



Innovatieve rekenmethodiek leidingfalen en dijkfalen

Integrale faalkansanalyse kruisingen gastransportleidingen
in kadeversterking Tussenklappenpolder

24 juli 2023 (definitief)



Colofon

Auteurs

Harry Schelfhout | Schelfhout Advies

Jan Spiekhout | B&B Advisor

Nisa Nurmohamed | Strategische Samenwerking Water- en Netbeheerders

Inhoudelijke bijdrage specialisten

Dick Mastbergen en Piet Meijers | Deltares

Victoria Monsma | DNV-GL

Marc Dröge en Frits Koerts | N.V. Nederlandse Gasunie

Sylvio van Ditzhuijzen | Bilfinger Tebodin Netherlands B.V.

Wiebe Janssen, Mitchell van der Horst en Martin Arends | Arcadis

Martin Nieuwjaar | Martin Nieuwjaar Advies

Reviewers

Wim Guijt | namens Shell Global Solutions International B.V. en NEN Werkgroep 1 Ontwerp

Erik Brink | namens N.V. Nederlandse Gasunie en NEN Werkgroep 1 Ontwerp

Henk van Hemert | STOWA

Ruben Jongejan | Jongejan RMC

Robert Slomp | Rijkswaterstaat

Projectgroep

Sjaak Vis en Gabriël Rammeloo | Waterschap Hunze en Aa's

Aat Glas en Paul Kassenberg | N.V. Nederlandse Gasunie N.V.

Derk-Jan Starke en Janny Mulder-Teunissen | Nederlandse Aardolie Maatschappij

Henk Hazelhorst | Arcadis

Harry Schelfhout | Schelfhout Advies

Jan Spiekhout | B&B Advisor

Nisa Nurmohamed | Strategische Samenwerking Water- en Netbeheerders

Vaststelling door opdrachtgevers

Waterschap Hunze en Aa's, N.V. Nederlandse Gasunie en Nederlandse Aardolie Maatschappij

Voorwoord

Voor u ligt het rapport Innovatieve rekenmethodiek leidingfalen en dijkfalen - Integrale faalkansanalyse kruisingen gastransportleidingen in kadeversterking Tussenklappenpolder.

Dit product is tot stand gekomen vanuit de Strategische Samenwerking Water- en Netbeheerders (SSWN), als vervolg op de in 2022 uitgevoerde faalkansanalyse voor de kadeversterking Steendam - Tjuchem. De SSWN is 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 hebben effect op de veiligheid van een waterkering. Het beoordelen van de veiligheid van een waterkering met leidingen vraagt dan ook om een integrale aanpak waarbij we zowel het gedrag van de leidingkruisingen als dat van de waterkering moeten beschouwen en de beïnvloeding daarvan op de faalkans van de waterkering. Dit vraagt om een benadering die is gebaseerd op de systematiek van het Veiligheidsraamwerk POV K&L [POV-KL, 2020a], een product van de POV K&L, dat in de praktijk is toegepast voor een aantal dijkversterkingsprojecten bij primaire waterkeringen. Verder is bij de uitwerking van de faalkansanalyse zoveel mogelijk aangesloten bij de aanpak op basis van faalpaden zoals die in het kader van het nieuwe Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium (BOI) voor primaire waterkeringen wordt ontwikkeld.

Voor de eerdere praktijkcasus Steendam-Tjuchem is een innovatieve rekenmethodiek ontwikkeld waarbij de systematiek van het Veiligheidsraamwerk POV K&L op vereenvoudigde wijze is toegepast. Het belangrijkste verschil tussen de systematiek van het Veiligheidsraamwerk K&L en de innovatieve rekenmethodiek is dat bij de innovatieve methodiek nog meer aansluiting is gezocht bij bestaande kennis en rekenregels voor waterkeringen en pijpleidingen, aangevuld met nieuwe kennis over de interactie tussen leidingfalen en dijkfalen en de gevolgen daarvan. Er wordt van grof naar fijn gewerkt. Hierbij wordt het gecombineerd falen van een gastransportleiding en een regionale waterkering berekend. Door het hanteren van conservatieve, veilige aannames en kans schattingen kunnen complexe berekeningen achterwege blijven met als resultaat: lagere analysekosten en een kortere doorlooptijd. Voor regionale waterkeringen is een belangrijk extra aandachtspunt dat de vigerende veiligheidsbenadering (nog) niet is gebaseerd op overstromingskansen en een faalkansaanpak.

De innovatieve rekenmethodiek is na toepassing bij de kadeversterking Steendam – Tjuchem [WSHA, 2022] voor de kadeversterking Tussenklappenpolder voor de tweede keer toegepast. Voor Tussenklappenpolder heeft dit geleid tot een significante maatschappelijke kostenbesparing. Daarbij geldt nog wel de kanttekening dat twee van de vijf leidingkruisingen nog niet voldoen aan de verhoogde eisen betreffende de faalkans van de rondlas, zodat er daarvoor nog aanvullend onderzoek nodig is.

We zijn bijzonder trots op het resultaat dat er nu ligt. Dit was nooit gelukt zonder de constructieve bijdrage van het Waterschap Hunze en Aa's, de N.V. Nederlandse Gasunie en de Nederlandse Aardolie Maatschappij. Zij hebben zowel bij de eerdere kadeversterking Steendam-Tjuchem als bij de kadeversterking Tussenklappenpolder de doorontwikkeling van de innovatieve rekenmethodiek samen mogelijk gemaakt. Daarmee is weer een stap gezet naar een bredere toepassing van de innovatieve rekenmethodiek.

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

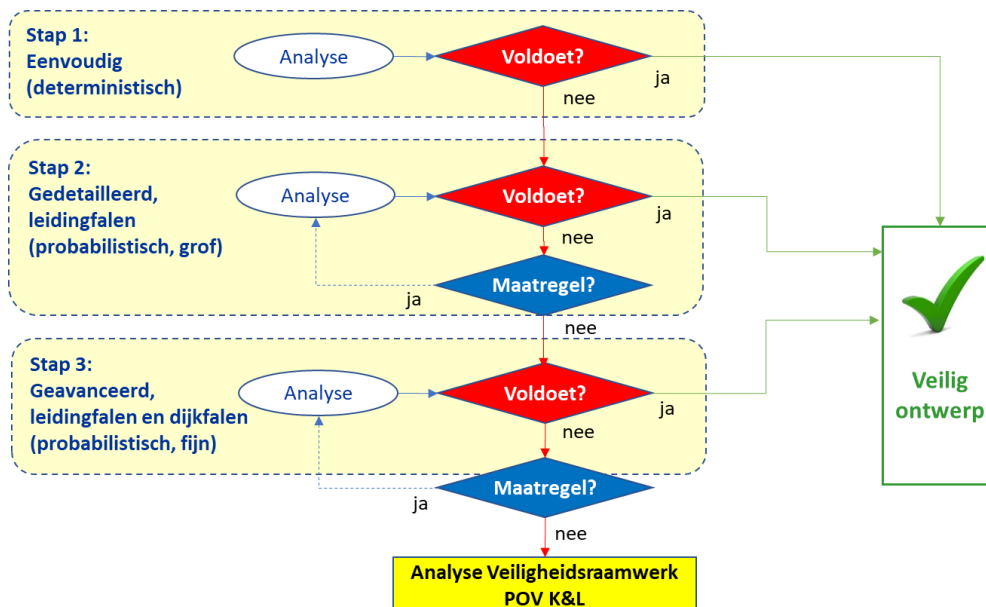
**Strategische
Samenwerking
Water- en
Netbeheerders**

Managementsamenvatting

Vijf bestaande kruisende gastransportleidingen in de kadeversterking Tussenklappenpolder voldeden niet aan de eisen van de huidige buisleidingnormen. Dit betekende dat er compenserende maatregelen nodig zouden zijn in de vorm van de aanleg van kistdammen en dat de leidingsterkte en de veiligheidszone nog nader moesten worden bepaald.

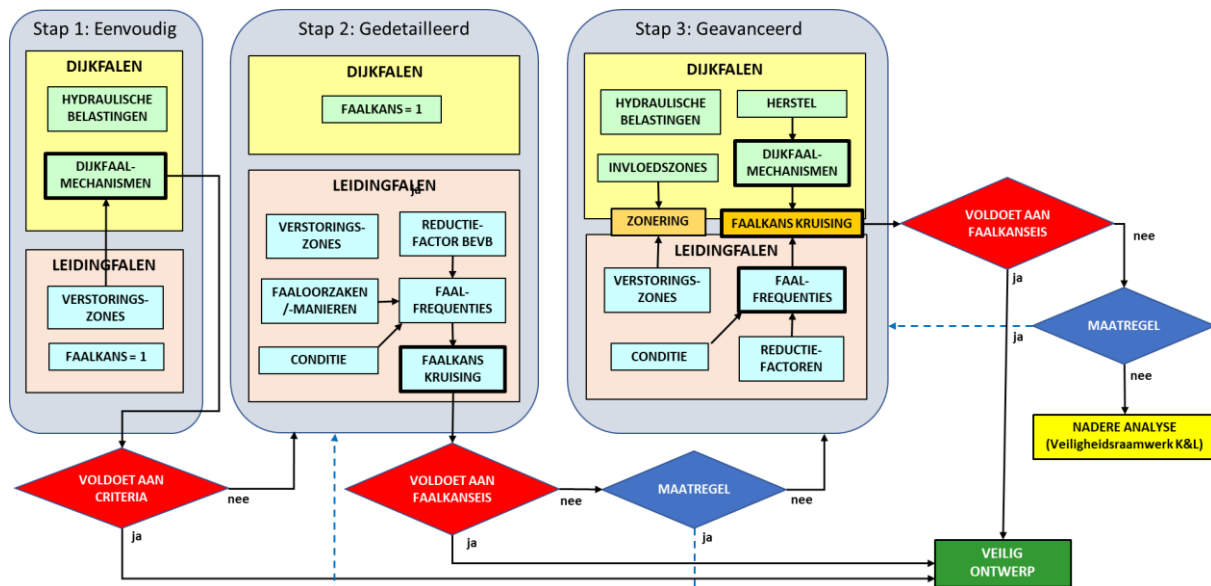
Om nut en noodzaak daarvan te kunnen beoordelen zijn aanvullende berekeningen gemaakt volgens een innovatieve rekenmethodiek, waarbij faalkansanalyses zijn uitgevoerd. De methodiek is grotendeels gebaseerd op bestaande kennis (betrouwbaarheids-/faalpadanalyses voor waterkeringen), die op specifieke onderdelen (interactie tussen leidingfalen en dijkfalen en de gevolgschade) is aangevuld met nieuwe kennis. De methodiek is voor het eerst in 2022 toegepast in de kadeversterking Steendam – Tjuchem [WSHA, 2022]. De innovatieve rekenmethodiek is een volwaardige methodiek en vormt een versimpelde tussenstap op weg naar het Veiligheidsraamwerk Kabels en Leidingen, dat door de Project Overstijgende Verkenning Kabels & Leidingen (POV K&L) in praktijkcasussen voor primaire waterkeringen is toegepast en is ontwikkeld tot een Veiligheidsraamwerk POV Kabels en Leidingen. Het veiligheidsraamwerk is echter complex en nog in doorontwikkeling en daarom nu nog niet algemeen toepasbaar. Bij de innovatieve rekenmethodiek is bij de faallansanalyse aangesloten bij de beoogde aanpak volgens het nieuwe Beoordelings- en Ontwerp Instrumentarium (BOI) voor primaire waterkeringen. Daarbij worden conservatieve uitgangspunten toegepast, resulterend in een beoordeling van de invloed van het falen van een leidingkruising op de toelaatbare overstromingskans van een normtraject.

De werkwijze bij de innovatieve rekenmethodiek is van grof naar fijn, waarbij tevens een vertaling nodig is voor toepassing bij regionale waterkeringen. Om te kunnen beoordelen of een leidingkruising in een dijkontwerp voldoet aan de veiligheidseisen worden achtereenvolgens de volgende stappen van het onderstaande schema doorlopen.



Stap 1 bestaat uit eenvoudige analyses waarbij we bestaande deterministische rekenregels en rekenmodellen benutten voor leidingfalen (verstoringzones) en dijkfalen (overschrijdingskans voor overlopen/overslag en partiële veiligheidsfactoren voor macro-instabiliteit en piping). We passen hierbij nog geen nieuwe kennis toe. We berekenen eerst de verstoringzone(s) van een leiding en schematiseren het dijkprofiel met aanwezigheid van de verstoringzone(s). Vervolgens bepalen we de

invloed van de verstoringzone(s) per dijkfaalmechanisme en toetsen we het resultaat aan de huidige veiligheidseisen. Hierbij wordt als conservatief uitgangspunt gekozen dat de leiding faalt (faalkans leiding = 1,0) en dat er geen herstel van de schade aan de waterkering plaats vindt. Als bij stap 1 niet wordt voldaan aan de huidige veiligheidseisen is een nadere analyse nodig en kan nieuwe kennis worden ingezet. De innovatieve rekenmethodiek past deze nieuwe kennis toe in de vervolgstappen 2 en 3, die invulling krijgen door het proces van leidingfalen naar dijkfalen te benutten volgens het volgende schema.



Step 2 is gericht op het bepalen van de aanwezige leidingfaalkans. Step 2 bestaat uit gedetailleerde analyses van leidingfalen op basis van beschikbare informatie en rekenregels. De dijkfaalmechanismen worden in Step 2 buiten beschouwing gelaten. Daarvoor wordt als veilige, conservatieve aanname de kans op dijkfalen op 1,0 gesteld. Bij de bepaling van de kans op leidingfalen wordt uitgegaan van faalfrequenties uit de internationale data van leidingincidenten en toepassing van een reductiefactor op de faalfrequentie. Een essentieel onderdeel van de beoordeling is verificatie van de conditie van de leiding. Bij de bepaling van de kans op leidingfalen wordt rekening gehouden met een Bevb-reductiefactor van 0,1 (vanuit externe veiligheid) voor de faaloorzaak ‘invloed van buitenaf’ (deeloorzaak ‘graafwerkzaamheden’) en de faaloorzaak ‘corrosie’. De kans op herstel van de waterkering als gevolg van leidinglek-/breuk wordt buiten beschouwing gelaten, waardoor in feite als conservatieve aanname de kans op géén herstel op 1,0 wordt gesteld. Het resultaat van Step 2 is een aanwezige faalkans van de leidingkruising, die wordt getoetst aan de faalkanseis. Als daar niet aan wordt voldaan dient een keuze te worden gemaakt voor het uitvoeren van een nadere analyse volgens Step 3 en/of het nemen van compenserende maatregelen.

Step: 3 bestaat uit geavanceerde faalkansanalyses, waarbij voor leidingfalen gebruik wordt gemaakt van de in Step 2 toegepaste faalfrequenties voor het bepalen van de kans op leidingfalen, maar dan aangepast aan de Nederlandse situatie en uitgebreid met een specifieke set reductiefactoren voor waterveiligheid. Die set reductiefactoren wordt gebaseerd op de lokale wanddiktes, materiaalparameters en aanlegaspecten van de leiding, zoals dit vanuit de aanwezige documentatie gerechtvaardigd kan worden. Daarbij wordt ook rekening gehouden met de verstoringzones door leidinglek-/breuk (erosie-/explosiekrater en verwekingszone). Voor dijkfalen wordt een analyse uitgevoerd per dijkfaalmechanisme voor de situatie met leidingfalen (inclusief de aanwezigheid van verstoringzones). Bij de analyse wordt een zonering (centrale zone en veiligheidszone) toegepast en wordt tevens rekening gehouden met de hydraulische belastingen en de kans op herstel van de schade

aan de waterkering als gevolg van leidinglek-/breuk. De resultaten worden verwerkt in een gebeurtenissenboom met als resultaat een additionele faalkans van de leidingkruising.

Bij de stappen 2 en 3 wordt getoetst aan een faalkanseis. Dat betekent dat de leidingkruising moet voldoen aan de veiligheidseisen van een normtraject, zoals dat voor primaire waterkeringen is gedefinieerd. Voor regionale waterkeringen is geen normtraject beschikbaar en ook geen vereiste faalkans op normtrajectniveau. De huidige veiligheidsnormen en technische instrumenten 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 de veiligheidsnormen en technische instrumenten voor primaire waterkeringen, waarbij wordt uitgegaan van een toelaatbare overstromingskans in een normtraject en ook rekening wordt gehouden met de invloed van de lengte van het normtraject en het aantal (waterkerende en niet-waterkerende) objecten in het normtraject.

Bij de bepaling van de aanwezige faalkansen wordt, conform de aanpak bij primaire waterkeringen, gebruik gemaakt van beschikbare casuïstiek van leidingincidenten en de omrekening van de resultaten van partiële veiligheidsfactoren met de huidige technische instrumenten.

Voor toepassing van de innovatieve rekenmethodiek bij regionale waterkeringen moet een normtraject worden bepaald en is een toelaatbare faalkans voor het normtraject nodig. Voor het normtraject is gekozen voor de totale lengte van de boezemkade langs de Tussenklappenpolder van hetzelfde boezemwatersysteem. Deze lengte en de daarin aanwezige leidingkruisingen zijn in overleg met het waterschap en de leidingbeheerders bepaald.

De vereiste kans op falen voor het gekozen normtraject is getalsmatig gelijkgesteld aan de overschrijdingsfrequentie van met Maatgevende Boezem Peil (MBP) = $1/1.000$ ($1,0 \times 10^{-3}$) per jaar, vermenigvuldigd met een factor 0,2, wat overeenkomt met $1/5.000$ ($2,0 \times 10^{-4}$) per jaar. Dit in aansluiting op de werkwijze van destijds bij de kalibratie van het veiligheidsniveau voor boezemkaden.

De resultaten van de voor het project Tussenklappenpolder gevolgde stappen zijn als volgt:

Stap1: De dijkfaalmechanismen met verstoringzones (erosiekrater en/of verwekingszone) voldoen niet allemaal aan de huidige veiligheidseisen, zodat een nadere analyse volgens Stap 2 is uitgevoerd.

Stap 2: Voor alle leidingkruisingen voldoet de kans op leidingfalen niet aan de faalkanseis, zodat een nadere analyse volgens Stap 3 is uitgevoerd.

Stap 3: Alle leidingkruisingen voldoen aan de faalkanseis. Een belangrijke conclusie daarbij is dat de leidingkruisingen die deels door middel van een schildboring zijn aangelegd een lagere faalkans opleveren dan de kruisingen die deels door middel van een zinker zijn aangelegd. Ter waarborging van de toegepaste leidingfaalkansen en reductiefactoren moet nog wel een aantal acties worden uitgevoerd, die bestaan uit een lokaal herstellen van de onvoldoende aanwezige gronddekking in de naastgelegen vaarweg, het uitvoeren van inwendige inspecties en nader onderzoek van de kwaliteit van de rondlas door middel van het uitvoeren van extra niet-destructief onderzoek, waartoe de leiding lokaal zal moeten worden vrij gegraven (bij voorkeur buiten het dijklichaam zelf, met dezelfde laskarakteristieken).

Voor wat betreft achtergronden en onderbouwing van factoren en aanpak wordt verwezen naar een separaat rapport in ontwikkeling met als werktitel "Handelingsperspectief Leidingen in Dijken".

Inhoud

1.	Inleiding	10
1.1	Kader	10
1.2	Uitgangspunten	12
1.3	Aanpak	13
2.	Situatie en dwarsprofielen	14
3.	Faalkanseis	15
4.	Stappenplan	20
5.	Uitwerking Stap 1: Eenvoudig	22
5.1	Leidingfalen	22
5.1.1	Verstoringszones	22
5.2	Dijkfalen	22
5.3	Toetsing aan huidige veiligheidseisen	23
6.	Uitwerking Stap 2: Gedetailleerd	23
6.1	Leidingfalen	23
6.1.1	Conditie-en materiaalkwaliteit	23
6.1.2	Faalfrequenties van gastransportleidingen	24
6.2	Dijkfalen	25
7.	Uitwerking Stap 3: Geavanceerd	25
7.1	Leidingfalen	26
7.1.1	Conditieverklaringen	26
7.1.2	Faalfrequenties	26
7.1.3	Reductiefactoren	26
7.1.4	Invloed van verweking als gevolg van leidingexplosie	27
7.1.5	Invloed van ankerschade	27
7.1.6	Invloed van aardbevingen	28
7.1.7	Verstoringszones	28
7.2	Hydraulische belastingen	29
7.2.1	Boezemwaterstanden	29
7.2.2	Hoogwater vóór of tijdens herstel	31
7.3	Dijkfalen	31
7.3.1	Dijkfaalmechanismen	31
7.3.2	Centrale zone en veiligheidszones	32
7.4	Kans op dijkfalen bij leidingfalen	32
7.4.1	Overlopen/overslag	32
7.4.2	Macro-instabiliteit binnenwaarts	33

7.4.3	Macro-instabiliteit buitenwaarts	36
7.4.4	Piping	36
7.5	Damwandfalen.....	37
7.6	Kruisingslengte	37
7.7	Additionele faalkans per leidingkruising	38
7.8	Toetsing additionele faalkans aan faalkanseis.....	38
8.	Leer- en verbeterpunten	39
8.1	Stap 1: Eenvoudig.....	39
8.1.1	Beoordeling dijkfaalmechanismen	39
8.1.2	Bepaling verstoringszones	39
8.2	Stap 2: Gedetailleerd	39
8.3	Stap 3: Geavanceerd	40
8.4	Faalkanseis	40
9.	Conclusies en aanbevelingen	41
9.1	Conclusies	41
9.2	Aanbevelingen	43
10.	Referenties.....	44

Bijlagen

- Bijlage 1: Situatie en dwarsprofielen
- Bijlage 2: Toelichting faalkansaanpak bij stappenplan Tussenklappenpolder
- Bijlage 3: Leidingfaalkansen en reductiefactoren
- Bijlage 4: Kans op ankerschade
- Bijlage 5: Controle verwekingsgevoeligheid zandlagen
- Bijlage 6: Kraterberekeningen leidingkruising 20 (A666)
- Bijlage 7: Stabiliteit- en pipingberekeningen zonder en met erosiekrater
- Bijlage 8: Faalpaden en gebeurtenissenbomen
- Bijlage 9: Beoordeling conditie leidingkruisingen

1. Inleiding

Bij de kadeversterking van het traject Tussenklappenpolder liepen het Waterschap Hunze en Aa's, de N.V. Nederlandse Gasunie en de Nederlandse Aardolie Maatschappij tegen de situatie aan dat vijf bestaande kruisingen van gastransportleidingen niet voldeden aan de eisen conform de vigerende ontwerpinstrumenten en regelgeving (NB: De kruisingen voldeden wel aan de vergunningseisen zoals destijds gesteld). Dit betrof in belangrijke mate de huidige normen voor buisleidingen volgens de NEN 3650 reeks voor de leidingsterkteberekeningen, de bepaling van de veiligheidszones en de aanwezigheid van vervangende waterkeringen.

Volgens paragraaf 8.1.7.1.1 van NEN 3651 zijn de huidige eisen voor kruisingen van hogedruk gasleidingen in boezemkaden, die onder het Maatgevend Boezem Peil (MBP) kruisen:

- Waterstaatkundige voorziening: kistdam.
- Breedte kistdam: 20 m.
- Ontwerpeisen bij leiding onder MBP: TR Kistdammen en Diepwanden.

Vanwege het ontbreken van kistdammen 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. Dat kwam vanuit de behoefte om tot een gedragen oplossing te komen waarbij naast bestaande kennis ook nieuwe kennis kon worden benut, die in de POV K&L (Project Overstijgende Verkenning K&L, 2017-2020) en in het project kadeversterking Steendam – Tjuchem [WSHA, 2022] is ontwikkeld. De SSWN zet het werk voort van de POV K&L (Project Overstijgende Verkenning K&L, 2017-2020). In de SSWN zijn zowel waterbeheerders als netbeheerders vertegenwoordigd. De projectmanager SSWN Nisa Nurmohamed heeft als vertegenwoordiger van de SSWN een belangrijke rol gespeeld in het verbinden van de betrokken partijen met als doel om gezamenlijk tot een oplossing te komen van het ontstane veiligheidsprobleem tegen zo laag mogelijke maatschappelijke kosten en heeft er ook voor gezorgd dat daarbij de juiste expertise is betrokken.

1.1 Kader

De ligging van het kadeversterkingstraject Tussenklappenpolder is weergegeven op de volgende overzichtskaart.



Figuur 1.1: Ligging versterkingstraject boezemkade Tussenklappenpolder.

De kadeversterking voorziet in maatregeling door middel van grondaanvullingen ter plaatse van de kruin en het binnenmaaienveld. Informatie over de situatie en de dwarsprofielen van de leidingenkruisingen in het kadeversterkingsontwerp staat in *Bijlage 1: Situatie en dwarsprofielen*.

Bij de analyses is gebruik gemaakt van de kennis die is ontwikkeld in de POV K&L en bij de kadeversterking Steendam – Tjuchem. De boezemkade Tussenklappenpolder is een regionale waterkering, die valt in normklasse V met een veiligheidsnorm van 1/1.000 per jaar. De ontwikkelde kennis uit de POV K&L is hiermee voor de tweede maal toegepast bij een regionale waterkering.

De leidingkruisingen zijn in eerste instantie beoordeeld op basis van de vigerende technische instrumenten, zoals vastgelegd in de huidige wet- en regelgeving, normen en richtlijnen voor regionale waterkeringen en de NEN-normen voor buisleidingen. Daartoe is een review uitgevoerd van ter beschikking gestelde ontwerpdocumenten. Daaruit is geconcludeerd dat er nog essentiële ontwerpaspecten ontbreken, dat de leidingen niet voldoen aan de standaardbepalingen en eisen van de NEN 3650 reeks [NEN, 2020] en dat er kistdammen zouden moeten worden aangelegd om aan de veiligheidseisen te voldoen.

Door de opdrachtgevers is gevraagd of een faalkansanalyse mogelijk is om de invloed van het falen van de gastransportleidingen te bepalen, met als doel om na te gaan of de leidingkruisingen zonder ingrijpende en kostbare maatregelen kunnen worden ingepast binnen de veiligheidseisen van de waterkering.

In principe kan daarvoor gebruik worden gemaakt van het Veiligheidsraamwerk POV K&L, dat in het kader van de POV K&L is ontwikkeld 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 erg complex is en nog witte vlekken bevat, is verdere doorontwikkeling daarvan noodzakelijk. Meer informatie daarover is te vinden in het rapport 'Doorontwikkeling Veiligheidsraamwerk POV K&L' [POV K&L, 2020b).

Op dit moment is er nog geen compleet en algemeen toepasbaar Veiligheidsraamwerk K&L beschikbaar. Daarom is voor de kadeversterking Tussenklappenpolder aansluiting gezocht bij de in 2022 uitgevoerde faalkansanalyse voor de kadeversterking Steendam – Tjuchem [WSHA, 2022]. Deze is gebaseerd op toepassing van een innovatieve rekenmethodiek, die in de praktijk meteen kan worden toegepast.

De werkwijze van innovatieve rekenmethodiek is van grof naar fijn en maakt zoveel mogelijk gebruik van bestaande kennis uit het ontwerpinstrumentarium voor regionale en primaire waterkeringen, aangevuld met nieuwe kennis over de interactie tussen leidingfalen en dijkfalen en de gevolgen daarvan. De essentie van de innovatieve rekenmethodiek voor de kadeversterking Tussenklappenpolder houdt in dat op vereenvoudigde wijze een verbinding wordt gelegd tussen leidingfalen in combinatie met dijkfalen en de vigerende veiligheidseisen voor de regionale waterkering. Hiermee kan het effect van leidingfalen op de veiligheid van de regionale waterkering worden gekwantificeerd, zonder dat complexe berekeningen nodig zijn. De innovatieve rekenmethodiek is gebaseerd op de gevolgde aanpak bij de praktijkcasus Steendam – Tjuchem [WSHA, 2022], die verder is uitgebreid, en de systematiek van het Veiligheidsraamwerk POV K&L [POV-KL, 2020a]. De innovatieve rekenmethodiek maakt zichtbaar welke 'verborgen' marges aanwezig zijn en verantwoord kunnen worden benut, binnen de vigerende toets- en ontwerpinstrumenten en wet- en regelgeving. Dat geldt zowel voor de regionale waterkering als voor de leidingkruisingen. Onnodige maatregelen kunnen daarmee worden voorkomen met als gevolg dat tijd en geld wordt bespaard.

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

1.2 Uitgangspunten

Met de innovatieve rekenmethodiek voeren we op vereenvoudigde wijze een integrale faalkansanalyse uit voor de kadeversterking Tussenklappenpolder. Daarvoor zijn in lijn met de aanpak bij primaire waterkeringen onder andere getalswaarden nodig voor de lengte van het normtraject, de faalkanseis van het normtraject en de faalkanseis voor leidingfalen in combinatie met 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.

- Het beoordelen van de veiligheid van een waterkering met leidingen vraagt om een integrale aanpak, waarbij we zowel het gedrag van de leidingkruisingen als dat van de waterkering moeten beschouwen en de beïnvloeding daarvan op de faalkans van de waterkering.
- Er is gekozen voor een benadering die is gebaseerd op de systematiek van het Veiligheidsraamwerk POV K&L [POV-KL, 2020a], dat in de praktijk is toegepast voor een aantal dijkversterkingsprojecten bij primaire waterkeringen.
- Bij de uitwerking van de faalkansanalyse is verder zoveel mogelijk aangesloten bij de aanpak op basis van faalpaden zoals die in het kader van het nieuwe Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium (BOI) voor primaire waterkeringen wordt ontwikkeld en bij de aanpak van de praktijkcasus Steendam-Tjuchem.
- We hanteren in navolging van primaire waterkeringen een normtraject. Voor de lengte van dit normtraject kiezen we de kadelengete langs het boezemwater rond het te beschermen gebied: de Tussenklappenpolder (zie hoofdstuk 3).
- Voor de te hanteren faalkanseis voor leidingfalen in combinatie met dijkfalen vormt de huidige veiligheidsbenadering voor de regionale waterkeringen met de bijbehorende gehanteerde verdeling van de faalkansruimte (zie hoofdstuk 3) de basis. Voor achtergronden van de huidige veiligheidsbenadering van regionale waterkeringen zie [STOWA, 2020].
- Als faalkanseis van het gekozen normtraject (vereist veiligheidsniveau) is daarbij gekozen om uit te gaan van $0,2 \times$ de getalswaarde van de huidige norm van de regionale waterkering (= $1/1.000$ per jaar = overschrijdingskans van de doorsnede van de regionale waterkering of $1/5.000$ per jaar, zie hoofdstuk 3).
- We beschouwen leidingfalen in combinatie met dijkfalen als een faalmechanisme dat direct tot overstroming 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 (NWO) en een dijk 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 Tussenklappenpolder is, in navolging van de POV K&L, uitgegaan van Optie 1 en is Optie 2 verder buiten beschouwing gelaten.
- We kiezen als veilige, conservatieve waarde 1% van de maximaal toelaatbare kans op falen van de regionale waterkering (= $0,2$ maal de huidige norm als overschrijdingskans van de doorsnede) 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'.

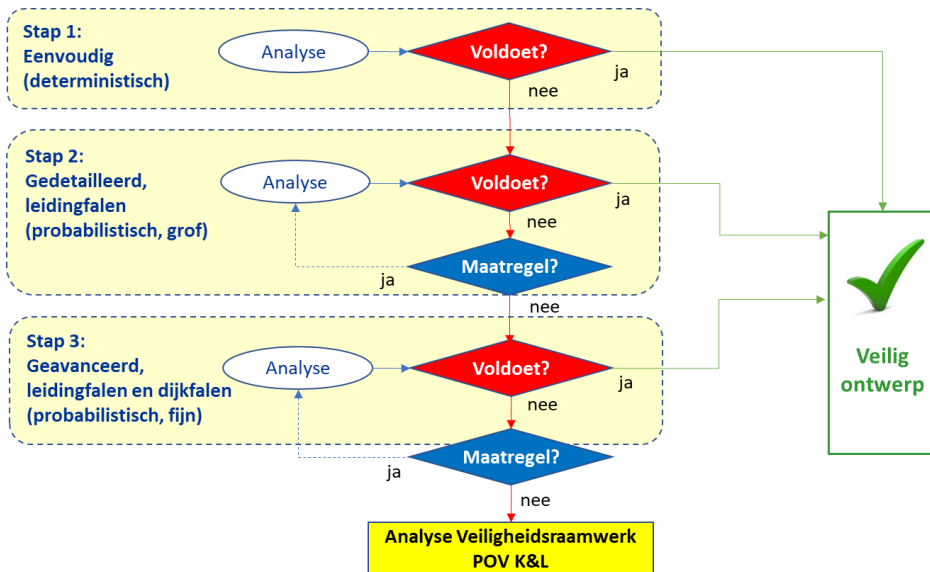
- Conform de systematiek van het Veiligheidsraamwerk K&L houden we rekening met álle leidingkruisingen in het gehele normtraject. Dit betekent dat de gekozen faalkanseis van 1% geldt voor het totaal aantal leidingkruisingen in het normtraject. Zodoende resteert er nog 9% voor de overige mechanismen. De faalkanseis per individuele leidingkruising wordt verkregen door 1% te delen door een equivalent aantal leidingkruisingen in het normtraject, dat wordt geacht een bijdrage te leveren aan de faalkans.
- De faalkansen van de leidingen worden bepaald op basis van Europese statistiek van leidingincidenten van gastransportleidingen [EGIG, 2018] en een vertaalslag van beschikbare (semi-probabilistische) berekeningen op basis van partiële veiligheidsfactoren.

1.3 Aanpak

Voor de kadeversterking Steendam – Tjuchem [WSHA, 2022] is de innovatieve rekenmethodiek voor het eerst toegepast in een regionale waterkering. Voor de kadeversterking Tussenklappenpolder is de innovatieve rekenmethodiek voor de tweede keer toegepast en doorontwikkeld bij kruisingen van gastransportleidingen in een regionale waterkering. De gehanteerde werkwijze kan in principe ook worden toegepast bij kruisingen van gastransportleidingen met een kistdam of met een andere damwandwandconstructie. In dat geval zal in de uitwerking rekening moeten worden gehouden met andere bijkomende aspecten.

De werkwijze bij de innovatieve rekenmethodiek is van grof naar fijn, waarbij zoveel mogelijk gebruik wordt gemaakt van bestaande rekenmethoden en rekenregels. Indien nodig wordt deze bestaande kennis aangevuld met nieuwe kennis vanuit de primaire waterkeringen en vanuit de leidingen, waarbij een vertaling nodig is voor toepassing bij regionale waterkeringen.

Na het verzamelen van de nog ontbrekende gegevens zijn analyses uitgevoerd over de veiligheid van vijf bestaande kruisingen van gastransportleidingen in het versterkingsplan van de boezemkade in het traject Tussenklappenpolder. Om te kunnen beoordelen of een leidingkruising in een dijkontwerp voldoet aan de veiligheidseisen zijn achtereenvolgens de volgende stappen van het onderstaande schema doorlopen. Dit Stappenplan komt in hoofdstuk 5 uitgebreid aan de orde.

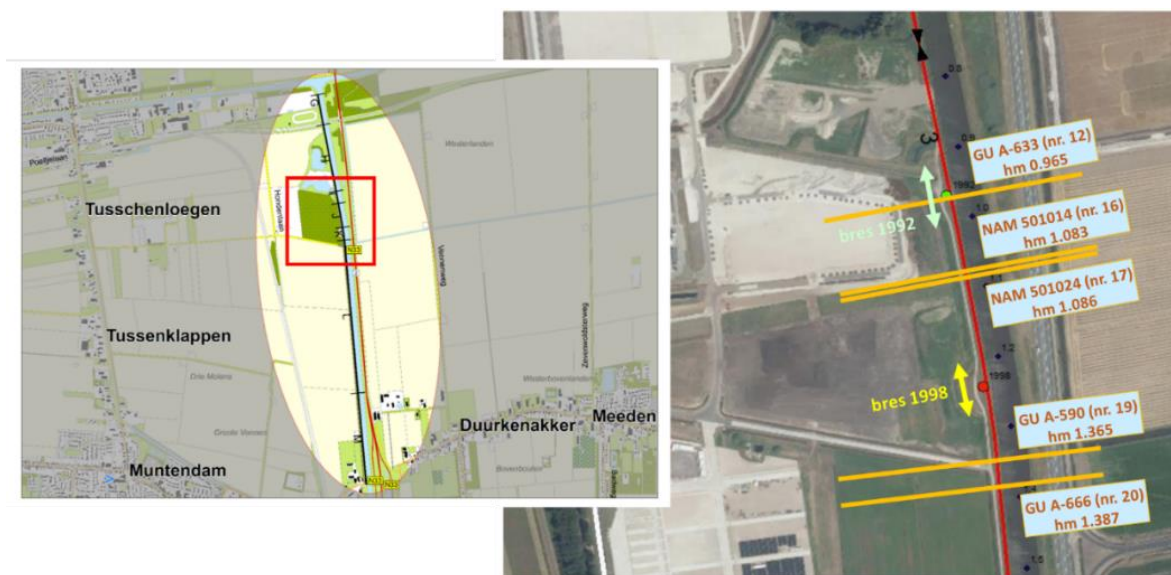


Figuur 1.2: Werkwijze van grof naar fijn.

Van het voorliggende rapport is het concept ter review voorgelegd aan een 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 figuur.



Figuur 1: Locatie dijkdoorbraken Tussenklappenpolder

Figuur 2.1: Ligging van de kruisingen van de te analyseren gastransportleidingen.

In het in ontwikkeling zijnde rapport met als werktitel “Handelingsperspectief Leidingen in Dijken” zijn de bescheiden genoemd die tenminste aanwezig moeten zijn, alsmede documenten welke “extra” zijn. In bijlage 9 is dit voor de te beoordelen leidingkruisingen geïnventariseerd.

De belangrijkste kenmerken van de leidingkruisingen zijn samengevat in de volgende tabel.

Parameter	Kenmerken leidingkruisingen Gasunie in westelijke kade A.G. Wildervanckkanaal				
Hectometer	0.9 + 65 m	1.0 + 83 m	1.0 + 86 m	1.3 + 65 m	1.3 + 87 m
Leiding nummer	12	16	17	19	20
Leiding code	GU A-633	NAM 501014	NAM 501024	GU A-590	GU A-666
Aanlegmethode	schildboring + open sleuf	zinker + open sleuf	zinker + open sleuf	zinker + open sleuf	schildboring + open sleuf
Jaar van aanleg	1992	1966	1970	1980	2010
Diameter (inch/mm]	48"/1219	28"/711	28"/711	12"/324	48"/1219
Wanddikte [mm]	30 (kruising) 18,3 (veld)	18 (kruising) 18,3 (bochten) 15,8 (veld)	18 (kruising) 18,3 (bochten) 15,8 (veld)	17,48 (kruising) 12,7 (veld)	22,7 (kruising) 18,7 mm (veld)
Ontwerpdruk (bar)	79,9	83	83	79,9	79,9
Materiaal	St.E 415	X52	X52	Grade B	L 480
Kathodische bescherming	ja	ja	ja	ja	ja
Uitwendige bekleding	PE	Bitumen	Bitumen	PE	PP
Product	Aardgas ¹	Aardgas ¹	Aardgas ¹	Aardgas ¹	Aardgas ¹
Bouwjaar	1992	1966	1970	1981	2010
Conditieverklaring	ja	ja	ja	ja	ja
Kraterdiepte D _x t.p.v. kanaal (m)	3,1	6,1	6,1	3,4	5,7
Kraterdiepte D _x t.p.v. kruin (m)	9,7	4,1	4,1	3,5	8,7
Kraterdiepte D _x t.p.v. binnenmaaveld (m)	4,3	4,4	4,4	3,0	5,4
Kraterlengte L _{upstream} (m)	9,0 ²	9,0 ²	9,0 ²	9,0 ²	9,0
Kraterlengte L _{downstream} (m)	6,0 ²	6,0 ²	6,0 ²	6,0 ²	6,0
Compenserende damwand aanwezig	nee	nee	nee	nee	ja

¹ - droog, niet corrosief aardgas

² - gebaseerd op dynamische berekening leidingkruising 20

Tabel 2.1: Overzicht met de belangrijkste kenmerken van te beoordelen leidingkruisingen.

De leidingkruisingen zijn aangelegd in de periode van 1966 tot 2010 en moeten nu worden ingepast in het ontwerp van de kadeversterking, die voorziet in beperkte grondaanvullingen in de kruin en op het binnentalud en op het aangrenzende binnenmaaveld. Voor de situatietekeningen en dwarsprofielen van de betreffende leidingkruisingen zie *Bijlage 1: Situatie en dwarsprofielen*.

3. Faalkanseis

De boezemkade is een regionale waterkering in kadeklasse V met een veiligheidsnorm van $1,0 \times 10^{-3}$ (1/1.000) per jaar (Dit is conform Provinciale Verordening. Voor achtergronden zie rapport "Veiligheidsklassen Regionale Waterkeringen Actualiseren normering regionale waterkeringen" PR2329.10, april 2013). Deze waarde moet worden beschouwd als een afkeurgrens (toetswaarde), die is gebaseerd op een dijkvakbenadering met als uitgangspunt dat een hoogwaterstand met een overschrijdingsfrequentie van het Maatgevend Boezem Peil (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.

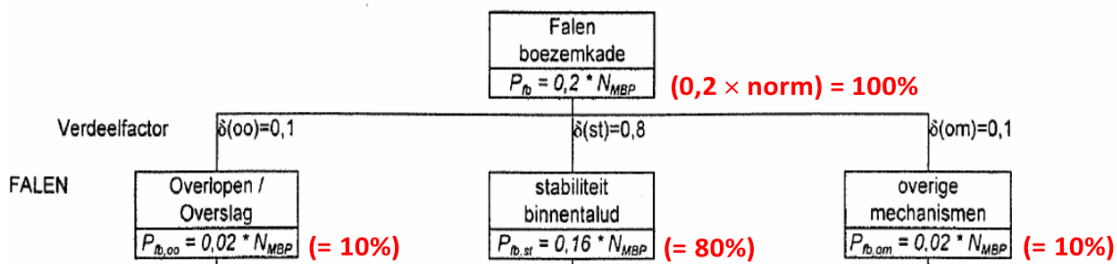
(...)

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:

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

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



Figuur 3.1: Bij de normering van boezemkade gehanteerde verdeling van de faalkansruimte (bron: [IPO, 1999]).

Uit Figuur 3.1 blijkt dat op doorsnedeniveau van een dijkvak de toelaatbare kans op falen van een boezemkade gelijk is aan 0,2 maal de norm. Hierbij is de norm de vereiste overschrijdingsfrequentie van de waterstand voor het beschouwde dijkvak.

Opgemerkt wordt dat bij de dijkvakbenadering geen rekening wordt gehouden met de invloed van de lengte van de boezemkade en het aantal in de boezemkade aanwezige objecten.

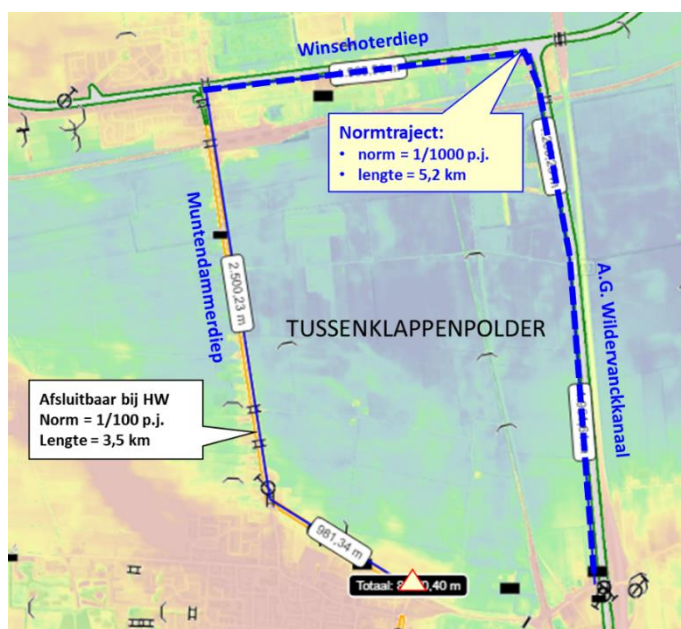
Uit de foutenboom van figuur 3.1 blijkt dat 10% van de toelaatbare kans op falen van de boezemkade wordt gereserveerd voor ‘overlopen/overslag’, 80% voor ‘stabiliteit binnentalud’ en 10% voor ‘overige mechanismen’. De dijkfaalmechanismen macro-instabiliteit buitenwaarts en piping vallen onder de tak ‘overige mechanismen’, evenals de niet-waterkerende objecten (NWO’s), waaronder ook de kabels & leidingen vallen.

