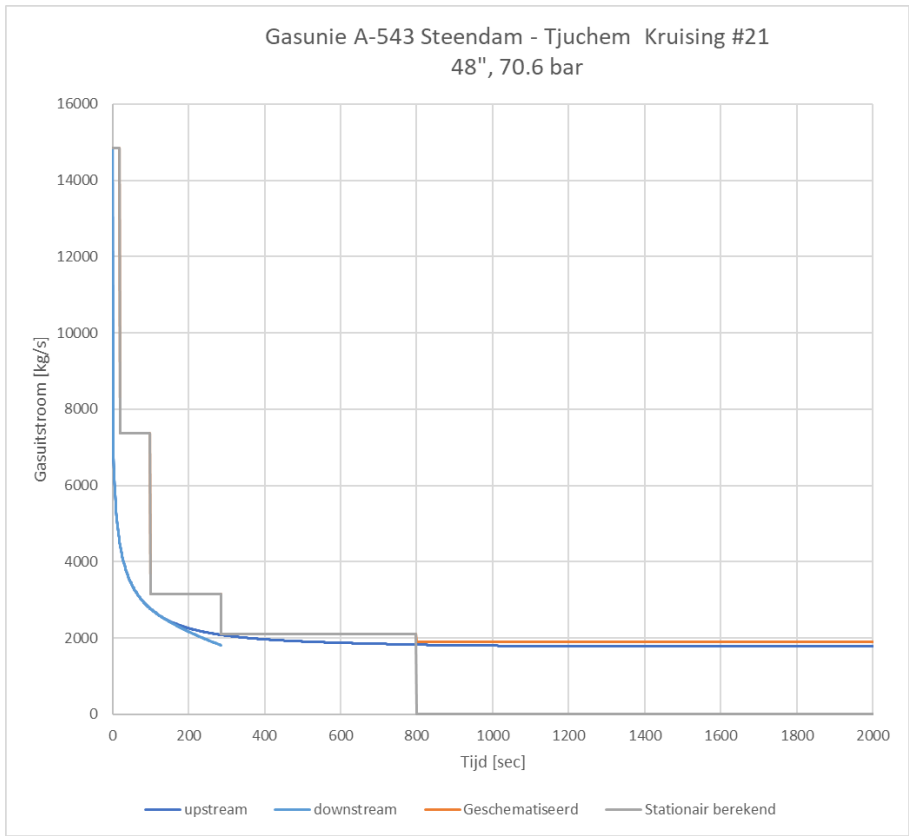
De berekening gaat uit van de dynamische gasuitstroming zoals toegeleverd door Gasunie. Omdat het niet mogelijk is de dynamische gasuitstroming ook voor de allereerste momenten na breuk te bepalen (van 0 tot 1 sec), wordt voor  $t = 0$  de druk in de leiding vóór breuk aangehouden, dus de maximale bedrijfsdruk en voor de gasuitstroming de maximale stationaire waarde bij die druk, zoals in Tabel 2 vermeld, dus 14.852 kg/s voor de 48"-leiding. Een dergelijke zeer grote, maar zeer korte uitstroming heeft het karakter van een fysieke explosie, we noemen dit daarom ook wel het explosiescenario, als tegenstelling tot het scenario met constante maximale uitstroming volgens de NEN 3651. De gasuitstromingsberekeningen zijn uitgevoerd voor 1000 sec, zie Figuur 3 en Figuur 4, dan is er al een stationaire situatie ingetreden. De berekening is geëxtrapoleerd naar 2 uur, onder aanname dat de stationaire eindsituatie veiligheidshalve nog 2 uur blijft bestaan, voordat de leiding wordt afgesloten. Voor de downstream zijde heeft dit geen effect, immers daar is de gasuitstroming na 10 minuten al tot 0 gereduceerd, zoals volgt uit de dynamische gasuitstromingsberekeningen (paragraaf 1.4). Downstream (zuidelijke zijde van de breuk) is er alleen sprake van uitstroom van gas uit de leiding, upstream (noordelijke zijde) wordt gas geleverd.

De berekeningen van de Gasunie van Figuur 3 en Figuur 4 zijn geschematiseerd tot een stapsgewijs afnemende druk en uitstroom, zie grijze trapjeslijnen in Figuur 5 en Figuur 6 (voor de 48"-leiding). Daarbij zijn de drukken zodanig aangehouden dat de daarbij berekende stationaire gasuitstroom nooit lager is dan de dynamische berekening aangeeft. Dit is dus nog steeds een conservatieve schematisering. Voor de overige leidingen (42" in Figuur 3 en voor de NAM kruisingen 36" in Figuur 4) is dit op dezelfde manier uitgevoerd. Vervolgens zijn de berekeningen geëxtrapoleerd naar een tijdsduur van 2 uur. Er is dus aangenomen dat in de bovenstroomse leiding de uitstroom constant blijft tot 7200 sec en pas dan wordt afgesloten.

De stationaire uitstroming (flow) en impuls, zie Tabel 2, zijn berekend op basis van de geschematiseerde druk en de leiding- en gaskarakteristieken volgens de formules van de stationaire thermodynamische theorie, zoals gegeven in de NEN en in Deltares (2010). Dit geeft een veilige benadering van de dynamische uitstroming.



Figuur 5: Dynamisch berekende en geschematiseerde druk in gasleiding bij leidingbreuk (48").