Bij de innovatieve rekenmethodiek wordt, in lijn met de systematiek voor primaire waterkeringen, uitgegaan van een overstromingskansbenadering van een normtraject, dat bestaat uit meerdere dijkvakken en objecten. Bij de uitwerking daarvan dient in principe per faalmechanisme dan ook rekening te worden gehouden met de invloed van lengte-effecten (waterkering gerelateerd) en met het aantal objecten in het 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 Tussenklappenpolder is voor de lengte van het normtraject een veilige waarde gekozen, waarbij is uitgegaan van de lengte van de regionale waterkering langs het te beschermen gebied binnen de beschouwde polder. De conservatieve keuze is gemaakt om de faalkanseis van het gekozen normtraject gelijk te stellen aan de faalkanseis op dijkvak(doorsnede)niveau (te weten: $0,2 \times$ de getalswaarde van de huidige norm van de regionale waterkering). Verder is rekening gehouden met de invloed van het aantal leidingkruisingen in het gekozen normtraject op de faalkanseis per leidingkruising.

Om aan het bovenstaande invulling te kunnen geven, zijn door het Waterschap gegevens verstrekt over dit gedeelte van het watersysteem. De boezemkade langs de Tussenklappenpolder ligt langs het Winschoterdiep, het A.G. Wildervanckkanaal en het Muntendammerdiep. Het gedeelte langs het Muntendammerdiep, met een lengte van 3,5 km, is bij hoogwater afsluitbaar, wat ook tot uitdrukking komt in de ter plekke geldende mildere norm van 1/100 per jaar op dijkvak-/doorsnedeniveau. Dit gedeelte is bij de verdere analyse buiten beschouwing gelaten. Het gekozen normtraject betreft daarmee de boezemkade langs het Winschoterdiep en het A.G. Wildervanckkanaal, met een totale lengte van 5,2 km. Binnen het gekozen normtraject is op dijkvakniveau een norm van 1/1.000 per jaar (kadeklasse V) van toepassing. Deze norm is vastgelegd in een verordening van de Provincie Groningen [PROV-G, 2016], zijnde het bevoegd gezag voor vaststelling van de veiligheidsnormen voor regionale waterkeringen. Bij een advies van het project Droge Voeten 2050 [WSHA, 2014] is op basis van berekeningen van de overstromingsschade geconcludeerd dat er geen aanleiding is om de huidige veiligheidsnorm van de boezemkade van 1.000 per jaar aan te passen. Ter verduidelijking is in figuur 3.2 het watersysteem en de situering van het gekozen normtraject aangegeven.



Figuur 3.2: Watersysteem en situering van het gekozen normtraject

Uit een door Arcadis uitgevoerde KLIC-inventarisatie is gebleken dat er in het normtraject 18 leidingkruisingen liggen, die een potentiële bijdrage kunnen leveren aan de faalkans van het normtraject. Een overzicht daarvan staat in de volgende tabel.

Overzicht van belangrijkste kruisingen in normtraject Tussenklappenpolder					
Inwendige druk	Leiding-beheerder	Leiding-materiaal	Type kruisende leidingen (> 10 bar)	Transport-medium	Aantal kruisingen
> 10 bar	NAM	staal	Niet-sleufloos (zinker)	gas	4
	GU	staal	Niet-sleufloos (zinker)	gas	4
		staal	Sleufloos (schildboring)	gas	3
		staal	Sleufloos (HDD)	gas	3
		staal	Buiten gebruik	gas	1
< 10 bar	WSHA	HDPE	Sleufloos (HDD, zonder/met mantelbuis?)	afvalwater	1
		staal	Niet-sleufloos (zinker)	afvalwater	1
	GEM	staal	Niet-sleufloos (zinker)	afvalwater	1
		diversen	Overige lagedrukleidingen, huisaansluitingen etc.		

Totaal: N = 18

Tabel 3.1: Overzicht van belangrijkste leidingkruisingen met een verwachte bijdrage aan de faalkans.

Uit deze tabel blijkt dat er in het normtraject 18 belangrijke leidingkruisingen liggen die een potentiële bijdrage kunnen leveren aan de faalkans van het normtraject. Voor het equivalent aantal leidingkruisingen wordt als veilige conservatieve aanname uitgegaan van $N_{EQ} = 10$. Deze keuze is verantwoord omdat het falen van de leidingkruisingen niet onafhankelijk van elkaar hoeft te zijn en omdat de faalkansen van alle leidingkruisingen niet identiek zijn. Het equivalent aantal leidingkruisingen is maatgevend voor de bepaling van de faalkanseis voor een individuele leidingkruising in het normtraject.

Bij de faalkansanalyse is er als veilige, conservatieve aanname voor gekozen om de maximaal toelaatbare faalkans van het normtraject (P_{max}) getalsmatig gelijk te stellen aan 0,2 maal de getalswaarde van de huidige veiligheidsnorm van de boezemkade (1/1.000 per jaar).

Voor de bepaling van de faalkanseis voor de leidingkruisingen is er voor gekozen om binnen de beschikbare 10% voor falen door 'overige mechanismen' 1% te reserveren voor het 'falen van alle leidingkruisingen'. Zodoende blijft er nog 9% faalkansruimte over voor 'overige mechanismen'. Dit betekent dat voor het falen van alle leidingkruisingen 1% van de toelaatbare faalkans van het gekozen normtraject wordt gereserveerd. Bij het bepalen van de faalkanseis per individuele leidingkruising (dus op doorsnedeniveau) is een lengte-effect in rekening gebracht. De faalkanseis per individuele leidingkruising komt daarmee op 1% van de huidige veiligheidsnorm $\times 0,2 / N_{EQ} = 2,0 \times 10^{-7}$ per jaar. Door het hanteren van de waarde $N_{EQ} = 10$ voor het aantal leidingkruisingen komt dit overeen met 0,1% van de toelaatbare kans op falen van het gekozen normtraject. Voor een nadere toelichting over de faalkansaanpak zie *Bijlage 2: Toelichting faalkansaanpak bij stappenplan Tussenklappenpolder*.

Deze keuze voor 1% voor 'falen van alle leidingkruisingen' is arbitrair. Voor het project Tussenklappenpolder is dit de gekozen waarde, die in vergelijkbare situaties - indien wenselijk - kan worden bijgesteld. Aanknopingspunten voor optimalisatie/aanscherping van de faalkanseis worden gegeven in Hoofdstuk 8: Leer en verbeterpunten. In het voorgaande project Steendam – Tjuchem en in praktijkcasussen van 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]). In de POV K&L is bij deze optie als eerste stap ook uitgegaan van 1% van de vereiste faalkans van het gehele normtraject. Bij de primaire waterkeringen bestaat daarnaast ook nog de optie om een NWO als indirect faalmechanisme te beschouwen (Optie 2 in de POV K&L). Deze 2e optie is in het voorliggende rapport niet toegepast, 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.

In de Waterwet wordt bij de veiligheidsnormen voor primaire waterkeringen onderscheid gemaakt in signaleringswaarden en ondergrenzen, elk met een eigen functie. In de Grondslagen voor hoogwaterbescherming [ENW, 2016] zijn deze begrippen als volgt toegelicht:

1. Signaleringswaarde. Als de overstromingskans van een traject volgens de periodieke wettelijke beoordeling groter is dan deze waarde, moet dit worden gemeld aan de minister van Infrastructuur en Milieu. Het bereiken van de signaleringswaarde is een van de voorwaarden voor subsidiering van maatregelen.
2. Ondergrens. Dit is de overstromings- of faalkans waarop de waterkering '*minimaal berekend moet zijn*' (art. 2.2, lid 4 van de Waterwet en de Memorie van Toelichting bij deze wet). De ondergrens is de maximaal toelaatbare waarde van de overstromings- of faalkans. Als hieraan wordt voldaan, is het basisbeschermingsniveau gewaarborgd.

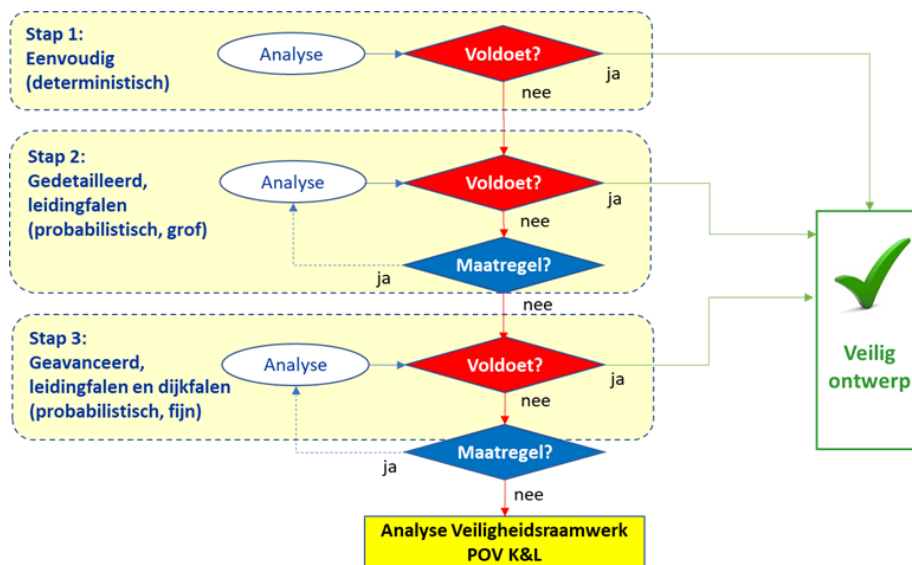
De signaleringswaarden is zodanig gekozen dat er voldoende tijd is voor het uitvoeren van een verbeteractie (versterking van de primaire waterkering). Afhankelijk van de ligging van het beschouwde normtraject, is de ondergrens een factor 1 of 3 maal groter dan de signaleringswaarde.

In [IPO, 1999] zijn bij de bepaling van het veiligheidsniveau voor regionale waterkeringen enkel afkeurgrenzen (toetswaarden) en geen ontwerpnormen bepaald. Daarin wordt aanbevolen om de ontwerpgrenzen nader te bepalen op basis van een economische optimalisatie.

De reguliere veiligheidseisen, die bij verificaties in de Stappen 1,2 en 3 worden toegepast, zijn gebaseerd op de rekenregels in het huidige (ontwerp)instrumentarium voor regionale en primaire waterkeringen. De situatie dat de waterkering in beschadigde toestand als gevolg van leidinglek-/breuk wel of niet voldoet aan de reguliere eisen wordt getoetst aan de faalkanseis van $2,0 \times 10^{-7}$ per jaar.

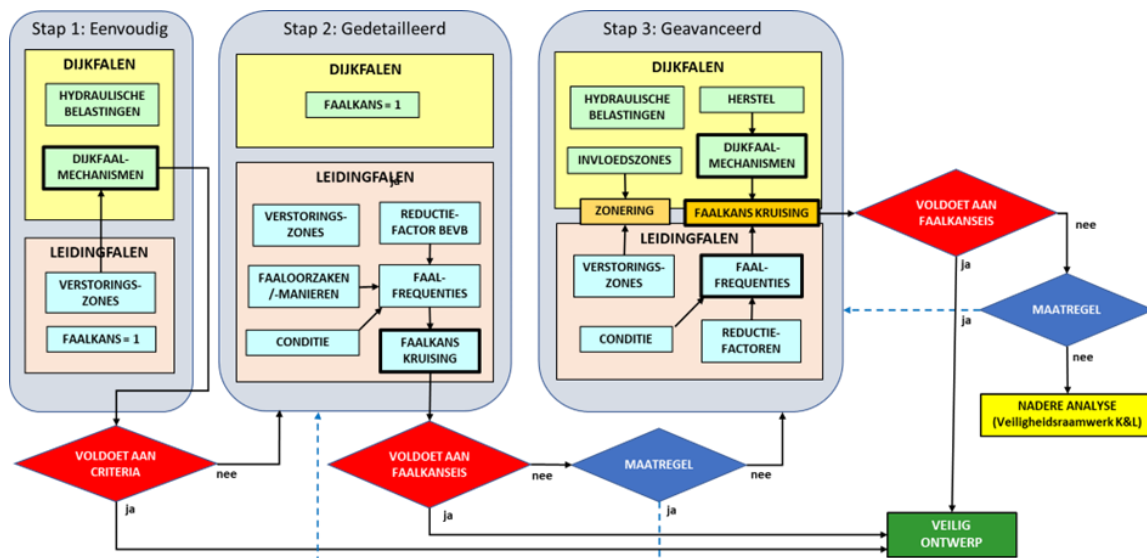
4. Stappenplan

Bij de aanpak van de analyses van leidingfalen en dijkfalen is de werkwijze van grof naar fijn aan de hand van de stappen in het volgende schema.



Figuur 4.1: Stappenplan voor werken van grof naar fijn bij analyses van leidingfalen en dijkfalen.

Het proces van leidingfalen in combinatie met dijkfalen met de daarbij behorende bouwstenen is voor de 3 stappen schematisch weergegeven in de volgende figuur.



Figuur 4.2: Proces van leidingfalen in combinatie met dijkfalen bij toepassing van de innovatieve rekenmethodiek.

Stap 1 bestaat uit eenvoudige analyses waarbij we bestaande deterministische rekenregels en rekenmodellen benutten voor leidingfalen (verstoringzones) en dijkfalen (overschrijdingskans voor overlopen/overslag en partiële veiligheidsfactoren voor macro-instabiliteit en piping). We passen bij deze stap nog geen nieuwe kennis toe. We berekenen eerst de verstoringzone(s) van een leiding en schematiseren het dijkprofiel met aanwezigheid van de verstoringzone(s). Vervolgens bepalen we de

invloed van de verstoringzone(s) per dijkfaalmechanisme en toetsen we het resultaat aan de huidige veiligheidscriteria. Hierbij wordt als veilig, conservatief uitgangspunt gekozen dat de leiding faalt (faalkans leiding = 1) en dat er geen herstel van de schade aan de waterkering als gevolg van leidinglek/-breuk mogelijk is. Als bij Stap 1 voor één of meer dijkfaalmechanismen niet wordt voldaan aan de huidige veiligheidseisen is een nadere analyse volgens Stap 2 nodig

Stap 2 is gericht op het bepalen van de aanwezige leidingfaalkans en bestaat uit een beoordeling van de conditie en de materiaalkwaliteit van de leidingkruising en het uitvoeren van een gedetailleerde analyse van leidingfalen op basis van beschikbare faalfrequenties en reductiefactoren. De aanwezige faalkans van de leidingkruising moet voldoen aan de faalkanseis. De dijkfaalmechanismen worden in stap 2 buiten beschouwing gelaten. Impliciet betekent dit dat als veilig, conservatief uitgangspunt wordt gekozen dat de dijk faalt (faalkans dijk = 1) en er ook geen herstel mogelijk is van de schade aan de waterkering als gevolg van leidinglek/-breuk. Als de aanwezige leidingfaalkans klein genoeg is kan toch aan de faalkanseis van de leidingkruising worden voldaan. Bij de bepaling van de kans op leidingfalen wordt uitgegaan van internationale statistiek van leidingincidenten (faalfrequenties van EGIG = European Gas pipeline Incident data Group) en een Bevb (Besluit externe veiligheid buisleidingen) - reductiefactor van 0,1 voor de faaloorzaken 'invloed van buitenaf' (door graafwerkzaamheden) en 'corrosie'. Voor de lengte van een leidingkruising wordt conform [TNO, 2003] uitgegaan van 100 m. Onderdeel van de analyse is verificatie van de conditie van de leiding. De berekende kans op falen van de leidingkruising wordt na vermenigvuldiging met de Bevb-reductiefactoren getoetst aan de faalkanseis van $2,0 \times 10^{-7}$ per jaar. Als daar niet aan wordt voldaan dient een keuze te worden gemaakt voor het uitvoeren van een nadere analyse volgens Stap 3 en/of het nemen van compenserende maatregelen.

Stap: 3 bestaat uit een analyse van faalpaden voor leidingfalen in combinatie met dijkfalen, inclusief hydraulische belastingen (buiten- en binnenwaterstanden) en herstel. Voor leidingfalen wordt bij de bepaling van de kans op leidingfalen gebruik gemaakt van gegevens uit Stap 2, maar dan met aangescherpte faalfrequenties en toepassing van een specifieke set reductiefactoren voor waterveiligheid, die worden bepaald op basis van de materiaaleigenschappen van de betreffende leiding. Daarbij wordt ook rekening gehouden met de verstoringzones door leidinglek/-breuk (erosiekrater, explosiekrater, plastische zone en verwekingszone).

Voor dijkfalen worden per dijkfaalmechanisme (overlopen/overslag, macro-instabiliteit en piping) berekeningen gemaakt voor de situatie met verstoringzone(s). Voor overlopen/overslag wordt de faalkans berekend. Voor de geotechnische faalmechanismen (macro-instabiliteit en piping) wordt gebruik gemaakt van bestaande rekenregels op basis van partiële veiligheidsfactoren ($\gamma's$), die via de bijbehorende betrouwbaarheidsindex (β) met behulp van een standaard normale verdeling worden omgerekend naar een faalkans (P). Per dijkfaalmechanisme worden de invloedszones (centrale zone en stabiliteit-/pipingzone) en de veiligheidszones bepaald, wat resulteert in de aan te houden totale lengte van de leidingkruising. Daarbij wordt tevens rekening gehouden met de kans op herstel van de schade aan de waterkering als gevolg van leidinglek/-breuk. Alle faalpaden met de bijbehorende faalkansen worden verwerkt in een gebeurtenissenboom met als resultaat de additionele kans op dijkfalen als gevolg van leidingfalen, die wordt getoetst aan de faalkanseis van $2,0 \times 10^{-7}$ per jaar. Als daaraan niet wordt voldaan wordt een afweging gemaakt of toepassing van het (complexe) Veiligheidsraamwerk POV K&L nog oplossing kan bieden of dat aanvullende maatregelen nodig zijn.

In *Bijlage 2: Toelichting faalkansaanpak bij stappenplan Tussenklappenpolder* wordt een nadere uitleg gegeven over de toegepaste aanpak.

5. Uitwerking Stap 1: Eenvoudig

De analyse van leidingfalen wordt beperkt tot de bepaling van de verstoringszones van gasleidingen op basis van de huidige rekenregels van bijlage A van NEN 3651. Dit resulteert in dimensies van een explosiekrater, erosiekrater, plastische zone en een verwekingszone bij de aanwezigheid van zandlagen met onvoldoende pakkingsdichtheid. De faalkans van de leiding wordt buiten beschouwing gelaten. Daarvoor wordt als veilige, conservatieve aanname de faalkans van de leiding op 1,0 gesteld.

De analyse van dijkfalen geschiedt met behulp van bestaande rekenmodellen en rekenregels voor de dijkfaalmechanismen overlopen/overslag, macro-instabiliteit en piping. Daarbij worden aanvullend op de huidige aanpak de dimensies van de verstoringszones gemodelleerd.

Opgemerkt wordt dat bij de berekeningen van macro-instabiliteit, gegeven een erosiekrater in de kruin, veiligheidshalve rekening is gehouden met een verkeersbelasting op de kruin. Omdat de kans groot is dat deze dan niet zal optreden, is dat een conservatieve aanname.

5.1 Leidingfalen

5.1.1 Verstoringzones

De dimensies van de verstoringszones van een gasleiding (erosie-/explosiekrater en verwekingszone) zijn bepaald op basis van vereenvoudigde berekeningen volgens Bijlage A van NEN 3651 [NEN 3650, 2020f] als functie van de leidingdiameter en de ontwerpdruk. Voor meer informatie zie *Bijlage 6: Kraterberekeningen leidingkruising 20 (A666)*. In dit geval is een erosiekrater met een kraterstraal van $\frac{1}{2}G_L = 20$ m maatgevend en is er bij leidingkruising 12 sprake van verweking. Voor meer informatie zie *Bijlage 5: Controle verwekingsgevoeligheid zandlagen*.

5.2 Dijkfalen

Per dijkfaalmechanisme gelden volgens de huidige ontwerpinstrumenten de volgende veiligheidscriteria en partiële veiligheidsfactoren:

- Overlopen/overslag (O/O):
 - \leq norm (kadeklasse V) of $\leq 1,0 \times 10^{-3}$ (1/1.000) per jaar.
- Macro-instabiliteit binnenwaarts (STBI):
 - Schadefactor $\gamma_n = 1,0$
 - Modelfactor $\gamma_d = 1,05$ (methode Bishop, grondmodel Mohr-Coulomb met gedraineerde schuifsterkte)
 - Schematiseringsfactor $\gamma_b = 1,1$
 - Vereiste stabiliteitsfactor $SF = \gamma_n \times \gamma_d \times \gamma_b = 1,16$
- Macro-instabiliteit buitenwaarts (STBU):
 - Geen eis beschikbaar, uitgegaan wordt van $SF = 1,16$
- Piping/heave (STPH):
 - geen eis beschikbaar, conform de ontwerpeis wordt uitgegaan van een veiligheidsfactor op het verval van $\gamma_{pip} = \Delta H / \Delta H_{cr} = 1,4$

Voor de dijkfaalmechanismen macro-instabiliteit binnenwaarts (STBI), macro-instabiliteit buitenwaarts (STBU) en piping (STPH) zijn door Arcadis berekeningen gemaakt, zie *Bijlage 7: Stabiliteit- en pipingberekeningen zonder en met erosiekrater*. De resultaten van de geotechnische berekeningen zijn samengevat in de volgende tabel.

Dijkfaalmechanisme	Aanwezige stabiliteit- en pipingfactoren met erosiekrater		
	Kruising 12	Kruising 16	Kruising 19
STBI bij MHW (eis = 1,16)	0,82	0,83	0,75
STBI bij MHW + verweking (eis = 1,16)	0,75	n.v.t.	n.v.t.
STBI bij KP (eis = 1,16)	1,18	1,14	0,92
STBI bij KP + verweking (eis = 1,16)	0,80	n.v.t.	n.v.t.
STBU (eis = 1,16)	1,71	1,99	1,96
STPH (eis = 1,4)	0,79	0,27	0,29

Tabel 5.1: Resultaten geotechnische berekeningen macro-instabiliteit en piping.

5.3 Toetsing aan huidige veiligheidseisen

Bij toetsing van de resultaten van tabel 5.1 aan de veiligheidseisen van de dijkfaalmechanismen volgens de huidige ontwerpinstrumenten volgt dat bij alle leidingkruisingen meerdere dijkfaalmechanismen niet voldoen aan de huidige veiligheidseisen (zie rode getallen). Daarnaast is bij overlopen/overslag de hoogte van het restprofiel bij een erosiekrater lager dan het Kanaalpeil, zodat de kans op overlopen/overslag gelijk is aan 1,0 wat niet voldoet aan de vereiste kans op overlopen/overslag van 1/1.000 per jaar. Daarom is een nadere analyse volgens Stap 2 uitgevoerd.

6. Uitwerking Stap 2: Gedetailleerd

De analyse van leidingfalen bestaat uit een beoordeling van de conditie en materiaalkwaliteit van de leidingkruising en de bepaling van de faalfrequenties per strekkende meter leiding. Vanwege de ligging van de leidingkruising in een waterkering, waarin beperkingen voor graafwerkzaamheden gelden, wordt op de faalfrequentie voor de faaloorzaken ‘invloed van buitenaf’ (graafwerkzaamheden) en ‘corrosie’ een reductiefactor van 0,1 conform het Besluit externe veiligheid buisleidingen (Bevb) toegepast. Voor de lengte van de kruising wordt conform [TNO, 2003] een standaardlengte van 100 m gehanteerd. De aanwezige faalkans van de leidingkruising moet voldoen aan de faalkanseis.

Een analyse van dijkfalen wordt niet uitgevoerd. Als veilige, conservatieve aanname wordt er van uitgegaan dat de kans op falen van de dijk gelijk is aan 1,0.

6.1 Leidingfalen

6.1.1 Conditie-en materiaalkwaliteit

De leidingkruisingen zijn aangelegd in de periode van 1966 t/m 2010. Daarom is het voor de analyse ook nodig om te weten wat de huidige conditie en kwaliteit van de leidingen is. De resultaten daarvan zijn vastgelegd in *Bijlage 9: Beoordeling conditie leidingkruisingen*. Beide worden door de NAM en Gasunie periodiek gecontroleerd en de resultaten daarvan worden geverifieerd door onafhankelijke, daartoe geaccrediteerde en aangewezen instituten/instellingen (zie de volgende tabel).

Voor toelichting over onafhankelijke instituten/instellingen zie *Bijlage 9: Beoordeling conditie leidingkruisingen* en het in ontwikkeling zijnde rapport met als werktitel “Handelingsperspectief Leidingen in Dijken”.

Kruising nummer	Leiding nummer	Verklaring
12	GU: A-633	Eigen Inspectiedienst van Gasunie, Gasunie VA 21.0491
16	NAM: 501014	NAM Technical Authority Pipelines en geacordeerd door de NAM Technical Authority Inspection Body, NAM document EP202111204991
17	NAM: 501024	NAM Technical Authority Pipelines en geacordeerd door de NAM Technical Authority Inspection Body, NAM document EP202111204991
19	GU: A-590	Eigen Inspectiedienst van Gasunie, Gasunie V 21.0489
20	GU: A-666	Eigen Inspectiedienst van Gasunie, Gasunie V 21.0492A

NB: - Alle Bvb's/BOB's/Conformiteitsverklaringen van de nieuwbouwfase zijn aanwezig
- Bij de aanwezige wanddiktes en kerftaaiheden wordt voldaan aan de scheurstoppeis uit NEN 3651 (voor oudere kruisingen geen impact, zie Wolferen-Sprok)

Tabel 6.1: Conditieverklaringen van eigen en onafhankelijke inspectiediensten

De conclusie is dat de conditie en materiaalkwaliteit van alle leidingen sinds de aanleg niet is achteruitgegaan. Uitgangspunt bij de analyse is dat de conditie en materiaalkwaliteit van de leidingkruisingen na kadeversterking gedurende 50 jaar ook niet achteruitgaat en dat dit door voortzetting van de huidige procedure van inspectie en verificatie wordt gewaarborgd.

6.1.2 Faalfrequenties van gastransportleidingen

De kans op leidingfalen wordt berekend met behulp van Europese data van leidingincidenten van EGIG (European Gas pipeline Incident data Group) in de periode van 1970 tot 2016 (voor meer info zie [EGIG, 2018]). Daarin wordt impliciet rekening gehouden met een bijdrage aan de faalfrequentie van de faaloorzaken (externe invloed, corrosie, operationele fout, mechanische gebreken en grondbeweging) en van de faalmanieren (klein gat/scheur, groot gat en leidingbreuk).

In navolging van de werkwijze van de POV K&L bij de praktijkcasus Wolferen – Sprok [POV-KL, 2020c], wordt onderscheid gemaakt in leidingen met een kleine diameter ($\varnothing < 17$ inch) en leidingen met een grote diameter (≥ 17 inch) en wordt daarop een Bevb-reductiefactor van 0,1 toegepast voor de faaloorzaak 'invloed van buitenaf' en 'corrosie'. Voor meer informatie zie *Bijlage 3: Leidingfaalkansen en reductiefactoren*. Voor de lengte van de leidingkruising wordt conform [TNO, 2003] uitgegaan van een lengte van 100 m.

De aanwezige kans op falen van de leidingkruising volgt uit vermenigvuldiging van de faalfrequentie F_f per strekkende meter leiding met de kruisingslengte $L = 100$ meter en toepassing van een Bevb-reductiefactor van 0,1 voor de faaloorzaken 'invloeden van buitenaf' (beheermaatregelen ter beperking van schade door derden, zoals graafwerkzaamheden) en 'corrosie'. De resultaten zijn samengevat in de volgende tabel.

Parameter	Kans op falen leidingkruisingen	
	Kruising 19 = 12" ($\varnothing < 17''$) (EGIG, $3 * \varnothing \geq 17''$)	Kruising 12, 16, 17 en 20 ($\varnothing \geq 17''$) (EGIG)
Faalfrequentie per faaloorzaak [per 1000 km.jaar (per m.jaar)]:		
- 'invloed van buitenaf'	0,0423 (4,23E-08)	0,0141 (1,41E-08)
- 'corrosie'	0,0375 (3,75E-08)	0,0125 (1,25E-08)
- 'operationele fouten'	0,0057 (5,70E-09)	0,0019 (1,90E-09)
- 'mechanische gebreken'	0,0267 (2,67E-08)	0,0089 (8,90E-09)
- 'grondbeweging'	0,0225 (2,25E-08)	0,0075 (7,50E-09)
Totale faalfrequentie F_F [per 1000 km.jaar (per m.jaar)]	0,1347 (1,35E-07)	0,0449 (4,49E-08)
Lengte leidingkruising L [m]	100	100
Kans op falen leidingkruising $P_{F,LK} = F_F \times L$ [per jaar]	1,35E-05	4,49E-06
Reductiefactor voor 'invloed van buitenaf' en 'corrosie'	0,1	0,1
Reductiefactor voor 'operationele fouten', 'mechanische gebreken' en 'grondbeweging'	1,0	1,0
Kans op falen leidingkruising inclusief reductiefactoren $P_{F,LK}$ [per jaar]	1,35E-06	4,49E-07

Tabel 6.2: Resultaten kans op falen per leidingkruising volgens Stap 2: gedetailleerd.

Uit deze tabel volgt dat de aanwezige kans op falen van de leidingkruisingen gelijk is aan $1,35 \times 10^{-6}$ of $4,49 \times 10^{-7}$ per jaar. Daarbij moet voor leidingkruising 12 nog de kans op ankerschade van $1,0 \times 10^{-8}$ per jaar worden opgeteld, wat overigens een verwaarloosbare bijdrage levert aan de berekende faalkans.

Bij de faalkansanalyse Tussenklappenpolder zijn de EGIG faalfrequenties voor leidingen met een diameter groter of gelijk aan 17inch (≥ 432 mm) vermenigvuldigd met een factor 3 om de faalfrequenties af te leiden voor leidingen met een kleinere diameter dan 17 inch (< 432 mm). De (robuuste) factor 3 is gebaseerd op een door TNO uitgevoerde statistische analyse van de EGIG-data bij de praktijkcasus Wolferen – Sprok [POV-KL, 2020c].

6.2 Dijkfalen

De kans op falen van de leidingkruising moet voldoen aan de faalkanseis van $2,0 \times 10^{-7}$ per jaar. Uit de resultaten van tabel 6.2 blijkt dat voor alle leidingkruisingen de kans op falen niet voldoet aan de faalkanseis. De aanwezige faalkans varieert per leidingkruising en blijkt een factor 10 tot 30 groter te zijn dan de faalkanseis. Daarom is er voor het vervolg van afgezien om een verdere verfijning van Stap 2 uit te werken, en een nadere analyse volgens Stap 3 uit te voeren.

7. Uitwerking Stap 3: Geavanceerd

Stap 3 is gebaseerd op een analyse van faalpaden en gebeurtenissenbomen, die aansluit bij de aanpak volgens [Deltares, 2018] en de beoogde aanpak, die in het kader van nieuwe Beoordelings-en Ontwerp Instrumentarium (BOI) voor primaire waterkeringen wordt ontwikkeld.

Bij de analyse van leidingfalen wordt gebruik gemaakt van de bij Stap 1 berekende erosiekraters, die nu worden aangescherpt op basis van een berekening met dynamische, tijdsafhankelijke gasuitstroming. Tevens wordt gebruik gemaakt van de resultaten van Stap 2, waarvan de faalfrequenties nu worden bepaald per diameterklasse en een extra set reductiefactoren voor alle faaloorzaken wordt bepaald. Voor de bepaling van de lengte van de kruising wordt een zonering bepaald, die aansluit bij de bepaling van de veiligheidszone van NEN 3651 en wordt uitgebreid met een centrale zone.

Bij de analyse van dijkfalen wordt gebruik gemaakt van de resultaten van Stap 1, waarbij de per dijkfaalmechanisme berekende aanwezige veiligheidsfactoren worden omgerekend naar faalkansen. Daarbij wordt onder meer gebruik gemaakt van de relatie tussen de partiële veiligheidsfactor en de

faalkans via de bijbehorende betrouwbaarheidsindex en wordt rekening gehouden met de kans op hoogwater vóór of tijdens herstel. De afmetingen van de centrale zone en de veiligheidszones worden afgeleid aan de hand van de invloedzones en de verstoringzones.

Een en ander wordt uitgewerkt in faalpaden en gebeurtenissenbomen, waarin de faalkans van de leiding per zone, de kans op hoogwater vóór herstel en de kans op falen van de dijkfaalmechanismen met elkaar worden gecombineerd (zie *Bijlage 8: Faalkansen en gebeurtenissenbomen*).

7.1 Leidingfalen

7.1.1 Conditieverklaringen

Zie Stap 2. De conclusie is dat de conditie en materiaalkwaliteit van alle leidingen sinds de aanleg niet is achteruitgegaan. Uitgangspunt bij de analyse is dat de conditie en materiaalkwaliteit van de leidingkruisingen na kadeversterking gedurende 50 jaar ook niet achteruitgaat en dat dit door voortzetting van de huidige procedure van beheer en onderhoud met inspectie en verificatie wordt gewaarborgd. Voor wat betreft de achtergronden over de conditieverklaring wordt verwezen naar *Bijlage 9: Beoordeling conditie leidingkruisingen* en een separaat rapport in ontwikkeling met als werktitel “Handelingsperspectief Leidingen in Dijken”.

7.1.2 Faalfrequenties

De bij Stap 2 toegepaste EGIG-faalfrequenties worden voor de Nederlandse situatie bij waterkeringen aangescherpt voor de faaloorzaken ‘operationele fouten’, ‘mechanische gebreken’ en ‘grondbeweging’. Daarnaast wordt bij ‘mechanische gebreken’ onderscheid gemaakt in een belastinggestuurde scheur en een vervormingsgestuurde scheur en wordt bij de faalfrequenties een onderverdeling in diameterklassen toegepast naar rato van de bijbehorende leidinglengte en leidingincidenten. Tevens wordt de grotere wanddikte beschouwd bovenop de reductiefactor uit het Bevb aangaande beheersmaatregelen. Voor meer informatie zie *Bijlage 3: Leidingfaalkansen en reductiefactoren*. De bij de analyse per diameterklasse toe te passen faalfrequenties zijn samengevat in de volgende tabel.

Faalfrequenties		
Ø 11” – 17” (kruising 19 = 12”)	Ø ≥ 17” (kruising 16 en 17 = 28”) (kruising 12 en 20 = 48”)	
0,0928	0,0449	[per 1000 km.jaar]
9,28E-08	4,49E-08	[per m.jaar]

Tabel 7.1: Faalfrequenties per diameterklasse.

7.1.3 Reductiefactoren

Voor de beoordeling van de waterstaatkundige veiligheid is een specifieke set reductiefactoren opgesteld, die voor een deel is gebaseerd op een handleiding van het Bevb (Besluit externe veiligheid buisleidingen) [RIVM, 2021] en voor een deel zijn afgeleid op basis van de lokale specifieke situatie van de leidingen. Meer informatie daarover is te vinden in *Bijlage 3: Leidingfaalkansen en reductiefactoren*.

Voor verdere toelichting en achtergronden wordt verwezen naar het in ontwikkeling zijnde rapport met als werktitel “Handelingsperspectief Leidingen in Dijken”. De per leidingkruising toe te passen reductiefactoren zijn samengevat in de volgende tabel.

Specifieke maatregel	Faaloorzaak	Reductie-factor	Opmerkingen
Beheer en fysieke barrière	Graafwerkzaamheden	0,1	Bevb
Extra wanddikte	Graafwerkzaamheden	0,1	
Extra dekking	Graafwerkzaamheden	-	Specifieke tabel Bevb
Dekking zinker	Graaf-/bagger werkzaamheden	-	DNV methodiek
(Extra) pig run (ILI)	Corrosie	0,1	
Gemechaniseerd US, TOFD rondlassen	Mechanische gebreken	0,2	
Opgraving rondlas met NDO	Mechanische gebreken	0,1	
Leidingsterkteberekening	Zettingen en vervormingen	-	Faalkans $4,5 \times 10^{-8}$ / jaar

ILI = In-Line Inspectie, US = Ultrasoon, TOFD = Time Of Flight Diffraction en NDO = Niet Destructief Onderzoek

Tabel 7.2: Reductiefactoren, afgeleid voor waterveiligheid.

In principe kunnen deze reductiefactoren in alle zones (centrale zone en veiligheidszones) worden toegepast, behalve wanneer daarbij niet wordt voldaan aan de toepassingsvoorwaarden van *Bijlage 3: Leidingfaalkansen en reductiefactoren*. In de loop van het project is ook onderzocht wat het effect is van toepassing van een extra Bevb-reductiefactor van 0,033 bij een maatregel door de aanleg van ondergrondse beschermplaten met een waarschuwingsslint in de veiligheidszone aan de binnenzijde. Echter deze extra Bevb-reductiefactor mag niet worden gecombineerd met de in tabel 7.2 genoemde reductiefactoren en is daarom verder buiten beschouwing gelaten. Bovendien is voldoende wanddikte > 12.5 mmm aanwezig.

7.1.4 Invloed van verweking als gevolg van leidingexplosie

Bij een explosie van een hogedruk gasleiding gaat er een drukgolf door de ondergrond, wat tijdelijk een lokale verhoging van de waterspanningen en een verlaging van de korrelspanningen geeft. Bij de aanwezigheid van zandige lagen in de ondergrond kan dat invloed hebben op de pakkingsdichtheid van het zand.

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 5: Controle verwekingsgevoeligheid zandlagen*.

Daarin wordt geconcludeerd dat er enkel ter plaatse van leidingkruising 12 sprake is van verwekingsgevoelige zandlagen. Daarom is voor deze kruising voor het faalmechanisme macro-instabiliteit binnenwaarts de invloed van verweking geverifieerd, door de hoek van inwendige wrijving te reduceren tot een conservatieve waarde van $\phi = 5^\circ$. Opgemerkt wordt dat dit een zeer veilige conservatieve benadering is, waarbij de hele zandlaag als verweekt wordt verondersteld. Daaruit is gebleken dat daardoor de berekende stabiliteitsfactor voor de situatie met een erosiekrater wordt gereduceerd van $SF = 0,82$ tot $SF = 0,75$ wat niet voldoet aan de eis van 1,16. Voor meer informatie zie *Bijlage 7: Stabiliteit en pipingberekeningen zonder en met erosiekrater*.

7.1.5 Invloed van ankerschade

Op het A.G. Wildervanckkanaal is scheepvaart volgens CMT-klasse IV toegestaan. Volgens NEN 3651 is dan een controle nodig van de gronddekking op de leiding en de mogelijkheid van ankerschade. Daaruit volgt dat bij de leidingkruisingen 16, 17, 19 en 20 vanwege de voldoende dikke gronddekking met zand geen risico van ankerschade mogelijk is (lokaal onvoldoende dekking bij kruisingen 16 en 17 wordt hersteld). Echter bij leidingkruising 12 wordt vanwege de gronddekking met klei niet aan de eis voldaan en is door DNV-GL een analyse van de kans op ankerschade uitgevoerd. De resultaten daarvan staan in *Bijlage 4: Kans op ankerschade*. Daaruit wordt de kans op ankerschade verwaarloosbaar klein

geacht ($< 1,0 \times 10^{-8}$ per jaar). Bij de faalkansanalyse wordt voor leidingkruising 12 een kans op ankerschade van $1,0 \times 10^{-8}$ per jaar aangehouden.

7.1.6 Invloed van aardbevingen

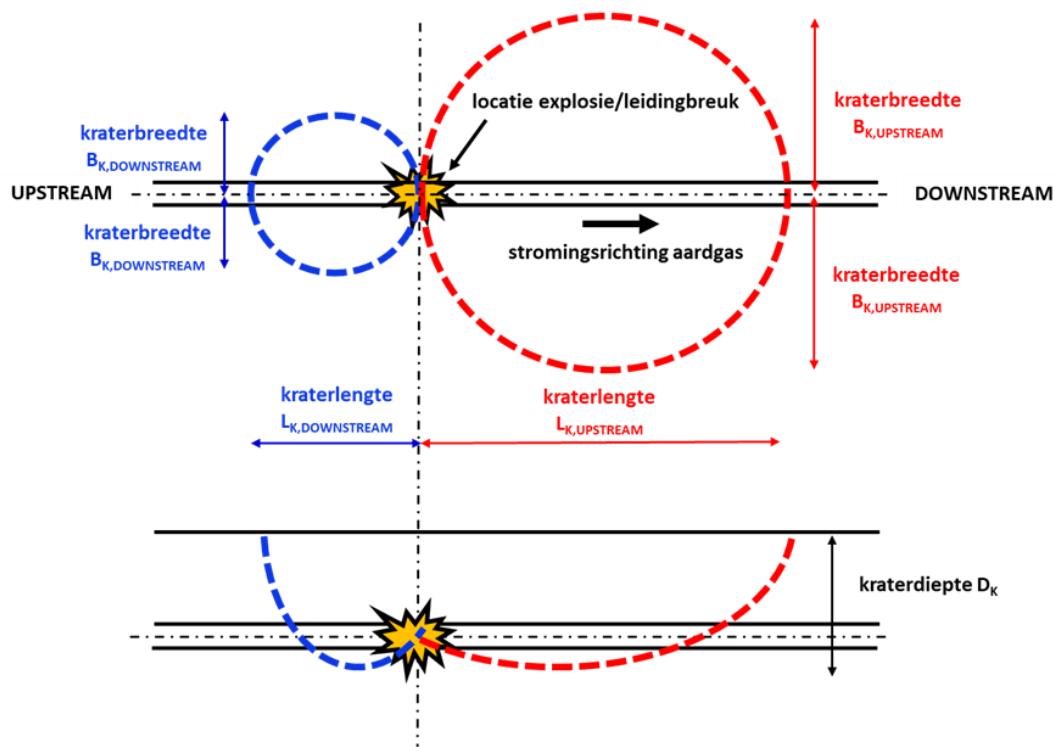
De effecten van geïnduceerde bevingen door aardgaswinning zijn uitgebreid onderzocht en gerapporteerd in [Deltares, 2013a] (zie de hierna genoemde referenties).

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 op locaties waar de T-stukken onderhevig zijn aan extra spanningen. Op stations moeten voor bovengrondse leidingdelen speciale pipingstressberekeningen worden gemaakt 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. Overigens wordt in NEN 3651 [NEN, 2020f] de belasting op een leiding door bezwijken van de waterkering niet beschouwd. Omdat dit in de betrouwbaarheidsanalyses een potentieel relevant faalmechanisme kan zijn wordt aanbevolen om NEN 3561 daarop aan te passen.

7.1.7 Verstoringszones

Voor de dimensies van de verstoringszones worden de bij Stap 1 gemaakte berekeningen aangescherpt door in plaats van een constante, statische gasuitstroming van 2 uur bij ontwerpdruk uit te gaan van een dynamische, tijdsafhankelijke gasuitstroming op grond van een door de Gasunie uitgevoerde gestileerde netberekening. Deze berekening is enkel voor leidingkruising 20 gemaakt en wordt ook als veilige rekenwaarde voor de andere leidingkruisingen toegepast. Voor meer informatie zie *Bijlage 6: Kraterberekeningen leidingkruising 20*. Dit geeft voor leidingkruising 20 een gereduceerde erosiekrater met een kraterbreedte van $B_{K,UPSTREAM} = 9,0$ m en $B_{K,DOWNSTREAM} = 5,8$ m, afgerond 6,0 m (voor een nadere toelichting van de kraterdimensies zie ook de volgende figuur).



Figuur 7.1: Dimensies erosiekrater op basis van aangescherpte dynamische berekeningen.

Opgemerkt wordt dat de mogelijkheid van het optreden van een erosiekrater mede afhankelijk is van de uitvoeringsmethode van de leiding en de aanwezige gronddekking. Bij de aanleg van de leidingkruisingen zijn er destijds twee verschillende uitvoeringstechnieken toegepast, namelijk:

- 1) Leidingkruisingen 12 en 20:
Sleufloze techniek door middel van een schildboring (GFT = Gesloten Front Techniek). Hierbij is er enkel sprake van grondverwijdering en treden er nagenoeg geen zettingen of zakkingen op. Als bovendien de gronddekking groot is kan er geen schade door graaf- of baggerwerkzaamheden optreden en is de kans op het ontstaan van een erosiekrater verwaarloosbaar klein. Dit is het geval in de centrale zone, waar de gronddekking 8,7 m of 9,7 m is.
- 2) Leidingkruisingen 16, 17 en 19:
Niet-sleufloze techniek door middel van een zinker. Hierbij is er wel sprake van zettingen of zakkingen en is er kans op schade door graaf-/baggerwerkzaamheden. Dit is het geval in de veiligheidszone aan de buitenzijde en de binnenzijde.

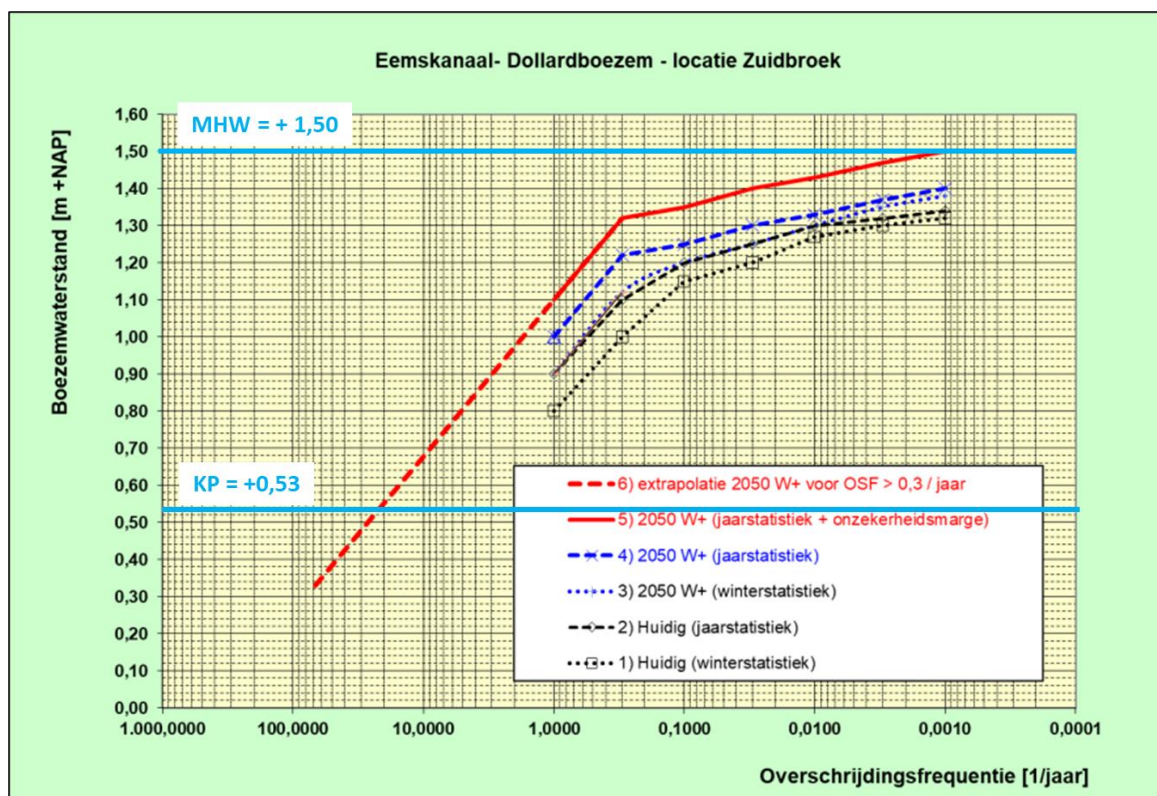
Bij de analyse van leidingfalen en dijkkfalen wordt bij de leidingkruisingen 12 en 20 er enkel in de veiligheidszones rekening mee gehouden dat daar een erosiekrater kan optreden en dat bij de leidingkruisingen 16, 17 en 19 zowel in de veiligheidszones als in de centrale zone een erosiekrater kan optreden.

7.2 Hydraulische belastingen

7.2.1 Boezemwaterstanden

Voor de faalkansanalyse is de overschrijdingsfrequentie van de boezemwaterstand maatgevend. Daarbij geldt dat een lagere boezemwaterstand vaker voorkomt, en daarmee een hogere overschrijdingsfrequentie heeft dan een hogere boezemwaterstand. Voor de bepaling van overschrijdingsfrequenties van boezemwaterstanden is gebruik gemaakt van gegevens uit [HKV, 2013],

die representatief zijn voor de nabijgelegen locatie Zuidbroek langs het Winschoterdiep. De resultaten uit [HKV, 2013] voor de huidige situatie en voor klimaatscenario 2050 W+, zijn grafisch weergegeven in de volgende figuur.



Figuur 7.2: Overschrijdingsfrequentielijn van boezemwaterstanden (2050 W+).

De in de grafiek weergegeven overschrijdingsfrequentielijnen 1), 2) en 3) zijn gebaseerd op een stochastische analyse (probabilistische analyse) van [HKV, 2013] met de volgende uitgangspunten:

- Spuistremming 0 tot 7 dagen
- Winterstatistiek neerslag
- 4 tot 9 daagse neerslag (> 100 mm)
- Spuistremming en neerslag gecorreleerd
- Inzet bergingsgebieden
- Klimaatscenario 2050 W+: 0,35 m zeespiegelstijging en 12% neerslagtoename

Voor de bepaling van overschrijdingsfrequentielijn 4) is voor het verschil tussen winter- en jaarstatistiek gebruik gemaakt van het verschil tussen de overschrijdingsfrequentielijnen 1) en 2). Deze overschrijdingsfrequentie lijn stemt overeen met de in [HKV, 2014] gepresenteerde lijn.

Overschrijdingsfrequentielijn 6) is bepaald op basis van extrapolatie van WST = NAP +1,32 m (OSF = 0,3 / jaar) en WST = NAP +1,1 m (OSF = 1,0/jaar). Hierin is impliciet de jaarstatistiek en een geschatte onzekerheidsmarge van 0,10 m verdisconteerd.

Uit de grafiek blijkt dat de overschrijdingsfrequentielijnen 4) en 5) een knik vertonen bij een boezemwaterstand met een overschrijdingsfrequentie van 0,3 keer per jaar. Die knik wordt veroorzaakt doordat bij hogere waterstanden de invloed van de inzet van bergingsgebieden merkbaar wordt. Voor de faalkansanalyse is vanwege de ontwerp levensduur van de kadeversterking klimaatscenario 2050 W+ op basis van jaarstatistiek plus een onzekerheidsmarge van 0,10 m (zie rode lijn in de grafiek) maatgevend.

De boezemwaterstand varieert tussen de laagst bekende boezemwaterstand (WST = voormalig streefpeil = NAP +0,33 m met OSF = 80 per jaar) en de maatgevende boezemwaterstand (WST = MHW = NAP + 1,50 m met OSF = 1/1.000 per jaar).

Overlopen treedt op als de boezemwaterstand hoger is dan de kerende hoogte van de boezemwaterkering. In het verlengde hiervan is de kans op overlopen gelijk aan de kans dat de boezemwaterstand hoger is dan de kerende hoogte van de boezemwaterkering. Een verlaging van de kerende hoogte werkt daarbij uiteraard ongunstig. Zo'n verlaging manifesteert zich bij een erosiekrater in de kruin als gevolg van leidinglek-/breuk en die kruinverlaging is aanwezig zolang er geen herstel is uitgevoerd.

De diepte van de erosiekrater in de kruin als gevolg van leidinglek-/breuk varieert tussen NAP -1,2 m (leidingkruising 17) en NAP -1,6 m (leidingkruising 19). Dit betekent dat er in die situatie bij de laagst bekende boezemwaterstand van NAP +0,33 m en een maaiveldhoogte in het achterland van NAP -1,50 m een reële kans is dat zelfs frequent voorkomende boezemwaterstanden al leiden tot overlopen.

Voor de leidingkruisingen 16, 17 en 19, die destijds niet-sleufloos (open ingraving / zinker) zijn aangelegd en de kraterdiepte veel lager is dan de laagst bekende boezemwaterstand geldt voor de situatie met een erosiekrater in de kruin dat de overeenkomende boezemwaterstand het gehele jaar (365 dagen van het jaar) wordt overschreden. Daarmee is de overschrijdingskans van deze boezemwaterstand gelijk aan 1 (per iedere tijdseenheid die kan worden beschouwd: jaar, dag, uur, seconde).

7.2.2 Hoogwater vóór of tijdens herstel

Bij de faalkansanalyse wordt, afhankelijk van het beschouwde dijkfaalmechanisme rekening gehouden met de kans dat er geen tijdig herstel plaatsvindt van de schade aan de waterkering als gevolg van leidinglek-/breuk.

Voor het faalmechanisme overlopen is er geen sprake van extreme hoogwaterstanden maar van dagelijks voorkomende boezemwaterstanden die bij een diepe en grote erosiekrater in de centrale zone direct tot een overstroming leiden. Daarom wordt aangenomen dat er na leidingfalen onvoldoende tijd voor herstel van de waterkering beschikbaar is. Dat betekent dat bij de faalkansanalyse voor het dijkfaalmechanisme overlopen wordt uitgegaan van een kans op géén herstel van 1. Opgemerkt wordt dat bij de leidingkruisingen 12 en 20, die volgens de schildboormethode zijn aangelegd de kans op een erosiekrater in de centrale zone verwaarloosbaar klein wordt geacht. Leidingbreuk in de veiligheidszone hoeft overigens niet direct tot kruinverlaging te leiden en daarmee niet tot overstroming door overlopen.

Voor de dijkfaalmechanismen macro-instabiliteit en piping is een erosiekrater in de veiligheidszone maatgevend. Hierbij hoeft geen sprake te zijn van extreme hoogwaterstanden en wordt de kans op herstel voorafgaand aan hoogwater groot en daarmee de kans op géén herstel voorafgaand aan hoogwater klein geacht. De kans op géén herstel voorafgaand aan hoogwater wordt arbitrair, maar conservatief, ingeschat op 5%. (dit impliceert dat de kans op herstel 95% is). Bij de faalkansanalyse wordt daarom uitgegaan van een kans op géén herstel van 0,05.

7.3 Dijkfalen

7.3.1 Dijkfaalmechanismen

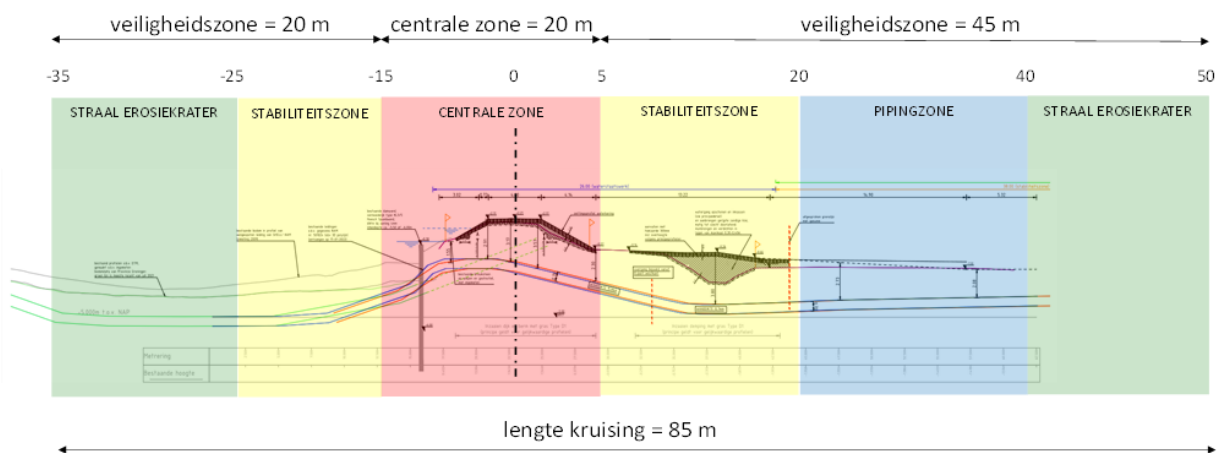
Voor de bij de analyse relevante dijkfaalmechanismen zie Stap 1 (paragraaf 5.2).

7.3.2 Centrale zone en veiligheidszones

Bij de bepaling van de zonering van de waterkering wordt aangesloten bij de systematiek van NEN 3651 voor de bepaling van de veiligheidszone, die bestaat uit de stabiliteitszone van de waterkering en de kraterstraal (R_K) van de leiding. Daaraan voegen we een pipingzone en een erosiezone (centrale zone) toe. Voor de invloedszones van de dijkfaalmechanismen geeft dit de volgende waarden:

1. Stabiliteitszone buitenzijde = 10 m (van -10 m tot -20 m).
2. Overlopen/overslag, erosiezone buitentalud, kruin en binnentalud (centrale zone) = 20 m (van -15 m tot 5 m).
3. Stabiliteit-/pipingzone binnenzijde = 35 m (van 5 tot 20 m, respectievelijk van 5 m tot 40 m, met deels overlap).

Voor de verstoringszone in de centrale zone is de straal van de erosiekrater gelijk aan $L_{UPSTREAM} + L_{DOWNSTREAM} = 9 + 6 = 15$ m en wordt een restkruinbreedte van 5 m gekozen, zodat de centrale zone van 20 m naadloos aansluit op de veiligheidszones aan de binnenzijde en aan de buitenzijde. Voor de veiligheidszone aan de buitenzijde en de binnenzijde wordt $R_K = L_{UPSTREAM} = 9$ m, afgerond 10 m aangehouden. De som van de invloedszones en de kraterstralen komt hiermee op 85 m, die representatief is voor de lengte van een leidingkruising die aan de buitenzijde reikt tot 35 m uit de as van de kruin van de waterkering en aan de binnenzijde tot 50 m uit de as van de kruin van de waterkering. Het dwarsprofiel is weergegeven in de volgende figuur.



Figuur 7.3: Zonering van de waterkering bij de leidingkruisingen.

Bij de analyse worden de leidingfaalkansen bepaald voor de centrale zone, de veiligheidszone aan de buitenzijde en de veiligheidszone aan de binnenzijde.

7.4 Kans op dijkfalen bij leidingfalen

De kans op dijkfalen bij leidingfalen wordt op doorsnedeniveau beschouwd (zie *Bijlage 2: Toelichting faalkansaanpak bij stappenplan Tussenklappenpolder*). Daarom wordt ook ieder dijkfaalmechanisme dat na leidingfalen kan optreden op doorsnedeniveau beschouwd.

7.4.1 Overlopen/overslag

De aanpak voor overlopen/overslag is gebaseerd op overschrijdingskansen van de buitenwaterstand.

Voor de leidingkruisingen 16, 17 en 19 wordt voor de situatie met een erosiekrater in de kruin uitgegaan van een kans op overlopen van 1,0. Voor de leidingkruisingen 12 en 20 is de kans op een erosiekrater in de kruin verwaarloosbaar klein en is voor de kans op overlopen de situatie zonder erosiekrater maatgevend. Deze situatie wordt bij de faalkansanalyse niet beschouwd. Dat geldt ook voor de kans op

overslag, die bij dagelijkse omstandigheden geen bijdrage levert en hier ook vanwege de aanwezigheid van smal water niet echt relevant is.

De kans op overlopen is beschouwd voor de centrale zone, waarbij de voorwaardelijke faalkans van 1,0 door overlopen geldt voor de situatie met een erosiekrater in de centrale zone.

7.4.2 Macro-instabiliteit binnenwaarts

Uitgangspunt is toepassing van een semi-probabilistische rekenmethodiek. Daarbij wordt uitgegaan van de resultaten van stabiliteitsberekeningen met partiële veiligheidsfactoren. Voor meer informatie zie *Bijlage 7: Stabiliteit en pipingberekeningen zonder en met erosiekrater*. Vervolgens wordt de hieruit voortvloeiende aanwezige schadefactor (γ_n) via de bijbehorende aanwezige betrouwbaarheidsfactor (β) omgerekend naar een aanwezige faalkans.

De aanwezige faalkans van de waterkering door macro-instabiliteit binnenwaarts of buitenwaarts in een tijdsperiode van een jaar, gegeven een permanent aanwezige schade aan de waterkering door een erosiekrater als gevolg van leidinglek-/breuk, volgt uit omrekening van de partiële factoren naar een kans op macro-instabiliteit.

De toe te passen partiële veiligheidsfactoren zijn als volgt gedefinieerd.

- Materiaalfactor (γ_m):
Is per grondsoort afgestemd op de onzekerheid in de sterkte-eigenschappen daarvan. Deze veiligheidsfactor wordt verdisconteerd in de stabiliteitsberekeningen.
- Schadefactor (γ_n):
Is afhankelijk van de toelaatbare kans op macro-instabiliteit in een dijkdoorsnede.
- Modelfactor (γ_d):
Wordt bepaald door het toe te passen rekenmodel (Bishop, afgestemd op het ontstaan van cirkelvormige glijvlakken) en materiaalmodel (gedraineerde schuifsterkte bij gebruik van Mohr-Coulomb).
- Schematiseringsfactor (γ_b):
Houdt rekening met de onzekerheid in de schematisering van de bodemopbouw en de bepaling van de grondwaterstanden en grondwaterspanningen.

Bij de faalkansanalyse blijft de materiaalfactor (γ_m) verder buiten beschouwing; want die is al in rekening gebracht bij de in het versterkingsproject toegepaste software. Om de kans op macro-instabiliteit te kunnen bepalen moeten de berekende stabiliteitsfactor (SF) nog worden gedeeld door de modelfactor: $\gamma_d = 1,05$ en de schematiseringsfactor: $\gamma_b = 1,1$, zoals die in het kadeversterkingsproject is toegepast.

Een en ander resulteert in een aanwezige schadefactor $\gamma_n = SF / (\gamma_b \times \gamma_d)$, die moet worden doorvertaald naar een kans op macro-instabiliteit. Dit wordt gedaan door het hanteren van een relatie tussen de schadefactor en de betrouwbaarheidsindex β . De betrouwbaarheidsindex β wordt omgerekend naar een faalkans met de volgende relatie:

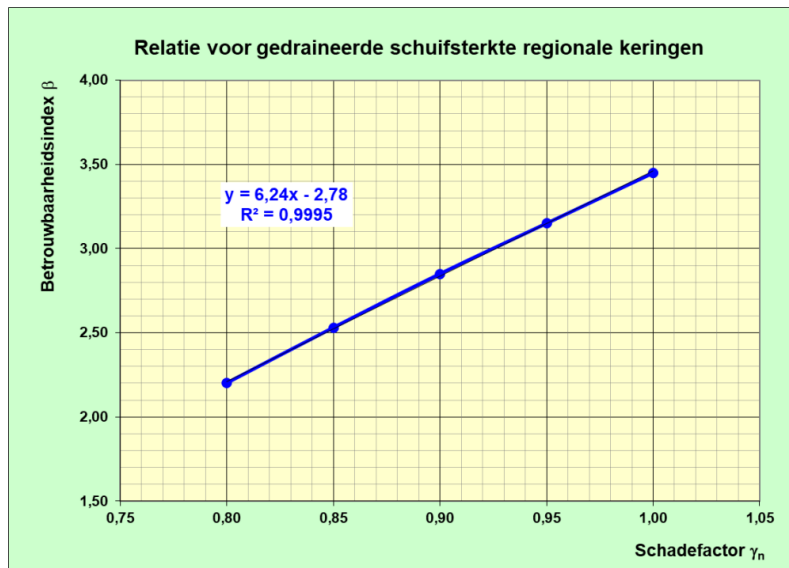
$$P = \Phi(-\beta)$$

met:

- P = faalkans
- Φ = aanduiding standaard normale verdeling
- β = betrouwbaarheidsindex

Voor de relatie tussen de schadefactor en de betrouwbaarheidsindex β wordt gebruik gemaakt van gegevens uit [STOWA, 2009]. Deze gegevens gelden bij gebruik van een set materiaalfactoren

behorend bij gedraineerde sterkte-eigenschappen en bij gebruik van een schematiseringsfactor. Bij de analyse in 2009 is een relatie gelegd met de in Figuur 3.1 vermelde faalkanseis voor het faalmechanisme stabiliteit binnenwaarts. De samenhang tussen de waarde van de schadefactor en de waarde van de betrouwbaarheidsindex β wordt weergegeven met de blauwe bolletjes in de volgende figuur.



Figuur 7.4: Relatie tussen γ_n en β voor regionale keringen voor gedraineerde schuifsterkte.

Door de in Figuur 7.4 weergegeven getallenparen kan een relatie worden gefit. Deze luidt:

$$\beta = (6,24 \times \gamma_n) - 2,78$$

met:

β = betrouwbaarheidsindex per doorsnede voor macro-instabiliteit

γ_n = schadefactor

Bij de faalkansanalyse wordt deze relatie toegepast. Deze relatie wordt gebruikt voor de omrekening van de aanwezige schadefactor (γ_n) via de betrouwbaarheidsindex (β) naar de kans op falen door macro-instabiliteit (P_{STBI} en P_{STBU}) voor de situatie met een erosiekrater in de stabiliteitszones. Voor macro-instabiliteit binnenwaarts zijn de resultaten samengevat in de volgende tabel.

Parameter	Macro-instabiliteit binnenwaarts (STBI) met erosiekrater bij boezemwaterstand = MHW = NAP +1,50 m				
	GU 12 (A-633)	GU-12 (A-633) bij verweking	NAM 16-17 (501014-501024}	GU 19 (A-590)	GU 20 (A-666)
Berekende stabiliteitsfactor SF	0,82	0,75	0,83	0,75	
Modelfactor γ_d (Bishop, MC, gedraineerd)	1,05	1,05	1,05	1,05	
Schematiseringsfactor γ_b	1,1	1,1	1,1	1,1	
Aanwezige schadefactor $\gamma_n = SF / (\gamma_d \times \gamma_b)$	0,71	0,65	0,72	0,65	
Aanwezige betrouwbaarheidsindex β	1,65	1,27	1,70	1,27	
P {STBI bij MHW erosiekrater}	4,95E-02	1,02E-01	4,42E-02	1,02E-01	

Tabel 7.3: Resultaten macro-instabiliteit binnenwaarts bij boezemwaterstand = MHW = NAP +1,50 m.

Daaruit blijkt dat de aanwezige schadefactoren niet aan de vereiste schadefactor van 1,0 voldoen. Opgemerkt wordt dat de stabiliteit bij leidingkruising GU-20 vanwege de aanwezigheid van een damwand in de kruin buiten beschouwing is gelaten. Voor de beoordeling van de damwand zie paragraaf 7.5.

Verder zijn naar aanleiding van vragen vanuit het project over de invloed van dagelijks voorkomende waterstanden op de schadefactoren voor macro-instabiliteit binnenwaarts ook aanvullend nog gevoeligheidsberekeningen gemaakt bij een buitenwaterstand, die gelijk is aan het kanaalpeil (KP = NAP +0,53 m). De resultaten daarvan staan in de volgende tabel.

Parameter	Macro-instabiliteit binnenwaarts (STBI) met erosiekrater bij boezemwaterstand = KP = NAP +0,53 m				
	GU 12 (A-633)	GU-12 (A-633) bij verweking	NAM 16-17 (501014-501024}	GU 19 (A-590)	GU 20 (A-666)
Berekende stabiliteitsfactor SF	1,18	0,80	1,14	0,92	
Modelfactor γ_d (Bishop, MC, gedraineerd)	1,05	1,05	1,05	1,05	
Schematiseringsfactor γ_b	1,1	1,1	1,1	1,1	
Aanwezige schadefactor $\gamma_n = SF / (\gamma_d \times \gamma_b)$	1,02	0,69	0,99	0,80	

Tabel 7.4: Resultaten gevoeligheidsberekeningen macro-instabiliteit binnenwaarts bij boezemwaterstand = KP = NAP +0,53 m.

Daaruit blijkt dat de aanwezige schadefactoren niet allemaal voldoen aan de vereiste schadefactor van 1,0. Bij vergelijking van de tabellen 7.3. en 7.4 blijkt dat de situatie bij MHW een hogere schadefactor oplevert dan de situatie bij KP en dat daarom de situatie bij MHW maatgevend wordt gesteld.

Opgemerkt wordt dat de kans op falen van macro-instabiliteit binnenwaarts bij KP desgewenst kan worden berekend als voorwaardelijk faalkans, gegeven het KP. Dit is dan geen kans op jaarbasis, die kan worden berekend middels een probabilistische som met bijvoorbeeld de software D-Geostability.

Voor nadere informatie over de uitgangspunten en de resultaten van de in de tabellen 7.3 en 7.4 gepresenteerde stabiliteitsfactoren (SF) zie *Bijlage 7: Stabiliteit- en pipingberekeningen zonder en met erosiekrater*. Bij de faalkansanalyse worden de in de tabel 7.3 weergegeven faalkansen P {STBI bij MHW | erosiekrater} toegepast.

De kans op macro-instabiliteit binnenwaarts is beschouwd voor de veiligheidszone aan de binnenzijde, gegeven het optreden van een erosiekrater in de veiligheidszone aan de binnenzijde.

Voor verdere toelichting en achtergronden omtrent de relatie tussen betrouwbaarheidsfactor en faalkans wordt verwezen naar het in ontwikkeling zijnde rapport met als werktitel “Handelingsperspectief Leidingen in Dijken”

7.4.3 Macro-instabiliteit buitenwaarts

Hierbij is dezelfde werkwijze gevolgd als bij macro-instabiliteit binnenwaarts met als enige verschil is dat hierbij enkel de situatie bij een boezemwaterstand van $KP = NAP + 0,53$ m is beschouwd. De resultaten zijn samengevat in de volgende tabel.

Parameter	Macro-instabiliteit buitenwaarts (STBU) met erosiekrater bij $KP = NAP + 0,53$ m				
	GU 12 (A-633)	GU-12 (A-633) bij verweking	NAM 16-17 (501014-501024}	GU 19 (A-590)	GU 20 (A-666)
Berekende stabiliteitsfactor SF	1,71	1,60	1,99	1,98	
Modelfactor γ_d (Bishop, MC, gedraineerd)	1,05	1,05	1,05	1,05	
Schematiseringsfactor γ_b	1,10	1,10	1,10	1,1	
Aanwezige schadefactor $\gamma_n = SF / (\gamma_d \times \gamma_b)$	1,48	1,39	1,72	1,71	
Aanwezige betrouwbaarheidsindex β	6,46	5,86	7,97	7,92	
P {STBU erosiekrater}	5,29E-11	2,26E-09	7,86E-16	1,22E-15	

Tabel 7.5: Resultaten macro-instabiliteit buitenwaarts bij boezemwaterstand = $KP = NAP + 0,53$ m.

De aanwezige schadefactoren voldoen ruimschoots aan de eis van 1,0. Voor meer informatie over de uitgangspunten en de resultaten van de in tabel 7.5. gepresenteerde stabiliteitsfactoren (SF) zie *Bijlage 7: Stabiliteit- en pipingberekeningen zonder en met erosiekrater*.

Bij de faalkansanalyse worden de in de tabel weergegeven faalkansen P {STBU | erosiekrater} toegepast. De kans op macro-instabiliteit buitenwaarts is beschouwd voor de veiligheidszone aan de buitenzijde, gegeven het optreden van een erosiekrater in de veiligheidszone aan de aan de buitenzijde.

7.4.4 Piping

In het kadeversterkingsproject wordt voor piping een veiligheidsfactor van 1,4 gehanteerd. Uitgangspunt bij de faalkansanalyse is toepassing van een semi-probabilistische rekenmethodiek, die is gebaseerd op toepassing van een partiële veiligheidsfactor (γ_{pip}) en volgens de rekenregels uit [I&M, 2017], die worden toegepast bij de overstromingskansbenadering voor primaire waterkeringen. Daarbij wordt de aanwezige partiële veiligheidsfactor (γ_{pip}), via de bijbehorende betrouwbaarheidsindex (β) omgerekend naar een faalkans.

Bij de faalkansanalyse wordt gebruik gemaakt van pipingformules uit het Ontwerpinstrumentarium voor primaire waterkeringen [I&M, 2017]. Daarin staat onder meer de volgende relatie:

$$\gamma_{pip} = 1,04 \times \exp \{ (0,37 \times \beta_{eis,dsn}) - (0,43 \times \beta_{max}) \}$$

met: γ_{pip} = veiligheidsfactor voor het deelfaalmechanisme piping
 $\beta_{eis,dsn}$ = vereiste betrouwbaarheidsindex voor een doorsnede
 β_{max} = betrouwbaarheidsindex behorend bij de maximaal toelaatbare overstromingskans van het gekozen normtraject, met $P_{max} = 0,2 \times \text{norm}$ (1/1.000 per jaar) en $\beta_{max} = -\Phi^{-1}(P_{max})$

De bovenstaande relatie kan ook worden geschreven als:

$$\beta_{eis,dsn} = [\ln(\gamma_{pip} / 1,04) + (0,43 \times \beta_{max})] / 0,37$$

Deze relatie is toegepast om de aanwezige partiële veiligheidsfactor γ_{pip} via de bijbehorende betrouwbaarheidsindex $\beta_{aanw,dsn}$ om te rekenen naar een aanwezige kans op piping. De resultaten zijn samengevat in de volgende tabel.

Parameter	Piping (STPH) met erosiekrater bij MHW = NAP +1,50 m			
	GU 12 (A-633)	NAM 16-17 (501014-501024)	GU 19 (A-590)	GU 20 (A-666)
Optredend verval $\Delta H = h - h_{exit} - (0,3 \times D_{deklaag})$ [m]	3,70	3,645	3,645	3,00
Kritiek verval $\Delta H_{c,p} = L \times F_{resistance} \times F_{scale} \times F_{geometry}$ [m]	1,26	0,97	1,07	2,23
Schematiseringsfactor $\gamma_{b,p}$	1,10	1,10	1,10	1,10
Aanwezige pipingfactor $\gamma_{pip} = \Delta H_{c,p} / (\Delta H \times \gamma_{gb})$	0,31	0,24	0,27	0,68
$P_{max} = 0,2 \times 1/1.000$ per jaar	2,00E-04	2,00E-04	2,00E-04	2,00E-04
$\beta_{max} = -\Phi^{-1}(P_{max})$	3,54	3,54	3,54	3,54
Aanwezige betrouwbaarheidsindex $\beta_{aanw,dsn}$	0,84	0,17	0,44	2,95
P {STPH erosiekrater}	2,01E-01	4,31E-01	3,31E-01	1,59E-03

Tabel 7.6: Resultaten pipingberekeningen.

De aanwezige pipingfactoren voldoen niet aan de vereiste pipingfactor van 1,4. Voor nadere informatie over de uitgangspunten en de resultaten van de in tabel 7.6. gepresenteerde vervallen (ΔH en $\Delta H_{c,p}$) en partiële veiligheidsfactoren (γ_{pip}) zie *Bijlage 7: Stabiliteit- en pipingberekeningen zonder en met erosiekrater*.

Bij de faalkansanalyse worden de in de tabel weergegeven faalkansen $P \{STPH | erosiekrater\}$ toegepast. De kans op piping is beschouwd voor de veiligheidszone aan de buitenzijde en de veiligheidszone aan de binnenzijde, gegeven het optreden van een erosiekrater in de veiligheidszones.

7.5 Damwandfalen

Bij leidingkruising 20 staat in de binnenkruislijn een onverankerde stalen damwand, die bij leidingfalen invloed heeft op de kans op dijkwanden. Door Arcadis is een damwandcontrole voor de situatie met een erosiekrater uitgevoerd op basis van de methodiek van CUR 166 [CUR, 2012]. De resultaten daarvan zijn opgenomen in *Bijlage 7: Stabiliteit en pipingberekeningen zonder en met erosiekrater*.

Omdat het type damwand onbekend is, is als uitgangspunt een licht type gekozen (AZ12) met een afname van de wanddikte van 15% door corrosie. Dit komt overeen met een afname van 1,3 mm van de wanddikte van een damwandprofiel AZ12 (wanddikte = 8,5 mm) Voor de betrouwbaarheidseis is uitgegaan van Eurocode RC2, wat overeenkomt met betrouwbaarheidseis van $\beta = 3,8$ of een faalkans per faalmechanisme van $7,3 \times 10^{-5}$ voor een referentieperiode van 50 jaar. Uit de berekeningen blijkt dat de Unity Check op het buigend moment gelijk is aan $UC = 0,13$ (kerend naar binnen bij MHW = NAP +1,50 m) of $UC = 0,94$ (kerend naar buiten bij voormalig streefpeil = NAP +0,33 m). Dit betekent dat er nog een veiligheidsmarge aanwezig is ten opzichte van de betrouwbaarheidseis.

Opgemerkt wordt dat bij $UC \leq 1,0$ er nog sprake is van een grote veiligheidsmarge, omdat normaliter een niet beschadigde kering wordt beschouwd als een voldoende betrouwbare damwand. Dat betekent dat de damwand ook in Stap 1 al zou voldoen, omdat deze voldoende betrouwbaar is in een continu beschadigde situatie.

7.6 Kruisingslengte

Om invulling te kunnen geven aan het proces van leidingfalen naar dijkwanden dient de faallengte van het geheel, zijnde de totale lengte van de kruising te worden bepaald. In feite is dat de optelsom van de centrale zone en de veiligheidszones aan de binnenzijde en de buitenzijde (zie ook figuur 7.3). Dat

resulteert in een kruisingslengte van 85 m, die als veilige maat voor alle kruisingen wordt aangehouden. Daarbuiten heeft leidingfalen geen invloed meer op dijkfalen.

7.7 Additionele faalkans per leidingkruising

Per leidingkruising is de additionele faalkans bepaald aan de hand van gebeurtenissenbomen, die zijn te vinden in *Bijlage 8: Faalpaden en gebeurtenissenbomen*. De resultaten daarvan zijn samengevat in de volgende tabel.

Leidingkruising		Additionele faalkans	
Nummer	Code	[per jaar]	
12	Gasunie A-633		1,05E-09
16	NAM 501014	2,64E-08	
17	NAM 501024	2,64E-08	
19	Gasunie A-590		3,92E-08
20	Gasunie A-666		5,20E-12

Tabel 7.7: Additionele faalkans per leidingkruising.

Nog even ter toelichting:

Het verschil tussen de faalkans tussen leidingkruising 12 en 20 komt door de aanwezigheid van een damwand in de kruin, die bij kruising 20 wel en bij kruising 12 niet aanwezig is.

Kruising 19 is een 12" en valt in een groep met een ca. 3 keer hogere faalkans dan een 48".

7.8 Toetsing additionele faalkans aan faalkanseis

De faalkanseis per leidingkruising is gelijk aan $2,0 \times 10^{-7}$ per jaar. Uit de resultaten van tabel 7.7 blijkt dat de additionele faalkans van alle leidingkruisingen voldoet aan de faalkanseis. Daarbij is er impliciet al rekening mee gehouden dat er nog een aantal aanvullende acties met een positief resultaat wordt uitgevoerd. Het gaat daarbij om de volgende acties:

- 1) Ograven en onderzoeken rondlas omdat onvoldoende informatie uit de as-built administratie aanwezig is om de benodigde strenge faalkansreductie te onderbouwen:
 - leidingkruising 12: ter plaatse van overgang geperst/gelegd aan de binnenzijde
 - leidingkruisingen 16, 17 en 19¹: ter plaatse van de dikke pijp in de centrale zone of de veiligheidszone
- 2) Inwendige inspectie ILI (In-line Inspectie) mede als onderdeel van het Buisleiding Integriteit Management Plan:
 - leidingkruising 12 en 20
- 3) Herstel gronddekking langs damwandbeschoeiing kanaal:
 - leidingkruisingen 16 en 17

Indien de resultaten van 1) en 2) niet voldoen aan de daarvoor geldende eisen en 3) niet wordt uitgevoerd kunnen de in dit rapport gepresenteerde faalkansen niet worden toegepast en is herberekening daarvan nodig om te kunnen verifiëren of ze dan nog voldoen aan de faalkanseis.

¹ Ondertussen is uit een breukmechanische analyse (zie Appendix van Bijlage 3) gebleken dat vanwege het laag spanningsniveau, de relatief geringere sterkte van het materiaal (Grade B) en inzicht in de breuktaaiheid van de rondlas, de toelaatbare afmetingen van de lasdefecten zo groot zijn dat deze destijds moeten zijn gedetecteerd. Extra niet destructief onderzoek van deze rondlas is daarom niet nodig. Voor achtergronden en toelichting bij het uitvoeren van een breukmechanische analyse wordt verwezen naar het in ontwikkeling zijnde rapport met als werktitel "Handelingsperspectief Leidingen in Dijken"

Voor achtergronden en toelichting op mogelijke te nemen maatregelen wordt verwezen naar het in ontwikkeling zijnde rapport met als werktitel “Handelingsperspectief Leidingen in Dijken”

8. Leer- en verbeterpunten

Bij de ontwikkeling van de innovatieve rekenmethodiek is er voor gekozen om bij het werken van grof naar fijn inzicht te geven in de doorwerking van de verschillende stappen. Als we het geheel overzien is er in het licht van de verdere doorontwikkeling en bredere toepassing van de innovatieve rekenmethodiek een aantal aspecten die voor verbetering vatbaar zijn. Dat betreft de toepassing van verfijningen per afzonderlijke stap en de daarbij te maken afweging over hoe verder. De rode draad daarbij is de interactie tussen leidingfalen en dijkfalen en de daaruit voortvloeiende gevolgschade aan de waterkering. Verder is er ook behoefte aan een betere onderbouwing van de faalkanseis.

8.1 Stap 1: Eenvoudig

Deze stap voorziet in de meest eenvoudige manier van de beoordeling van dijkfalen (dijkfaalmechanismen: overlopen/overslag, macro-instabiliteit en piping), die is gebaseerd op bestaande rekenregels en veiligheidseisen en leidingfalen (erosiekrater en verwekingszone), die is gebaseerd op bestaande rekenregels. De kans op falen van de leiding is daar geen onderdeel van en gelijkgesteld aan 1 wat een zeer conservatieve aanname is.

8.1.1 Beoordeling dijkfaalmechanismen

Uit de resultaten van Stap 1 blijkt dat deze worden gedomineerd door overlopen/overslag en dat macro-instabiliteit en piping daar nauwelijks aan bijdragen. Dat pleit ervoor om als eerste een beoordeling van overlopen/overslag uit te voeren. Zeer waarschijnlijk zal de kruinhoogte van de waterkering bij een bestaande leidingkruising met een erosiekrater in de kruin niet voldoen aan de vereiste kruinhoogte, zodat een nadere analyse van macro-instabiliteit en piping dan achterwege kan worden gelaten. Eventueel kan bij Stap 1 ook al rekening worden gehouden met de kans op géén herstel van de schade aan de waterkering na leidingbreuk, wat nu onderdeel is van Stap 3.

8.1.2 Bepaling verstoringszones

De lengte G_L van de erosiekrater is in Stap 1 berekend met de vereenvoudigde formule uit NEN 3651 op basis van een conservatieve constante, statische gasuitstroming van 2 uur bij ontwerpdruk ($G_L = 39$ m). De lengte van de erosiekrater bij Stap 3 met een toegepaste aangescherpte berekening van de Gasunie op basis van een dynamische, tijdsafhankelijke gasuitstroming aan de hand van een gestileerde netberekening ($L_{UPSTREAM} + L_{DOWNSTREAM} = 15$ m) kan in feite ook al bij Stap 1 worden toegepast.

Voor de invloed van leidingexplosie op macro-instabiliteit is er van uitgegaan dat in alle zandlagen de hoek van inwendige wrijving continue wordt gereduceerd van $\varphi = 30^\circ$ tot $\varphi = 5^\circ$, wat een conservatieve aanname is. Een meer realistische stabiliteitsberekening is mogelijk door conform NEN 3651 in de ondergrond de afname van de korrelspanningen en toename van de waterspanningen te modelleren als functie van de equivalente TNT-waarde bij leidingexplosie en de pakkingsdichtheid van de ondergrond. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat de methode van NEN 3651 niet meer actueel is en aanpassing behoeft.

8.2 Stap 2: Gedetailleerd

Bij deze stap wordt enkel de aanwezigheid faalkans van de leidingkruising conservatief bepaald, op basis van bestaande data (faalfrequenties uit een Europese database van leidingincidenten) en toepassing van een faalkansreductiefactor van 0,1 voor externe veiligheid (Bevb) voor de faaloorzaken ‘invloed van buitenaf’ en ‘corrosie’. Daarbij is de lengte van een leidingkruising gelijkgesteld aan de standaardwaarde van 100 m volgens [TNO, 2003]. De kans op falen van de dijkfaalmechanismen is daar geen onderdeel van en is gelijkgesteld aan 1,0.

Voor de bepaling van de faalfrequenties kan ook gebruik worden gemaakt van verfijningen uit Stap 3, die zijn gebaseerd op de aangepaste EGIG-faalfrequenties en de extra faalkansreductiefactoren voor waterveiligheid. Dat levert een kleinere faalkans van de leidingkruising op, waarbij de kans groot is dat bij Stap 2 al aan de faalkanseis wordt voldaan en Stap 3 kan vervallen.

8.3 Stap 3: Geavanceerd

Deze stap maakt gebruik van de resultaten van Stap 1 en Stap 2 en voorziet in een gecombineerde beoordeling van de kans op leidingfalen en de kans op dijkfalen aan de hand van faalpaden en gebeurtenissenbomen. Daarbij is aangesloten bij de voorgestane aanpak van het BOI en de huidige aanpak van NEN 3651, waarin een veiligheidszone wordt gedefinieerd, die voor de faalkansanalyse is uitgebreid met een centrale zone, die aansluit op de veiligheidszone aan de buitenzijde en de veiligheidszone aan de binnenzijde.

Voor de beoordeling van de damwand in de kruin is er sprake van een grote veiligheidsmarge, omdat deze in de situatie met een beschadigde waterkering is beoordeeld. Daarbij is een betrouwbaarheidseis toegepast voor de situatie met een niet beschadigde waterkering. Dat betekent dat de damwand ook in Stap 1 al zou voldoen en daarom bij voorkeur in Stap1 kan worden opgenomen.

Voor de leidingkruisingen die door middel van een zinker zijn aangelegd wordt de faalkans gedomineerd door het dijkfaalmechanisme overlopen/overslag. Voor de leidingkruisingen die zijn aangelegd door middel van een schildboring zijn dat de geotechnische faalmechanismen (macro-instabiliteit binnenwaarts en piping). Bij macro-instabiliteit is nog geen rekening gehouden met mogelijke reserve in de kans op instabiliteit in verband met het restprofiel na leidingbreuk. Dat betekent dat daarin nog een mogelijkheid voor aanscherping van de berekende kans op macro-instabiliteit aanwezig is.

8.4 Faalkanseis

Uitgangspunt voor de toetsing van de additionele faalkans van een leidingkruising is de maximaal toelaatbare faalkans van het stelsel van boezemkaden met dezelfde veiligheidsnorm dat de achterliggende polder beschermt tegen overstroming. Daarbij is aangesloten bij de werkwijze voor primaire waterkeringen op basis van overstromingskansen van normtrajecten, inclusief de verdiscontering van lengte-effecten. Deze aanpak is voor regionale waterkering niet beschikbaar. Daarom is gekozen voor een conservatieve aanpak, door bij de faalkansanalyse een normtraject te definiëren, waarvan de maximaal toelaatbare kans overstroming getalsmatig is gelijkgesteld aan $0,2 \times$ norm (op doorsnedeniveau) = $2,0 \times 10^{-4}$ per jaar met een verdeling van de faalkansruimte van 10% voor overlopen/overslag, 80% voor macro-instabiliteit binnentalud en 10% voor overige mechanismen. Onder de tak 10% voor overige mechanismen is voor het falen van alle leidingkruisingen 1% gereserveerd, wat bij een equivalent aantal kruisingen van 10 stuks een faalkanseis van $2,0 \times 10^{-7}$ per jaar per individuele leidingkruising oplevert. Een overweging om voor een conservatieve aanpak te kiezen was dat de norm voor regionale waterkeringen een afkeurgrens betreft, terwijl er bij de Tussenklappenpolder sprake is van een kadeversterking. Bekend is dat een ontwerpnorm significant strenger kan zijn dan een afkeurgrens. Verder wordt momenteel vanuit het landelijke programma ORK (STOWA) een verkenning uitgevoerd naar de gewenste veiligheidsbenadering voor regionale waterkeringen. Ook dit was een overweging om bij de kadeversterking van de Tussenklappenpolder een conservatieve aanpak te willen hanteren.