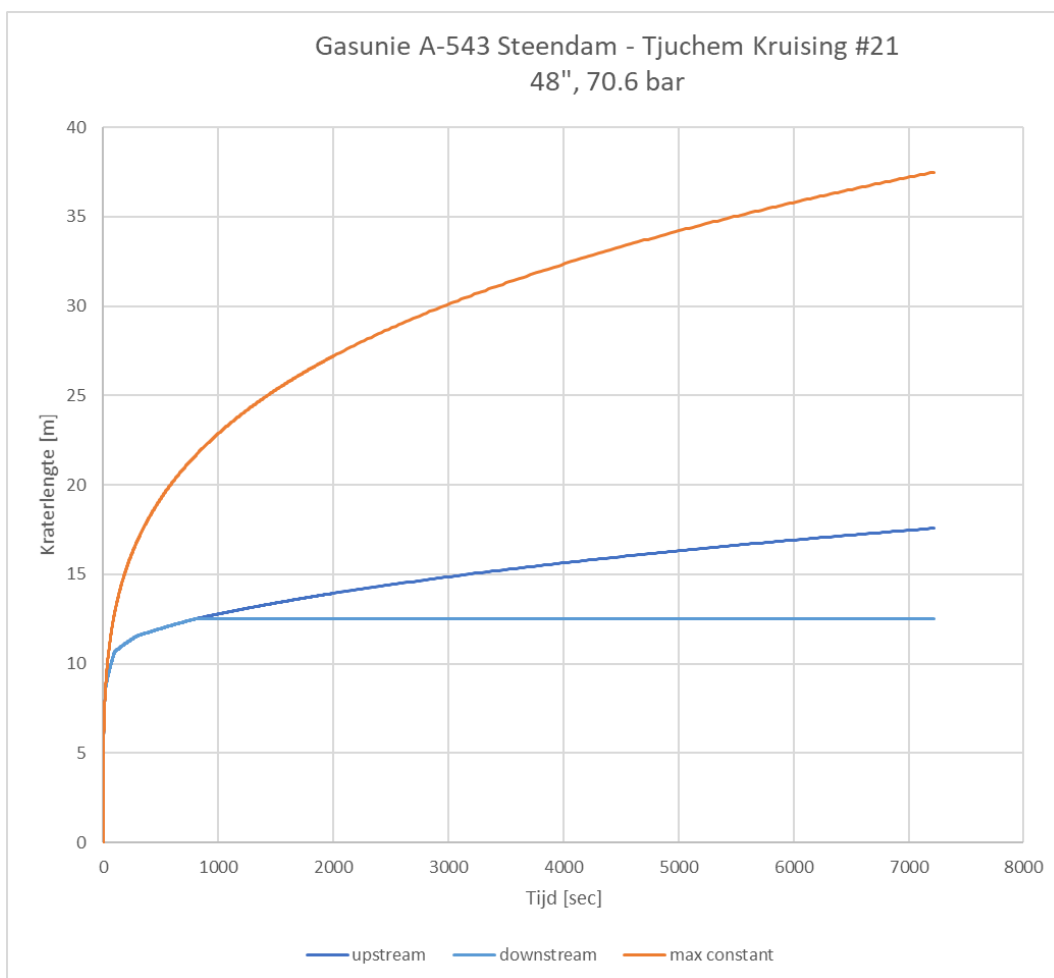


Figuur 6: Dynamisch berekende en geschematiseerde gasuutstroming in gasleiding bij leidingbreuk (48").

De resulterende kuilontwikkeling is gegeven in Figuur 7 (voor de 48"-leiding en overige analoog). Te zien is dat na 2 uur de kuillengte 37,5 m zou bedragen bij constante uitstroming, zoals eerder berekend volgens de Eenvoudige methode, zie Tabel 2, terwijl volgens het explosiescenario de kuillengte na 2 uur 12,5 m bedraagt aan de benedenstroomse zijde en 17,6 m aan de bovenstroomse zijde. Als mag worden aangenomen dat na 1000 sec de uitstroming ook aan de bovenstroomse zijde geheel stopt, zoals de Gasunie berekening aangeeft (Figuur 3), dan blijft de kuilafmeting aan deze zijde beperkt tot 13 m.

De kuilbreedte is in alle gevallen de helft van de lengte (schijfvormige erosiekrater).

Vanwege het verschil in up- en downstream zal de kuilvorm asymmetrisch zijn (8-vormig in vlak maaiveld).



Figuur 7: Berekende erosiekraterontwikkeling bij gasleidingbreuk (48"). Donkerblauwe lijn upstream, lichtblauwe lijn downstream, beiden volgens explosiescenario. Oranje lijn bij stationaire maximale uitstroming (eenvoudige methode).

## 1.6 Resultaten

De berekeningsresultaten voor de kraterafmetingen zijn samengevat in Tabel 2 voor de leidingkruisingen zoals samengevat in Tabel 1.