De vraag is hoe aanscherping van de gehanteerde conservatieve faalkanseis mogelijk is. Dat houdt verband met de juistheid van de factor $0,2 \times$ norm, die voor regionale waterkeringen niet is afgeleid op basis van een economische optimalisatie van de overstromingskansen van een normtraject. Het verdient aanbeveling om voor regionale waterkeringen een overstap op een overstromingskansbenadering te overwegen. Dan kan, in lijn met de aanpak bij primaire waterkeringen, een adequate norm worden

afgeleid voor normtrajecten, die op basis van overstromingsberekeningen zijn bepaald. Hierbij kunnen ook de lengte-effecten worden bepaald en meegenomen. Vervolgens kan dan ook een optimale verdeling worden gekozen van de faalkansruimte voor de dijkfaalmechanismen. Het is denkbaar dat dan meer faalkansruimte kan worden vrijgemaakt voor overige mechanismen in het algemeen en leidingkruisingen in het bijzonder. Dit raakt aan de bij de Tussenklappenpolder gehanteerde waarde van 1% van de maximaal toelaatbare kans op falen van de regionale waterkering als faalkanseis voor alle leidingkruisingen tezamen en ook aan het gebruikte equivalent aantal kruisingen van 10 stuks.

9. Conclusies en aanbevelingen

9.1 Conclusies

Op basis van een traditionele beoordeling volgens de huidige normen voldoen de vijf onderzochte bestaande kruisingen van gastransportleidingen (zinkers aangelegd tussen 1996 en 1980 en schildboringen uit 1992 en 2010) niet aan de eisen van NEN 3651:2020. Om daaraan te kunnen voldoen zouden ter plaatse van de leidingkruisingen kistdammen moeten worden aangelegd.

Daarom is de veiligheid van de leidingkruisingen in de kadeversterking Tussenklappenpolder onderzocht op basis van een innovatieve rekenmethodiek, die werkend van grof naar fijn voorziet in analyses van leidingfalen en dijkfalen. Deze is na een eerste toepassing in de kadeversterking Steendam – Tjuchem nu voor de tweede keer toegepast. De innovatieve rekenmethodiek bestaat uit een eenvoudige, of gedetailleerde, of geavanceerde faalkansanalyse. De innovatieve rekenmethodiek is een vereenvoudigde versie van de systematiek van het Veiligheidsraamwerk POV Kabels en Leidingen, die erg complex is en, vanwege de witte vlekken daarin, ook nog niet direct toepasbaar is.

De innovatieve rekenmethodiek bestaat van grof naar fijn uit 3 stappen, namelijk Stap 1: Eenvoudig (deterministisch), Stap 2: Gedetailleerd (probabilistisch, grof) en Stap 3: Geavanceerd (probabilistisch, fijn).

Voor de kadeversterking Tussenklappenpolder is het resultaat van Stap 1 dat de dijkfaalmechanismen voor de situatie met een erosiekrater niet allemaal voldoen aan de huidige veiligheidseisen, zodat een nadere analyse volgens Stap 2 is uitgevoerd.

Het resultaat van Stap 2 is dat de conditie van de leidingkruisingen voldoet aan de eisen. Echter de faalkans van de leidingkruisingen met EGIG-faalfrequenties, inclusief een Bevb-reductiefactor van 0,1 voor de faaloorzaken 'invloed van buitenaf' en 'corrosie' voldoen niet aan de faalkanseis, zodat een nadere analyse volgens Stap 3 is uitgevoerd.

Het resultaat van Stap 3 is dat alle leidingkruisingen met aangepaste EGIG faalfrequenties, inclusief een Bevb-reductiefactor van 0,1 en specifieke reductiefactoren, variërend van 0,1 tot 0,2 voor waterveiligheid (zie tabel 8.1), voldoen aan de faalkanseis.

Specifieke maatregel	Faaloorzaak	Reductie-factor	Opmerkingen
Beheer en fysieke barrière	Graafwerkzaamheden	0,1	Bevb
Extra wanddikte	Graafwerkzaamheden	0,1	
Extra dekking	Graafwerkzaamheden	-	Specifieke tabel Bevb
Dekking zinker	Graaf-/bagger werkzaamheden	-	DNV methodiek
(Extra) pig run (ILI)	Corrosie	0,1	
Gemechaniseerd US, TOFD rondlassen	Mechanische gebreken	0,2	
Opgraving rondlas met NDO	Mechanische gebreken	0,1	
Leidingsterkteberekening	Zettingen en vervormingen	-	Faalkans $4,5 \times 10^{-8}$ / jaar

ILI = In-Line Inspectie, US = Ultrasoon, TOFD = Time Of Flight Diffraction en NDO = Niet Destructief Onderzoek

Tabel 8.1: Overzicht van de toegepaste reductiefactoren.

Er wordt dus voor alle leidingkruisingen voldaan aan de faalkanseis, zodat er geen kistdammen hoeven te worden aangelegd. Daardoor worden ingrijpende maatregelen voorkomen en worden extra kosten bespaard. Wel moet ter verificatie van de additionele faalkansen nog een aantal acties worden uitgevoerd, namelijk:

- Leidingkruisingen 16 en 17:
Herstel van de gronddekking op de leidingen ter plaatse van de damwandbeschoeiing langs het kanaal, als gevolg van erosie door de scheepvaart.
- Leidingkruisingen 16, 17 en 19:
Opgraving van de leidingen en het uitvoeren van niet-destructief onderzoek van de rondlas. Indien dit onderzoek niet wordt uitgevoerd kan worden overwogen om een nadere analyse uit te voeren over de kwaliteit van de rondlas op basis van breukmechanica. Daartoe moet er wel inzicht zijn over de grootte van de breuktaaiheidsparameters van deze rondlas. Ondertussen is voor kruising 19 uit een breukmechanische analyse gebleken dat vanwege het lage spanningsniveau, de relatief geringere sterkte van het materiaal (Grade B) en inzicht in de breuktaaiheid van de rondlas, de toelaatbare afmetingen van de lasdefecten zo groot zijn dat deze destijds moeten zijn gedetecteerd. Extra niet destructief onderzoek van de rondlas in kruising 19 is daarom niet nodig.
De opgraving dient vanwege de risico's voor de leiding en de waterkering bij voorkeur niet uitgevoerd te worden in de kruin, maar op een andere plaats. Voorwaarde daarbij is dat het dezelfde leidingkruising, staalkwaliteit en wanddikte betreft, een en ander ter goedkeuring van de eigen inspectiediensten van de leidingbeheerder en het waterschap. Als uit het onderzoek volgt dat de rondlas niet voldoen aan de kwaliteitseisen is er een compenserende maatregel nodig. Dit kan invulling krijgen door de aanleg van een damwandconstructie in de kruin. Als het nader onderzoek niet wordt uitgevoerd de acties niet worden uitgevoerd is de faalkans van de leidingkruisingen 16 en 17 een factor 3-4 groter, zodat een nadere analyse niet zinvol is en enkel aanscherping van de faalkanseis nog soelaas kan bieden.
- Leidingkruising 12:
Opgraven en onderzoeken rondlas ter plaatse van overgang geperst/gelegd aan de binnenzijde.
- Leidingkruisingen 12 en 20:
Uitvoeren van ILI (In-Line Inspectie). Voor periode zie PIMS (Pipeline Information Management System).

9.2 Aanbevelingen

De resultaten van deze tweede toepassing van de innovatieve rekenmethodiek 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.

Aanbevolen wordt om de innovatieve rekenmethodiek verder uit te dragen en te verbreden door praktische toepassing daarvan in dijkversterkingsprojecten van regionale en primaire waterkeringen. Daarbij dient bij voorkeur onderscheid te worden gemaakt in leidingen zonder en met damwandconstructies. Zodoende kan de innovatieve rekenmethodiek mogelijk worden verbeterd en uitgebreid en een plek krijgen in de NEN 3650 reeks en in de huidige wet- en regelgeving en het bijbehorende toets- en ontwerpinstrumentarium van Rijkswaterstaat en van de STOWA.

Voor de bepaling van de faalkanseisen is gekozen voor veilige, conservatieve uitgangspunten, waarbij de toelaatbare kans op falen van een gekozen normtraject voor een regionale waterkering getalsmatig is gelijkgesteld aan $0,2 \times$ vigerende norm, welke waarde representatief is voor de afkeurgrens in de doorsnede van een dijkvak. Voor toekomstige projecten wordt aanbevolen om de faalkanseisen nader te bepalen op basis van de (maximaal) toelaatbare kans op overstroming van een normtraject, inclusief een economisch optimale verdeling van de faalkansruimte over de faalmechanismen. Nadere studie wordt aanbevolen voor de vaststelling van een meer realistische waarde voor N_{eq} .

Bij de faalkansanalyse zijn bij het werken van grof naar fijn de aspecten van leidingfalen en dijkfalen arbitrair verdeeld over de stappen 1 en 2 en zijn pas in Stap 3 verfijningen toegepast. Uit oogpunt van efficiëntie wordt aanbevolen om deze verfijningen ook al in de eerste twee stappen van de analyse toe te passen. Dit betreft de zonering van het dwarsprofiel en aanscherping van de afmetingen van de verstoringszones in Stap 1 en toepassing van aangescherpte faalfrequenties en specifieke reductiefactoren in Stap 2.

Bij de bepaling van de faalkanseis is ervoor gekozen om uit te gaan van een veilige conservatieve faalkanseis van 1% binnen de beschikbare krappe faalkansruimte van 10% voor overige mechanismen. Voor het falen van een individuele leidingkruising is 0,1% gereserveerd. Aanbevolen wordt om in lijn met de aanpak voor primaire waterkeringen de normen te herijken op basis van op basis van een economische optimalisatie van de overstromingskans van een normtraject voor regionale waterkeringen. Daarna kan ook een meer realistische verdeling van de faalkansruimte over de faalmechanismen worden gemaakt, waarbij meer faalkansruimte kan worden gereserveerd voor overige mechanismen in het algemeen en niet-waterkerende objecten (waaronder leidingkruisingen) in het bijzonder.

10. 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
- [Deltares, 2018] WBI Veiligheidsraamwerk Kabels en Leidingen
Generieke uitgangspunten als vertrekpunt voor nadere uitwerking in
(pilot) projecten
Deltares
Mei 2018
- [EGIG, 2018] Gas pipeline incidents 10th European Gas pipeline Incidents data Group
(period 2007 – 2016)
Document number VA 17.R 0395
March 2018
- [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^e herziene druk, deel 1 en deel 2
Juli 2012
- [ENW, 2016] Grondslagen voor hoogwaterbescherming
Expertise Netwerk Waterveiligheid
December 2016
- [HKV, 2013] Statistische analyse extreme waterstanden
HKV LIJN IN WATER in opdracht van Waterschap Hunze en Aa's
Rapport PR2443.20
Mei 2013

- [HKV, 2014] Statistische analyse extreme waterstanden
Keuze karakteristieke gebeurtenissen
Rapport PR2443.10
H_{KV} LIJN IN WATER, in opdracht van Waterschap Hunze en Aa's
April 2014
- [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 [HRBebv versie 3.2 | RIVM](#))
- [PROV-G, 2016] Omgevingsverordening Provincie Groningen 2016
Bijlage 3 Veiligheidsnormen regionale waterkeringen
Kaart 3.1 Eemskanaal en Dollardboezem
2016
- [POV-KL, 2020a] Veiligheidsraamwerk POV K&L - Toepassing in de praktijk
Projectoverstijgende verkenning kabels en 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
Projectoverstijgende verkenning kabels en leidingen
4 maart 2021
(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
Projectoverstijgende verkenning kabels en leidingen
9 september 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
Projectoverstijgende verkenning kabels en 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 \(povkabelsenleidingen.nl\)](https://povkabelsenleidingen.nl))
- [STOWA, 2009] Materiaalfactoren boezemkaden
Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Rapport nummer 2009-05
2009
- [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
- [WSHA, 2014] Project Droge Voeten 2050
Advies voor het beheergebied van het waterschap Hunze en Aa's
Waterschap Hunze en Aa's, Provincie Groningen en Provincie Drenthe
Juni 2014
- [WSHA, 2022] Interim methodiek leidingfalen en dijkfalen
Integrale faalkansanalyse kruisingen gastransportleidingen met kistdam in kadeversterking Steendam - Tjuchem
Waterschap Hunze en Aa's
22 december 2022 (definitief)

Bijlage 1: Situatie en dwarsprofielen

Opgesteld door:

- Harry Schelfhout (Schelfhout Advies)

Datum: 24 juli 2023 (definitief)

1. Inleiding

In deze bijlage wordt inzicht gegeven in de situatie en de dwarsprofielen van de in het kadeversterkingstraject Tussenklappenpolder liggende bestaande kruisingen van gastransportleidingen.

Het ontwerp van het kadeversterkingsplan voorziet in een beperkte grondaanvulling ter plaatse van de kruin en het binnenmaaveld. In tabel 1.1 zijn de belangrijkste leidingkenmerken van de kruisingen samengevat.

Parameter	Kenmerken leidingkruisingen Gasunie in westelijke kade A.G. Wildervanckkanaal				
Hectometer	0.9 + 65 m	1.0 + 83 m	1.0 + 86 m	1.3 + 65 m	1.3 + 87 m
Leiding nummer	12	16	17	19	20
Leiding code	GU A-633	NAM 501014	NAM 501024	GU A-590	GU A-666
Aanlegmethode	schildboring + open sleuf	zinker + open sleuf	zinker + open sleuf	zinker + open sleuf	schildboring + open sleuf
Jaar van aanleg	1992	1966	1970	1980	2010
Diameter (inch/mm)	48"/1219	28"/711	28"/711	12"/324	48"/1219
Wanddikte [mm]	30 (kruising) 18,3 (veld)	18 (kruising) 18,3 (bochten) 15,8 (veld)	18 (kruising) 18,3 (bochten) 15,8 (veld)	17,48 (kruising) 12,7 (veld)	22,7 (kruising) 18,7 mm (veld)
Ontwerpdruk (bar)	79,9	83	83	79,9	79,9
Materiaal	St.E 415	X52	X52	Grade B	L 480
Kathodische bescherming	ja	ja	ja	ja	ja
Uitwendige bekleding	PE	Bitumen	Bitumen	PE	PP
Product	Aardgas ¹	Aardgas ¹	Aardgas ¹	Aardgas ¹	Aardgas ¹
Bouwjaar	1992	1966	1970	1981	2010
Conditieverklaring	ja	ja	ja	ja	ja
Kraterdiepte D _x t.p.v. kanaal (m)	3,1	6,1	6,1	3,4	5,7
Kraterdiepte D _x t.p.v. kruin (m)	9,7	4,1	4,1	3,5	8,7
Kraterdiepte D _x t.p.v. binnenmaaveld (m)	4,3	4,4	4,4	3,0	5,4
Kraterlengte L _{upstream} (m)	9,0 ²	9,0 ²	9,0 ²	9,0 ²	9,0
Kraterlengte L _{downstream} (m)	6,0 ²	6,0 ²	6,0 ²	6,0 ²	6,0
Compenserende damwand aanwezig	nee	nee	nee	nee	ja

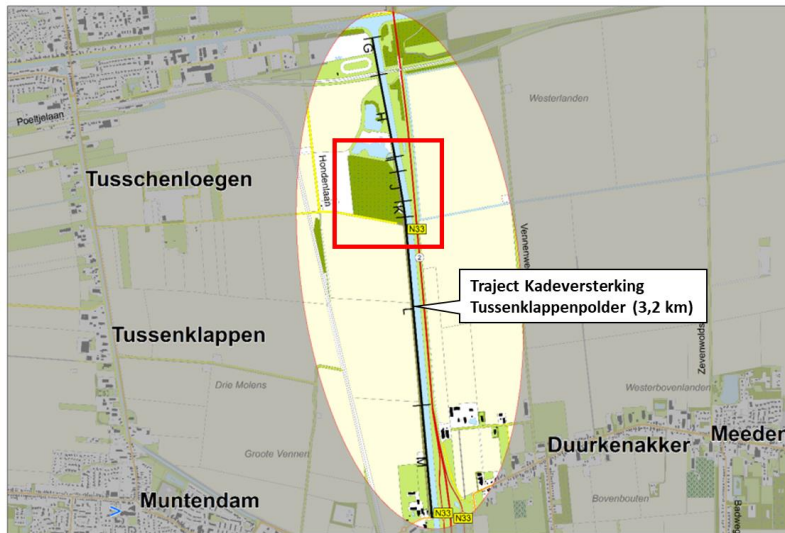
¹ - droog, niet corrosief aardgas

² - gebaseerd op dynamische berekening leidingkruising 20

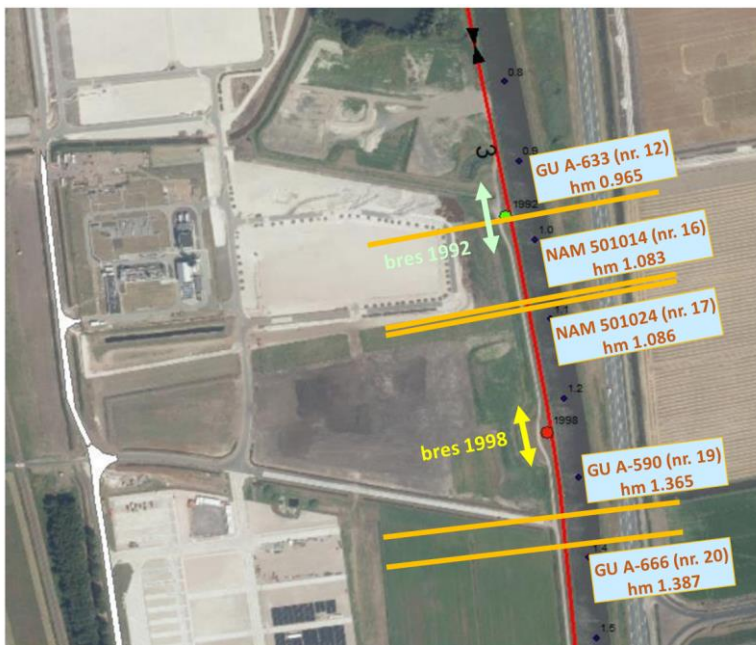
Tabel 1.1: Overzicht van de belangrijkste leidingkenmerken per kruising.

2. Situatie

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



Figuur 2.1: Situatie kadeversterkingstraject Tussenklappenpolder.



Figuur 1: Locatie dijkdoorbraken Tussenklappenpolder

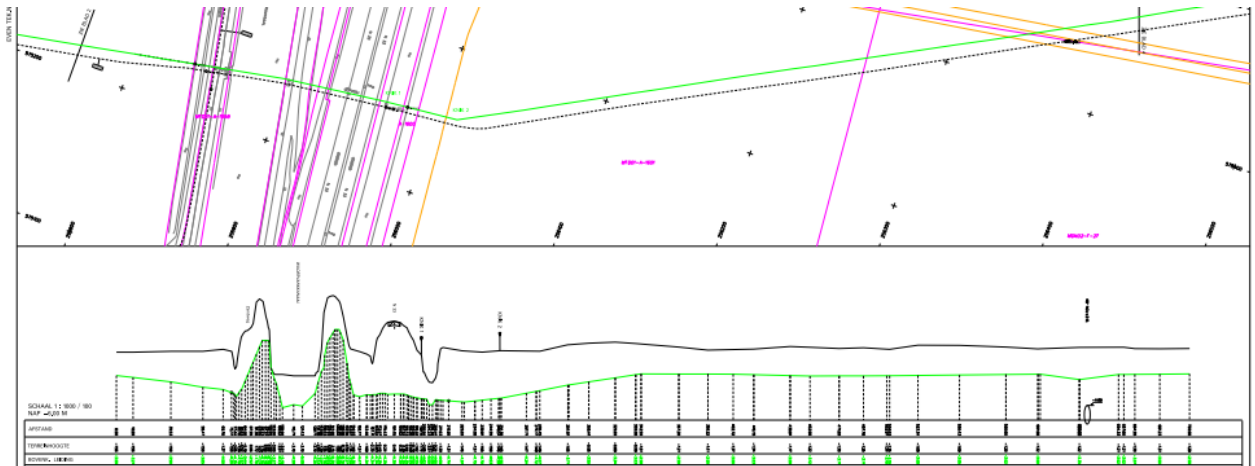
Figuur 2.2: Situatie te analyseren leidingkruisingen.

De leidingen kruisen de boezemkade onder het MHW, waarbij destijds geen kistdammen conform de eisen van de Pijpleidingcode en/of NEN 3651 zijn toegepast. De reden daarvan kon niet meer worden achterhaald.

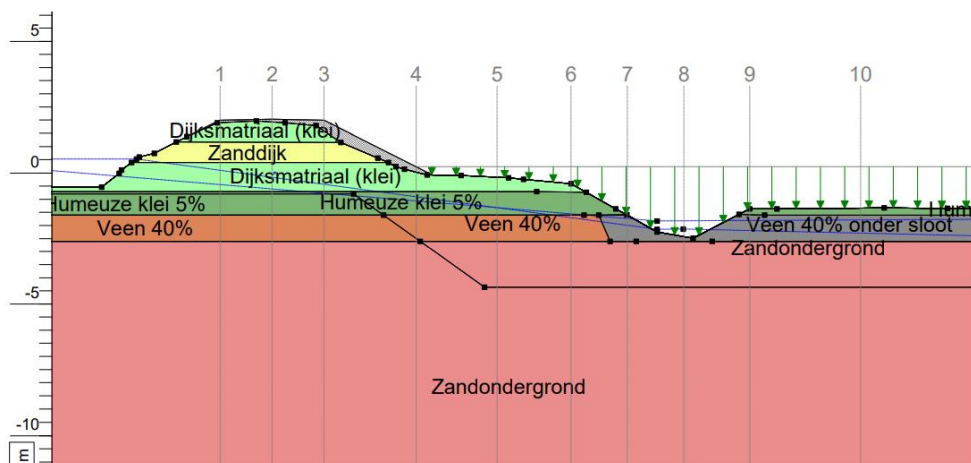
Hierna wordt een overzicht gegeven van de situatie, de dwarsprofielen en de bodemopbouw van deze leidingkruisingen.

3. Overzicht per leidingkruising

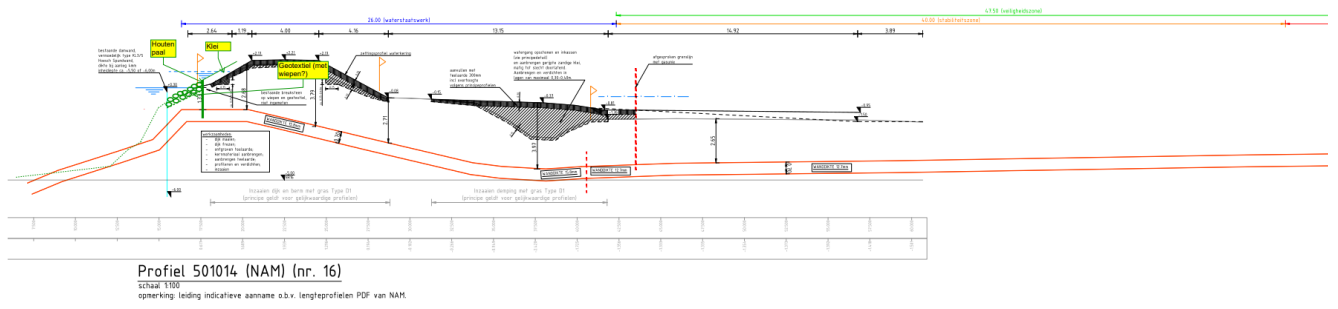
3.1 NAM 501014 (kruising nr. 16) en NAM 501024 (kruising nr. 17)



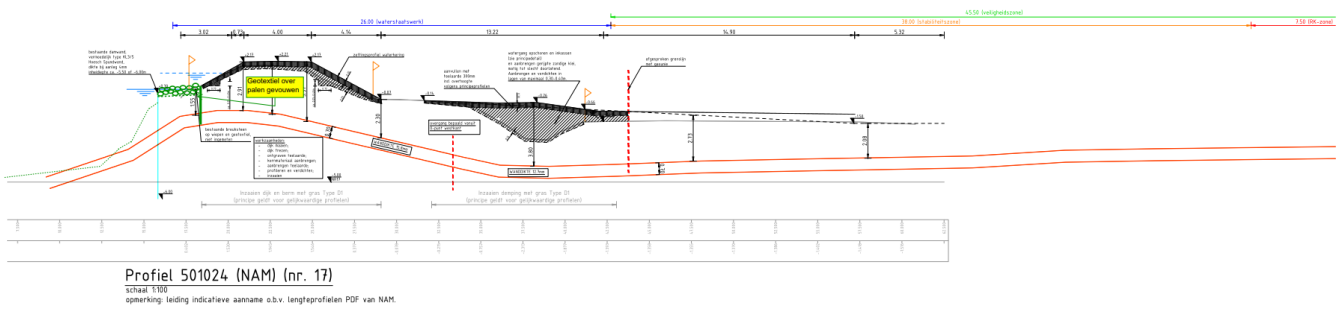
Figuur 3.1: Situatie NAM 501014 (kruising nr. 16) en NAM 501024 (kruising nr. 17).



Figuur 3.2: Bodempopbouw bij NAM 501014 (kruising nr. 16) en NAM 501024 (kruising nr. 17).

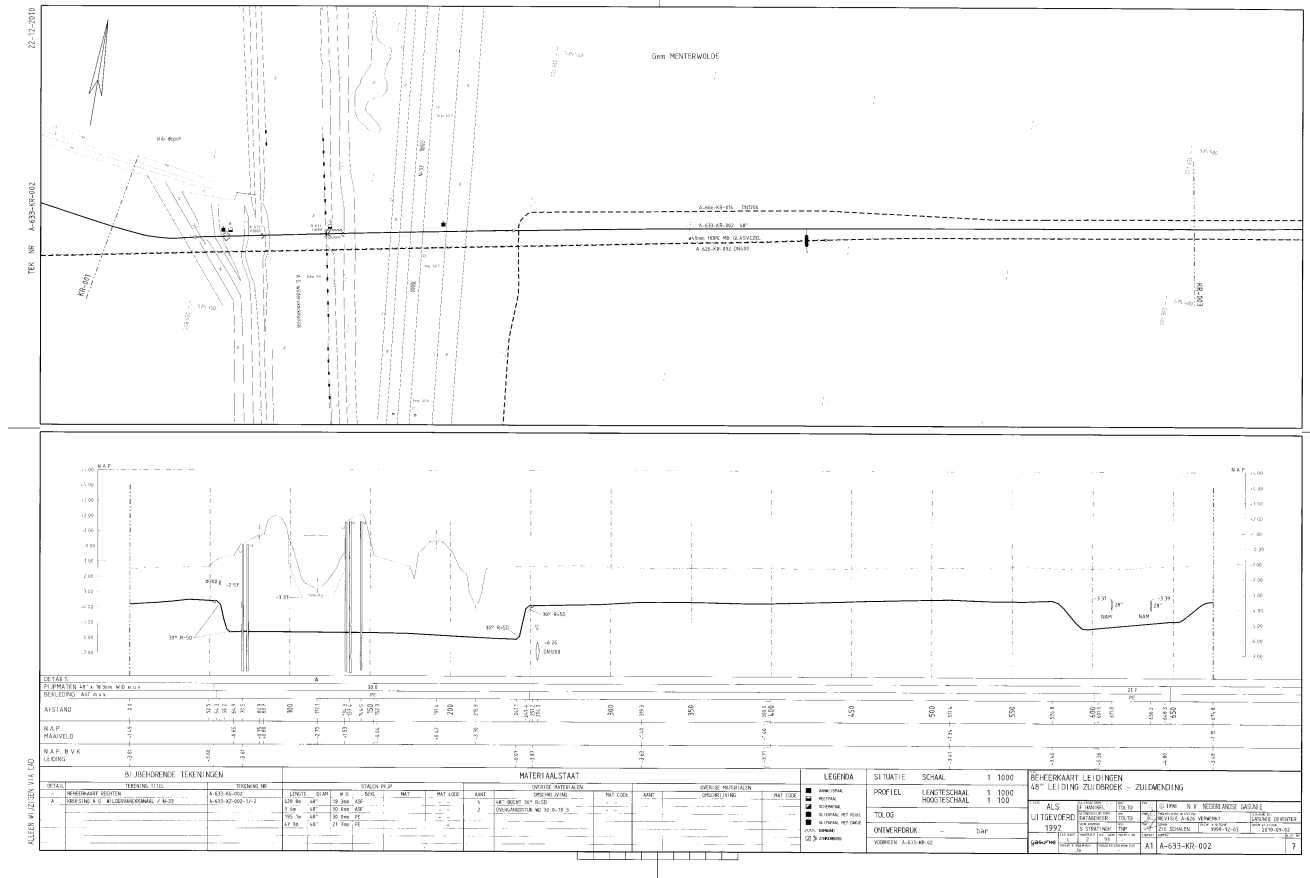


Figuur 3.3: Dwarsprofiel NAM 501014 (kruising nr. 16)

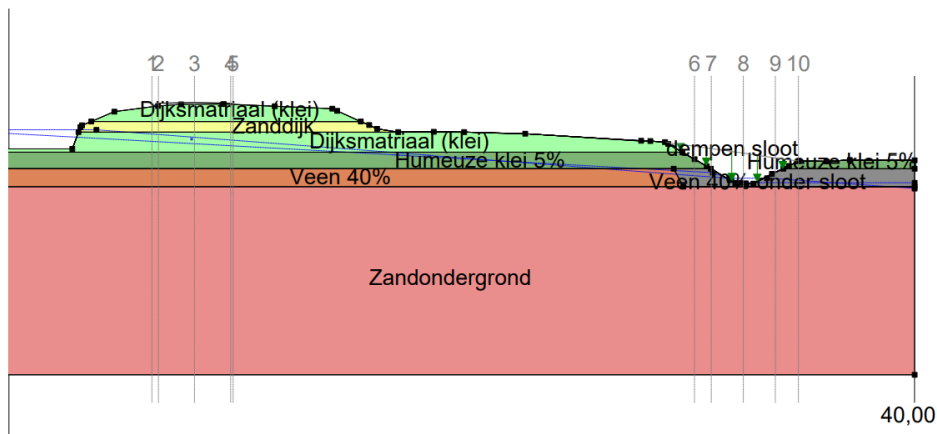


Figuur 3.4: Dwarsprofiel NAM 501024 (kruising nr. 17)

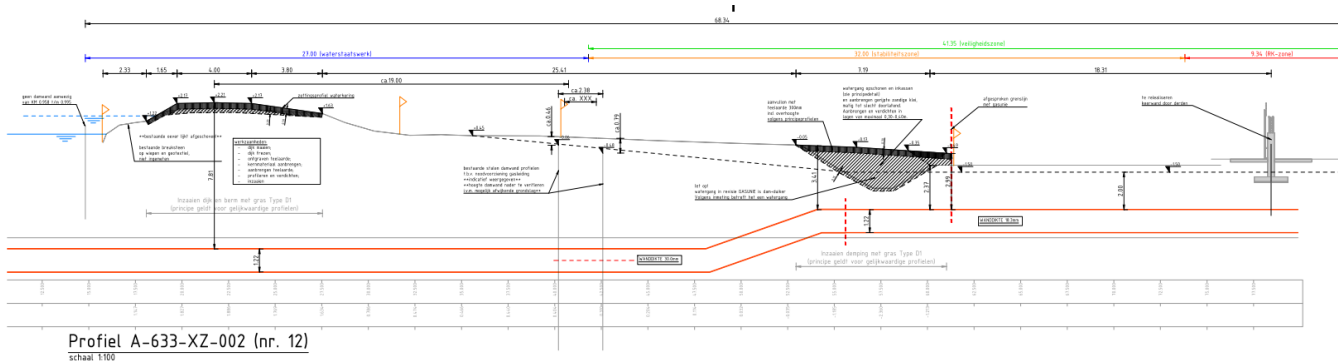
3.2 Gasunie A-633 (kruising nr. 12)



Figuur 3.5: Situatie en dwarsprofiel Gasunie A-633 (kruising nr. 12).

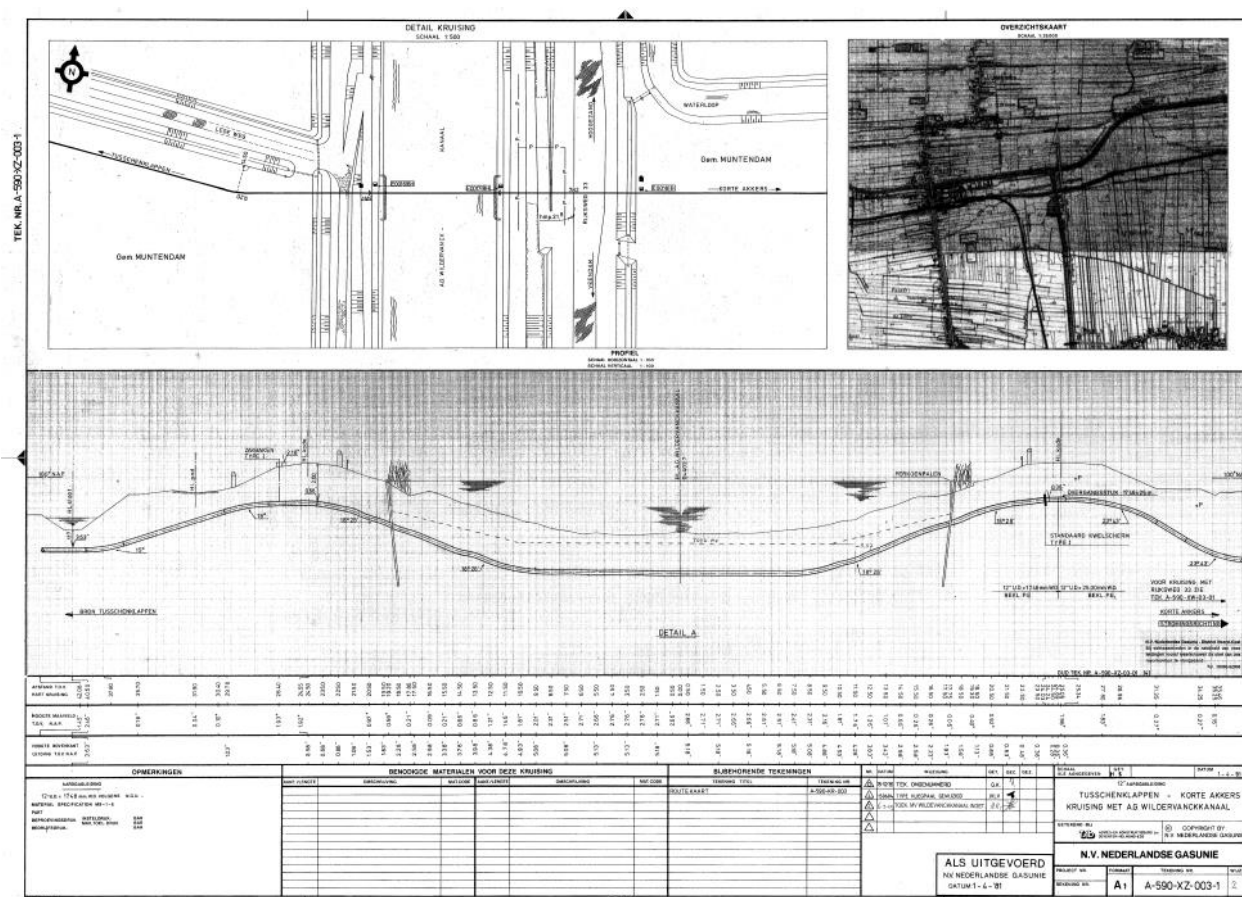


Figuur 3.6: Bodemopbouw bij Gasunie A-633 (kruising nr. 12).

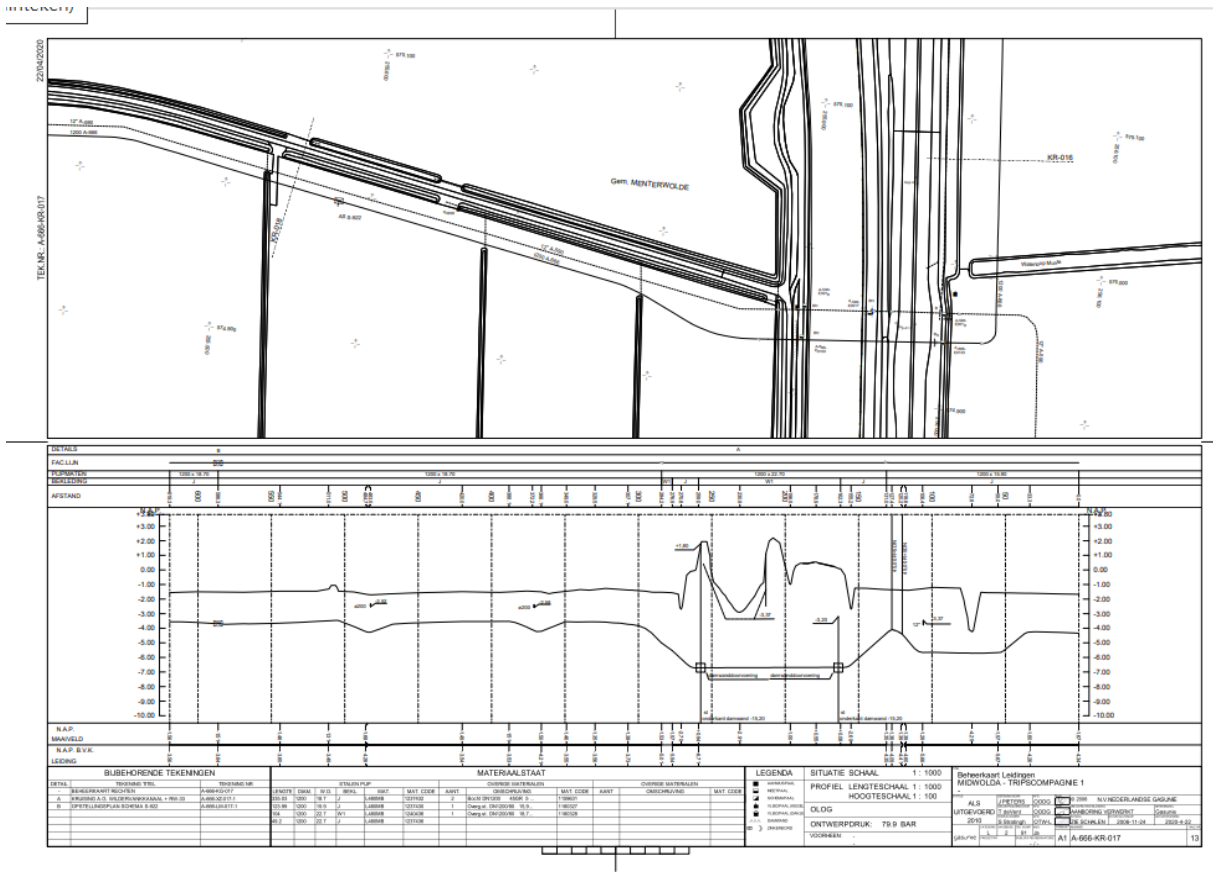


Figuur 3.7: Dwarsprofiel Gasunie A-633 (kruising nr. 12).

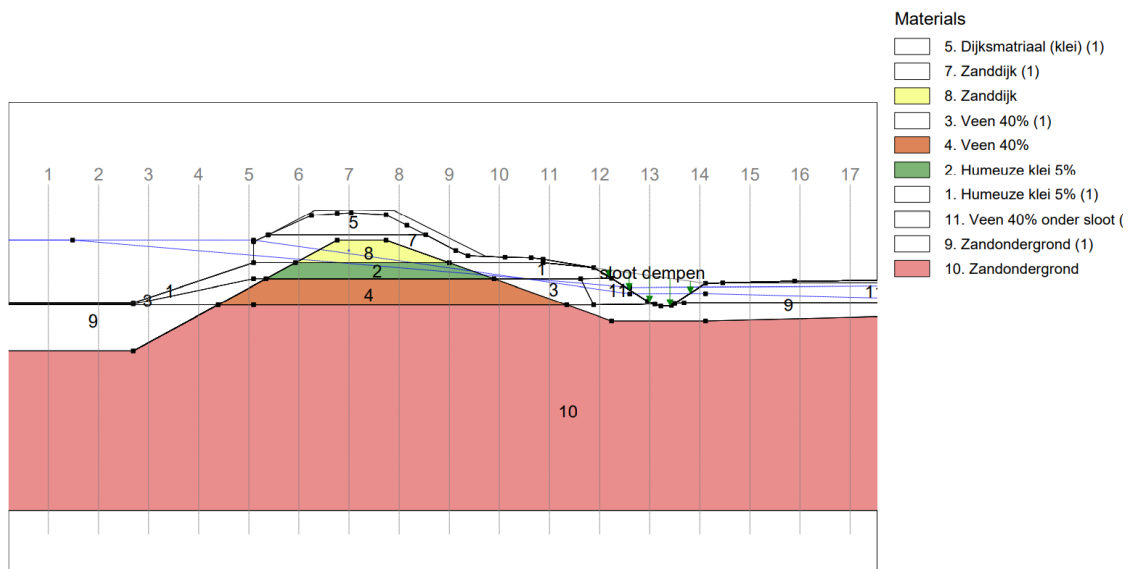
3.3 Gasunie A-590 (kruising nr. 19) en A-666 (kruising nr. 20).



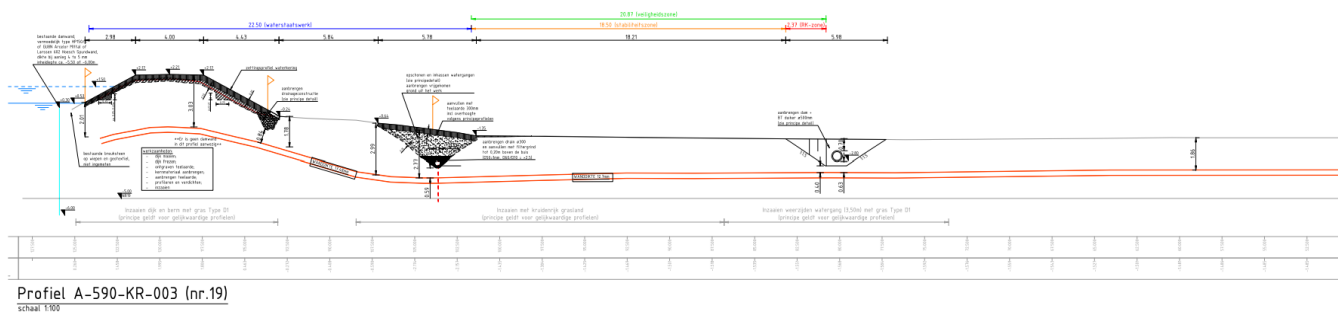
Figuur 3.8: Situatie en dwarsprofiel aanleg Gasunie A-590 (kruising nr. 19).



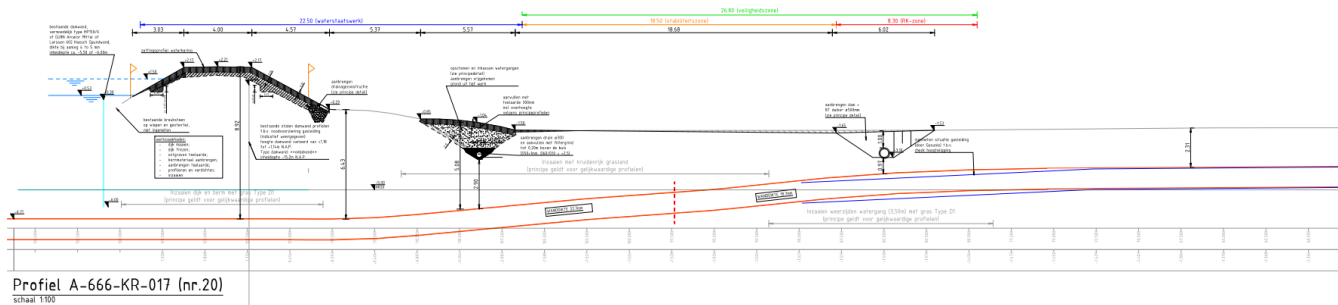
Figuur 3.9: Situatie en dwarsprofiel aanleg Gasunie A-666 (kruising nr. 20).



Figuur 3.10: Bodemopbouw bij Gasunie A-590 (kruising nr. 19) en A-666 (kruising nr. 20).



Figuur 3.11: Dwarsprofiel Gasunie A-590 (kruising nr. 19)



Figuur 3.12: Dwarsprofiel Gasunie A-666 (kruising nr. 20)

Bijlage 2

Toelichting faalkansanalyse bij stappenplan Tussenklappenpolder

Opgesteld door : Martin Nieuwjaar (Martin Nieuwjaar Advies)

Datum: 24 juli 2023 (definitief)

Onderwerp: Toelichting faalkansanalyse bij stappenplan Tussenklappenpolder
Opgesteld door: Martin Nieuwjaar
Datum: 10 mei 2023

1. Inleiding

In dit memo wordt toelichting gegeven over de wijze waarop de faalkansanalyse invulling heeft gekregen in het stappenplan dat bij Tussenklappenpolder is gebruikt. De inhoud van het memo vormt geen blauwdruk vooraf van de gewenste invulling, maar een weergave achteraf van de gehanteerde invulling.