Tabel 2 Gegevens en resultaten kraterberekeningen eenvoudig en dynamisch

Buisleiding	NAM	NAM	NAM	Gasunie	Gasunie	
Leidingnummer	501100	501071	501061	A-543	A-610	
Diameter [inch]	36	36	36	48	42	inch
Ontwerpdruk [bar]	85	85	85	70,6	70,6	bar
Bouwjaar	1973	1974	1974	1974	1986	
Kruisingnummer	15	22	23	21	20	
Diameter [mm]	914,4	914,4	914,4	1219,2	1066,8	mm
Wanddikte [mm] t.p.v. kruising	19,05	12	12	22,3	16,8	mm
Diameter inw [mm]	876,3	890,4	890,4	1174,6	1033,2	mm
Dichtheid aardgas	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	kg/m <sup>3</sup>
Max gasdruk	65	65	65	70,6	70,6	
Max uitstroom gas	7610	7857	7857	14852	11491	kg/s
Max impuls	4,88E+06	5,03E+06	5,03E+06	9,52E+06	7,37E+06	N
Grondsoort	klei	klei	klei	klei/veen	klei/veen	
Waterstand	-1,07	-1,07	-1,07	-1,07	-1,07	m NAP
Hart leiding	-3,357	-1,63	-1,63	-4,11	-4,04	m NAP
Kade hoogte	0,16	0,16	0,16	0,17	0,16	m NAP
Top leiding	-2,90	-1,17	-1,17	-3,50	-3,51	m NAP
Onderkant leiding	-3,81	-2,09	-2,09	-4,72	-4,57	m NAP
Gronddekking	3,06	1,33	1,33	3,67	3,67	m
<b>Berekeningen volgens NEN 3651 Bijlage A Eenvoudig na 2 uur</b>						
Kraterdiepte	4,52	2,79	2,79	5,62	5,38	m
kraterbodem ligging	-4,36	-2,63	-2,63	-5,45	-5,22	m NAP
kraterlengte	30,8	35,1	35,1	37,5	34,4	m
kraterbreedte	15,4	17,6	17,6	18,7	17,2	m
straal explosiekrater	2,39	3,12	3,12	3,66	2,94	m
kratervolume totaal	3368	2700	2700	6207	5000	m <sup>3</sup>
<b>Berekeningen dynamische uitstroming na 2 uur</b>						

kraterlengte upstream	17,1	19,2	19,2	17,6	17,4	m
kraterlengte downstream	7,4	8,4	8,4	12,5	10,8	m
kraterdiepte	4,52	2,79	2,79	5,62	5,38	m
kratervolume totaal	1232	962	962	2057	1772	m <sup>3</sup>

Een leidingbreuk binnen de kistdamwandconstructie zal niet tot instabiliteit leiden omdat de kuildiepte beperkt blijft ten opzichte van de insteekdiepte van de damwanden. De kuilontwikkeling kan niet buiten de kistdam treden. De kuildiepte is onafhankelijk van de gasuitstroming en wordt vooral bepaald door diepteligging.

Een leidingbreuk net buiten de kistdam kan tot een maximale schade leiden, dit is de “worst-case” situatie (guillotinebreuk met over 1 leidingdiameter verschoven leidinguiteinden met vrije tweezijdige uitstroming van gas). Daarbij ontstaat een ronde ontgrondingskuil die zich uitbreidt in de richting van de uitstroming.

Mits de kraterbreedte de door de damwanden beschermde zone van de kade niet te buiten gaat, kan geconcludeerd worden dat de damwanden voldoende breed zijn om als afschermconstructie te kunnen fungeren. Daartoe zijn de kraterafmetingen ingetekend op basis van een breuk op de meest ongunstige locatie, dus net buiten de kistconstructie aan polderzijde (voor figuren zie hoofdrapport). Bij een breuk aan de kanaalzijde zal een ontgrondingskuil onder water optreden, maar deze zal veel beperkter in omvang zijn, omdat het water de gasuitstroming zal smoren, net als bij breuk op grote diepte. Dit is echter niet met modelonderzoek onderzocht.

De kuil aan de zuidelijke zijde van de damwandconstructie op de noordelijke en zuidelijke oever, gevoed door de upstream zijde van de gasleiding, zal geringer zijn dan aan de noordelijke zijde (downstream). Indien de stroomrichting van het gas wordt gewijzigd zal dit juist andersom zijn, echter volgens Gasunie kan dit niet zonder grote veranderingen in het netwerk.

De explosiekrater zal worden “opgegeten” door de erosiekuil. Bij eerder sluiten van de gastoevoer (dan 2 uur) zal alleen de upstream kuil nog iets kleiner uitpakken.

Om de berekeningsmethode te verifiëren wordt aanbevolen om een evaluatie met praktijkgegevens (zoals beschikbaar bij TNO / Gasunie) uit te voeren, en aanvullend modelonderzoek uit te voeren met verschillende grondsoorten. In een meer geavanceerde rekenmethode of numeriek model kan dan rekening gehouden worden met de verschillende aanwezige grondsoorten, gebaseerd op veldonderzoek.

## 1.7 Conclusies

De berekening op basis van de specifieke dynamische gasuitstroom bij volledige breuk voor de betreffende kruisingen levert aanzienlijk kleinere kraterafmetingen dan met NEN 3651 Bijlage A.1.1.2 eenvoudig (factor 2 tot 3 kleiner).

Voor hogedruk gasleidingen wordt de gegeven rekenmethode op basis van berekende druk en uitstroming bij breuk daarom aanbevolen (passend in NEN 3651, A.1.1.3), omdat deze realistischer is maar nog steeds conservatief, dus veilig (o.m. omdat in klei of veen de ontgronding geringer zal zijn dan in vochtig zand / teelaarde).

Bij breuk in de damwand kistconstructie wordt verwacht dat de gasstroom de grond in de constructie uitspoelt, maar omdat de damwanden dieper steken dan de verwachte kuildiepte zal waarschijnlijk geen ondermijning optreden (check: sterkte stabiliteit damwand).

Bij breuk juist buiten de damwand breidt de kuil zich in breedterichting niet verder uit dan de aanwezige damwandbreedte (voor controle daarvan zie hoofdrapport).

De kraterberekeningen zijn representatief voor leidingbreuk boven water en kunnen niet zonder meer worden toegepast voor leidingbreuk onder het uitwateringskanaal. Het schadebeeld is onder water anders en gunstiger dan boven water.

## 1.8 Referenties

Witteveen+ Bos (2020), Kadeverbetering Steendam - Tjuchem, Leidingkruising nr. 20 (en anderen), bron: Bilfinger Tebodin, 2020.

Deltares (2021), Faalkansanalyses Leidingkruisingen Wolferen – Sprok, Methodiek, 1206705, (Bijlage C, Kraters voor de A524 en A533 leidingen).

POV Kabels & Leidingen (2020) Faalkansanalyse dijkontwerp Wolferen-Sprok met kruisende gasleiding A-505, Derde toepassing Veiligheidsraamwerk Kabels & Leidingen. Vastgesteld door de stuurgroep POV Kabels & Leidingen 29 oktober 2020. Deltares (2020), 11203959 (Bijlage G: Gevolgen van leidingfalen).

NEN 3651 (2020), Aanvullende eisen voor buisleidingen in of nabij belangrijke waterstaatswerken, Nederlands Normalisatieinstituut NEN, januari 2020.

Deltares (2010), Berekeningsmethode ontgroning bij gasleidingbreuk - evaluatie NEN 3651, Mastbergen, D.R., Deltares, 1201743, 2010.

WL (1991), Ontgroning door gasleidingbreuk, herinterpretatie M1136, in opdracht van Gasunie, Mastbergen, D.R., Waterloopkundig Laboratorium Delft, J617, 1991.

WL (1972), Ontgroning door gasleidingbreuk, verslag modelonderzoek, Os, A.G. van, Verbeek, P.R.H, Waterloopkundig Laboratorium Delft, M1136, 1972.

## Bijlage 6: Controle onder-/achterloopsheid kistdammen

Kruisende gastransportleidingen met kistdam  
in kadeversterking Steendam - Tjuchem

Opgesteld door: Harry Schelfhout

Datum: 9 september 2022 (definitief)

## 1. Inleiding

In deze bijlage worden de kistdammen gecontroleerd op de faalmechanismen onder- en achterloopsheid en wordt een globale schatting gemaakt van de bijbehorende faalkansen. Daarbij wordt onderscheid gemaakt in de situatie zonder en met een erosiekrater als gevolg van leidingbreuk.

Voor de situatie zonder een erosiekrater is er vanwege de aanwezigheid van afsluitende deklagen geen kans op onder-/achterloopsheid.

Voor de situatie met een erosiekrater zijn de deklagen plaatselijk afwezig en is er wel een kans op onder-/achterloopsheid. Voor deze situatie is gebruik gemaakt van de door Deltares berekende kraterafmetingen op basis van tijdsafhankelijke dynamische gasuitstroming. Voor meer informatie daarover zie *Bijlage 5: Kraterberekeningen*. Voor de controle van onderloopsheid is gebruik gemaakt van de inheidiepten van de bestaande damwanden. De horizontale en verticale kwelwegen zijn berekend volgens de methode Lane voor kunstwerken uit het Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen [TAW, 1999] met de volgende formule:

$$\Delta H \leq \Delta H_{CR} = \{(1/3 \times L_H) + L_V\} / C_{W;CREEP}$$

waarin:

$\Delta H$  = verval [m]

$\Delta H_{CR}$  = kritiek verval [m]

$L_H$  = horizontale kwelweglengte [m]

$L_V$  = verticale kwelweglengte [m]

$C_{W;CREEP}$  = creepfactor [-]

Voor de omrekening van de veiligheidsfactor ( $\gamma = \Delta H_{CR} / \Delta H$ ) naar faalkansen zijn geen formules beschikbaar. Daarvoor is als indicatieve benadering gebruik gemaakt van de relatie tussen de veiligheidsfactor ( $\gamma$ ) en betrouwbaarheidsindex ( $\beta$ ) voor piping uit het Ontwerpinstrumentarium [I&M. 2017] voor primaire waterkeringen.

Voor de controle van achterloopsheid is uitgegaan van de bestaande damwandbreedtes en de berekende dimensies van de erosiekraters. De controle van de damwandbreedte is uitgevoerd voor elke afzonderlijke kistdam. De resultaten worden hierna gepresenteerd en nader toegelicht.

## 2. Kistdam bij NAM 501100 (nr. 15)

De kistdam wordt hier gekruist door 3 leidingen. De bestaande breedte van de damwandconstructie reikt hier tot  $B = 10,2$  m, gemeten uit de zijkant van de buitenste leiding. De kruisende leiding heeft een diameter van 36 inch en een ontwerp druk van 8,5 MPa. De stromingsrichting van het gas is van noord (upstream) naar zuid (downstream).

### 2.1 Onderloopsheid

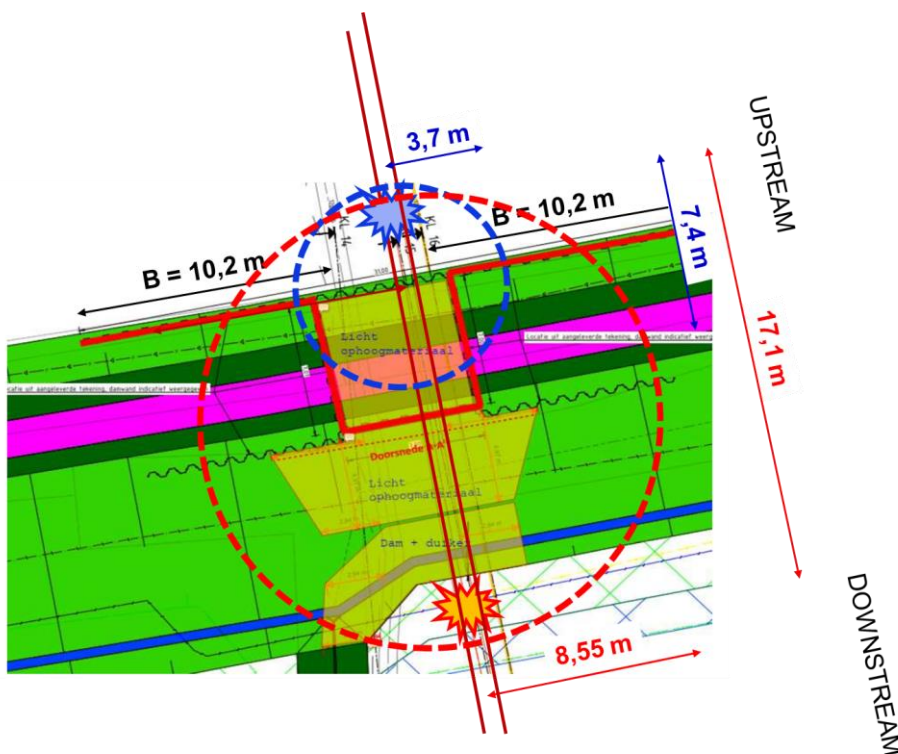
Op basis van de ontwerpprofielen en de formule van Lane zijn de volgende parameters bepaald:

Parameter	Met erosiekrater buitenzijde	Met erosiekrater binnenzijde
$L_H$	13 m	15 m
$L_V$	11,3 m	9,9 m
$\Delta_H$	2,85 m	2,85 m
$\Delta H_{CR}$	2,23 m	2,13 m
$C_{W,CREEP}$	7	7
$\gamma = \Delta H_{CR} / \Delta H$	0,78	0,75
$\beta$	2,57	2,46
$P_F$	$5,12 \times 10^{-3}$	$2,96 \times 10^{-3}$

Tabel 2.1: Controle onderloopsheid kistdam bij leidingkruising nr. 15.

## 2.2 Achterloopsheid

Voor leidingkruising nr. 15 is bij leidingbreuk (volledige afschuiving) een kraterlengte upstream berekend van 17,1 m en een kraterlengte downstream van 7,4 m. Voor de controle van de breedte van de damwand is de kraterbreedte van belang, die aan weerszijden van de kruisende leiding reikt tot de helft van de kraterlengte, gemeten uit de as van de leiding. Een en ander is weergegeven in de volgende figuur.



Figuur 2.1: Damwandbreedte en afmetingen erosiekraters bij leidingkruising nr. 15.

Uit de figuur blijkt dat zowel de kraterbreedte upstream (8,55 m) als downstream (3,7m) binnen de bestaande damwandbreedte vallen en de damwanden als afschermconstructie bij leidingfalen kunnen fungeren.

### 3. Kistdam bij NAM 501071 (nr. 22) en NAM 501061 (nr.23)

De kistdam wordt hier gekruist door 2 leidingen. De bestaande breedte van de damwandconstructie reikt hier tot  $B = 9,74$  m respectievelijk  $B = 9,75$  m, gemeten uit de zijkant van de buitenste leiding. De kruisende leidingen hebben een diameter van 36 inch en een ontwerp druk van 8,5 MPa. De stromingsrichting van het gas is van noord (upstream) naar zuid (downstream).

#### 3.1 Onderloopsheid

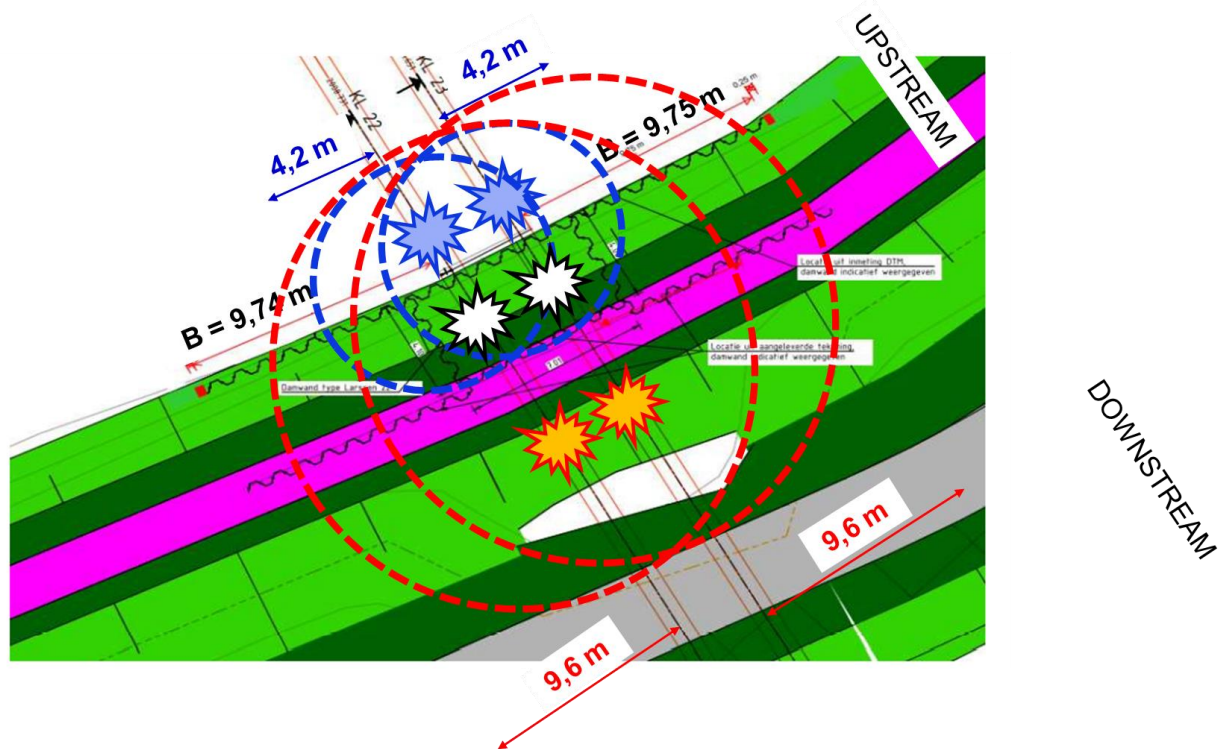
Op basis van de ontwerpprofielen en de formule van Lane zijn de volgende parameters bepaald:

Parameter	Met erosiekrater buitenzijde	Met erosiekrater binnenzijde
$L_H$	22 m	14 m
$L_V$	9,7 m	9,8 m
$\Delta_H$	2,85 m	2,85 m
$\Delta H_{CR}$	2,43 m	2,07 m
$C_{W, CREEP}$	7	7
$\gamma = \Delta H_{CR} / \Delta H$	0,85	0,73
$\beta$	2,80	2,39
$P_F$	$2,56 \times 10^{-3}$	$8,46 \times 10^{-3}$

Tabel 3.1: Controle onderloopsheid kistdam bij leidingkruising nr. 22

#### 3.2 Achterloopsheid

Voor leiding nr. 22 en 23 is bij leidingbreuk (volledige afschuiving) een kraterlengte upstream berekend van 19,2 m en een kraterlengte downstream van 8,4 m. Een en ander is weergegeven in de volgende figuur.



Figuur 3.1: Damwandbreedte en afmetingen erosiekraters bij leidingkruising nr. 22 en 23

Uit de figuur blijkt dat zowel de kraterbreedte upstream als downstream binnen de bestaande damwandbreedte vallen en de damwanden als afschermconstructie kunnen fungeren.

#### 4. Kistdam bij Gasunie A-610 (nr. 20) en Gasunie A-543 (nr. 21)

De kistdam wordt hier gekruist door 2 leidingen. De bestaande breedte van de damwandconstructie reikt hier tot  $B = 7,2$  m respectievelijk  $B = 8,6$  m, gemeten uit de zijkant van de buitenste leiding. De kruisende leidingen hebben een diameter van 42 inch en 48 inch en een ontwerp druk van 7,06 MPa. De stromingsrichting van het gas is van noord (upstream) naar zuid (downstream).

##### 4.1 Onderlooptheid

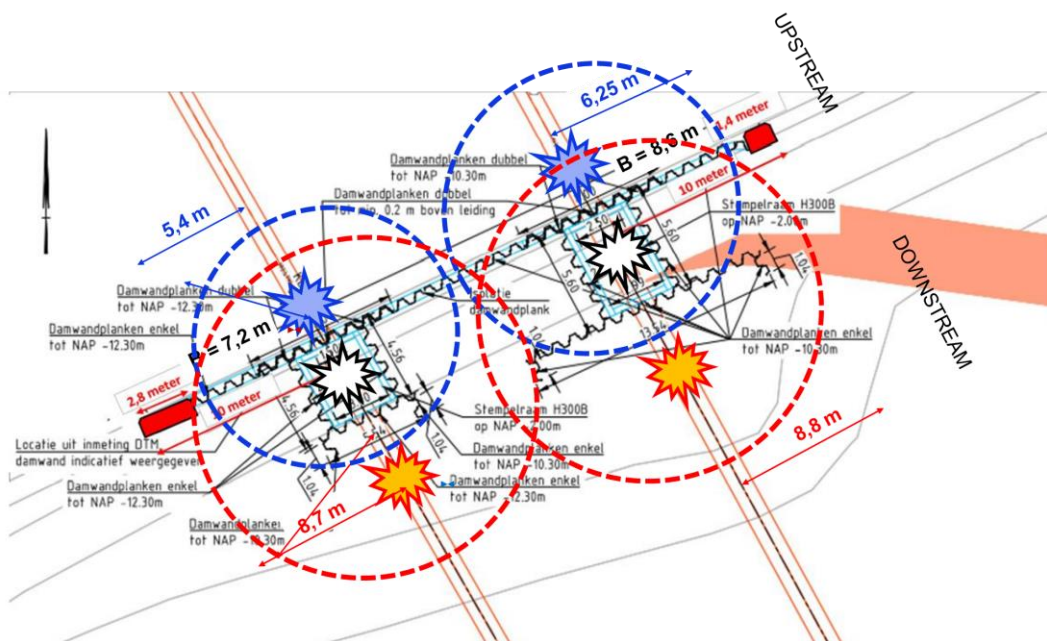
Op basis van de ontwerpprofielen en de formule van Lane zijn de volgende parameters bepaald:

Parameter	Met erosiekrater buitenzijde	Met erosiekrater binnenzijde
$L_H$	14 m	16 m
$L_V$	17,1 m	15,4 m
$\Delta H$	2,85 m	2,85 m
$\Delta H_{CR}$	2,27 m	2,96 m
$C_{W,CREEP}$	7	7
$\gamma = \Delta H_{CR} / \Delta H$	0,80	1,04
$\beta$	2,64	3,34
$P_F$	$4,20 \times 10^{-3}$	$4,12 \times 10^{-4}$

Tabel 4.1: Controle onderloopsheid kistdam bij leidingkruising nr. 20

## 4.2 Achterloopsheid

Voor leiding nr. 20 is bij leidingbreuk (volledige afschuiving) een kraterbreedte upstream berekend van 8,7 m en een kraterlengte downstream van 5,4 m. Voor leiding nr. 21 is dat een kraterbreedte upstream van 8,8 m en een kraterbreedte downstream van 6,25 m. Een en ander is weergegeven in de volgende figuur.