Het belangrijkste doel van dit memo is om inzichtelijk te maken:

1. Welke keuzes zijn gemaakt bij het afleiden van de vereiste en aanwezige faalkans van de waterkering met leidingkruising (het leidinggedeelte ter plaatse van de kruising met de waterkering).
2. Welke vereenvoudigingen bij stap 1 en stap 2 van het stappenplan zijn toegepast om op verantwoorde wijze te komen tot een invulling.

De formules die ten grondslag liggen aan de gebruikte faalkansanalyse worden behandeld. Om zo goed mogelijk invulling te kunnen geven aan het geschetste doel, is gekozen om steeds ook de gemaakte tussenstappen te presenteren die zijn gemaakt bij het afleiden van de formules.

In hoofdstuk 2 wordt toegelicht welk veiligheids criterium wordt gehanteerd voor de waterkering met leidingkruising. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen de aanwezige faalkans en de vereiste faalkans. De bepaling van de vereiste faalkans vormt het onderwerp van hoofdstuk 3, terwijl de bepaling van de aanwezige faalkans aan de orde komt in hoofdstuk 4. In hoofdstuk 5 wordt toegelicht welke keuzen zijn gemaakt bij de invulling van de verschillende stappen van het stappenplan dat bij Tussenklappenpolder is gebruikt. Hoofdstuk 6 geeft de essentie weer van de invulling van de faalkansanalyse in het stappenplan. Het memo wordt afgesloten met een overzicht van relevante literatuur.

2. Veiligheids criterium waterkering met leidingkruising

Bij de innovatieve rekenmethodiek wordt op een vereenvoudigde wijze een verbinding gelegd tussen leidingfalen en waterkeringfalen. De innovatieve rekenmethodiek bouwt voort op de gevolgde aanpak bij de praktijkcasus Steendam-Tjuchem (Waterschap Hunze en Aa's, 2022) en op de systematiek van het Veiligheidsraamwerk POV K&L (Project Overstijgende Verkenning Kabels & Leidingen, 2020).

In lijn met eerdere toepassingen bij primaire waterkeringen, vindt de faalkansanalyse voor regionale waterkeringen plaats op doorsnedeniveau van de waterkering. Daarbij geldt als veiligheids criterium:

$$P_{\text{aanw, additioneel}}(\text{falen waterkering a.g.v. falen leiding}) \leq P_{\text{vereist}}(\text{falen waterkering a.g.v. falen leiding}) \quad (1)$$

met:

$P_{aanw, additioneel}$ (falen waterkering a.g.v. falen leiding)	= aanwezige kans op falen aangetast profiel doorsnede waterkering als gevolg van falen leidingkruising	[1/jaar]
$P_{vereist}$ (falen waterkering a.g.v. falen leiding)	= maximaal toelaatbare kans op falen doorsnede waterkering als gevolg van falen leidingkruising	[1/jaar]

3. Vereiste faalkans waterkering met leidingkruising

Bij de toepassing van de innovatieve rekenmethodiek bij Tussenklappenpolder is de vigerende veiligheidsbenadering voor de regionale waterkeringen als uitgangspunt gehanteerd.

De vigerende veiligheidsbenadering voor de regionale waterkeringen is de 'overschrijdingskansbenadering per dijkvak' (Van der Meer & Stoop, 1995; Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, 2015); destijds ook wel aangeduid als de 'overbelastingsbenadering per dijkvak'. Dit omdat destijds bij de afleiding van de veiligheidsbenadering voor regionale waterkeringen aansluiting werd gezocht met de toen vigerende veiligheidsbenadering voor primaire waterkeringen (Van der Meer & Stoop, 1995; Nieuwjaar, 2020).

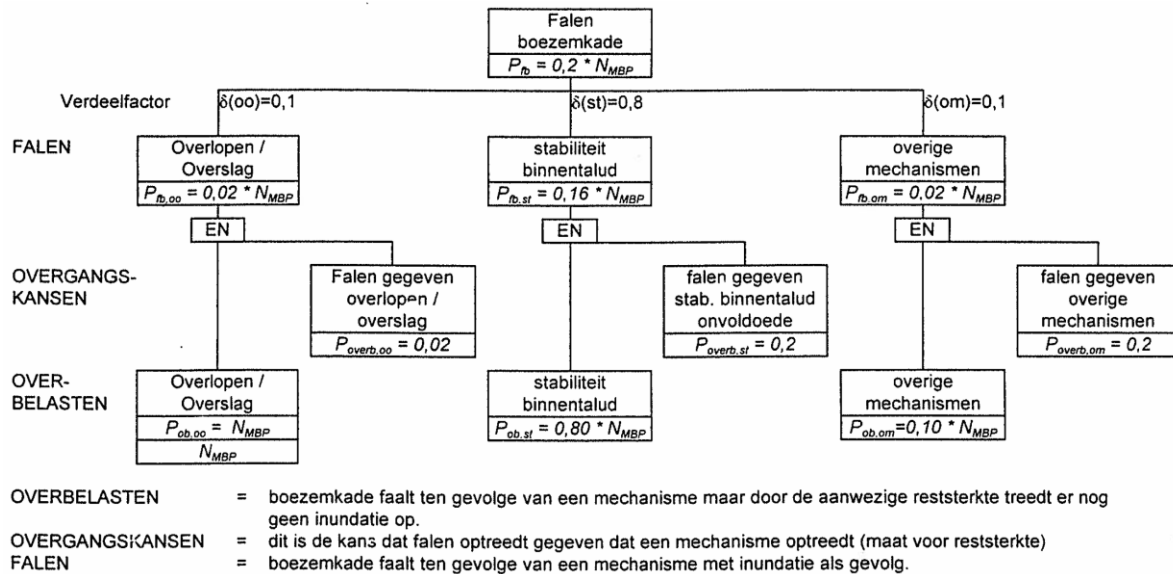
Een dijkvak is bij de vigerende veiligheidsbenadering een deel van een waterkering met min of meer gelijke sterkte-eigenschappen en belasting (Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 1998). Of, in statistische termen: een dijkvak is een deel van een waterkering waarbinnen de belasting en de sterkte statistisch homogeen zijn: de kansverdelingen van de belasting en de sterkte zijn binnen de dijkvak overal hetzelfde. Desondanks is de sterkte niet voor iedere doorsnede binnen een dijkvak gelijk: er zijn doorsneden die sterker zijn dan het gemiddelde van het dijkvak en doorsneden die zwakker zijn dan het gemiddelde van het dijkvak. Kortom, er is sprake van ruimtelijke spreiding in langrichting: het lengte-effect binnen een dijkvak.

Bij het afleiden van de normering voor regionale waterkeringen is het lengte-effect binnen een dijkvak buiten beschouwing gelaten (Van der Meer et al., 1999). Dit betekent dat er praktisch gezien sprake is van een 'overschrijdingskansbenadering voor een doorsnede in een dijkvak', of korter: een 'overschrijdingskansbenadering per doorsnede'. Bij de toetsing op veiligheid wordt veelal een relatief ongunstige doorsnede gebruikt, al dan niet in combinatie met een eveneens ongunstige ondergrondopbouw.

Om te komen van de genormeerde 'overschrijdingskansbenadering per doorsnede' naar de volgens vergelijking (1) benodigde maximaal toelaatbare kans op falen per doorsnede is nog een vertaalslag nodig. De overschrijdingskansbenadering richt zich namelijk op de gebeurtenis 'overbelasten'. Bij overbelasten is de optredende belasting groter dan de *rekenwaarde* van de sterkte (Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 1994). Veelal werd de rekenwaarde van de sterkte uitgedrukt in een toelaatbare belasting. Een voorbeeld hiervan is het 2%-golfoploopcriterium voor het faalmechanisme overlopen/overslag.

Bij overbelasten hoeft nog geen falen op te treden: de aanwezige sterkte kán groter zijn dan de gehanteerde rekenwaarde van de sterkte. In het gegeven voorbeeld is het binnentalud misschien toevallig sterk genoeg om meer golfoverslag te weerstaan dan hoort bij het 2%-golfoploopcriterium. Van falen is pas sprake als de optredende belasting groter is dan de *aanwezige* sterkte, met overstroming als (mogelijk) gevolg.

Bij het afleiden van de normering voor regionale waterkeringen (boezemkaden) is een relatie afgeleid tussen overbelasten en falen (Van der Meer et al., 1999). Deze wordt weergegeven in Figuur 1.



Figuur 1: Relatie tussen overbelasten en falen voor boezemkaden

In Figuur 1 zijn de waarden van de overgangskansen tussen overbelasten en falen en de waarden van de verdeelfactoren (waarmee eisen worden opgelegd aan de vereiste faalkans voor ieder faalmechanisme) gekozen op basis van het principe van 'geen trendbreuk' (Van der Meer et al., 1999; Nieuwjaar, 2020). Referentie hierbij waren de eisen uit het systematisch kade-onderzoek, dat in de periode 1969 tot en met 1992 in opdracht van de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen werd uitgevoerd.

Uit Figuur 1 blijkt:

$$P_{vereist}(\text{falen waterkering}) = 0,2 * OSF_{MHW} \quad (2)$$

met:

$$P_{vereist}(\text{falen waterkering}) = \text{maximaal toelaatbare kans op falen doorsnede waterkering} \quad [1/\text{jaar}]$$

$$OSF_{MHW} = \text{overschrijdingsfrequentie maatgevende waterstand} \quad [1/\text{jaar}]$$

En verder blijkt uit Figuur 1 dat 10% van de totale faalkansruimte is gereserveerd voor falen als gevolg van optreden overige mechanismen:

$$P_{vereist}(\text{falen waterkering a.g.v. overige mechanismen}) = 0,1 * P_{vereist}(\text{falen waterkering}) \quad (3)$$

met:

$$P_{vereist}(\text{falen waterkering a.g.v. overige mechanismen}) = \text{maximaal toelaatbare kans op falen doorsnede waterkering als gevolg van optreden overige mechanismen} \quad [1/\text{jaar}]$$

Invullen van vergelijking (3) in vergelijking (2) geeft:

$$P_{\text{vereist}}(\text{falen waterkering a.g.v. overige mechanismen}) = 0,02 * OSF_{\text{MHW}} \quad (4)$$

Dit resultaat is weer terug te vinden in Figuur 1.

Het is belangrijk om te realiseren dat de normen voor regionale waterkeringen zogenaamde toetsnormen betreffen. Dit vloeit voort uit het eerder gehanteerde principe van ‘geen trendbreuk’. In 1999 zijn ook ontwerpnormen geïntroduceerd (Van der Meer et al., 1999; Nieuwjaar, 2020), bedoeld voor het dimensioneren van de versterking van een afgekeurde boezemkade. De ontwerpnorm moest daarbij worden gebaseerd op een economische optimalisatie. Aan het hanteren van ontwerpnormen is in de latere provinciale regelgeving geen status toegekend. Over het algemeen zijn de ontwerpen wezenlijk strenger dan de wel in de provinciale regelgeving vastgelegde toetsnormen.

Met dit vertrekpunt voor ogen, is gekeken hoe de innovatieve rekenmethodiek kan worden toegepast bij de veiligheidsbeschouwing van de aanwezige leidingkruisingen in de kadeversterking van de Tussenklappenpolder. Daarbij is gekozen om de aanpak te volgen die is gerapporteerd in het Veiligheidsraamwerk POV K&L (Project Overstijgende Verkenning Kabels & Leidingen, 2020). Waterkeringfalen als gevolg van leidingfalen wordt binnen deze aanpak beschouwd als een faalmechanisme dat direct tot overstroming kan leiden (Optie 1: Falen NWO als direct faalmechanisme). Omdat de aanpak volgens het Veiligheidsraamwerk POV K&L oorspronkelijk is ontwikkeld voor toepassing op primaire waterkeringen vraagt deze onder andere om het bepalen van het normtraject (het deel van de waterkering waarbinnen het overstromingspatroon en de gevolgen van een overstroming voor mogelijke doorbraaklocaties vergelijkbaar zijn) en van de getalswaarden voor de toelaatbare faalkanseis van het normtraject en de faalkanseis voor waterkeringfalen als gevolg van leidingfalen. Binnen de vigerende veiligheidsbenadering voor regionale waterkeringen is deze informatie niet direct beschikbaar. Voor toepassing bij Tussenklappenpolder zijn de volgende keuzen gemaakt:

1. Bij gebrek aan beschikbare overstromingsberekeningen, is voor het normtraject uitgegaan van de waterkering die direct boezemwater keert. Daarna is geïnventariseerd hoeveel equivalente leidingkruisingen zich binnen dit normtraject bevinden. Dit is het aantal leidingkruisingen binnen het normtraject met een naar verwachting significante en evenwaardige bijdrage aan de aanwezige faalkans van de waterkering.
2. De maximaal toelaatbare kans op falen binnen het normtraject is gelijk gesteld aan de maximaal toelaatbare kans op falen van een doorsnede binnen een dijkvak van een regionale waterkering. Daarmee is een strenge eis geformuleerd, omdat de kans op falen binnen het normtraject in werkelijkheid (vanwege het lengte-effect) groter mag zijn dan de kans op falen van een doorsnede binnen een dijkvak.
3. De maximaal toelaatbare kans op falen binnen het normtraject als gevolg van leidingfalen is gelijk gesteld aan 1% van de maximaal toelaatbare kans op falen binnen het normtraject.
4. Bij het bepalen van de maximaal toelaatbare kans op falen op doorsnedeniveau als gevolg van leidingfalen is de maximaal toelaatbare kans op falen binnen het normtraject als gevolg van leidingfalen gedeeld door het equivalent aantal leidingkruisingen binnen het normtraject, onder de aanname dat deze leidingkruisingen onafhankelijk zijn.

In formulevorm ziet keuze 2 er als volgt uit:

$$P_{\text{vereist-traject}}(\text{falen waterkering}) = P_{\text{vereist}}(\text{falen waterkering}) \quad (5)$$

met:

$$P_{\text{vereist-traject}}(\text{falen waterkering}) = \text{maximaal toelaatbare kans op falen binnen normtraject waterkering} \quad [1/\text{jaar}]$$

Voor keuze 3 geldt:

$$P_{\text{vereist-traject}}(\text{falen waterkering a.g.v. falen leiding}) = 0,01 * P_{\text{vereist-traject}}(\text{falen waterkering}) \quad (6)$$

met:

$$P_{\text{vereist-traject}}(\text{falen waterkering a.g.v. falen leiding}) = \text{maximaal toelaatbare kans op falen binnen normtraject waterkering als gevolg van falen leidingkruising} \quad [1/\text{jaar}]$$

En keuze 4 levert:

$$P_{\text{vereist}}(\text{falen waterkering a.g.v. falen leiding}) = P_{\text{vereist-traject}}(\text{falen waterkering a.g.v. falen leiding})/N_{\text{EQ}} \quad (7)$$

met:

$$P_{\text{vereist}}(\text{falen waterkering a.g.v. falen leiding}) = \text{maximaal toelaatbare kans op falen doorsnede waterkering als gevolg van falen leidingkruising} \quad [1/\text{jaar}]$$
$$N_{\text{EQ}} = \text{equivalent aantal leidingkruisingen} \quad [-]$$

Invullen van vergelijking (2) in vergelijking (5) geeft:

$$P_{\text{vereist-traject}}(\text{falen waterkering}) = 0,2 * OSF_{\text{MHW}} \quad (8)$$

Invullen van vergelijking (8) in vergelijking (6) geeft:

$$P_{\text{vereist-traject}}(\text{falen waterkering a.g.v. falen leiding}) = 0,002 * OSF_{\text{MHW}} \quad (9)$$

Invullen van vergelijking (9) in vergelijking (7) geeft:

$$P_{\text{vereist}}(\text{falen waterkering a.g.v. falen leiding}) = 0,002 * OSF_{\text{MHW}}/N_{\text{EQ}} \quad (10)$$

Vergelijking van vergelijking (4) met vergelijking (10) levert:

$$P_{\text{vereist}}(\text{falen waterkering a.g.v. falen leiding}) = [0,1/N_{\text{EQ}}] * P_{\text{vereist}}(\text{falen waterkering a.g.v. overige mechanismen}) \quad (11)$$

Vergelijking (11) laat zien dat, als resultaat van de gemaakte keuzen, slechts een klein deel van de voor overige mechanismen beschikbare faalkansruimte wordt gebruikt voor leidingfalen. Als equivalent aantal leidingkruisingen N_{EQ} bijvoorbeeld 10 bedraagt, dan betekent dit:

$$P_{\text{vereist}}(\text{falen waterkering a.g.v. falen leiding}) = 0,01 * P_{\text{vereist}}(\text{falen waterkering a.g.v. overige mechanismen})$$

In combinatie met vergelijking (3) betekent dit ook:

$$P_{\text{vereist}}(\text{falen waterkering a.g.v. falen leiding}) = 0,001 * P_{\text{vereist}}(\text{falen waterkering})$$

Dit illustreert dat de gemaakte keuzen resulteren in een strenge eis op doorsnedeniveau voor waterkeringsfalen als gevolg van leidingfalen.

4. Aanwezige faalkans waterkering met leidingkruising

Er geldt:

$$P_{\text{aanw}}(\text{falen waterkering a.g.v. falen leiding}) = P_{\text{aanw}}(\text{falen leiding}) * P_{\text{aanw}}(\text{falen waterkering | falen leiding}) \quad (12)$$

met:

$$P_{\text{aanw}}(\text{falen waterkering a.g.v. falen leiding}) = \text{aanwezige kans op falen doorsnede waterkering als gevolg van falen leidingkruising} \quad [1/\text{jaar}]$$

$$P_{\text{aanw}}(\text{falen leiding}) = \text{aanwezige kans op falen leidingkruising} \quad [1/\text{jaar}]$$

$$P_{\text{aanw}}(\text{falen waterkering | falen leiding}) = \text{aanwezige kans op falen doorsnede waterkering gegeven falen leidingkruising} \quad [-]$$

De kans op falen van de niet-aangetaste waterkering wordt beschouwd als onderdeel van een reguliere veiligheidsbeschouwing. De hier behandelde faalkansanalyse beschouwt specifiek de kans op falen van een waterkering als gevolg van falen van een leidingkruising. Daarbij leidt falen van een leidingkruising tot aantasting van de waterkering. De verdere uitwerking richt zich daarom op de kans op falen van de aangetaste waterkering (als gevolg van falen van een leidingkruising). Dit wordt zichtbaar gemaakt door het toevoegen van de index 'additioneel'.

Doorvoeren in vergelijking (12) levert:

$$P_{\text{aanw, additioneel}}(\text{falen waterkering a.g.v. falen leiding}) = P_{\text{aanw}}(\text{falen leiding}) * P_{\text{aanw}}(\text{falen aangetaste waterkering | falen leiding}) \quad (13)$$

met:

$$P_{\text{aanw, additioneel}}(\text{falen waterkering a.g.v. falen leiding}) = \text{aanwezige kans op falen aangetast profiel doorsnede waterkering als gevolg van falen leidingkruising} \quad [1/\text{jaar}]$$

$$P_{\text{aanw}}(\text{falen aangetaste waterkering | falen leiding}) = \text{aanwezige kans op falen aangetast profiel doorsnede waterkering gegeven falen leidingkruising} \quad [-]$$

Verder geldt:

$$P_{\text{aanw}}(\text{falen aangetaste waterkering | falen leiding}) = P(\text{geen herstel vóór MHW | falen leiding}) * P_{\text{aanw}}(\text{falen aangetaste waterkering | falen leiding, geen herstel}) \quad (14)$$

met:

$$\begin{aligned} &P(\text{geen herstel vóór MHW} \mid \text{falen leiding}) \\ &= \text{kans dat aangetast profiel doorsnede} \\ &\quad \text{waterkering niet is hersteld vóór} \\ &\quad \text{optreden van relevante hydraulische} \\ &\quad \text{belasting gegeven falen} \\ &\quad \text{leidingkruising} \quad [-] \\ &P_{\text{aanw}}(\text{falen aangetaste waterkering} \mid \text{falen leiding, geen herstel}) \\ &= \text{aanwezige kans op falen aangetast} \\ &\quad \text{profiel doorsnede waterkering bij} \\ &\quad \text{optreden van relevante hydraulische} \\ &\quad \text{belasting gegeven falen leidingkruising} \\ &\quad \text{èn geen tijdig herstel} \quad [-] \end{aligned}$$

Invullen van vergelijking (14) in vergelijking (13) geeft:

$$\begin{aligned} &P_{\text{aanw, additioneel}}(\text{falen waterkering a.g.v. falen leiding}) \\ &= P_{\text{aanw}}(\text{falen leiding}) * P(\text{geen herstel vóór MHW} \mid \text{falen leiding}) \\ &* P_{\text{aanw}}(\text{falen aangetaste waterkering} \mid \text{falen leiding, geen herstel}) \quad (15) \end{aligned}$$

Aangenomen is verder dat na falen van een leidingkruising uitsluitend falen van de aangetaste waterkering zal kunnen ontstaan door de dijkfaalmechanismen overlopen/overslag, macro-instabiliteit of piping. Ook is aangenomen dat deze dijkfaalmechanismen elkaar uitsluiten. Met deze twee aannamen kan vergelijking (15) worden geschreven als:

$$\begin{aligned} &P_{\text{aanw, additioneel}}(\text{falen waterkering a.g.v. falen leiding}) \\ &= P_{\text{aanw}}(\text{falen leiding}) * P(\text{geen herstel vóór MHW} \mid \text{falen leiding}) \\ &* \{P_{\text{aanw}}(\text{falen aangetaste waterkering door overlopen} \mid \text{falen leiding, geen herstel}) \\ &+ P_{\text{aanw}}(\text{falen aangetaste waterkering door macro} \mid \text{falen leiding, geen herstel}) \\ &+ P_{\text{aanw}}(\text{falen aangetaste waterkering door piping} \mid \text{falen leiding, geen herstel})\} \quad (16) \end{aligned}$$

met:

$$\begin{aligned} &P_{\text{aanw}}(\text{falen aangetaste waterkering door overlopen} \mid \text{falen leiding, geen herstel}) \\ &= \text{aanwezige kans op falen aangetast} \\ &\quad \text{profiel doorsnede waterkering door} \\ &\quad \text{overlopen/overslag gegeven falen} \\ &\quad \text{leidingkruising èn geen tijdig herstel} \quad [-] \\ &P_{\text{aanw}}(\text{falen aangetaste waterkering door macro} \mid \text{falen leiding, geen herstel}) \\ &= \text{aanwezige kans op falen aangetast} \\ &\quad \text{profiel doorsnede waterkering door} \\ &\quad \text{macro-instabiliteit gegeven falen} \\ &\quad \text{leidingkruising èn geen tijdig herstel} \quad [-] \\ &P_{\text{aanw}}(\text{falen aangetaste waterkering door piping} \mid \text{falen leiding, geen herstel}) \\ &= \text{aanwezige kans op falen aangetast} \\ &\quad \text{profiel doorsnede waterkering door} \\ &\quad \text{piping gegeven falen} \\ &\quad \text{leidingkruising èn geen tijdig herstel} \quad [-] \end{aligned}$$

De opbouw van vergelijking (16) is terug te zien in de in *Bijlage 8: Faalpaden en gebeurtenissenbomen* opgenomen gebeurtenissenbomen.

5. Invulling faalkansanalyse in het stappenplan

5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt toegelicht hoe de faalkansanalyse is ingevuld als onderdeel van de drie stappen van het stappenplan. Daarbij wordt inzichtelijk gemaakt welke vereenvoudigingen zijn toegepast. Achtereenvolgens komen aan de orde: stap 1 (paragraaf 5.2), stap 2 (paragraaf 5.3) en stap 3 (paragraaf 5.4).

5.2 Invulling faalkansanalyse bij stap 1

Bij stap 1 is gesteld:

$$P_{aanw}(\text{falen leiding}) = 1 \quad (17)$$

$$P(\text{geen herstel vóór MHW} \mid \text{falen leiding}) = 1 \quad (18)$$

Invullen van vergelijking (17) en vergelijking (18) in vergelijking (16) geeft:

$$\begin{aligned} & P_{aanw, \text{ additioneel}}(\text{falen waterkering a.g.v. falen leiding}) \\ & = 1 * 1 \\ & * \{P_{aanw}(\text{falen aangetaste waterkering door overlopen} \mid \text{falen leiding, geen herstel}) \\ & + P_{aanw}(\text{falen aangetaste waterkering door macro} \mid \text{falen leiding, geen herstel}) \\ & + P_{aanw}(\text{falen aangetaste waterkering door piping} \mid \text{falen leiding, geen herstel})\} \end{aligned} \quad (19)$$

Invullen van vergelijking (19) in vergelijking (1) geeft als veiligheids criterium:

$$\begin{aligned} & P_{aanw}(\text{falen aangetaste waterkering door overlopen} \mid \text{falen leiding, geen herstel}) \\ & + P_{aanw}(\text{falen aangetaste waterkering door macro} \mid \text{falen leiding, geen herstel}) \\ & + P_{aanw}(\text{falen aangetaste waterkering door piping} \mid \text{falen leiding, geen herstel}) \\ & \leq P_{vereist}(\text{falen waterkering a.g.v. falen leiding}) \end{aligned} \quad (20)$$

Bij stap 1 is bij de toepassing geen faalkansanalyse gehanteerd, maar zijn de als gevolg van falen van de leidingkruising aangetaste dijkdoorsnede waterkering per dijkfaalmechanisme met deterministische rekenregels getoetst aan de vigerende veiligheidseisen voor regionale waterkeringen.

5.3 Invulling faalkansanalyse bij stap 2

Bij stap 2 is gesteld:

$$P_{aanw}(\text{falen aangetaste waterkering} \mid \text{falen leiding}) = 1 \quad (21)$$

Invullen van vergelijking (21) in vergelijking (13) geeft:

$$\begin{aligned} & P_{aanw, \text{ additioneel}}(\text{falen waterkering a.g.v. falen leiding}) \\ & = P_{aanw}(\text{falen leiding}) * 1 \end{aligned} \quad (22)$$

Invullen van vergelijking (22) in vergelijking (1) geeft als veiligheids criterium:

$$P_{aanw}(\text{falen leiding}) \leq P_{vereist}(\text{falen waterkering a.g.v. falen leiding}) \quad (23)$$

5.4 Invulling faalkansanalyse bij stap 3

Invullen van vergelijking (16) in vergelijking (1) geeft als veiligheids criterium:

$$\begin{aligned} & P_{aanw}(\text{falen leiding}) * P(\text{geen herstel vóór MHW} \mid \text{falen leiding}) \\ & * \{P_{aanw}(\text{falen aangetaste waterkering door overlopen} \mid \text{falen leiding, geen herstel}) \\ & + P_{aanw}(\text{falen aangetaste waterkering door macro} \mid \text{falen leiding, geen herstel}) \\ & + P_{aanw}(\text{falen aangetaste waterkering door piping} \mid \text{falen leiding, geen herstel})\} \\ & \leq P_{vereist}(\text{falen waterkering a.g.v. falen leiding}) \end{aligned} \quad (24)$$

6. Essentie invulling faalkansanalyse in het stappenplan

Bij stap 1 richt de aandacht zich uitsluitend op de beoordeling van de als gevolg van leidingfalen aangetaste waterkering. Daarmee wordt een conservatieve benadering gevolgd:

- Leidingfalen wordt als een gegeven wordt beschouwd, terwijl deze kans in werkelijkheid veel kleiner dan 1 is.
- Er wordt aangenomen dat er geen kans is op tijdig herstel van de als gevolg van leidingfalen aangetaste waterkering.

Bij de toepassing van stap1 wordt geen faalkansanalyse toegepast, maar wordt de als gevolg van leidingfalen aangetaste waterkering per dijkfaalmechanisme met deterministische rekenregels getoetst aan de vigerende veiligheidseisen voor regionale waterkeringen.

Bij stap 2 richt de aandacht zich uitsluitend op de kans op leidingfalen. Daarmee wordt een conservatieve benadering gevolgd, omdat wordt aangenomen dat leidingfalen altijd zal leiden tot falen van de waterkering.

Bij stap 3 wordt een integrale faalkansanalyse toegepast, waarbij invulling wordt gegeven aan het proces van leidingfalen naar falen van de waterkering, inclusief de mogelijkheid van tussentijds herstel.

Literatuur

Nieuwjaar, M.W.C. (2020). *De veiligheidsbenadering regionale keringen: Ontstaan, achtergronden en toepassing van de huidige veiligheidsbenadering voor regionale waterkeringen*. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer.

Project Overstijgende Verkenning Kabels & Leidingen (2020). *Veiligheidsraamwerk POV K&L: Toepassing in de praktijk*.

Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (2015). *Leidraad Toetsen op Veiligheid Regionale waterkeringen: Module A: Algemeen gedeelte*. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer.

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (1994). *Marsroute veiligheidsbenadering*.

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (1998). *Grondslagen voor waterkeren*.

Van der Meer, M.T. & Stoop, J.D (1995). *Rapport betreffende Methodiek voor de bepaling van het vereiste veiligheidsniveau van boezemkaden: Fase 2*. Provincie Zuid-Holland.

Van der Meer, M.T., Stoop, J.D. & Eerkens, J.W. (1999). *IPO-richtlijn ter bepaling van het veiligheidsniveau van boezemkaden*. Interprovinciaal Overleg.

Waterschap Hunze en Aa's (2022). *Interim methodiek leidingfalen en dijksfalen: Integrale faalkansanalyse kruisingen gastransportleidingen met kistdam in kadeversterking Steendam-Tjuchem*.

Bijlage 3

Leidingfaalkansen en reductiefactoren

Opgesteld door :

- Jan Spiekhout (B&B Advisor)
- Harry Schelfhout (Schelfhout Advies)

Datum: 24 juli 2023 (definitief)

INHOUD

1.	Algemeen.....	3
2.	Faalfrequenties (EGIG)	3
2.1	Statistiek van leidingincidenten voor grote diameters	3
2.2	Leidingsterkteberekeningen met PLE.....	6
2.3	Aangepaste faalfrequenties	6
3.	Materiaaleigenschappen.....	8
3.1	Ontwerpfactoren.....	8
3.2	Kerfslagwaarden.....	8
3.3	Wanddikte	9
3.3.1	Beschadiging door invloed van buitenaf	9
3.3.2	Kras-en doorponsbestendigheid	9
3.3.3	Corrosie	10
3.4	Mechanische gebreken	11
3.5	Grondbeweging.....	13
4.	Toe te passen reductiefactoren	13
5.	Toe te passen leidingfaalkansen	14
6.	Conclusies.....	16
6.1	Faalfrequenties.....	16
6.2	Reductiefactoren.....	17
6.3	Faalkans per leidingkruising incl. reductiefactoren.....	17
7.	Referenties	18

Appendix: Indicatieve breukmechanica-berekeningen rondlassen kruising 19 Gasunie

1. ALGEMEEN

In deze bijlage worden de leidingfaalkansen en reductiefactoren bepaald voor de kruisingen van de gastransportleidingen in het kadeversterkingstraject Tussenklappenpolder langs het A. G. Wildervanckkanaal. In Tabel 1.1 zijn de belangrijkste kenmerken van de leidingkruisingen weergegeven

Parameter	Belangrijkste kenmerken kruisingen gastransportleidingen Tussenklappenpolder				
	0.9 + 65 m	1.0 + 83 m	1.0 + 86 m	1.3 + 65 m	1.3 + 87 m
Kruising nummer	12	16	17	19	20
Leiding code	GU A-633	NAM 501014	NAM 501024	GU A-590	GU A-666
Aanlegmethode	schildboring + open sleuf	zinker + open sleuf	zinker + open sleuf	zinker + open sleuf	schildboring + open sleuf
Jaar van aanleg	1992	1966	1970	1980	2010
Diameter (inch/mm)	48"/1219	28"/711	28"/711	12"/324	48"/1219
Wanddikte [mm]	30 (kruising) 18,3 (veld)	18 (kruising) 18,3 (bochten) 15,8 (veld)	18 (kruising) 18,3 (bochten) 15,8 (veld)	17,48 (kruising) 12,7 (veld)	22,7 (kruising) 18,7 (veld)
Materiaal	St.E 415	X 52	X 52	Grade B	L 480
Ontwerpdruk (bar)	78,9	83	83	79,9	79,9
Damwandconstructie aanwezig?	nee	nee	nee	nee	ja
Conditieverklaring aanwezig?	ja	ja	ja	ja	ja
Leidingsterkte voldoet aan NEN 3650 reeks?	ja	ja	ja	ja	ja

Tabel 1.1: Belangrijkste kenmerken van de leidingkruisingen.

Omdat voor de kruisingen 12, 19 en 20 de wanddiktes in de veiligheidszone "overdik" zijn en daarvan ook de vereiste materiaalcertificaten en kwaliteitsadministratie aanwezig zijn, wordt daarvan gebruik gemaakt bij de beschouwing van de faalkansen.

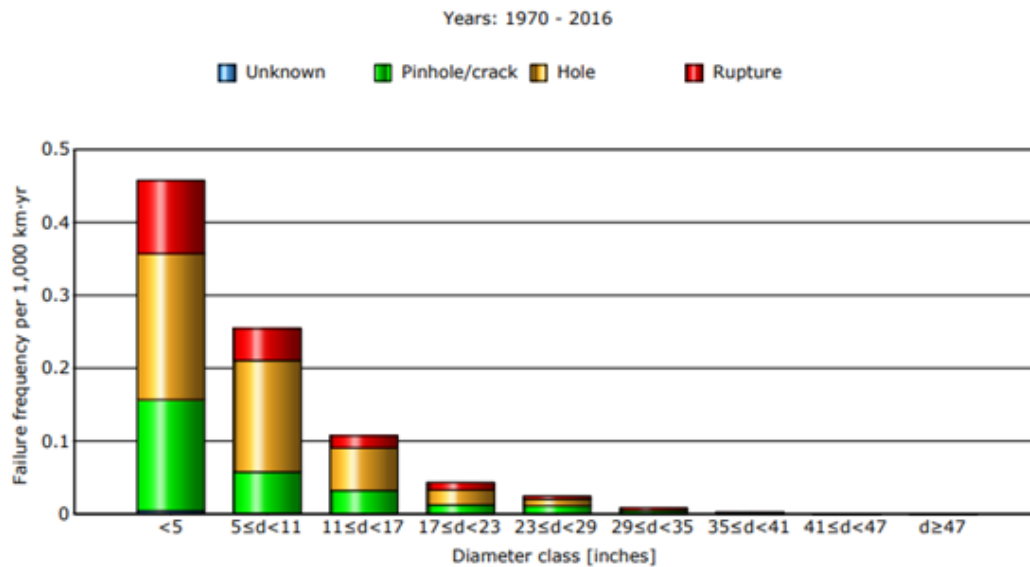
Verder is ten aanzien van de leidingsterkte uit de resultaten van de uitgebreide sterkteberekeningen met het rekenmodel Ple4Win (zie ref. [13] t/m [17]) gebleken dat alle leidingkruisingen voldoen aan de eisen van de NEN 3650 reeks. De kans op falen van de sterkte van de leidingkruisingen door de faaloorzaak 'ground movement (grondbeweging)' wordt daarop afgestemd en gelijkgesteld aan de huidige voor leidingkruisingen voor de doorsnede van een leidingsegment geldende betrouwbaarheidseis.

2. FAALFREQUENTIES (EGIG)

2.1 Statistiek van leidingincidenten voor grote diameters

Voor de in beschouwing te nemen faalfrequenties wordt als vertrekpunt uitgegaan van de faalfrequenties, die zijn gebaseerd op de EGIG-statistiek voor gastransportleidingen in Europa [ref. 1]. Daarbij wordt voor leidingen met een grote diameter ($\varnothing \geq 17$ inch) gebruik gemaakt van de door

TNO in ref. [2] afgeleide faalfrequenties. TNO heeft hierbij de range $\varnothing \geq 17$ inch toegepast, omdat voor de diameter van $\varnothing 48$ inch er maar een relatief beperkte lengte aanwezig is en de lengte voor de gehele range $\varnothing \geq 17$ inch statistisch gezien significant is. Bovendien is voor $\varnothing 48$ inch separaat de incidentfrequentie zeer gering (zie Figuur 2.1).



Figuur 2.1: Faalfrequentie als functie van de leidingdiameter.

De leidingen uit de statistiek voor de grotere diameter leidingen ($\varnothing \geq 17$ inch) betreffen overwegend leidingen met ontwerpdrukken van rond de 70 bar en in het algemeen ontwerpfactoren van 0,60 tot 0,70. Voor de groep leidingen met grote diameters ($\varnothing \geq 17$ inch) is de incidentfrequentie een factor 3 kleiner dan voor de groep leidingen met kleine diameters ($\varnothing < 17$ inch).

Voor de bepaling van de faalfrequentie van leidingen met een kleine diameter ($\varnothing < 17$ inch) is deze groep conform de EGIG-statistiek onderverdeeld in drie diameterklassen, namelijk $\varnothing < 5$ inch, $\varnothing 5$ inch tot $\varnothing 11$ inch en $\varnothing 11$ inch tot $\varnothing 17$ inch. Daarbij is de secundaire faalfrequentie bepaald naar rato van de systeemplengte van de leidingen in de betreffende diameterklasse.

Opgemerkt wordt dat bij de bepaling van de faalfrequenties in [ref. 2] nog geen rekening is gehouden met onbekende faaloorzaken (unknown). In deze bijlage wordt daar wel rekening mee gehouden. Dat geldt ook voor de kansbijdrage door ankerschade door een vallend of slepend anker, die nader is bepaald in *Bijlage 3: Kans op ankerschade*. Daaruit volgt voor kruising 12, waar ter plaatse van de dijkdoorbraak destijds de dekking bestaat uit kleigrond, een kans op ankerschade kleiner dan $1,0 \times 10^{-8}$ per jaar en een verwaarloosbare kans op ankerschade voor de overige kruisingen. Veiligheidshalve wordt bij de faalkansanalyse voor kruising 12 uitgegaan van een kans op ankerschade van $1,0 \times 10^{-8}$ per jaar.

De EGIG-faalfrequenties per oorzaak zijn per diameterklasse samengevat in Tabel 2.1.

Faalfrequenties EGIG 2007-2016 per diameterklasse [per 1000 km.jaar] per oorzaak					
Leidingfalen (faaloorzaken en faalmanieren)		Ø < 5"	Ø 5" - Ø 11"	Ø 11" - Ø 17"	Ø ≥ 17"
External interference (invloed van buitenaf)	Scheur, klein gat (crack, pin hole)	0,0638	0,0269	0,0143	0,0055
	Gat (hole)	0,0750	0,0316	0,0168	0,0065
	Breuk (rupture)	0,0223	0,0094	0,0050	0,0019
	Onbekend (unknown)	0,0027	0,0011	0,0006	0,0002
Corrosion (corrosie)	Klein gat (pin hole)	0,1357	0,0571	0,0304	0,0118
	Gat of cluster (hole)	0,0027	0,0011	0,0006	0,0002
	Breuk van meerdere pijplengtes	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	Onbekend (unknown)	0,0054	0,0023	0,0012	0,0005
Hot tap ¹ made by error (operationele fout)	Scheur, klein gat (crack, pin hole)	0,0165	0,0070	0,0037	0,0014
	Groot gat (hole)	0,0054	0,0023	0,0012	0,0005
	Breuk (rupture)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	Onbekend (unknown)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Mechanical defects (mechanische gebreken)	Scheur, klein gat (crack, pin hole)	0,0861	0,0363	0,0193	0,0075
	Gat (hole)	0,0054	0,0023	0,0012	0,0005
	Breuk (rupture)	0,0085	0,0036	0,0019	0,0007
	Onbekend (unknown)	0,0027	0,0011	0,0006	0,0002
Groundmovement (grondbeweging)	Scheur, klein gat (crack, pin hole)	0,0250	0,0105	0,0056	0,0022
	Gat (hole)	0,0304	0,0128	0,0068	0,0026
	Breuk (rupture)	0,0250	0,0105	0,0056	0,0022
	Onbekend (unknown)	0,0054	0,0023	0,0012	0,0005
Totaal		0,5180	0,2180	0,1160	0,0449

Tabel 2.1: Faalfrequenties per diameterklasse op basis van EGIG 2007 – 2016 per faaloorzaak.

Deze tabel voorziet in faalfrequenties, die per diameterklasse en faaloorzaak zijn bepaald naar rato van de bijbehorende leidinglengte, waarbij een onderverdeling is gemaakt van leidingen met een kleine diameter ($\text{Ø} < 17$ inch) en leidingen met een grote diameter ($\text{Ø} \geq 17$ inch). De reden daarvan is dat er voor leidingen met een grote diameter onvoldoende data over leidingincidenten beschikbaar is. Dit is ook al geconstateerd door de POV K&L bij de casus Wolferen Sprok [ref. 12], met als resultaat dat de faalfrequentie van leidingen met een diameter ≥ 17 inch toen is gelijkgesteld aan de EGIG-faalfrequentie voor alle leidingen, gedeeld door een factor 3 als robuuste factor. Bij de faalkansanalyse Tussenklappenpolder zijn de EGIG faalfrequenties voor $\text{Ø} \geq 17$ " als basis gebruikt. Deze waarde is met 3 vermenigvuldigd om de faalfrequenties voor $\text{Ø} < 17$ " af te leiden.

Omdat de faalfrequenties voor de faaloorzaken 'hot tap made by error (operationele fout)' en 'ground movement (grondbeweging)' niet representatief zijn voor de Nederlandse situatie worden de faalfrequenties daarop aangepast. Daartoe worden de faalfrequenties van 'hot tap made by error'¹ op nul gesteld en wordt de faalfrequentie van 'ground movement (grondbeweging)' gebaseerd op de resultaten van uitgebreide leidingsterkteberekeningen met het gevalideerde rekenmodel PLE (zie hiervoor paragraaf 2.2).

¹ 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

2.2 Leidingsterkteberekeningen met PLE

Uitgangspunt is dat bij de beoordeling van de faaloorzaak 'ground movement (grondbeweging)' de leidingsterkteberekeningen moeten voldoen aan de eisen van de NEN 3650 reeks, die zijn gebaseerd op betrouwbaarheidseisen uit ref. [11]. Daarin wordt voor leidingkruisingen uitgegaan van een vereiste betrouwbaarheidsindex van $\beta = 5,15$ in de doorsnede van een leidingsegment van 10 m voor een zichtperiode van 30 jaar, wat overeenkomt met een faalkans van $1,3 \times 10^{-7}$ per 10 m per 30 jaar of 0,00043 per 1000 km per jaar. Indien de grensspanningen en vervormingen exact voldoen aan het toetscriterium komt dat overeen met een spannings-/vervormingsratio of Unity Check van $UC = 1,0$.

De voor de leidingkruisingen met het rekenmodel Ple4Win berekende maximale spannings- en vervormingsratio's samengevat in de volgende tabel.

Leidingkruising	Belasting-combinatie	Maximale spanningsratio	Maximale vervormingsratio	Locatie	Opmerking
Kruising 12 (Gasunie A-633)	BC 4	0,87	0,47	Onder kruin	Gerekend met L 480 1)
Kruising 16 (NAM 201014)	BC 3/4	0,97/ 0,95	0,46	Veldstrekking/ bovenbocht	
Kruising 17 (NAM 201024)	BC 3/4	0,86	0,57	Bovenbocht	Na controle wisselend vloeien
Kruising 19 (Gasunie A-590)	BC 4	0,42/ 0,30	0,02	Veldstrekking/ onderbocht	
Kruising 20 (Gasunie A-666)	BC 4	0,81	0,45	Onder kruin	

1) De kruising is volgens tekening uitgevoerd in X 60. De materiaalsterktes op het materiaalcertificaat voldoen daar niet aan, maar echter wel aan L 480.

Tabel 2.2: Met Ple4Win berekende maximale spannings-/vervormingsratio's per leidingkruising.

Uit deze tabel blijkt dat alle kruisingen voldoen aan de eis $UC \leq 1,0$ en dat de maximale spanningsratio's maatgevend zijn. Voor meer informatie zie ref. [13] t/m [16]. Bij de faalkansanalyse wordt per leidingsegment van 10 m als veilige waarde uitgegaan van $UC = 1,0$ met een faalkans van $4,3 \times 10^{-8}$ per 10 m per jaar.