Figuur 4.1: Damwandbreedte en afmetingen erosiekraters bij leidingkruising nr. 20 en 21.

Uit de figuur blijkt dat zowel de kraterbreedte upstream als de kraterbreedte downstream binnen de bestaande damwandbreedte vallen en de damwanden als afschermconstructie bij leidingfalen kunnen fungeren.

## Bijlage 7: Faalpaden en gebeurtenissenbomen

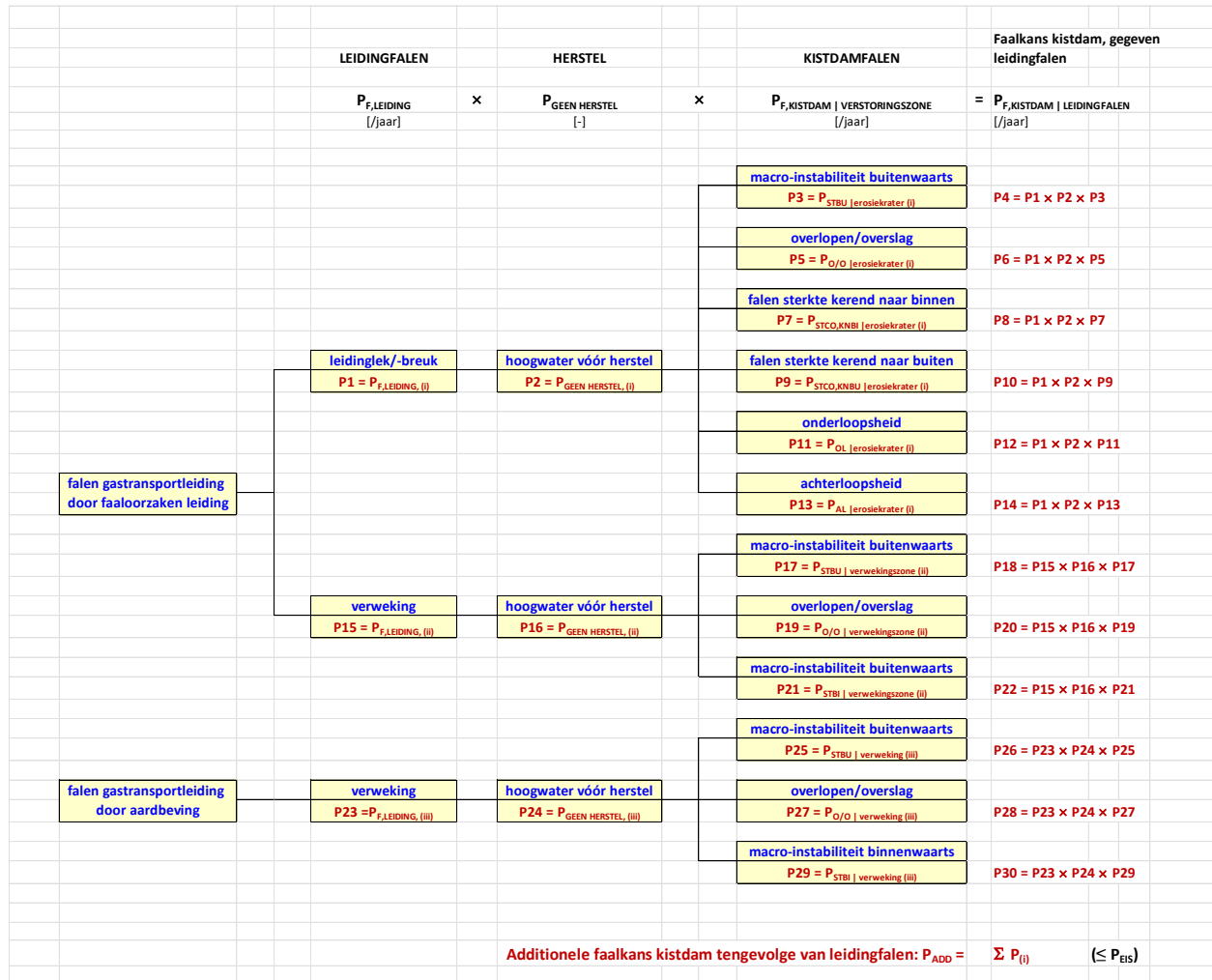
Kruisingen gastransportleidingen  
in kadeversterking Steendam - Tjuchem

Opgesteld door: Harry Schelfhout

Datum: 30 oktober 2022 (definitief)

# 1. Inleiding

In deze bijlage worden per leidingkruising de gebeurtenissenbomen gepresenteerd met daarin de binnen de veiligheidszone en centrale zone gecombineerde faalkansen van leidingfalen en kistdamfalen en de daaruit voortvloeiende additionele faalkansen, die moet voldoen aan de faalkanseis. Deze zijn gebaseerd op een analyse van de faalpaden/-scenario's, zoals weergegeven in de volgende figuur.



Figuur 1.1: Overzicht van faalpaden van kruisingen van gastransportleidingen.

Voor de casus Steendam – Tjuchem worden de volgende gebeurtenissen gedefinieerd:

$P(A) = P_{F,LEIDING}$  = de kans op schade aan de kering door leidingfalen [per jaar]

$P(B) = P_{GEEN\ HERSTEL\ |}\ LEIDINGFALEN$  = de kans dat het jaarmaximum van de waterstand zich binnen of tijdens de herstelperiode voordoet in geval van schade aan de kering door leidingfalen [-]

$P(C) = P_{F,KISTDAM\ |}\ GEEN\ HERSTEL\ |}\ LEIDINGFALEN$  = de kans op falen van de kistdam, gegeven leidingfalen bij een jaarmaximum van de waterstand binnen of tijdens de herstelperiode [-]

Deze kans is niet direct bepaald. In deze casus is deze kans bij benadering getalsmatig gelijkgesteld aan de kans op jaarbasis dat de kistdam faalt, uitgaande van continu aanwezige schade door leidingfalen. Dit zijn de kansen die voor verschillende faalorzaken van de leiding zijn bepaald.