2.3 Aangepaste EGIG-faalfrequenties

Bij de aanpassing van de EGIG faalfrequenties, die representatief zijn voor een populatie van alle leidingdiameters over de totale leidinglengte, is rekening gehouden met de statistische significantie ten aanzien van het aantal faalincidenten. Daarbij zijn vanwege de beperkte data van faalincidenten van grote leidingdiameters de leidingen ≥ 17 inch bij elkaar gevoegd (voor nadere onderbouwing zie praktijkcasus Wolferen – Sprok (POV-KL, 2020c). Voor de leidingen < 17 inch is een onderverdeling gemaakt in 3 diameterklassen: < 5 inch, 5 tot 11 inch en 11 tot 17 inch.

Verder zijn de faalfrequenties voor de faaloorzaak 'operationele fouten (hot tap made by error)', die niet van toepassing zijn voor leidingkruisingen in waterkeringen geschrapt en zijn de faalfrequenties voor de faaloorzaak 'grondbeweging (ground movement)' vervangen door de kans op falen, die voortvloeit uit uitgebreide leidingsterkteberekeningen conform NEN 3650-2.

De resultaten zijn weergegeven in de volgende tabel.

Aangepaste faalfrequenties EGIG 2007-2016 per diameterklasse [per 1000 km.jaar]					
Leidingfalen (faaloorzaken en faalmanieren)		Ø < 5"	Ø 5" - Ø 11"	Ø 11" - Ø 17"	Ø ≥ 17"
External interference (invloed van buitenaf)	Scheur, klein gat (crack, pin hole)	0,06384	0,02687	0,01660	0,01430
	Gat (hole)	0,07499	0,03156	0,01950	0,01679
	Breuk (rupture)	0,02230	0,00939	0,00580	0,00499
	Onbekend (unknown)	0,00269	0,00113	0,00070	0,00060
Corrosion (corrosie)	Klein gat (pin hole)	0,13575	0,05713	0,03530	0,03040
	Gat of cluster (hole)	0,00269	0,00113	0,00070	0,00060
	Breuk van meerdere pijplengtes	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
	Onbekend (unknown)	0,00538	0,00227	0,00140	0,00121
Hot tap made by error (operationele fout)	Scheur, klein gat (crack, pin hole)				
	Groot gat (hole)				
	Breuk (rupture)				
	Onbekend (unknown)				
Mechanical defects (mechanische gebreken) 1)	Scheur, klein gat (crack, pin hole)	0,08614	0,03625	0,02240	0,01929
	Vervormingsgestuurde scheur (hole)	0,00538	0,00227	0,00140	0,00121
	Belastinggestuurde scheur (rupture)	0,00846	0,00356	0,00220	0,00189
	Onbekend (unknown)	0,00269	0,00113	0,00070	0,00060
Ground movement (grondbeweging) 2)	Scheur, klein gat (crack, pin hole)				
	Vervormingsgestuurde scheur (hole)	0,00043	0,00043	0,00043	0,00043
	Belastinggestuurde breuk (rupture)	0,00043	0,00043	0,00043	0,00043
	Onbekend (unknown)				
Totaal		0,4112	0,1735	0,1133	0,0928
<p>1) Niet van toepassing voor gastransportleidingen in waterkeringen</p> <p>2) Gebaseerd op grote grondafschuivingen en mijn- en berggebieden en niet representatief voor situatie in NL met zettingen en vervormingen</p>					

Tabel 2.3: Aangepaste faalfrequenties per diameterklasse op basis van EGIG 2007 – 2016.

De aanpassingen ten opzichte van de EGIG-faalfrequenties betreffen de volgende faaloorzaken:

- Hot tap made by error (operationele fout) is geschrapt omdat dit niet van toepassing is bij kruisingen van gastransport leidingen in waterkeringen
- Ground movement (grondbeweging) is representatief voor grote afschuivingen in berggebieden of mijnverzakkingen, die niet van toepassing zijn voor leidingkruisingen in waterkeringen. Daarvoor zijn zettingen, zakkingen en vervormingen bepalend. Deze worden voor kruisingen van gastransportleidingen, conform 3560-2, berekend op basis van uitgebreide leidingsterkteberekeningen en partiële veiligheidsfactoren, die zijn afgeregeld op een betrouwbaarheidseis, die representatief is voor de doorsnede van een leidingsegment van 10 m en een referentieperiode van 30 jaar. Deze waarde is via een standaard normale verdeling omgerekend naar een faalkans per 1000 km per jaar.

Kruising 19 heeft een diameter van Ø 12 inch, zodat daarvoor de aangepaste faalfrequenties van de diameterklasse Ø 11 tot Ø 17 inch van toepassing zijn.

De leidingkruisingen 12, 16, 17 en 20 hebben een diameter van 28 inch tot Ø 48 inch, zodat daarvoor de aangepaste faalfrequenties van de diametergroep Ø ≥ 17 inch van toepassing zijn.

3. MATERIAALEIGENSCHAPPEN

3.1 Ontwerpfactoren

In de volgende tabel zijn de ontwerpfactoren voor de kruisingen aangegeven. Dit zijn zowel de theoretische “design”-waarden als de werkelijke waarden op basis van de sterktecijfers uit de materiaalcertificaten indien materiaalcertificaten beschikbaar zijn.

Leidingkruising	Rekgrens R_e theoretisch (MPa)	Rekgrens R_e werkelijk (MPa)	Ontwerpfactor theoretisch	Ontwerpfactor werkelijk
Kruising 12 (Gasunie A-633)	415	480	0,38	0,33
Kruising 16 (NAM 201014)	360		0,46	
Kruising 17 (NAM 201024)	360		0,46	
Kruising 19 (Gasunie A-590)	240	329	0,29	0,21
Kruising 20 (Gasunie A-666)	480	496	0,43	0,42

Tabel 3.1: Ontwerpfactoren per leidingkruising.

Uit deze tabel blijkt dat de werkelijke rekgrenzen en ontwerpfactoren van de kruisingen 12, 19 en 20 gunstiger zijn dan de “design”-waarden. Voor de kruisingen 16 en 17 zijn geen materiaalcertificaten voorhanden. Indien nodig gevonden mogen deze werkelijke sterktewaarden als toetswaarden voor de berekende spanningen worden toegepast. Voor onderhavige gevallen was dit niet nodig.

3.2 Kerfslagwaarden

De kerftaaiheid ligt voor de kruisingen 12, 19 en 20 boven de vereiste waarden uit NEN 3650 en NEN 3651 (zie volgende tabel voor de aanwezige kerfslagwaarden).

Leidingkruising	Kerfslagwaarde (J)
Kruising 12 (Gasunie A-633)	> 59
Kruising 16 (NAM 201014)	
Kruising 17 (NAM 201024)	
Kruising 19 (Gasunie A-590)	> 93
Kruising 20 (Gasunie A-666)	> 96 (langslas > 50)

Tabel 3.2: Kerftaaiheid buismateriaal kruisingen 15, 19 en 20.

Uit deze tabel blijkt dat de kerfslagwaarden van de kruisingen 12, 19 en 20 voldoen aan de eisen. Voor de kruisingen 16 en 17 zijn de kerfslagwaarden niet bekend. Op basis van de verklaringen als destijds afgegeven door de onafhankelijke Inspectiedienst, kan er ervan uitgegaan worden dat de kerfslagwaarden voldoen aan de eisen uit de norm van destijds. Als minimum kan 27 Joule worden gehanteerd. Dit is in lijn met wat in ref. [12] voor de praktijkcasus Wolferen – Sprok is gedaan.

Volgens Fearnehough (ref. [4]), is barsten bij ontwerpfactoren $\leq 0,30$ niet mogelijk (is onafhankelijk van de kerftaaiheid). Eventuele scheurstop bij een lopende scheur van buiten de kruising stopt binnen één pijplengte. Voor kruisingen 12, 19 en 20 zijn de kerfslagwaarden bij deze relatief grote wanddiktes zodanig hoog dat een defect dat ontstaat in de kruising geen instabiele breuk vertoont.

3.3 Wanddikte

3.3.1 Beschadiging door invloed van buitenaf

Binnen de veiligheidszone stelt NEN 3651 in verband met mechanische beschadiging eisen aan de minimum wanddikte en importantie factor S (zie volgende tabel).

S	DN resp. d_n mm										
	50	100	150	200	300	400	600	750	900	1 050	1 200
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,95	5	5	6	6	7	7	8	8	9	9	10
0,9	5	6	7	7	8	8	9	9	10	10	11
0,85	5	7	8	8	9	9	10	10	11	11	12
0,8	5	8	9	9	10	10	11	11	12	12	13
0,75	6	9	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14

Indien $p_a < 1,0$ MPa en $D_n \leq 300$ mm mag d_n met maximaal 2,0 mm worden verkleind.
Indien $p_a < 1,0$ MPa en $D_n > 300$ mm mag d_n met maximaal 1,0 mm worden verkleind.

Tabel 3.3: Eis minimum wanddikte en importantiefactor S (bron NEN 3651).

Uit deze tabel kan voor de leidingkruisingen het volgende worden afgeleid:

- Kruising 12: \varnothing 1219 mm en wanddikte 30 / 18,3 mm (> minimum eis 14 mm)
- Kruising 16 en 17: \varnothing 711 mm en wanddikte 18,3 / 15,8 mm (> minimum eis 12 - 12,5 mm)
- Kruising 19: \varnothing 324 mm en wanddikte 17,48 / 12,7 mm (> minimum eis 11 – 11,5 mm)
- Kruising 20: \varnothing 1219 mm en wanddikte 22,7 / 18,7 mm (> minimum eis 14 mm)

Hieruit volgt dat alle kruisingen voldoen aan de minimum wanddikte-eis van NEN 3651 en dat daarvoor een importantiefactor van $S = 1,0$ kan worden toegepast. Opgemerkt wordt dat bij de faalkansanalyse de importantiefactor geen rol speelt. Daarvoor in de plaats komt de beoordeling van de faalkans van de leidingkruising op basis van de aanwezige materiaalsterkte en wanddikte.

3.3.2 Kras-en doorponsbestendigheid

Buisleidingen met wanddiktes $> 10 - 12,5$ mm en waarbij de kerftaaiheid van het materiaal voldoet aan de eisen uit NEN 3650-2, zijn kras – en doorponsbestendig. Met normale graafapparatuur zal zo'n leiding niet kapot te krijgen zijn. Dit is gebaseerd op onderzoek door o.a. Gasunie, British Gas (nu National Grid), Gaz de France, EPRG (European Pipeline Research Group) en PRCI (Pipeline Research Council International). Hierbij gaat het dan met name om de weerstand tegen krassen en doorponzen. Ref. [5] en ref. [6] bevatten een lijst van literatuur met de achtergronden over dit onderwerp. Boven een bepaalde wanddikte bij een gegeven graafwerktuig kan geen bezwijken of lekkage meer plaats vinden. Voor de moderne staalsoorten, zoals die heden ten dage worden toegepast (grote breuktaaiheid) bij gastransportleidingen kan worden gesteld dat voor wanddiktes groter dan circa 10 mm een gemiddelde hydraulische graafmachine niet in staat is deze leiding te doen bezwijken. De leiding zal krassen overleven en doorponzen zal niet plaats vinden. Een kras-deuk-combinatie zal zich gedragen als een kras.

Krasbestendigheid betekent dat een leiding een kras van 2,5 mm moet kunnen doorstaan. Dit is gebleken uit beproeving. Zie hiertoe ref. [7]. Voor wanddiktes groter dan 9,5 mm is de leiding bestand tegen doorponzen.

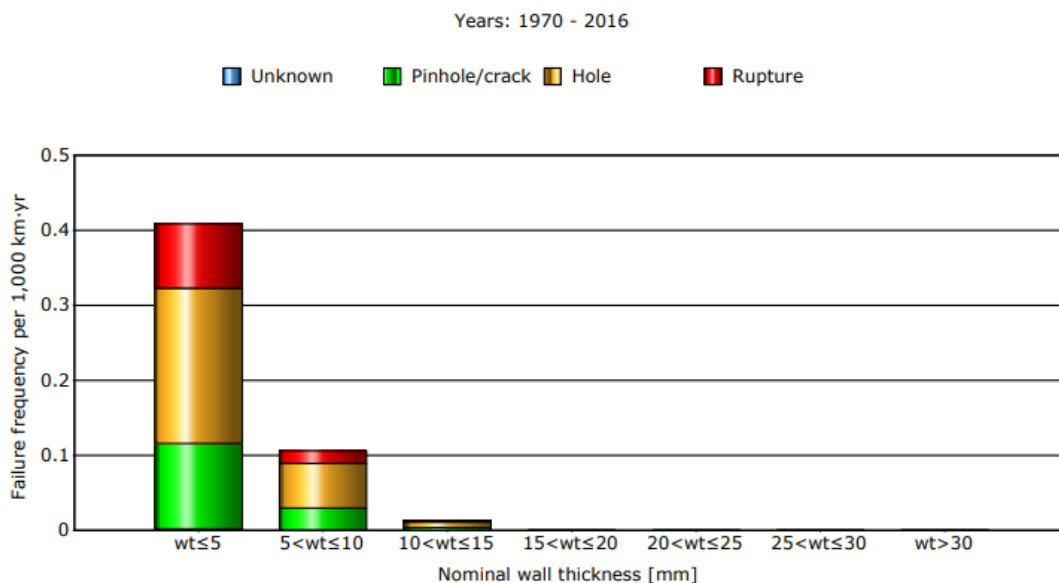
Uit de evaluatie en het voorgaande kan gesteld worden dat de segmenten van alle kruisingen van de transportleidingen onder de dijk bestand zijn tegen krassen en doorponsen. Alleen een kras-deuk-combinatie is bedreigend. Voor grote diameters van hogedruk leidingen met grote wanddiktes zijn grote krachten vereist om de leiding in te deuken. Een gladde deuk op zich brengt de sterkte tegen inwendige druk niet in gevaar.

Kruising nummer	Wanddikte (mm) in de centrale zone en de veiligheidszones
12	30 / 18,3
16 en 17	18,3 / 15,8
19	17,48 / 12,7
20	22,7 / 18,7

Tabel 3.4: Wanddiktes per leidingkruising.

In de EGIG-statistiek is naast de eerder genoemde uitsnede naar diameter tevens een uitsnede naar wanddiktes gemaakt (zie volgende figuur). Deze figuur bevestigt de eerdergenoemde conclusies ten aanzien van de weerstand tegen beschadigingen door invloed van buitenaf.

Geconcludeerd mag worden dat de weerstand tegen beschadiging van de buizen bij alle kruisingen verhoogd is.



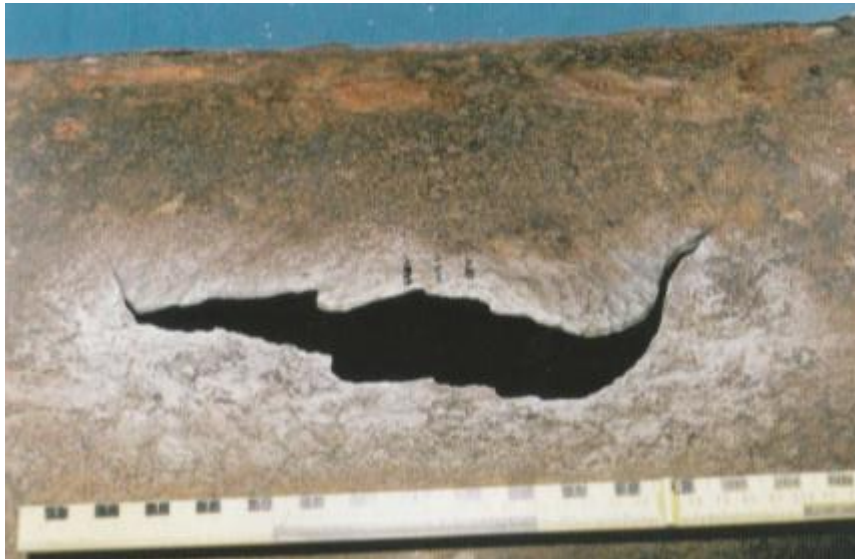
Figuur 3.1: Faalfrequentie van gastransportleidingen als functie van de wanddikte.

3.3.3 Corrosie

Het beheersysteem van Gasunie is gericht op het voorkomen van corrosie – te weten goede coating met kathodische bescherming en periodieke controle voor tijdig monitoren van optredende corrosie voor het voorkomen van lekkage. Omdat kathodische bescherming globaal werkt wordt tevens periodiek een ILI inspectie (In Line Inspection) uitgevoerd. Eventuele optredende corrosie duurt een zekere tijd voordat deze tot lekkage leidt, zeker bij een 30 mm wanddikte. Een ILI inspectie is nog niet uitgevoerd, maar staat gepland op een afzienbare termijn. Eventuele defecten worden vastgesteld met een POD (Probability Of Detection) van 90%.

Voor de NAM-kruisingen 16 en 17 wordt de kans op corrosie gelijkgesteld aan de kans op corrosie van de Gasunie-kruisingen omdat het NAM beheersysteem gelijkwaardig is aan dat van Gasunie en daarnaast ILI informatie van de leidingen voorhanden is.

Een groot defect is alleen denkbaar vanuit een klein defect, dat eerst zal leiden tot een klein lek welke in de tijd uit zou moeten groeien. De afmetingen van zo'n klein defect zullen maximaal ter grootte van een pinhole (klein gat) zijn, waarvan de maximale diameter 2 cm bedraagt. Meerdere corrosieplekken bij elkaar zijn bekend uit de praktijk (zie de volgende figuur). De afmeting van 350 mm en 250 mm is dan groot en zo'n clustering van corrosie zal zeker bij de reguliere inspecties ontdekt moeten zijn.



Figuur 3.2: Bezweken cluster corrosieplekken, geen instabiele breuk (bron: [ref. 9]).

3.4 Mechanische gebreken

Het gaat hier met name om eventuele gebreken in de rondlassen. Voor detectie van eventuele kritieke gebreken in langsrichting is bij de buisfabricage reeds Niet Destructief Onderzoek (NDO) uitgevoerd (o.a. de langslas bij de \varnothing 48 inch langснаad-gelaste buizen; de \varnothing 12 inch is naadloos) en is de buis op hoge druk hydrostatisch beproefd. Daarnaast heeft na aanleg een hydrostatische beproeving plaatsgevonden.

Bij optreden van een scheurtje in rondgaande richting zal dit een lasfout betreffen die bij overschrijden van bepaalde kritieke afmetingen, bij het geleidelijk proces van zetting ("vormingsgestuurd") gaat openscheuren. Dit is een langzaam proces waarbij een klein lek langzamer groter wordt. Een klein lek kan mogelijk worden gedetecteerd, echter een groot lek zal niet ontstaan (zie de volgende figuur).

In geval van kruising 12 is de situatie zelfs gunstiger omdat de gehele leiding in het zand ligt en geïnstalleerd is middels een schildboring. Voor kruising 12 moet alleen ter plaatse van de perskuip met een uitvoeringszakking rekening worden gehouden. Voor kruising nummer 20 staat de perskuip in de dijk en moet nog wel met de (historische) zetting ten gevolge van het dijklichaam rekening worden gehouden. Voor kruising 19 ligt de aansluiting tussen het zinkergedeelte en aanleg in den droge ter plaatse van de kruin van de dijk en moeten de uitvoeringszakking en de (historische) zetting ten gevolge van het dijklichaam in de leidingsterkteberekening worden meegenomen.

De conclusie is dat voor mechanische gebreken alleen rekening hoeft te worden gehouden met overwegend “vervormingsgestuurde” gebreken als gevolg van zettingen. De maximale lekopening van zo’n scheur zal bij de 48 inch (1219 mm) de 1000 mm² niet overschrijden. Voor de 12 inch (305 mm) is dit ca. 250 mm². Waar de leiding niet in het zand ligt onder de kruin is sprake van indirect overgedragen belasting evenals bij uitvoeringszakking ter plaatse van overgang naar een andere aanlegwijze.



Figuur 3.3: Gescheurde las ten gevolge van buigspanningen (uit presentatie Yong-Yi Wang van CRES).



Figuur 3.4: Gescheurde rondlas ten gevolge van grondverzakking door mijnbouw (bron {ref.10}).

Tabel 2.1 vermeldt een faalfrequentie voor een “belasting gestuurde” breuk van 0,002 tot 0,025 per 1000 km per jaar. Voor een kruisingslengte van 100 meter resulteert dit in een faalkans van $2,0 \times 10^{-5}$ tot $2,5 \times 10^{-4}$ / jaar. De oorzaken van de bezwijkgevallen uit de statistiek zijn niet bekend (is vertrouwelijk). Bekend is dat er enkele grondverschuivingen geweest zijn met bezwijken van de leiding tot gevolg, o.a. in Italië in de Apennijnen. DNV-GL heeft onderzoek verricht naar o.a. databases in de VS waarbij de oorzaak achterhaald kon worden. Dit betrof alle grondverschuivingen in bergachtig gebied. Veelal zijn de leidingen niet speciaal ontworpen op deze grote verplaatsingen of is falen binnen de gestelde herhalings tijden geaccepteerd. Kruisingen in Nederland en in het bijzonder kruisingen met waterkeringen zijn altijd speciaal ontworpen, rekening houdend met grondbeweging in de vorm van zettingen, zakkingen en vervormingen.

Bij een belastinggestuurde situatie is er sprake van indirect overgedragen belasting. Bij kruising 12 is dit ter plaatse van de perskuip, waar de verbindingslas is gemaakt tussen het geboorde gedeelte en de in open ingraving gelegde veldstrekking. Voor de kruisingen 19 en 20 is dit ter plaatse van de kruin, waar er sprake is van een ophoging. Voor de kruisingen 12 en 20 mag met een verlaagde faalkans worden gerekend omdat het niet destructief onderzoek met Rotoscan is uitgevoerd, waarbij de faalkansstatistiek voornamelijk radiografisch onderzochte lassen betreft. Met Rotoscan (Applus + RTD), wat relatief recent is, kunnen met name scheurvormige defecten worden vastgesteld die moeilijk met radiografie zijn vast te stellen. Voor de kruisingen 12 en 20 wordt voorgesteld om voor de “belastinggestuurde” rondlassen een extra reductiefactor van 0,2 op de faalkans toe te passen.

Voor de kruising 19 zijn de toelaatbare defectafmetingen van de rondlassen geverifieerd op basis van een breukmechanica-analyse. De resultaten daarvan staan in de bijgevoegde Appendix. De conclusie daarvan is dat de toelaatbare defectgroottes van de rondlassen zodanig zijn dat deze zeker moeten zijn gevonden bij het niet destructief onderzoek destijds. Daarom wordt voor kruising 19 voorgesteld om voor de “belastinggestuurde” rondlassen een extra reductiefactor van 0,1 op de faalkans toe te passen.

Voor de kruisingen 16 en 17 zijn er geen breukmechanische materiaal parameters beschikbaar en is het spanningsniveau hoog. Er kan voor worden gekozen om de “belastinggestuurde” lassen onder de kruin op te graven en met een niet-destructieve techniek, zoals hand TOFD (Time Of Flight Detection) te onderzoeken. Indien opgraving in de kruin niet wenselijk is kan dat ook worden gedaan op een andere plaats in de kruising met dezelfde diameter, staalkwaliteit en wanddikte, e.e.a. mede ter goedkeuring van de Eigen Inspectiedienst. Als daaruit blijkt dat de lassen voldoen aan de eisen kan de faalkans ook met een extra factor 0,1 worden gereduceerd. De verwachting is dat e.e.a. een positief resultaat zal opleveren. Daarom wordt voorgesteld om bij de leidingkruisingen 16 en 17 voor de “belastinggestuurde” rondlassen voorlopig uit te gaan van een extra reductiefactor van 0,1 op de faalkans.

3.5 Grondbeweging

In de vorige paragraaf gaat het in feite om grondbeweging in combinatie met gebreken. De aanwezigheid van gebreken die een bepaalde afmeting overschrijden, verzwakken daarbij de buisleiding. Deze paragraaf betreft dus grondbeweging “zonder gebreken”. Met “normale” sterkteberekeningen wordt dan aangetoond dat de spanningen en vervorming binnen de toets waarden blijven. In dat geval is bij Unity Check van $UC = 1,0$ en bij een betrouwbaarheidsindex van $\beta = 5,15$ in de doorsnede van een leidingsegment van 10 m voor een referentieperiode van 30 jaar. De bijbehorende faalkans is $1,3 \times 10^{-7}$ per 10 m per 30 jaar of $4,3 \times 10^{-9}$ per 10 m per jaar.

Omdat voor alle kruisingen de Unity Checks van de toetsspanningen slechts weinig afwijken van de vereiste $UC = 1,0$ wordt uitgegaan van een kans op falen door grondbeweging van $4,3 \times 10^{-8}$ per leidingsegment van 10 m per jaar.

4. TOE TE PASSEN REDUCTIEFACTOREN

De reductiefactoren worden, afhankelijk van de faaloorzaak en faalmanieren toegepast in de veiligheidszone aan de buitenzijde (20 m), de centrale zone (20 m) en de veiligheidszone aan de binnenzijde (45 m). De toe te passen reductiefactoren zijn per leidingkruising samengevat in de volgende tabellen.

Reductiefactoren voor leidingkruisingen 12 en 20 (schildboringen)				
Leidingfalen (faalorzaken)	Veiligheidszone buitenzijde	Centrale zone	Veiligheidszone binnenzijde	Opmerking
Invloed van buitenaf	0,01	n.v.t.	0,01	wanddikte > 12,5 mm
Corrosie	0,01	n.v.t.	0,01	conditieverklaring + ILI
Mechanische gebreken	0,1	n.v.t.	0,1	Rotoscan kruising 20 is 0,2;
Grondbeweging	$4,3 \times 10^{-8}$ per 10 m	$4,3 \times 10^{-8}$ per 10 m	$4,3 \times 10^{-8}$ per 10 m	sterkte voldoet aan eis; geen reductiefactor

Tabel 4.1: Reductiefactoren per zone voor leidingkruisingen 12 en 20 (schildboringen)

Reductiefactoren voor leidingkruisingen 16, 17 en 19 (zinkers)				
Leidingfalen (faalorzaken)	Veiligheidszone buitenzijde	Centrale zone	Veiligheidszone binnenzijde	Opmerking
Invloed van buitenaf	0,01	0,01	0,01	wanddikte > 12,5 mm
Corrosie	0,01	0,01	0,01	conditieverklaring + ILI
Mechanische gebreken	0,1	0,1	0,1	incl. analyse breukmechanica en/of opgraven + NDO rondlassen
Grondbeweging	$4,3 \times 10^{-8}$ per 10 m	$4,3 \times 10^{-8}$ per 10 m	$4,3 \times 10^{-8}$ per 10 m	sterkte voldoet aan eisen; geen reductiefactor

Tabel 4.2: Reductiefactoren per zone voor leidingkruisingen 16, 17 en 19 (zinkers).

5. TOE TE PASSEN LEIDINGFAALKANSEN

De per leidingkruising toe te passen faalkansen, inclusief toepassing van de in de tabellen 4.1 en 4.2 vermelde reductiefactoren zijn weergegeven in de volgende tabellen.

Faalkansen leidingkruising 12 (incl. reductiefactoren) [per meter per jaar]				
Leidingfalen (faalorzaken en faalmanieren)		Veiligheidszone buitenzijde (20 m)	Centrale zone (20 m)	Veiligheidszone binnenzijde (45 m)
Invloed van buitenaf	Scheur, klein gat	1,11E-09		2,49E-09
	Gat	1,30E-09		2,93E-09
	Breuk	3,87E-10		8,70E-10
	Onbekend	4,67E-11		1,05E-10
Corrosie	Klein gat	2,35E-09		5,30E-09
	Gat of cluster	4,67E-11		1,05E-10
	Breuk meerdere pijplengtes			
	Onbekend	9,33E-11		2,10E-10
Mechanische gebreken	Scheur, klein gat			
	Vervormingsgestuurde scheur	9,33E-10		2,10E-09
	Belastinggestuurde scheur	2,93E-09		6,60E-09
	Onbekend			
Grondbeweging	Scheur, klein gat			
	Vervormingsgestuurde scheur	8,68E-09	8,68E-09	1,95E-08
	Belastinggestuurde breuk	8,68E-09	8,68E-09	1,95E-08
	Onbekend			
Totaal		2,66E-08	1,74E-08	5,98E-08

Tabel 5.1: Faalkansen inclusief reductiefactoren per zone voor leidingkruising 12 (schildboring).

Faalkansen leidingkruising 16 en 17 (incl. reductiefactoren) [per meter per jaar]				
Leidingfalen (faalorzaken en faalmanieren)		Veiligheidszone buitenzijde (20 m)	Centrale zone (20 m)	Veiligheidszone binnenzijde (45m)
Invloed van buitenaf	Scheur, klein gat	1,11E-09	1,11E-09	2,49E-09
	Gat	1,30E-09	1,30E-09	2,93E-09
	Breuk	3,87E-10	3,87E-10	8,70E-10
	Onbekend	4,67E-11	4,67E-11	1,05E-10
Corrosie	Klein gat	2,35E-09	2,35E-09	5,30E-09
	Gat of cluster	4,67E-11	4,67E-11	1,05E-10
	Breuk meerdere pijplengtes			
	Onbekend	9,33E-11	9,33E-11	2,10E-10
Mechanische gebreken	Scheur, klein gat			
	Vervormingsgestuurde scheur	9,33E-10	9,33E-10	2,10E-09
	Belastinggestuurde scheur	1,47E-09	1,47E-09	3,30E-09
	Onbekend			
Grondbeweging	Scheur, klein gat			
	Vervormingsgestuurde scheur	8,68E-09	8,68E-09	1,95E-08
	Belastinggestuurde breuk	8,68E-09	8,68E-09	1,95E-08
	Onbekend			
Totaal		2,51E-08	2,51E-08	5,65E-08

Tabel 5.2: Faalkansen inclusief reductiefactoren per zone voor leidingkruising 16 en 17 (zinker).

Faalkansen leidingkruising 19 (incl. reductiefactoren) [per meter per jaar]				
Leidingfalen (faalorzaken en faalmanieren)		Veiligheidszone buitenzijde (20 m)	Centrale zone (20 m)	Veiligheidszone binnenzijde (45m)
Invloed van buitenaf	Scheur, klein gat	2,86E-09	2,86E-09	6,43E-09
	Gat	3,36E-09	3,36E-09	7,56E-09
	Breuk	9,99E-10	9,99E-10	2,25E-09
	Onbekend	1,21E-10	1,21E-10	2,71E-10
Corrosie	Klein gat	6,08E-09	6,08E-09	1,37E-08
	Gat of cluster	1,21E-10	1,21E-10	2,71E-10
	Breuk meerdere pijplengtes			
	Onbekend	2,41E-10	2,41E-10	5,43E-10
Mechanische gebreken	Scheur, klein gat			
	Vervormingsgestuurde scheur	2,41E-09	2,41E-09	5,43E-09
	Belastinggestuurde scheur	3,79E-09	3,79E-09	8,53E-09
	Onbekend			
Grondbeweging	Scheur, klein gat			
	Vervormingsgestuurde scheur	8,68E-09	8,68E-09	1,95E-08
	Belastinggestuurde breuk	8,68E-09	8,68E-09	1,95E-08
	Onbekend			
Totaal		3,73E-08	3,73E-08	8,40E-08

Tabel 5.3: Faalkansen inclusief reductiefactoren per zone voor leidingkruising 19 (zinker).

Faalkansen leidingkruising 20 (incl. reductiefactoren) [per meter per jaar]				
Leidingfalen (faaloorzaken en faalmanieren)		Veiligheidszone buitenzijde (20 m)	Centrale zone (20 m)	Veiligheidszone binnenzijde (45m)
Invloed van buitenaf	Scheur, klein gat	1,11E-09		2,49E-09
	Gat	1,30E-09		2,93E-09
	Breuk	3,87E-10		8,70E-10
	Onbekend	4,67E-11		1,05E-10
Corrosie	Klein gat	2,35E-09		5,30E-09
	Gat of cluster	4,67E-11		1,05E-10
	Breuk meerdere pijplengtes			
	Onbekend	9,33E-11		2,10E-10
Mechanische gebreken	Scheur, klein gat			
	Vervormingsgestuurde scheur	9,33E-10		2,10E-09
	Belastinggestuurde scheur	2,93E-09		6,60E-09
	Onbekend			
Grondbeweging	Scheur, klein gat			
	Vervormingsgestuurde scheur	8,68E-09	8,68E-09	1,95E-08
	Belastinggestuurde breuk	8,68E-09	8,68E-09	1,95E-08
	Onbekend			
	Totaal	2,66E-08	1,74E-08	5,98E-08

Tabel 5.4: Faalkansen inclusief reductiefactoren per zone voor leidingkruising 20 (schildboring).

Deze leidingfaalkansen zijn per zone (veiligheidszone buitenzijde = 20 m, centrale zone = 20 m en veiligheidszone binnenzijde = 45 m) verwerkt in de gebeurtenissenbomen van *Bijlage 8: Faalpaden en gebeurtenissenbomen*.

6. CONCLUSIES

6.1 Faalfrequenties

In eerste instantie is voor de leidingfaalkansen uitgegaan van faalfrequenties van leidingincidenten voor alle diameters op basis van de EIG-statistiek voor gastransportleidingen in Europa. Dit geeft een voor alle leidingdiameters een faalfrequentie van 0,1347 per 1000 km per jaar. Uitsplitsing daarvan naar diameterklassen naar rato van de leidinglengte geeft de volgende secundaire faalfrequenties:

- Diameter < 5 inch : 0,5180 per 1000 km per jaar
- Diameter 5 inch tot 11inch : 0,2180 per 1000 km per jaar
- Diameter 11 inch tot 17 inch : 0,1160 per 1000 km per jaar
- Diameter ≥ 17 inch : 0,0449 per 1000 km per jaar

Omdat deze faalfrequenties niet helemaal representatief zijn voor leidingkruisingen in waterkeringen zijn deze deels aangepast. Daarbij is de faaloorzaak 'hot tap made by error (operationele fout)' geschrapt en is de faaloorzaak 'ground movement (grondbeweging)' aangepast op basis van een vertaalslag van de huidige betrouwbaarheidseis van $\beta = 5,15$ per 10 m per 30 jaar voor de sterkte van een leidingsegment van 10 m. Uitgaande van een standaard normale verdeling is de bijbehorende faalkans gelijk aan $1,3 \times 10^{-7}$ per 10 m per 30 jaar of 0,00043 per 1000 km per jaar.

Dit geeft voor de beschouwde leidingkruisingen de volgende faalfrequenties:

- Kruising 19 (12 inch = diameterklasse 11 tot 17 inch): $9,28 \times 10^{-8}$ per m per jaar
- Kruising 12, 16, 17 en 20 (28 of 48 inch = diameterklasse ≥ 17 inch): $3,64 \times 10^{-8}$ per m per jaar

De faalkansanalyses hebben betrekking op bezwijken van de leidingen op doorsnedeniveau en de vertaalslag daarvan naar een kans op overstroming gegeven het bezwijken van de leidingkruising, die volgt uit de optelsom van de faalkansen in de centrale zone, de veiligheidszone aan de buitenzijde en de veiligheidszone aan de binnenzijde.

6.2 Reductiefactoren

Op de faalfrequenties worden reductiefactoren toegepast. De bij de faalkansanalyse wordt een Bevb reductiefactor toegepast, die is gebaseerd op de Handreiking Risicoberekeningen [ref. 3]. Daarin staan clusters met bijbehorende correctie-/reductiefactoren. De leidingkruisingen liggen deels in de regionale waterkering en deels in de provinciale vaarweg. Daarin gelden beperkingen ten aanzien van graaf-/ baggerwerkzaamheden, zodat in de categorie “Mitigerende maatregelen beschadiging door derden” op basis van “Cluster 3 – beheermaatregelen”, nummer 32: “overeenkomst, graven/boren verboden” een reductiefactor van 0,1 mag worden toegepast. Omdat hiermee nog niet aan de faalkanseisen wordt voldaan is gezocht naar extra reductiefactoren voor waterveiligheid op basis van specifieke lokale materiaaleigenschappen.

Vanwege de grote wanddikte (“overdikte”), gecombineerd met goede materiaaleigenschappen boven het vereiste niveau (voldoende sterkte en goede kerftaaiheid) mogen voor de “overdikte wanddiktes” bovenop de Bevb-reductiefactor, de volgende reductiefactoren worden toegepast:

- Invloed van buitenaf – toepassing van een extra reductiefactor van 0,1
- Corrosie – Voor kruisingen 12 en 20 na uitvoering van de ILI-inpectie (In-Line Inspection) toepassing van een extra reductiefactor 0,1 (kruising nr. 20 is relatief nieuw)
- Mechanische gebreken – Het gaat hierbij om lasfouten in rondlassen. De meeste rondlassen zijn “vormingsgestuurd” en een eventueel lek ontwikkelt zich langzaam vanuit een lasfout. Bij een \varnothing 48 inch (1219 mm) leiding is de maximale lekopening circa 1000 mm². Bij een \varnothing 12 inch (305 mm) leiding bedraagt deze lekopening niet meer dan circa 250 mm². De locaties van de “belastinggestuurde” lassen, met bijbehorende reductiefactor bovenop de Bevb-reductiefactor, als deze toegepast mag worden, zijn aangegeven in de volgende tabel.

Leidingkruising nr.	Locatie belastinggestuurde las	Extra reductiefactor waterveiligheid
12	Perskuip	0,1 als opgraving met ndo
16 en 17	Onder de kruin (centrale zone)	0,1 als opgraving met ndo rondlas(-sen)
19	Onder de kruin (centrale zone)	0,1 als opgraving met ndo rondlas(-sen). Aangevoerd middels breukmechanica dat zeer grote defectgroottes toelaatbaar zijn.
20	Onder de kruin (centrale zone)	0,2 (gemechaniseerd US onderzoek toegepast)

Tabel 6.1: Locatie belastinggestuurde rondlas met reductie faalkans

6.3 Faalkans per leidingkruising incl. reductiefactoren

De aangepaste EGIG-faalfrequenties in combinatie met de Bevb reductiefactor van 0,1 en de extra reductiefactoren van tabel 6.1 de standaard en extra reductiefactoren leiding per leidingkruising tot een faalkans in de veiligheidszone aan de buitenzijde (20 m), centrale zone (20 m) en veiligheidszone aan de binnenzijde (45 m), die zijn samengevat in de volgende tabellen.

Leidingkruising		Faalkans per zone [per jaar]		
		Veiligheidszone buitenzijde (20 m)	Centrale zone (20 m)	Veiligheidszone binnenzijde (45 m)
Kruising 12	Gasunie A-633 (48 inch) Schade door ankers	2,66E-08 1,00E-08	1,74E-08	5,98E-08
Kruising 16	NAM 501014 (28 inch)	2,51E-08	2,51E-08	5,65E-08
Kruising 17	NAM 501024 (28 inch)	2,51E-08	2,51E-08	5,65E-08
Kruising 19	Gasunie A-590 (12 inch)	3,73E-08	3,73E-08	8,40E-08
Kruising 20	(Gasunie A-666) (48 inch)	2,66E-08	1,74E-08	5,98E-08

Tabel 6.2: Faalkansen in zones per leidingkruising (inclusief reductiefactoren).

De in tabel 6.2 weergegeven faalkansen per zone worden verwerkt in de gebeurtenissenbomen van *Bijlage 3: Faalpaden en gebeurtenissenbomen*.

Ter verificatie van een aantal faalkansen moeten er nog wel een aantal acties worden uitgevoerd, zoals:

- Bij kruising 12 in de veiligheidszone aan de buitenzijde nog wel de bijdrage van de kans op ankerschade van $1,0 \times 10^{-8}$ per jaar worden opgeteld, wat een totale faalkans van $3,66 \times 10^{-8}$ per jaar oplevert. Voor de verificatie van de faalkans van de faaloorzaak 'corrosie' moet nog wel aanvullend een ILI (In-Line Inspectie) worden uitgevoerd en is er voor de faaloorzaak 'mechanische gebreken' en de faalmanier 'belastinggestuurde breuk' nog een opgraving en niet-destructief onderzoek van de rondlassen nodig ter plaatse van de overgang geperstgelegd aan de binnenzijde.
- Bij de kruisingen 16 en 17 is ter verificatie van de faalkans voor de faaloorzaak 'mechanische gebreken' en de faalmanieren 'vervormingsgestuurde breuk' en 'belastinggestuurde breuk' nog een opgraving en niet-destructief onderzoek van de rondlassen in de centrale zone nodig.

7. REFERENTIES

- [1] - EGIG; "Gas pipeline incidents, 10th report of the European Gas Pipeline Incident Data Group, period 1970-2016"
- [2] - Deltares 11203959-000-GEO-0001 "Faalkansanalyse dijkontwerp Wolferen-Sprok met kruisende gasleiding A-505", bijlage E (TNO 2020 R10945) voor grote diameter leidingen (≥ 17 inch).
- [3] - RIVM; "Handleiding Risicoberekeningen Bevb", versie 3.2, 1 januari 2021.
- [4] – G. D. Fearnehough, "The control of risk in gas transmission pipelines", IChemE Symposium series no. 9
- [5] - J. Spiekhout: "The design of transmission pipelines to be resistant to external interference", page 427-441, 3rd International Conference on Pipeline Technology, Brugge, Belgium, May 21-24, 2000. Editor: R. Denys, Elsevier, Amsterdam, ISBN: 0-444-50271-8.
- [6] - J. Spiekhout, M. Gielisse: "Deterministic und probabilistischer Ansatz im Rohrleitungsentwurf – was sind die Unterschiede – wie wichtig ist das Endergebnisch? Die vorgehensweise in den Niederlanden", Oldenburger Rohrleitungsforum 2013, Rohrleitungen im Zeichen des

Klimawandels, Tagungsband zum 27. Oldenburger Rohrleitungsforum, IRO Band 38, Vulkan Verlag, pp. 495-505

- [7] - J. Spiekhout, A.M. Gresnigt, C. Koning en H. Wildschut: "Calculation models for the evaluation of the resistance against mechanical damage of pipelines", 3R International, 25. Jahrgang, Heft 4 April 1986, pp 198 - 203.
- [8] - "Specifications and requirements for in-line inspection of pipelines", Standard Practice, POF 100, November 2021
- [9] - TNO-rapport, 2020 - R12179; "Omrekening van Unity Check naar faalkans"
- [10] – "Macaw's Pipeline Defects"
- [11] TNO-rapport 2003-CI-R0031 ; "Herziening rekenfactoren en spanningscorrectie factoren in NEN 3650"
- [12] POV-KL, Faalkansanalyse dijkontwerp Wolferen-Sprok met kruisende gasleiding A-505, Derde praktijktoepassing van het Veiligheidsraamwerk Kabels & leidingen, Project Overstijgende Verkenning Kabels & Leidingen, 29 oktober 2020
- [13] Sterkteberekening Kadeversterking A.G. Wildervanckkanaal, Leidingkruising 12 - 48" Gasunie leiding A-633 Tusschenklappenpolder, F. Koerts, OTW-L 22.0566 rev.0, Datum 20 maart 2022
- [14]...Sterkteberekening Kadeversterking A.G. Wildervanckkanaal Leidingkruising 19 - 12" Gasunie leiding A-590 Tusschenklappenpolder, F. Koerts ,OTW-L 22.0548 rev.0, Datum 17 maart 2022
- [15] Sterkteberekening Kadeversterking A.G. Wildervanckkanaal , Leidingkruising 20 - 48" Gasunie leiding A-666 Tusschenklappenpolder, Koerts, OTW-L 22.0567 rev.0 , Datum 21 maart 2022
- [16].. Leidingkruising 16, Dijkversterking A.G. Wildervanckkanaal 28" pijpleiding 501014 Tusschenklappenpolder, Sterkteberekening, Bilfinger Tebodin Netherlands B.V., Documentnummer: 55721-1931001, Revisie: B, Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V. 17-06-2022
- [17]... Leidingkruising 17, Dijkversterking A.G. Wildervanckkanaal 28" pijpleiding 501024 Tusschenklappenpolder, Sterkteberekening, Bilfinger Tebodin Netherlands B.V, Documentnummer: 55721-1931002, Revisie: B, Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V. 17-06-2022

Appendix

Indicatieve breukmechanica-berekeningen rondlassen kruising 19 Gasunie

Opsteller: Jan Spiekhout (B&B Advisor)

Datum: 20 april 2023

1. INLEIDING

Om voor leidingkruising 19 te kunnen voldoen aan de faalkanseis van $2,0 \times 10^{-7}$ per jaar is het nodig om de faalkans voor lasdefecten, volgend uit de EGIG statistiek, te reduceren via extra maatregelen of nadere analyse. In eerste instantie is daarbij gedacht aan een extra inspectie van de rondlas in de kruin van de kade, welke daartoe vrijgegraven zou moeten worden.

2. BESCHIKBARE GEGEVENS

Aan de lassen van deze kruising is bij aanleg de nodige aandacht besteed. Dat blijkt uit het afgegeven Bewijs van Toezicht en het laswerkverslag, waarin de kruising is aangegeven en daarnaast herkenbaar is via de grotere wanddikte.

Uit nadere beschouwing van de kruising blijkt in relatie tot de andere leiding kruisingen (nummers: 12, 16, 17 en 20):

- Een laag spanningsniveau. De sterkteberekening geeft voor het dijkgedeelte een maximum Unity Check van $UC = 0,30$, wat ruim voldoet aan de vereiste $UC = 1,0$.
- Het buismateriaal betreft staalkwaliteit Grade B, wat grotere defecten toelaat dan voor de hogere sterkte buisleiding staalkwaliteiten bij de andere kruisingen.
- Het niveau van breuktaaiheid van de rondlas in buisleidingen in materiaal Grade B ligt hoger dan van de rondlassen in buisleidingen uit hogere sterkte staal

3. INDICATIEVE BREUKMECHANICA-BEREKENINGEN

Een indicatieve breukmechanica-berekening (zie volgende alinea) geeft aan dat grote (lengte, diepte) defecten acceptabel zijn, die zeker bij niet destructief onderzoek middels radiografie worden gevonden en veel groter zijn dan de defecten, zoals toegestaan in de Gasunie constructiespecificatie en norm (destijds NEN 1091).

In het volgende worden de indicatieve breukmechanica-berekeningen met de daarbij gehanteerde uitgangspunten nader toegelicht en worden de formules gegeven voor de berekening van de toelaatbare defectafmetingen van een defect in een rondlas. Voor de achtergronden wordt verwezen naar referenties [1] en [2], zoals genoemd in deze Appendix.

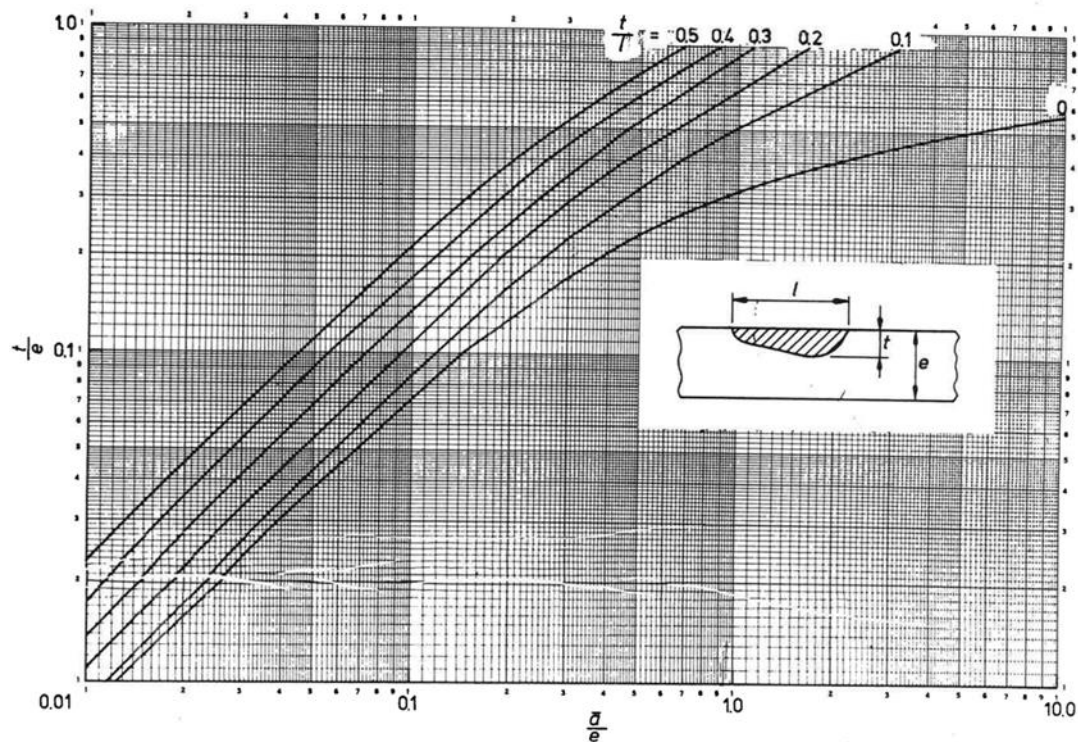
3.1 Formules berekening toelaatbare defectafmeting in relatie tot brosse breuk - CTOD

$$a_m = \frac{\delta}{2\pi(\varepsilon - 0.25\varepsilon_y)}$$

waarin:

a_m	- de toelaatbare halve door-de-dikte scheurlengte	(mm)
δ	- de kritische waarde van de <u>scheurtipopeningsverplaatsing</u>	(mm)
ε	- de toegepaste rek (inclusief residuele rek, spanningsconcentratie etc.)	(mm)
ε_y	- de vloeirek	(--)

Herleiding van de berekende toelaatbare halve door-de-dikte defectlengte naar een oppervlakte defect geschied met behulp van de volgende figuur.



Figuur 1: Herleiding door het door-de-dikte defect naar een equivalent oppervlakte defect

Voor een laslaag aangebracht middels hand electrode handlassen wordt een dikte van maximaal 3 mm gehanteerd. Een defectdiepte van 6 mm, 2 laslagen, is zeer zeldzaam,

3.2 Formules berekening plastisch bezwijken defect in rondlas

De berekende toelaatbare defectafmetingen moeten worden gecontroleerd op plastisch bezwijken met de volgende formule:

$$\sigma = \sigma_{flow} \left(1 - \frac{0.8l \cdot t}{R \cdot e}\right)$$

waarin:

- σ - spanning in langsrichting
- σ_{flow} - "flow"-spanning
- l - defectlengte in omtreksrichting
- t - defectdiepte
- R - halve diameter
- e - wanddikte

3.3 Invoer en berekeningsresultaten

De berekende Unity Check is $UC = 0,30$. Voor de achtergronden van de overige parameters wordt verwezen naar ref. [1] en [2].

- minimum gegarandeerde vloeispanning: $\sigma_y = 240 \text{ N/mm}^2$
- treksterkte: $UTS = 415 \text{ N/mm}^2$
- elasticiteitsmodulus: $E = 2,1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$
- residuele spanning: $\sigma_r = 0,5 \times \sigma_y$
- spanningsconcentratiefactor ten gevolge van "mis alignment": 1,5
- kritische waarde van de scheurtipopeningsverplaatsing : $\delta = 0,075 \text{ mm}$ (deze waarde is ontleend aan ref. [1], de materiaal database van Gasunie geeft voor staalkwaliteit Grade B in de verschillende groepen een 90% ondergrens van 0,13 – 0,27 mm bij een gemiddelde waarde van 0,26 – 0,38 mm)

Invulling van de parameters geeft de volgende waarde:

$\bar{a}_m = 14,92 \text{ mm}$, met $a/e = 0,851$ en $t/e = 0,172$ voor een 3 mm diep defect, of met $a/e=0,851$ en $t/e = 0,343$ voor het onwaarschijnlijke geval van een 6 mm diep defect, worden met de grafiek in figuur 1 (onwaarschijnlijk) lange toelaatbare defecten gevonden (voor $t = 6 \text{ mm}$, lengte $> 200 \text{ mm}$).

Bij de controle op plastisch bezwijken worden bij $l \times t = 2574$ (onwaarschijnlijk) lange defecten gevonden, zowel bij 3 mm diepte ($> 800 \text{ mm}$) als 6 mm diepte ($> 400 \text{ mm}$).

Deze defecten zijn veel langer dan de toelaatbare defecten en worden zeker gedetecteerd bij het niet destructief onderzoek van de rondlas.

4. CONCLUSIE

De kans op defecten in deze kruising welke falen van de rondlas kunnen veroorzaken, is veel lager dan bij rondlassen in veldstrekkingen met een faalkans volgens de EGIG statistiek. De reductiefactor 0.1 als gehanteerd ingeval van een NDO inspectie van de rondlas, mag vanwege de lage belasting gecombineerd met een goede breuktaaiheid van het materiaal, in dit geval ook zonder extra NDO inspectie worden toegepast.

5. REFERENTIES

- [1] J. Spiekhout: "Backgrounds of criteria for fitness for purpose in in-service gas transmission pipelines", ECF6 "Fracture control of engineering structures", 6th Biennial European Conference on Fracture, Amsterdam, June 1986, EMAS, pp 761 - 775.
- [2] J. Spiekhout: "Fitness for purpose assessment of weld flaws application of various fracture mechanics codes", Welding Journal, Volume 67, nr. 9, September 1988, pp 55 - 65.

Bijlage 4: Kans op ankerschade bij leidingkruising A-666

Opgesteld door:

- Victoria Monsma (DNV-GL)

Datum: 24 juli 2023 (definitief)

Memo Aan: A. Glas, Gasunie

Memo Nr.: [Our Ref]

Van: DNV

Datum: 21-02-2022

Kopie:

Opgesteld. V. Monsma, DNV

door:

Faalkans analyse AG Wildervanckkanaal zinker

1 INLEIDING

Gevolgen van te weinig dekking of dekking niet conform de NEN 3651 zijn dat het risico van schade aan de zinker door met name ankers mogelijk toeneemt.

Om de veilige ligging van de zinker te kunnen verzekeren en aan de vergunningsvoorwaarden te kunnen voldoen, is DNV gevraagd om de faalkansanalyse van A-633 ten gevolge van scheepvaart uit te voeren en de toekomstige dekking te evalueren. Als primaire faaloorzaken zijn onderkend: vallend en slepend anker.

De faalfrequentie berekeningen zijn uitgevoerd conform de probabilistische methodiek, die door DNV is ontwikkeld om de faalfrequentie ten gevolge van externe factoren van waterkruisingen te kunnen bepalen [1]. Met deze methodiek kan ook een risico afweging worden gemaakt in die gevallen waar de diepteligging mogelijk in eerste benadering ontoereikend is. Bij het kwantificeren van de faalkans wordt rekening gehouden met de lokale condities zoals vaarwegklasse, scheepvaart intensiteit en bodemsoort alsmede de leidingparameters inclusief de minimale breukenergie.

2 UITGANGSPUNTEN

1.1 Leiding parameters

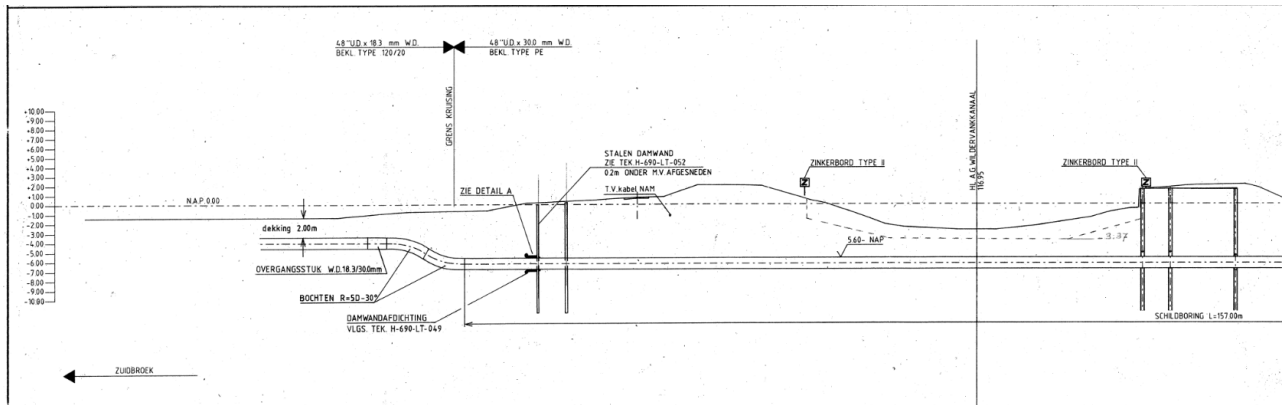
De leidingparameters zijn weergegeven in tabel 1. Alle informatie is afkomstig van Gasunie.

Tabel 1: Parameters van de leidingen

Leidingnummer	Diameter mm	Wanddikte mm	Staalsoort	Water diepte, m
A-633	1219	30(kruising) 18,3 (veld)	St.E 415	5,6

Bij kruising A-633 is sprake van dekking met klei. Dit betreft de bres die ontstaan is bij de dijkdoorbraak van 1992 en welke is opgevuld met klei (4000 m³) volgens de eindrapportage van het beleidsteam "dijk Muntendam", opgemaakt door de Provincie Groningen (2 september 1992).

Volgens de tekening A-633-XZ-002-1, geleverd door Gasunie, is de dekking van A-633 rond 2 meter.



Figuur 2: Situatie zinkers leidingen Gasunie A-633 (A-633-XZ-002-1)

3 AG WILDERVANCKKANAAL

Het A.G. Wildervanckkanaal is volgens opgave van het waterschap Hunze en Aa's ingedeeld in vaarweg klasse IV. Het A.G. Wildervanckkanaal vormt tevens onderdeel van de boezem voor de Tusschenklappenpolder. CEMT klasse IV wilt zeggen dat er schepen van maximaal 105 x 9,8 x 30 meter (= lengte x breedte x diepgang) wordt toegelaten. Het maximale laadvermogen is 2050 ton.

Volgens de eisen uit "Richtlijnen Vaarwegen 2020 van Rijkswaterstaat" wordt een dekking van 1.75 m. bij vaarwegklasse III-IV bij zandbodem of harde klei geëist. Voor zachte klei is de eis 6 m (nb.: Dit wordt vooreerst als conservatief aangehouden. De bres was namelijk tot even voorbij het midden van het kanaal aanwezig. De eerste dagen direct na de dijkdoorbraak is mijnsteen en stortsteen gestort en is daarna verder opgevuld met klei terwijl de oorspronkelijke grondslag zandig is)

1.2 Anker parameters en de minimale leidingbreukenergie

De anker massa voor binnenvaartschepen kan worden berekend conform EU-richtlijn 2006/87/EG, Bijlage II. Een CEMT klasse IV vaarweg relateert met een maximaal ankergewicht van bijna 2 ton en een anker vloeilengte van maximaal 2 meter.

De minimale leidingbreukenergie is berekend conform de rekenmethodiek waterkruisingen [1]. In de onderstaande tabel wordt de minimale benodigde kinetische energie van een vallend anker gegeven die een leidingbreuk kan veroorzaken¹.

Tabel 2: Minimale breukenergie

Leidingdiameter	Energie leidingbreuk [kJ]
A-633, 48", wt 30mm	807

¹Benodigde energie alleen voor het staal.

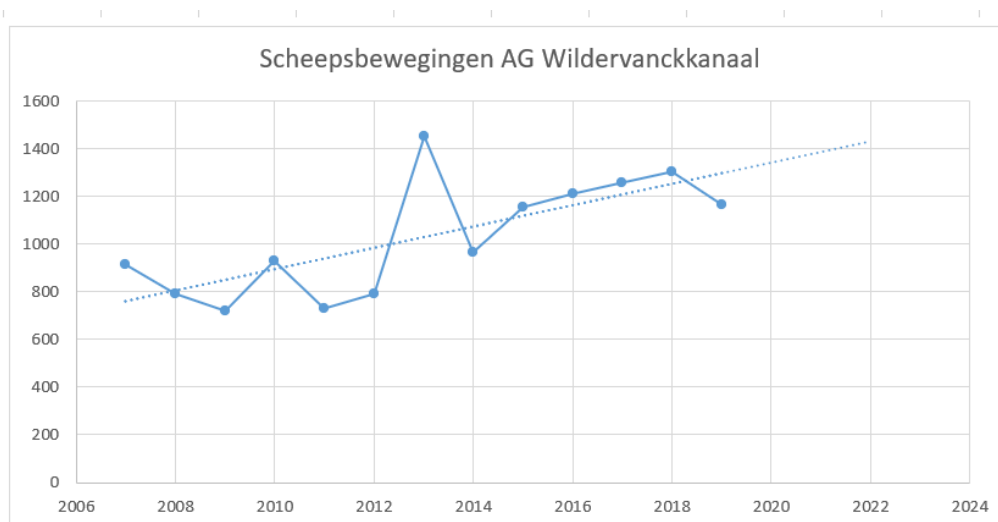
3.1 Scheepsintensiteit

De Scheepsintensiteit data is afkomstig van de Provincie Groningen, zie tabel onder.

Tabel 3: Scheepsintensiteit

Jaar	blok Veendam AGW	
	Totaal Aantal Passages	Totaal Vervoerd Gewicht
2007	913	405.875
2008	792	404.173
2009	718	387.612
2010	927	464.988
2011	731	411.438
2012	793	416.861
2013	1450	855.519
2014	966	496.756
2015	1153	595.207
2016	1212	587.875
2017	1257	652.360
2018	1305	685.581
2019	1167	606.487

De recreatievaart bedraagt gemiddeld ca. 600 per jaar.



Figuur 3: Aantal passages

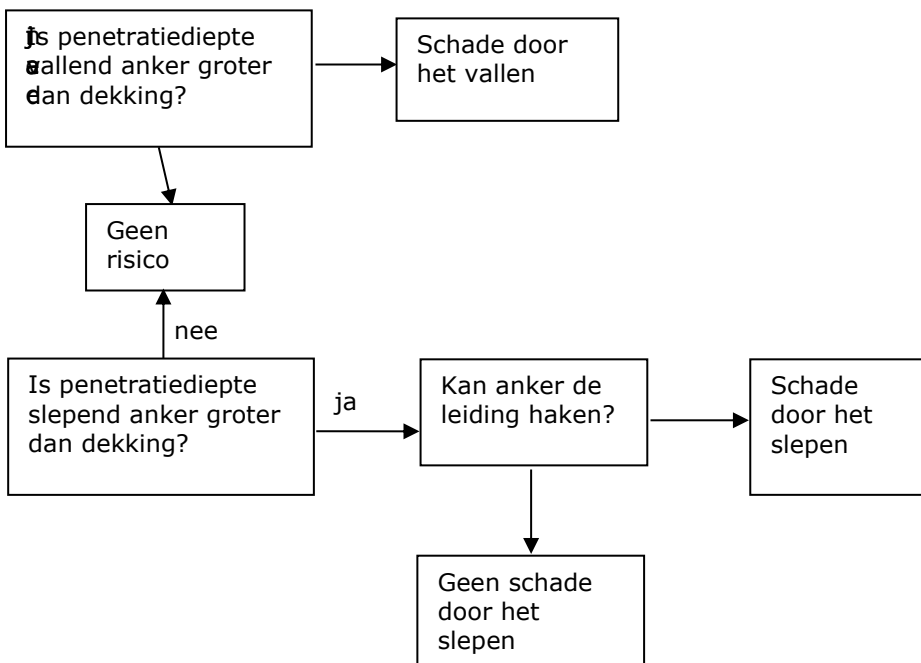
Voor 2022 wordt uitgegaan van 1400 passages.

2 RISICOANALYSE

Om te kunnen beoordelen welke ankers wel en welke niet tot het falen van de geanalyseerde leiding zullen leiden dienen de volgende stappen te worden gedaan:

- Bepaal de CEMT klasse van de waterweg;
- Bepaal de max ankerdimensies
- Bepaal de huidige dekking en de bodem/dekkingparameters;
- Bepaal welke ankers de leiding kunnen beschadigen en/of haken
- Maak een inschatting over de penetratiediepte voor alle ankers
- Selecteer alle relevante ankers voor de berekening

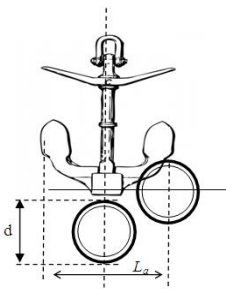
Het volgende flow-schema kan worden gebruikt ten behoeve van analyse voor de anker-leiding interactie:



Schema 1: Anker-leiding interactie analyse

3.2 Vallend anker

De ingraafdieptes is sterkafhankelijk van waterdiepte, valhoogte, draagcoëfficiënt, ankermassa, bodemtype. etc.



Figuur 4: Impact op de leiding bij vallend anker

Met behulp van de rekenmethodiek waterkruisingen [1] is berekend dat de ingraafdiepte van een anker van 2000 kg ongeveer 1,2 meter is voor zachte klei ($\phi = 15^\circ$) bij 5,6 meter waterdiepte en een valhoogte van 4 m.

De kinetische energie van het vallend 2000 kg anker is 30kJ, dat veel lager is dan de minimale breukenergie. Geconcludeerd kan worden dat vallende anker geen bedreiging voor 48" A-633 is.

3.3 Slepend anker

In "Risk Assessment of Dropped and Dragged Anchors to Offshore Pipelines" [8] wordt daarvoor de volgende formule gegeven:

$$D_{\max} = 2Lv \cdot \frac{1 - \cos\theta}{\sin\theta} \quad [m]$$

Waarin:

Lv – vloeilengte [m]

θ – vloeihoeck, 40° is gemiddelde waarde volgens [8]

Indien de diameter van de geanalyseerde leiding groter is dan de maximale diameter D_{\max} is het niet mogelijk dat het gegeven anker achter de leiding blijft haken. Met behulp van de bovenstaande informatie kan worden geanalyseerd welke ankers het falen van de leiding kunnen veroorzaken. In de onderstaande tabel is de resultaat van de berekening is weergegeven.

Tabel 4: Scheepsintensiteit

CEMT-klasse	Anker massa P, kg	Vloeilengte Lv , m	D_{\max} m
IV	1758-1954	1,5-2	0,8

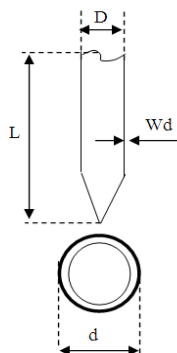
Geconcludeerd kan worden dat slepende ankers geen bedreiging voor de 48" A-633 is.

3.4 Vallende spudpaal

Een spudpaal is een verticale buizenconstructie, waarmee schepen zichzelf kunnen vastleggen. De meeste spudpalen (circa 80%) worden middels hydrauliek of lier langzaam naar de bodem gebracht. Dit systeem levert de volgende schatting ten aanzien van indringingsdiepte in de waterbodem [3]:

- Klei: 30 cm;
- Modder/slib: 2 a 3 meter, gemiddeld 1 meter;
- Zand: 20 cm.

Gangbare lengtes van spudpalen lopen uiteen van 7 m tot maximaal 24 m. Spudpalen kunnen bestaan uit een punt aan de onderzijde (zie figuur 6), maar er zijn ook spudpalen met een vlakke plaat aan de onderzijde.



Figuur 6: Impact op de leiding bij vallende spudpaal

De laatste kunnen zich minder diep in de bodem ingraven. Op dit moment is er nog veel onduidelijk over de inwerking op de bodem, maar relevant is de mate van indringing. Deze hangt af van het type spudpaal (open of gesloten onderzijde). Er zijn geen normen voor de mate van indringing. Het afmeren op spudpalen is reglementair gelijk te stellen aan ankeren. Daar waar een ankerverbod geldt, bijvoorbeeld in havens en op veel hoofdvaarwegen, mogen dus ook spudpalen niet gebruikt worden. Spudpalen worden enkel bij het afmeren toegepast; ze zijn niet geschikt om te gebruiken bij manoeuvres of als het schip nog vaart heeft, aangezien dat kan leiden tot schade aan de spudpaalinstallatie of de scheepsconstructie.

De grootste bedreiging wordt gevormd door aannemers, die werkzaamheden uitvoeren aan de oevers of bodems van de oppervlaktewateren. Als die werkzaamheden bij kabels of leidingen worden uitgevoerd, kan het, bij onvoldoende bodemdekking, gevolgen hebben voor de onderliggende leidingen / kabels. In principe zijn dat gereguleerde werkzaamheden onder het toezicht van bijvoorbeeld een leidingeigenaar of vaarwegbeheerder.

Met behulp van de rekenmethodiek waterkruisingen [1] is berekend dat de ingraafdiepte van een 20 meter paal van 6" met wanddikte van 6.3 mm (560 kg) ongeveer 4 meter is voor zachte klei ($\phi = 15^\circ$) met 5,6 meter waterdiepte en valhoogte van 4 m.

De kinetische energie van het vallend 560 kg spudpaal is 45kJ, dat veel lager is dan de minimale breukenergie. Geconcludeerd kan worden dat vallend spudpaal geen bedreiging voor de 48" A-633 is.

De totale faalfrequenties van de leidingen in de onderstaande tabel weergegeven:

Tabel 5: Totale faalfrequentie

	A-633
Vallende ankers	nihil
Slepende ankers	nihil
Spudpalen	nihil
Totaal	nihil

4 CONCLUSIE

Aan de hand van de beschikbare gegevens en de berekeningen kan worden geconcludeerd dat de uiteindelijke faalfrequentie van de waterkruising ten gevolge van ankers en spudpalen minder dan 10^{-8} per jaar bedraagt. Een belangrijke factor daarbij is dat het grootst voorkomende anker de 48" leiding niet kan haken.

Andere faaloorzaken zoals interne en externe corrosie worden in dit type risicoanalyse met betrekking tot Gasunie aardgastransportleidingen buiten beschouwing gelaten. In het zorgsysteem van Gasunie worden leidingen periodiek geïnspecteerd door middel van pigging en coatingsurveys. Op basis van de resultaten wordt het inspectieprogramma voortdurend gevalideerd en verbeterd en worden herinspectietermijnen bepaald. Door dit systeem wordt het ontstaan van corrosie in een dusdanig vroeg stadium onderkend dat tijdig ingrijpen mogelijk is. Daardoor zal een leiding niet falen ten gevolge van corrosie.

REFERENTIELIJST

- [1] V. Monsma, J. Spiekhout "Methodiek risico analyse waterkruisingen", DNV
- [2] Nota Beheer Provinciale Vaarwegen 2011-2020
- [3] Witteveen+Bos Raadgevende ingenieurs b.v. Studie naar de invloed van spudpalen op waterbodems, Rapport RT629-1

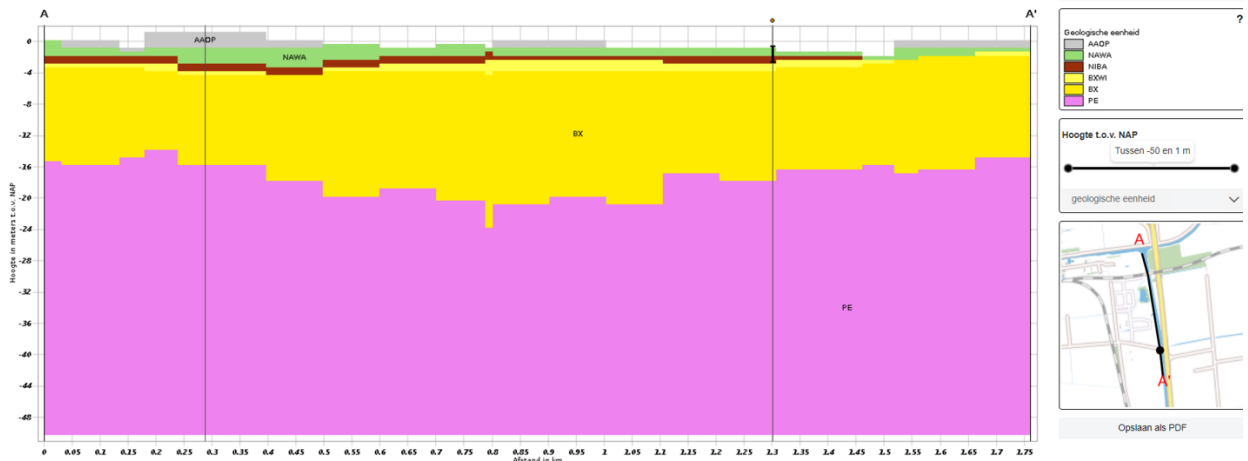
Bijlage 5: Controle verwekingsgevoeligheid zandlagen

Auteur:

- Piet Meijers (Deltares)

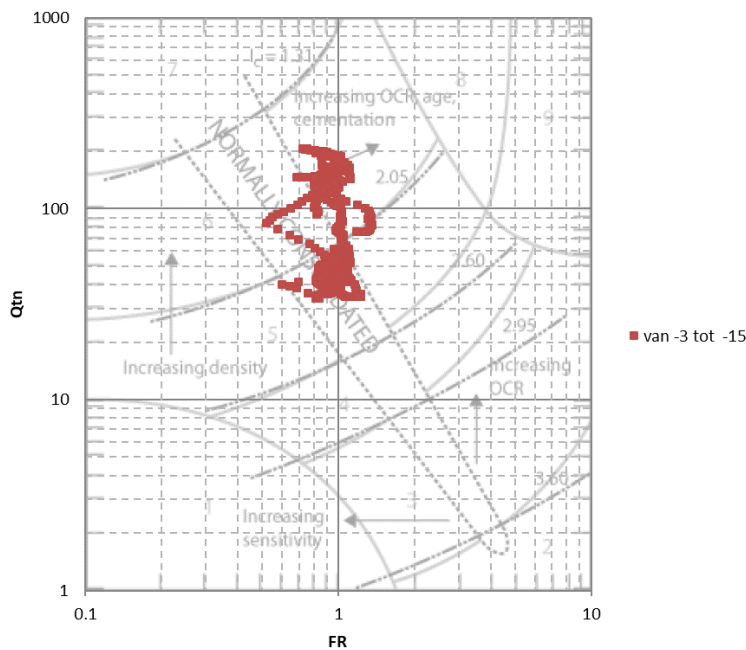
Datum: 24 juli 2023 (definitief)

Verticale Doorsnede BRO GeoTOP v1.4

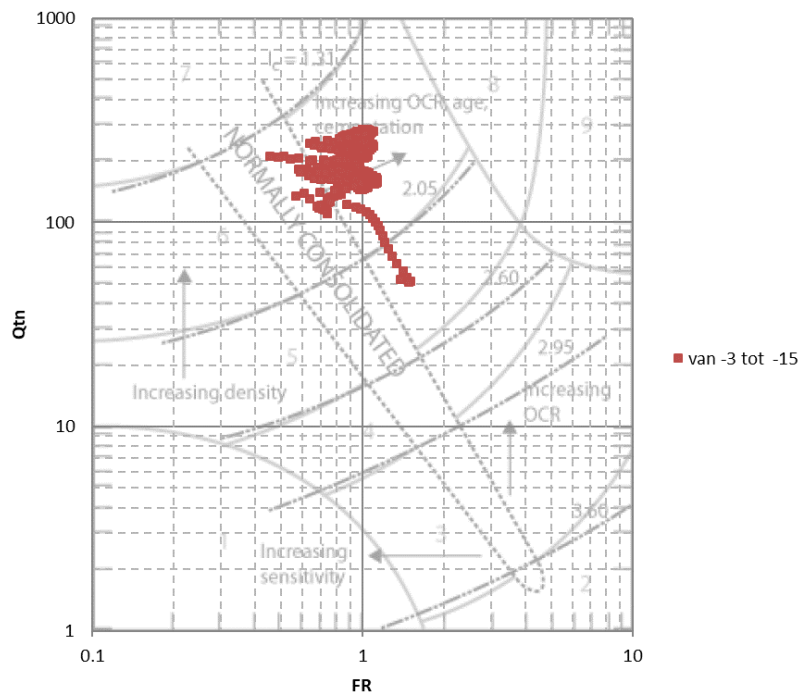


Figuur 2-1 Geologisch profiel langs kade A.G. Wildervanck kanaal en Tussenklappenpolder

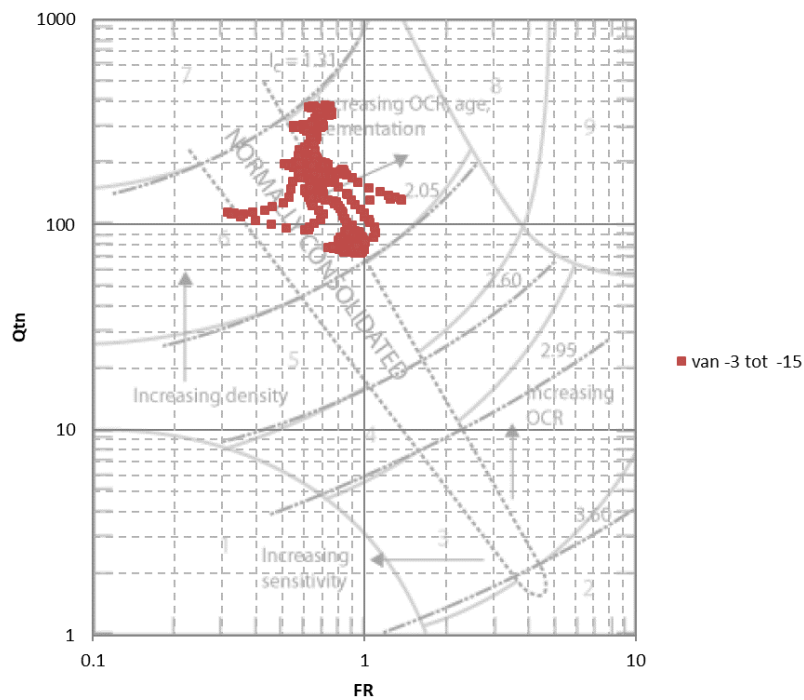
Voor een aantal kenmerkende sonderingen is een grondclassificatie volgens de methode Robertson (2009). De resultaten staan in Figuur 2-2 tot Figuur 2-5. Hierbij zijn alleen de punten van het zand opgenomen.



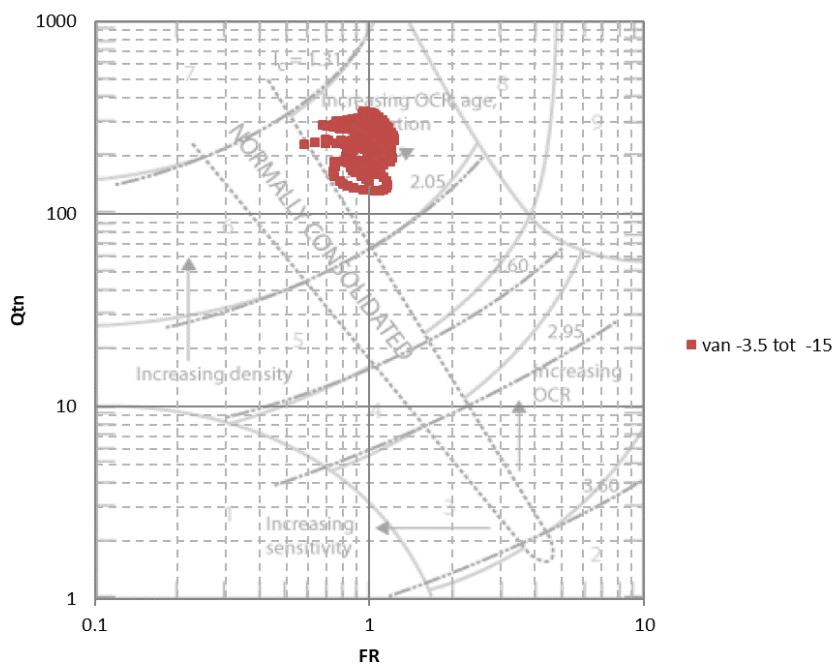
Figuur 2-2 Classificatie volgens Robertson (2009), sondering DKMP012



Figuur 2-3 Classificatie volgens Robertson (2009), sondering DKMP014



Figuur 2-4 Classificatie volgens Robertson (2009), sondering DKM305

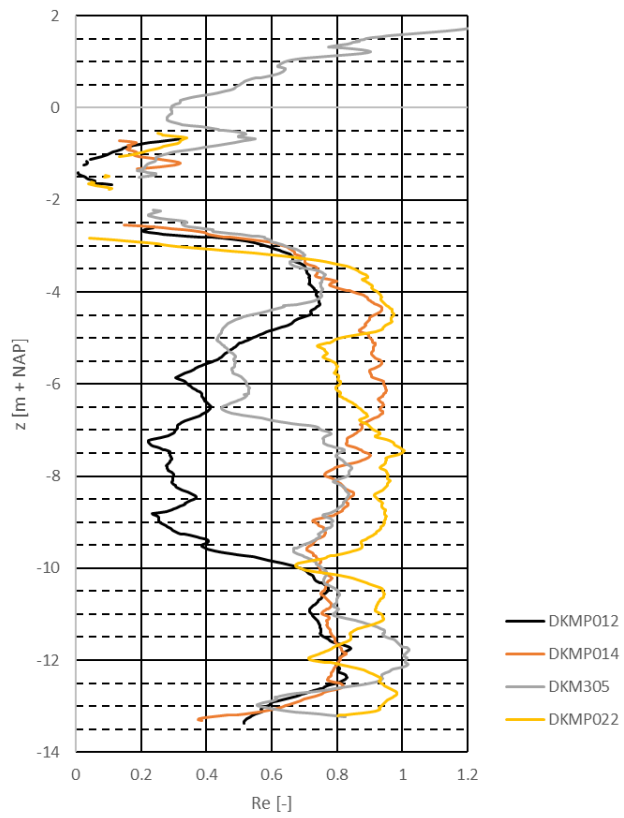


Figuur 2-5 Classificatie volgens Robertson (2009), sondering DKMP022

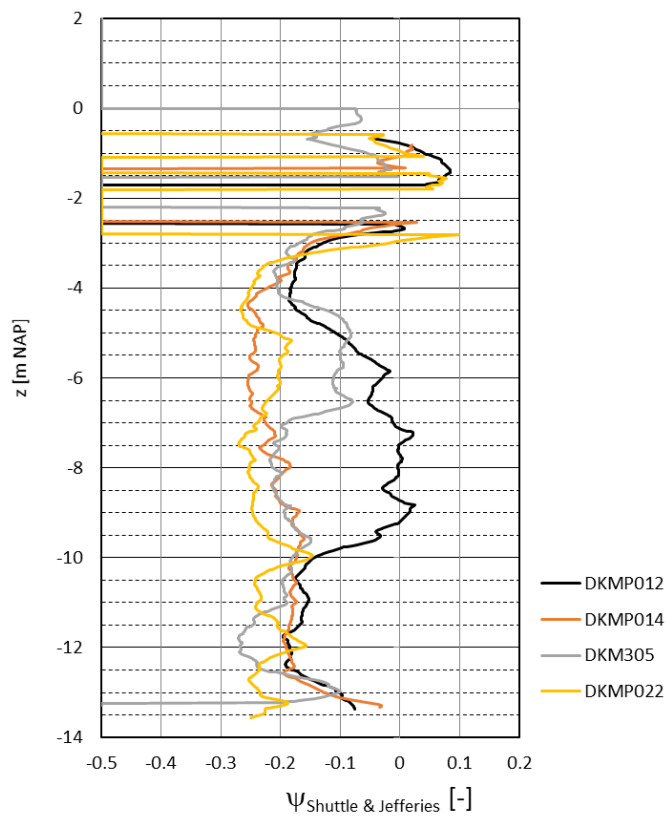
De classificatie geeft twee onderscheiden gebieden. De toplaag geeft een hoge I_c - waarde, die correspondeert met slappe grond. Onder NAP -3 m is sprake van normaal tot licht overgeconsolideerd zand. Dit komt overeen met de formatie van Boxtel.

2.2 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 2-6 en Figuur 2-7 weergegeven.



Figuur 2-6 Schatting relatieve dichtheid volgens Lunne en Christoffersen (1983)



Figuur 2-7 Schatting state parameter

De relatieve dichtheid en de state parameter variëren sterk per locatie. Zowel losgepakt zand ($R_e = 30\%$) als vastgepakt zand ($R_e = 90\%$) komen voor. Eenzelfde variatie wordt gevonden voor de state parameter ψ Shuttle & Refferies.

3 Beoordeling verwekingsgevoeligheid op basis sonderingen

Volgens art. A.1.2.2.2 van NEN 3651 is zand met een relatieve dichtheid van $R_e > 60\%$ als niet verwekingsgevoelig te beschouwen. Dit vormt een eerste indicatie voor de beoordeling. Daarnaast is gebruik gemaakt van resultaten van onderzoek in het kader van project TC211 (explosies in tunnels) van consortium DC-COB. Als onderdeel van dit project zijn een aantal testen met belasten en ontlasten van zandmonsters uitgevoerd (Meijers, 2007). Deze resultaten zijn gebruikt als indicatie voor de relatieve dichtheid en state parameter waarbij geen verweking wordt verwacht.

Volgens deze benaderingen worden voor de vier sonderingen waarvoor een schatting van de relatieve dichtheid en state parameter is bepaald het risico op verweking geschat. Die bevindingen zijn vervolgens gebruikt voor een kwalitatieve beoordeling van de overige sonderingen op het relevante kade traject. De beoordeling per sondering is weergegeven in Tabel 3-1. Waar in de kolom 'sonderingen' twee sonderingen worden genoemd betreft het twee sonderingen die min of meer in hetzelfde dwarsprofiel staan. De beoordeling 'onzeker' betreft een situatie waarbij geen duidelijke uitspraak over de verwekingsgevoeligheid mogelijk is.

Tabel 3-1 *Beoordeling verwekingsgevoeligheid op basis expert opinion*

sondering	beoordeling
DKMP011	Verwekingsgevoelig
DKMP012	Verwekingsgevoelig
DKMP014 / DKMP015	Niet verwekingsgevoelig
DKMP016 / DKMP017	Niet verwekingsgevoelig
DKM306	onzeker
DKM305 / DKMP019	DKMP019 verwekingsgevoelig; DKM305 onzeker
DKMP020	Niet verwekingsgevoelig
DKMP022 / DKMP023	Niet verwekingsgevoelig

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 korrelspanning, 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.

Bij het ontstaan van verweking in de nabijheid van taluds is het waarschijnlijk dat deze afschuiven. Of dit tot een falen van de waterkering leidt hangt af van de situatie en het restprofiel van de waterkering. Beoordeling hiervan valt buiten het kader van deze analyse.

5 Conclusie

De dichtheid van het zand varieert sterk per sondering. Zowel losgepakt zand als vastgepakt zand komen voor. Daarmee is de beoordeling van de kans op verweking ook sterk afhankelijk van de plaats. Op basis van de sondeerweerstand en de daaruit bepaalde relatieve dichtheid en state parameter is een oordeel gevormd over het mogelijk optreden van verweking bij openbarsten van een gasleiding. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 3-1.

A 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 6: Kraterberekeningen leidingkruising 20 (A666)

Opgesteld door:

- Dick Mastbergen (Deltares)

Datum: 24 juli 2023 (definitief)

1 Kraterberekeningen bij gasleidingbreuk A666, 48” aardgastransportleiding kruising kade Tussenklappenpolder

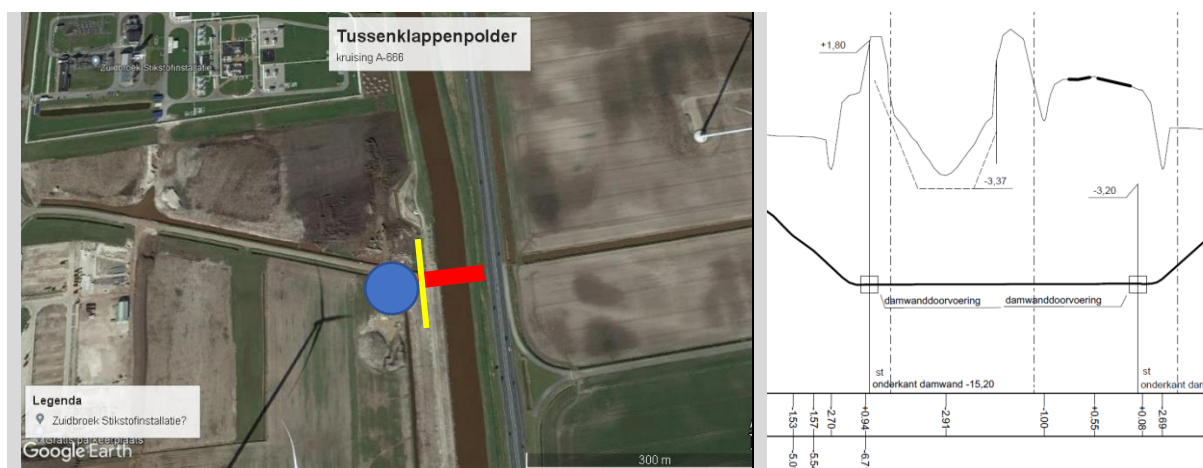
Kruisingen hogedruk gastransportleiding in kade A.G. Wildervanckkanaal, Tussenklappenpolder.

Dick Mastbergen, 8 juli 2022, Deltares, project 11207821.