De additionele faalkans volgt uit:  $P(A)$  en  $P(B)$  en  $P(C)$  of :

$$P_{ADDITIONEEL} = P_{F,LEIDING} \times P_{F,GEEN\ HERSTEL\ |}\ LEIDINGFALEN \times P_{F,KISTDAM\ |}\ GEEN\ HERSTEL\ |}\ LEIDINGFALEN$$

In feite wordt daarbij impliciet aangenomen dat de faalmechanismen disjunct zijn of elkaar uitsluiten, wat niet hetzelfde is als onafhankelijke gebeurtenissen. De faalkansen worden per leidingkruising gepresenteerd in de gebeurtenissenbomen van de hoofdstukken 2, 3 en 4.

## 2. Gebeurtenissenboom leidingkruising nr. 15

INTERIM METHODIEK						
Faalkansanalyse kruisende gastransportleiding NAM 501100 (nr.15)						
	LEIDINGFALEN: $P_{LF}$	GEEN HERSTEL	KISTDAMFALEN: $P_{mech,KF}$	Additionele faalkans: $P_{F,ADD}$		
	veiligheidszone buitenzijde = 30 m					
falen kruisende gastransportleiding	leidinglek/-breuk 1,1E-06	hoogwater vóór herstel 0,05	macro-instabiliteit buitenwaarts 1,5E-05	8,4E-13	0,13%	
			overlopen/overslag 4,0E-03	1,5E-10	22,36%	
			falen sterkte kerend naar binnen 2,2E-04	8,3E-12	1,24%	
	centrale zone = 20 m	leidinglek/-breuk 7,6E-07	hoogwater vóór herstel 0,05	falen sterkte kerend naar buiten 1,5E-03	5,7E-11	8,45%
			onderloopsheid 1,2E-02	4,6E-10	67,81%	
			achterloopsheid <<			
	veiligheidszone binnenzijde = 30 m					
leidingfalen door aardbeving	leidinglek/-breuk 1,1E-06	hoogwater vóór herstel 0,05	macro-instabiliteit binnenwaarts 1,5E-06	8,4E-14	0,01%	
			verweking <<			
			n.v.t <<			
		verweking/compactie <<	n.v.t <<			
				<b>Som:</b>	<b>6,7E-10 /jaar</b>	

Figuur 2.1: Gebeurtenissenboom voor leidingkruising NAM 501110 (nr. 15).

Deze figuur is representatief voor het falen van de kistdam met daarin één in bedrijf zijnde gastransportleiding (kruising nummer 15). De kansbijdrage van het falen van een tweede niet in bedrijf zijnde gastransportleiding (kruising nummer 14) is buiten beschouwing gelaten. Uit de gebeurtenissenboom volgt voor leidingkruising nummer 15 een additionele faalkans van  $6,7 \times 10^{-10}$  per jaar en dat de faalmechanismen 'overloop/overslag' (22%) en 'onderloopsheid' (68%) daaraan de grootste bijdrage leveren.



## 4. Gebeurtenissenboom leidingkruisingen nr. 22 en 23

INTERIM METHODIEK					
Faalkansanalyse kruisende gastransportleiding NAM 501071 (nr. 22) en NAM 501061 (nr. 23)					
	LEIDINGFALEN: $P_{LF}$	HERSTEL	KISTDAMFALEN: $P_{mech,KF}$	Additionele faalkans: $P_{F,ADD}$	
	veiligheidszone buitenzijde = 30 m				
falen 2 kruisende gastransportleidingen	leidinglek/-breuk kruising nr. 22-23 2,3E-06	hoogwater vóór herstel 0,05	macro-instabiliteit buitenwaarts 1,5E-05	1,7E-12	0,17%
			overlopen/overslag 4,0E-04	3,0E-11	3,01%
	centrale zone = 20 m				
	leidinglek/-breuk kruising nr. 22-23 1,5E-06	hoogwater vóór herstel 0,05	falen sterkte kerend naar binnen 2,2E-04	1,7E-11	1,67%
			falen sterkte kerend naar buiten 1,5E-03	1,1E-10	11,40%
			onderloopsheid 1,1E-02	8,4E-10	83,74%
			achterloopsheid <<		
	veiligheidszone binnenzijde = 30 m				
leidingfalen door aardbeving	leidinglek/-breuk kruising nr. 20-21 2,3E-06	hoogwater vóór herstel 0,05	macro-instabiliteit binnenwaarts 1,5E-06	1,7E-13	0,02%
			verweking n.v.t	<<	<<
		verweking/compactie <<	n.v.t	<<	<<
				Som:	1,0E-09 /jaar

Figuur 4.1: Gebeurtenissenboom voor leidingkruisingen NAM 501071 (nr. 22) en NAM 501061 (nr. 23).

Deze figuur is representatief voor het falen van de kistdam met daarin twee in bedrijf zijnde gastransportleidingen. Dit betekent dat het falen van beide leidingkruisingen een kansbijdrage levert aan het falen van de kistdam. Uit de gebeurtenissenboom volgt voor de leidingkruisingen nummer 20 en 21 tesamen een additionele faalkans van  $1,0 \times 10^{-9}$  per jaar, die voor 84% wordt bepaald door de kans op onderloopsheid.