1.1 Inleiding

In opdracht van het Waterschap Hunze en Aas is door Arcadis een ontwerp gemaakt voor de versterking van de regionale kade van het A.G. Wildervanckkanaal, bij de Tussenklappenpolder bij Veendam, Groningen met bestaande kruisingen van hogedruk gastransportleidingen van NAM en Gasunie.

Deltares heeft opdracht gekregen van Gasunie voor het uitvoeren van een gedetailleerde kraterberekening voor de leidingkruising 20 (Gasunie nummer A666-KR-017 48” - 80 bar aardgas transportleiding) met het A.G. Wildervanckkanaal, Tussenklappenpolder (zie Figuur 1 en Tabel 1).



Figuur 1 Locatie en doorsnede kruising A666-KR-017 (rood) met damwand (geel) en mogelijke krater bij breuk (blauw)

De situatie in bovenaanzicht en dwarsdoorsnede is vastgelegd in tekening A666-KR-017. Bij de kruising is destijds in de binnenkruislijn een stalen damwand geplaatst tot een diepte van -15,20 m NAP met een doorvoering van de leiding en een puntdiepte van 6,70 m NAP. De bestaande kade heeft een hoogte van +1,80 m NAP. Het maaiveld in de polder ligt op -1,50 m NAP, de leiding heeft dan een gronddekking van 2 m die toeneemt tot ruim 6 m bij de kruising. In de berekening wordt een constante waarde voor de gronddekking aangehouden van 4 m. Omdat de berekening uitgaat van vrije uitstroming van het gas naar het maaiveld betekent dit dat de kuil diepte altijd tot de onderzijde van de leiding strekt. Het effect van de kuil diepte op de krater lengte is niet zo groot.

Voor deze hogedruk gastransportleiding wordt aangenomen dat het maatgevende faalmechanisme bestaat uit volledige leidingbreuk ter plaatse van de kade. De damwand geeft bescherming aan het grondlichaam daarachter. De meest ongunstige locatie van een leidingbreuk voor de kade is juist aan de binnenzijde van de damwand of mogelijk ook juist aan de buitenzijde. In dat laatste geval zou de gasuitstroom echter sterk beperkt worden door het aanwezige water en de krater waarschijnlijk minder groot zijn dan bij breuk aan de polderzijde.

Voor de grondsoort wordt uitgegaan van nat zand of klei/veen.

Tabel 1 Kenmerken leidingkruisingen A.G. Wildervanckkanaal westelijke kade

Buisleiding	Gasunie	NAM	NAM	Gasunie	Gasunie
Leidingnummer	A-633	501014	501024	A-590	A-666
Diameter [inch]	48	28	28	12	48
Product	Aardgas*	Aardgas*	Aardgas*	Aardgas*	Aardgas*
Ontwerpdruk [bar]	79,9	83	83	79,9	79,9
Bouwjaar	1992	1966	1970	1980	2010
Kruisingnummer	12	16	17	19	20
Materiaal	staal	staal	staal	staal	staal
Diameter uitw [mm]	1219,2	711,2	711,2	304,8	1219,2
Wanddikte [mm] t.p.v. kruising	30	15,8	15,8	17,48	22,7
Diameter inw [mm]	1159,2	679,6	679,6	269,84	1173,8

* droog, niet corrosief aardgas

1.2 Dynamische berekening ontgrondingskuil

Door de Gasunie is een versimpelde, gestileerde, dynamische berekening van de gasuitstroming van de A666 leiding uitgevoerd voor een volledige leidingbreuk ter plaatse van de kadekruising. Deze berekening wordt als uitgangspunt genomen voor de kraterberekening. Voor de kanaal-/dijkkruising is een afstand van 25 km bovenstrooms en benedenstrooms relevant. De berekening geeft de gasuitstroming in de bovenstroomse (upstream) zijde en de benedenstroomse (downstream) zijde van de leiding bij de breuk als functies van de tijd gerekend vanaf het moment van breuk. Voor deze leiding is de ontwerpdruk 79,9 bar. Downstream gaat de gasuitstroom snel naar 0, upstream blijft er een zekere reststroom optreden.

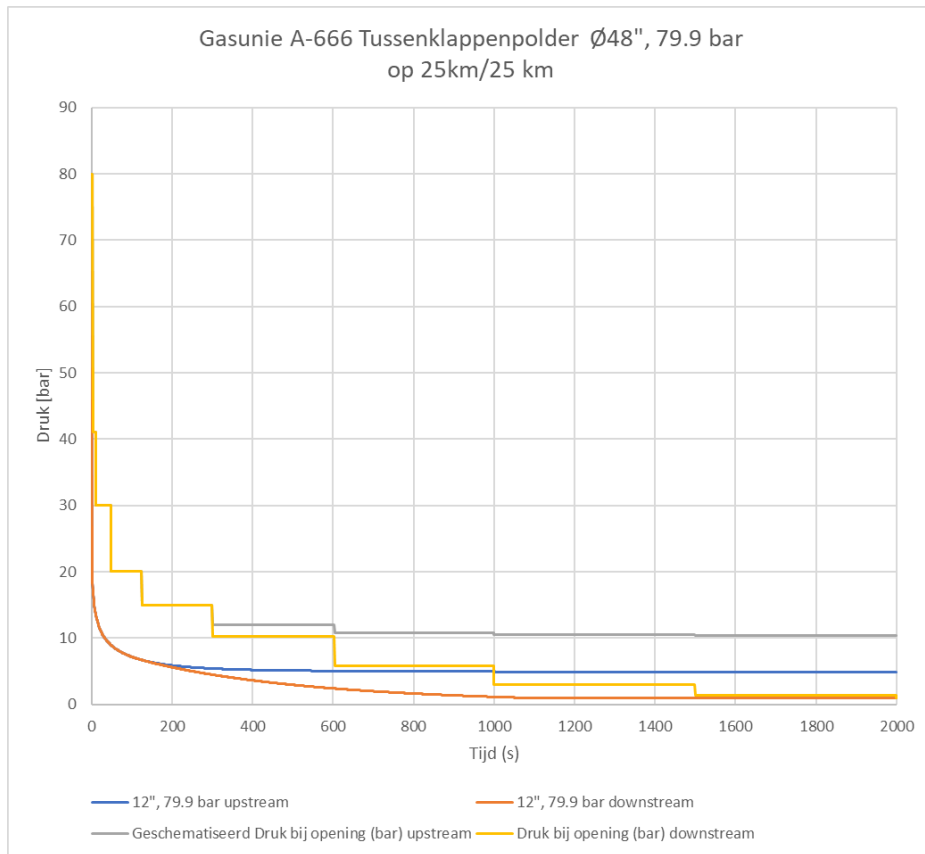
Omdat de transportrichting in dit deel van het netwerk (de gasrotonde) in beide richtingen kan zijn moet rekening gehouden worden met een reststroom in beide richtingen.

Omdat het niet mogelijk is de dynamische gasuitstroming ook voor de allereerste momenten na breuk te bepalen (van 0 tot 1 sec), wordt voor tijdstip $t = 0$ 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.

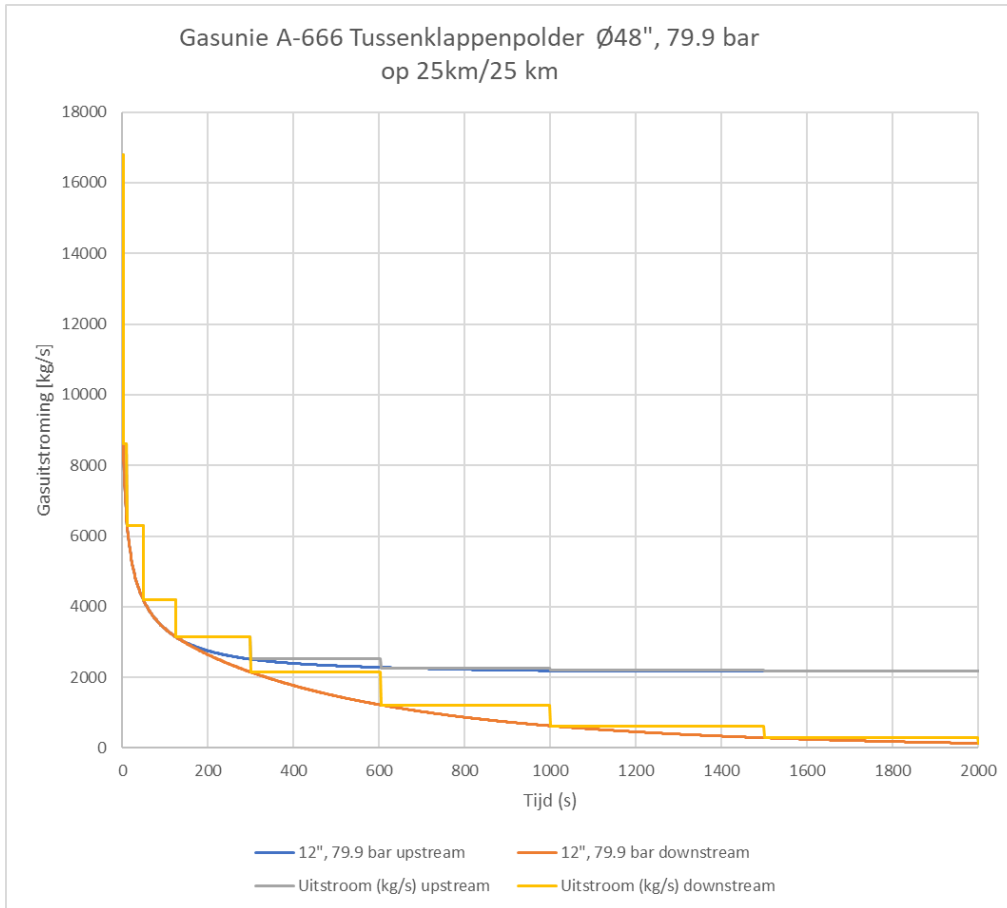
De gasuitstromingsberekeningen zijn uitgevoerd voor 1000 sec, dan is er al vrijwel een stationaire situatie ingetreden. De berekening is geëxtrapoleerd naar 2 uur, onder aanname dat de stationaire eindsituatie veiligheidshalve nog 2 uur blijft bestaan, voordat de leiding wordt afgesloten. Voor de downstream zijde heeft dit geen effect, immers daar is de gasuitstroming na 10 minuten al bijna tot 0 gereduceerd.

De gasuitstromingsberekeningen van de Gasunie zijn geschematiseerd tot een stapsgewijs afnemende druk met de daarbij berekende stationaire uitstroming, zie grijze trapjeslijnen in Figuur 2 en Figuur 3 (upstream voor de 48"-leiding). Daarbij zijn de drukken zodanig aangehouden dat de daarbij berekende stationaire gasuitstroming nooit lager is dan de dynamische berekening aangeeft. Vervolgens zijn de berekeningen geëxtrapoleerd naar een tijdsduur van 2 uur. Er is dus aangenomen dat in de leiding de uitstroming 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 3651 en in Deltares (2010). Dit geeft een veilige benadering van de dynamische uitstroming.

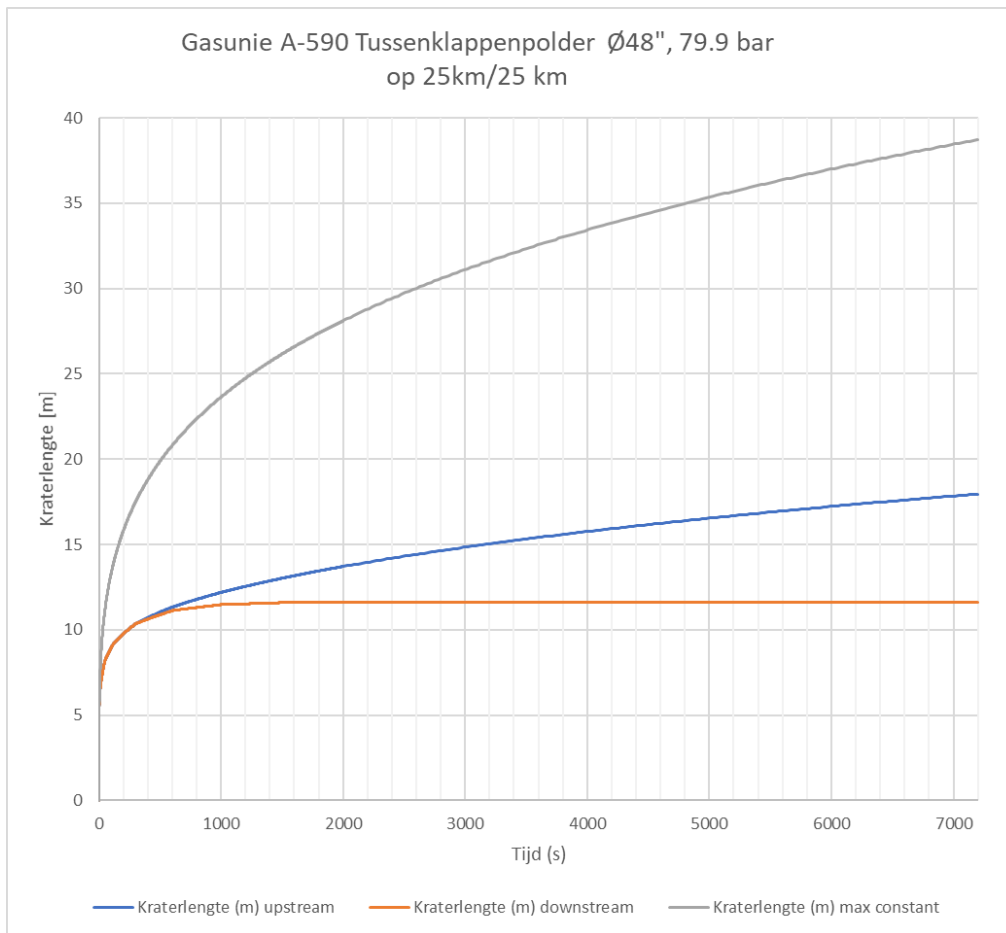


Figuur 2 Dynamisch berekende en geschematiseerde druk in gasleiding bij leidingbreuk (48")



Figuur 3 Dynamisch berekende en geschematiseerde gasuitstroming in gasleiding bij leidingbreuk (48")

De resulterende kuilontwikkeling is gegeven in Figuur 4. De dynamisch berekende kraterlengte (diameter ontgrondingskuil) voor deze kruising bedraagt dus 18 m.



Figuur 4 Berekende erosiekraterontwikkeling bij gasleidingbreuk (48"). Donkerblauwe lijn = upstream, oranje lijn = downstream, beiden volgens dynamische of explosiescenario. Grijze lijn = bij stationaire maximale uitstroming gedurende 2 uur (eenvoudige methode NEN 3651).

1.3 Resultaten

De berekeningsresultaten voor de kraterafmetingen zijn samengevat in Tabel 2 voor de leidingkruising A666-KR017.

Tabel 2 Gegevens en resultaten kraterberekeningen eenvoudig en dynamisch

Buisleiding	Gasunie	
Leidingnummer	A-666	
Diameter	48	inch
Product	Aardgas*	
Ontwerpdruk	79,9	bar
Bouwjaar	2010	
Kruisingnummer	17	
Materiaal	staal	
Diameter uitwendig	1219,2	mm
Wanddikte t.p.v. kruising	22,7	mm
Diameter inwendig	1173,8	mm
Max uitstroom gas	16785	kg/s
Max impuls	1,08E+07	N
Gronddekking	4,0	m
NEN 3651 Bijl A Eenvoudig		
Na 2 uur max uitstroom		
Kraterdiepte D_K	5,95	m
Kraterlengte G_L	38,7	m
Kraterbreedte G_B	19,3	m
Straal explosiekrater t	3,7	m
Berekeningen dynamisch na 2 uur		
Kraterlengte upstream	18,0	m
Kraterlengte downstream	11,6	m

1.4 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 de dynamisch berekende druk en uitstroming bij breuk daarom aanbevolen (passend in NEN 3651 A.1.1.3), omdat deze realistischer is maar nog steeds conservatief.

Bijlage 7: Stabiliteit- en pipingberekeningen zonder en met erosiekrater

Opsteller:

- Wiebe Janssen (Arcadis)

Datum: 24 juli 2023 (definitief)

ONDERWERP
Memo berekeningen erosiekrater

PROJECTNUMMER
30070539

DATUM
4 januari 2023

ONZE REFERENTIE
D10054651:18

VAN
Mitchell van der Horst, Wiebe Janssen

AAN
Henk Hazelhorst

KOPIE AAN
Martin Arends

Inleiding

In deze memo is een beschouwing gedaan van de invloed van het falen van de leiding op de dijkfaalmechanismen macro-instabiliteit en piping van de boezemkade in dijkvak 3b (hm 0.8 tot hm 1.9) van de Tussenklappenpolder. Er is gerekend zonder en met een erosiekrater, daarbij is gekeken naar onderstaande faalsporen.

- Binnenwaartse stabiliteit (extreme situatie bij MHW = NAP +1,5 m);
- Binnenwaartse stabiliteit (dagelijkse situatie bij KP = NAP +0,53 m) zonder en met verweking;
- Buitenwaartse stabiliteit (dagelijkse situatie bij KP = NAP +0,53 m);
- Piping;
- Constructieve sterkte van de damwand bij leidingkruising 20.

Doel

Het doel van deze memo is om de macrostabiliteit, veiligheid tegen piping en de sterkte van de damwand te berekenen van de boezemkade in dijkvak 3, bij het falen van de leiding die ter plekke aanwezig is. Hierbij zijn vier verschillende leidingen beschouwd. Er wordt geen veiligheidsoordeel opgesteld, dit wordt in een later stadium bepaald door de resultaten uit deze memo te combineren met de faalkans van de leiding. Deze analyse wordt uitgevoerd door een andere specialist.

Uitgangspunten

De berekeningen zijn overgenomen uit de toetsing. Voor geotechnische parameters wordt verwezen naar de geotechnische achtergrondrapportage [ref. 1]. De boezemkade heeft IPO-klasse V. Voor de beschouwde faalmechanismen zijn specifieke waterstanden aangehouden, deze zijn benoemd in de betreffende paragrafen.

Hieronder een overzicht van de aangehouden hydraulische randvoorwaarden

- Maatgevend boezempeil: MHW = NAP +1,5 m
Toegepast in berekeningen: STBI, STPH zonder erosiekrater, binnenwaartse erosiekrater damwand
- Streefpeil boezem: KP = NAP +0,53 m (STBU, STPH met erosiekrater)
Toegepast in berekeningen: STBU, STPH zonder erosiekrater
- Gemiddeld lage boezemwaterstand; NAP +0,33 m
Toegepast in berekeningen: Buitenwaartse erosiekrater damwand

Berekening dieptes erosiekrater

De dieptes van de erosiekraters zijn bepaald op basis van referentie 2 en 3. De erosiekrater is ingezet vanuit de insteek van de binnenberm. De krater loopt vanaf dit punt onder een helling van 1:3 naar de diepte van de krater, binnenwaarts en buitenwaarts. De binnen- en buitenwaartse situatie zijn voor alle faalsporen apart berekend. De minimale diepte van de erosiekrater is afhankelijk van de diameter van de leiding. De diepte van de krater is 0,6 keer de diameter van de leiding, gerekend vanaf de onderkant van de leiding. In Tabel 1 is per leiding de diepte van de erosiekrater weergegeven.

Tabel 1: Diepte erosiekrater per leiding

Leiding	Locatie [dijkpaal]	Diameter [m]	Diepte leiding (bovenkant) [m NAP]		Diepte erosiekrater [m NAP]	
			Binnenwaarts	Buitenwaarts	Binnenwaarts	Buitenwaarts
Leiding 12	0.8+85 m	1,22	-3,50	-5,60	-5,5	-7,55
Leiding 16	1.0+50 m	0,70	-4,15	-5,00 ¹	-5,3	-6,12
Leiding 19	1.4	0,30	-3,63	-5,50 ¹	-4,1	-6,00
Leiding 20	1.387	1,20	-5,10	-6,71	-7,0 ²	-8,74

¹De exacte diepte van de leiding kon niet worden bepaald op basis van de beschikbare gegevens. Daarom is een conservatieve inschatting gedaan.

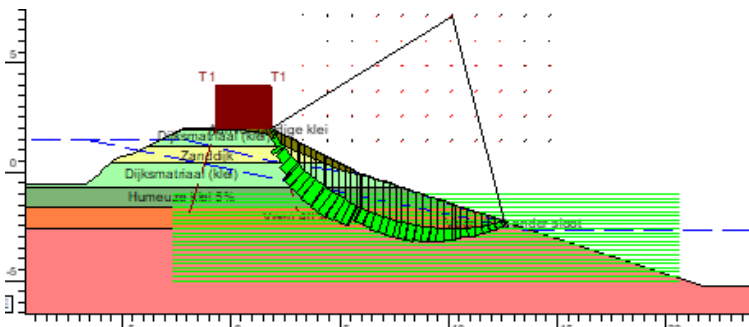
²In de damwandberekening van bij leiding 20 [ref. 4] is rekening gehouden met een diepte van NAP -8,2 m. Deze is gehandhaafd in de berekeningen achter deze memo.

Stabiliteitsberekeningen

De uitkomsten van de stabiliteitsberekeningen voor binnen- en buitenwaartse stabiliteit staan zijn in Tabel 2 weergegeven. De berekening zijn uitgevoerd met het Mohr-Coulomb model (gedraineerde schuifsterkte). Voor de achterliggende glijdvlakken wordt verwezen naar Bijlage 1. Hierbij is een erosiekrater geschematiseerd volgens de uitgangspunten uit de voorgaande paragraaf. In Figuur 1 staat een voorbeeld van een stabiliteitsberekening met erosiekrater (leiding 16).

Tabel 2: Uitkomsten stabiliteitsberekeningen

Leiding	Locatie [dijkpaal]	Binnenwaartse stabiliteit (Maatgevend boezempeil = NAP +1,5 m)		Buitenwaartse stabiliteit (Streefpeil boezem = NAP +0,53 m)	
		Zonder erosiekrater	Met erosiekrater	Zonder erosiekrater	Met erosiekrater
Leiding 12	0.8+85 m	1,86	0,82	1,43	1,71
Leiding 16	1.0+50 m	0,89	0,83	1,36	1,99
Leiding 19	1.4	0,88	0,75	0,86	1,98



Figuur 1: Voorbeeld berekening met erosiekrater (leiding 16)

Gevoeligheidsberekening Macrostabiliteit dagelijkse omstandigheden

Als gevoeligheid is onderzocht wat de veiligheid is tijdens dagelijks omstandigheden in de situatie met en zonder erosiekrater. In Tabel 3 zijn de resultaten weergegeven. De glijvlakken zijn toegevoegd in Bijlage 1.

Tabel 3: Uitkomsten stabiliteitsberekeningen dagelijks

Leiding	Locatie [dijkpaal]	Binnenwaartse stabiliteit (Streefpeil boezem = NAP +0,53 m)	
		Zonder erosiekrater	Met erosiekrater
Leiding 12	0.8+85 m	1,94	1,18
Leiding 16	1.0+50 m	1,07	1,14
Leiding 19	1.4	1,10	0,92

Invloed verweking

Leiding 12 behoeft een aanvullende beschouwen met de invloed van verweking. De bodemopbouw ter plaatse is verwekingsgevoelig. Door het exploderen van de leiding kan er verweking optreden in de zandlagen die hier gevoelig voor zijn. Om te bepalen wat de invloed van verweking is op de stabiliteitsberekeningen is gebruik gemaakt van onderzoek uitgevoerd door Piet Meijers van Deltares [ref. 6]. De invloed van verweking heeft invloed op de wateroverspanningen. Volgens [ref. 6] is de meest gangbare manier om dit effect te simuleren in een berekening het verlagen van de hoek van inwendige wrijving naar 3 tot 5° (aangehouden in berekening: 5°). Daarbij wordt de dilatantie op 0° gezet, omdat ervan uit wordt gegaan dat de grond uit elkaar wordt gedrukt. De dichtstbijzijnde sondering waarop een analyse is uitgevoerd op verwekingsgevoeligheid is DKMP012. Voor deze sondering is bepaald dat de verwekingsgevoelige laag zich bevindt tussen NAP -5 m en -9,5 m.

De resultaten van de stabiliteitsberekeningen bij leiding 12, met invloed van verweking, staan in Tabel 4. Hierbij enkel een beschouwing gedaan van de binnenwaartse stabiliteit. Als onderkant van de verwekingszone is NAP -6,2 aangehouden (1,5 m onder de onderkant van de leiding). De bijbehorende glijcirkel staat in Bijlage 2.

Tabel 4: Uitkomsten stabiliteitsberekeningen

Leiding	Locatie [dijkpaal]	Maatgevende sondering	Diepte verwekingszone [m NAP]	Binnenwaartse stabiliteit
Met erosiekrater en verweking				
Leiding 12 (MHW = NAP+1,50 m)	0.8+85 m	DKMP012	-5,0 tot -6,2	0,75
Leiding 12 (KP = NAP +0,53 m)	0.8+85 m	DKMP012	-5,0 tot -6,2	0,80

Pipingberekeningen

De uitkomsten van de piping berekening staan in Tabel 5. In de tabel staan ook de uitkomsten van de pipingberekeningen uit het versterkingsontwerp. De berekeningen zijn uitgevoerd met het model Sellmeijer. Hieronder een overzicht van de uitgangspunten:

- Doorlatendheid: 6 m/dag
- kD (vaste waarde): 13,75 m
- d70: 0,162 mm
- Maatgevend boezempeil: MHW = NAP +1,5 m
- Veiligheidsfactor 1,4
- Schematiseringsfactor 1,1

Er is een schematiseringsfactor aangehouden van 1,1; deze wijkt af van de waarde uit paragraaf 2.10.2 van de geotechnische achtergrondrapportage [ref. 1], maar komt overeen met de pipingberekeningen uit het ontwerp.

Tabel 5: Uitkomsten pipingberekeningen met erosiekrater

Leiding	Locatie [dijkpaal]	Situatie	Polderpeil [m NAP]	Optredend verval [m]	Kritiek verval [m]
Leiding 12	0.8+85 m	Zonder erosiekrater (ontwerp)	-2,2	3,5	4,67
		Met erosiekrater	-2,2	3,7	1,26
Leiding 16	1.0+50 m	Zonder erosiekrater (ontwerp)	-2,145	3,0	1,47
		Met erosiekrater	-2,145	3,645	0,97
Leiding 19	1.4	Zonder erosiekrater (ontwerp)	-2,145	4,2	4,41
		Met erosiekrater	-2,145	3,645	1,07
Leiding 20	1.387	Zonder erosiekrater (ontwerp)	-1,5	4,2	4,41
		Met erosiekrater	-1,5	3,0	2,23

Damwandberekeningen

Ter plaatste van leidingkruising 20 is een damwandconstructie aanwezig die fungeert als vervangende waterkering. Er is een berekening gedaan naar de constructie sterkte van de damwand, bij het falen van de leiding. De berekening is uitgevoerd met het programma D-Sheet Piling. Het type van deze damwand is onbekend, de inheidiepte en bovenkant zijn wel bekend. Als uitgangspunt is een licht type gekozen: AZ12 met staalkwaliteit S240. De diepte van de damwand is NAP -15,2 m [ref. 4]. Voor de berekening met een erosiekrater aan de binnenzijde is de situatie tijdens maatgevend hoogwater bepalend (NAP +1,5 m). Voor de berekening met een erosiekrater aan de buitenzijde is uitgegaan van de maatgevende lage waterstand (NAP +0,33 m). Er is gerekend met RC2. Voor de momentcapaciteit van de damwand

is rekening gehouden met een afname van 15% ten gevolge van corrosie, in lijn met de eerdere berekening [ref. 4]. De uitkomsten van de berekening staan in Tabel 6. Voor een uitgebreid overzicht van de rekenresultaten wordt verwezen naar Bijlage 3. Uit de tabel is op te maken dat de damwand voldoende sterkte overhoudt bij het falen van de leiding, in het geval van een licht profiel met corrosie.

Ten opzichte van de bestaande berekeningen [ref. 4] zijn de volgende dingen gewijzigd:

- Verkeersbelasting toegevoegd van 5 kN over 2,5 m; uitgezet vanaf de rand van de damwand
- Voor de buitenwaartse zijde is gerekend met een lage boezemwaterstand: NAP +0,33 m (was streefpeil).

Tabel 6: Uitkomsten stabiliteitsberekeningen met erosiekrater leiding 20.

Leiding	Locatie [dijkpaal]	Momentcapaciteit [kN]	Berekend buigmoment stap 6.3 [kNm]		Unity check ($M_{\text{capaciteit}}/M_{\text{berekend}}$)	
			Binnenwaarts (MBP)	Buitenwaarts (GLW)	Binnenwaarts	Buitenwaarts
Leiding 20	1.387	245 (AZ 12/S240)	31,3	230,9	0,13	0,94

Referenties

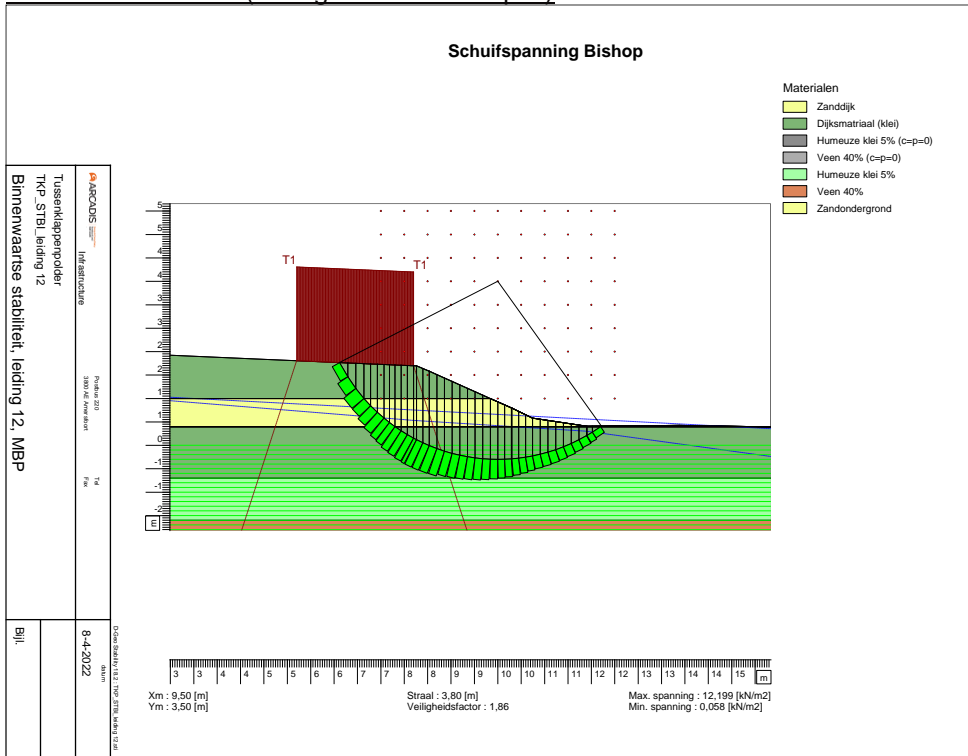
1. 'Geotechnisch achtergrond rapportage Tussenklappen polder', Arcadis, ref.: D10007467, 26 februari 2021
2. 'Bijlage 1 - Dwarsprofielen met erosiekraters bij leidingkruisingen TKP.pdf'
3. 'Dwp leidingen 12 16 17 19 en 20 aangepast 28 januari 2022.pdf'
4. 'Toetsing damwand leidingkruising A666 (nr. 20)-versie 2', Arcadis, ref.: D10047263, 19 januari 2022
5. 'Leidraad Toetsen op Veiligheid Regionale Waterkeringen', STOWA, ref.: STOWA 2015-15
6. 'Kade Tussenklappenpolder, expert opinion verweking', Deltares, ref.: 11207821-002-ZKS-0001, 1 maart 2022

Bijlage 1 Stabiliteitsberekeningen

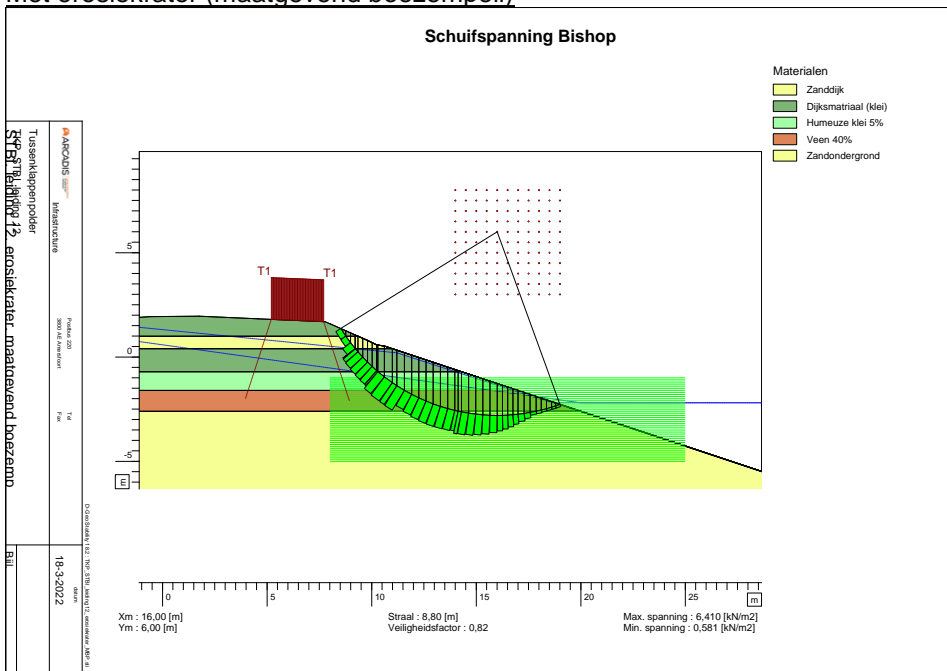
Leiding 12

Binnenwaartse stabiliteit

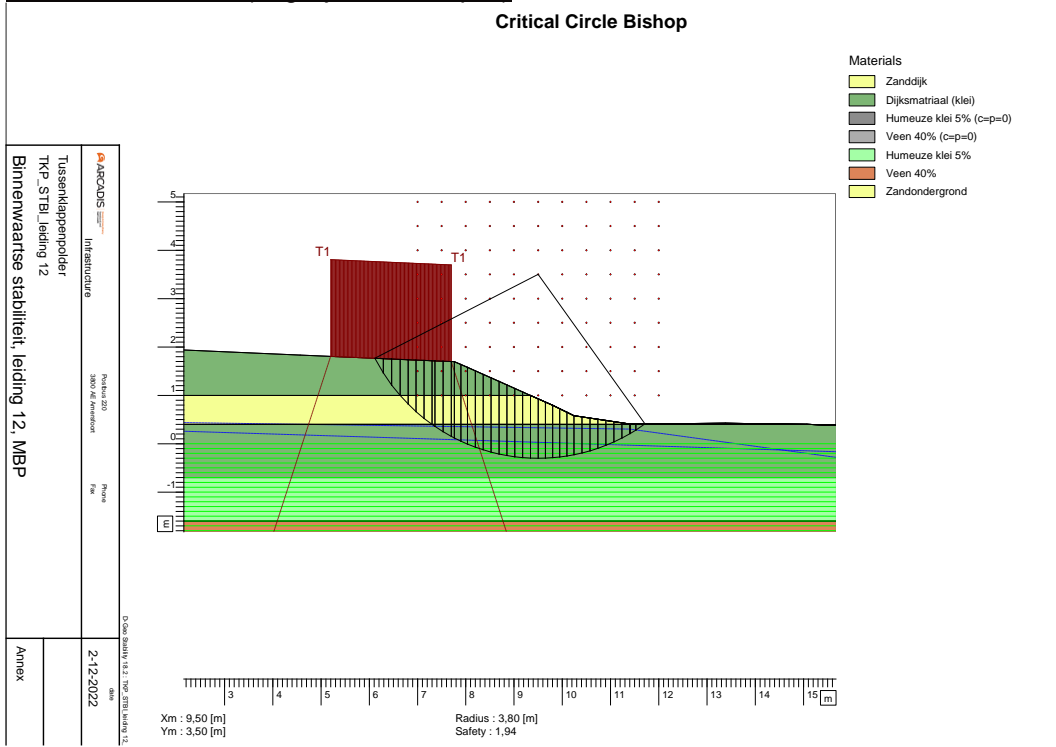
Zonder erosiekrater (maatgevend boezempeil)



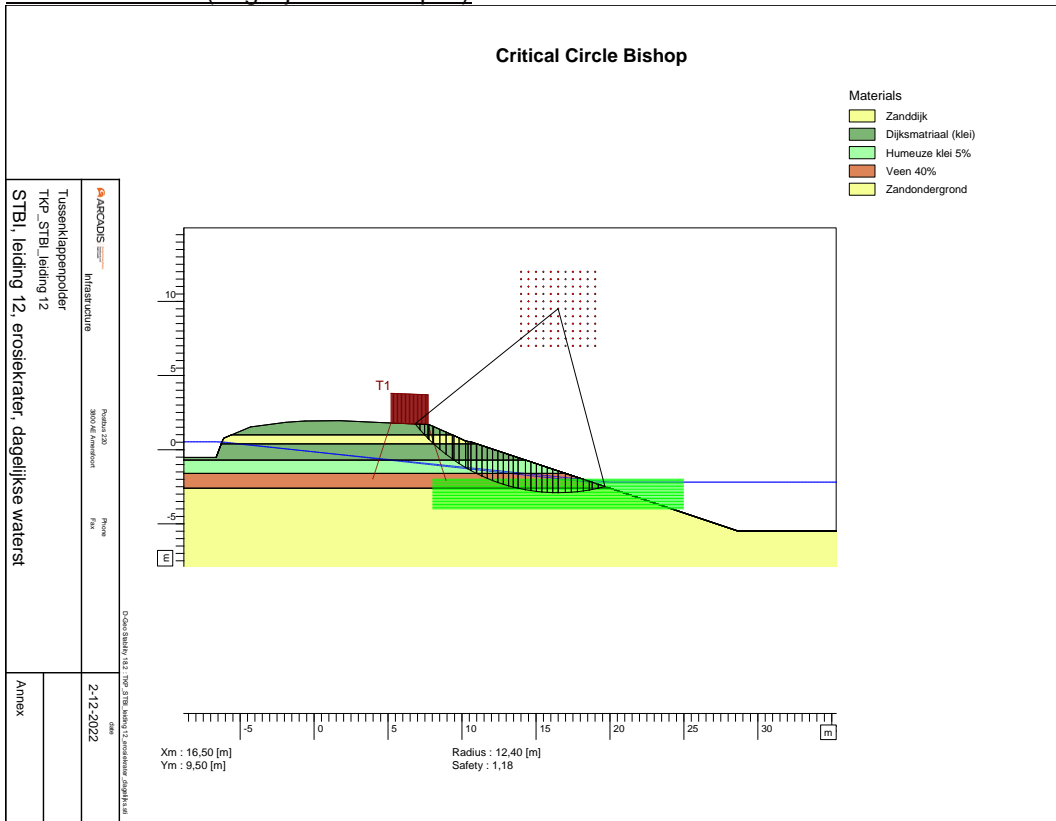
Met erosiekrater (maatgevend boezempeil)



Zonder erosiekraater (dagelijks boezempeil)

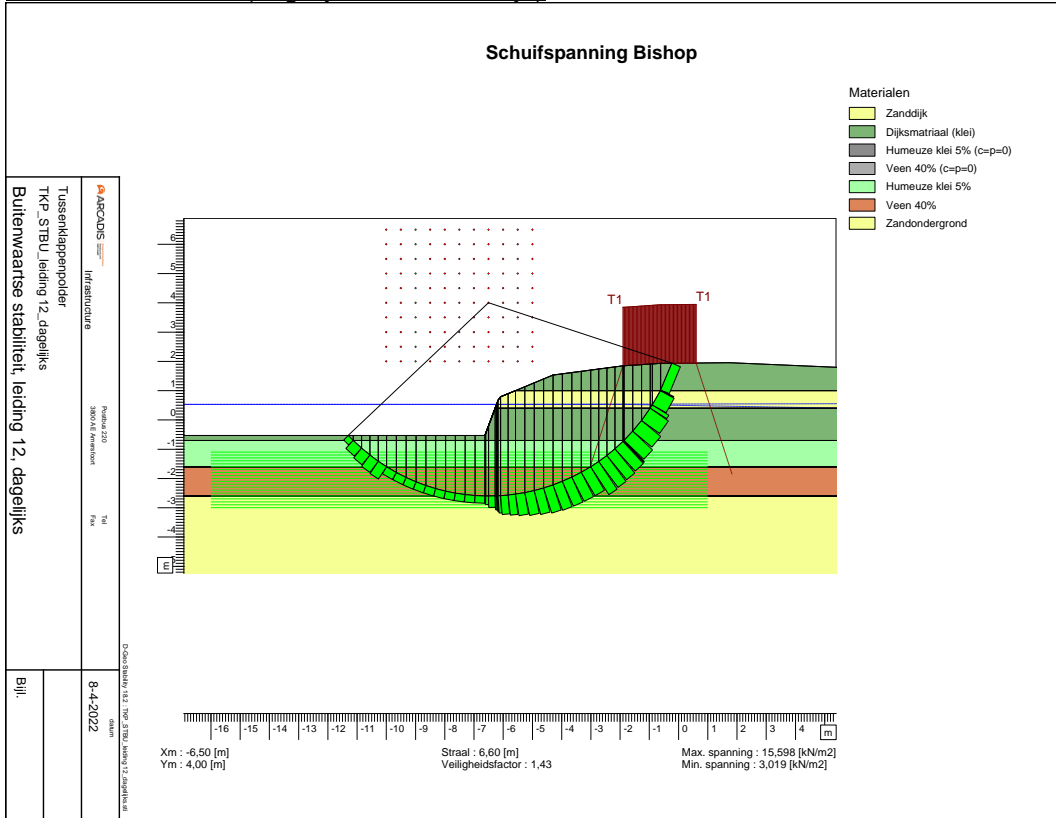


Met erosiekraater (dagelijks boezempeil)

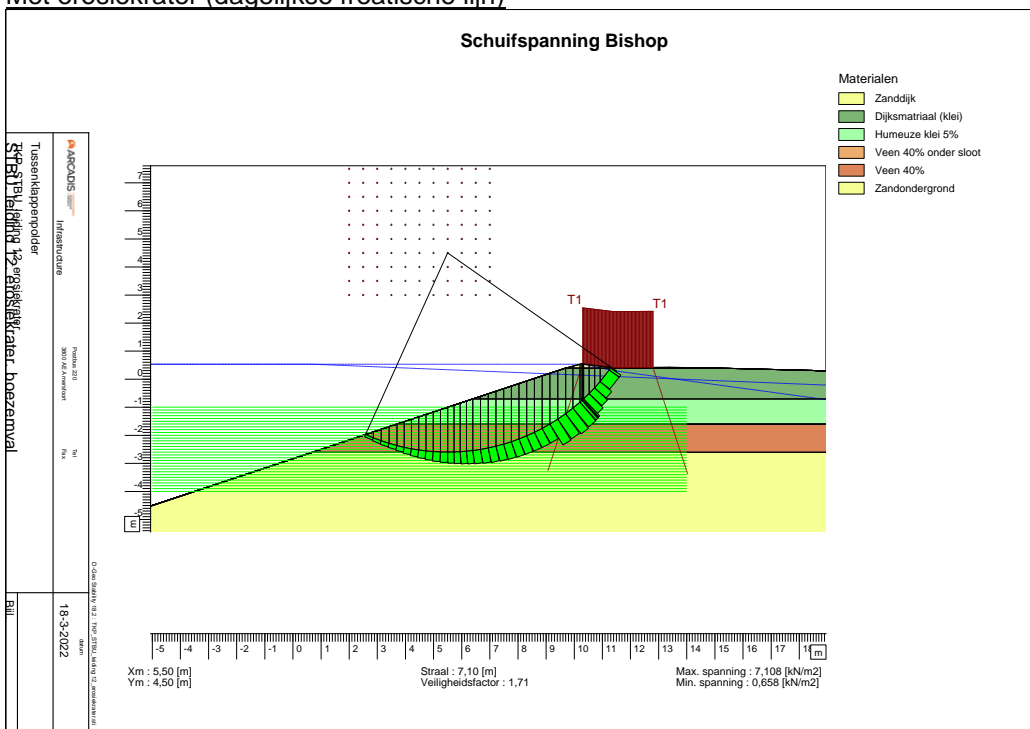


Buitenwaartse stabiliteit

Zonder erosiekrater (dagelijkse freatische lijn)



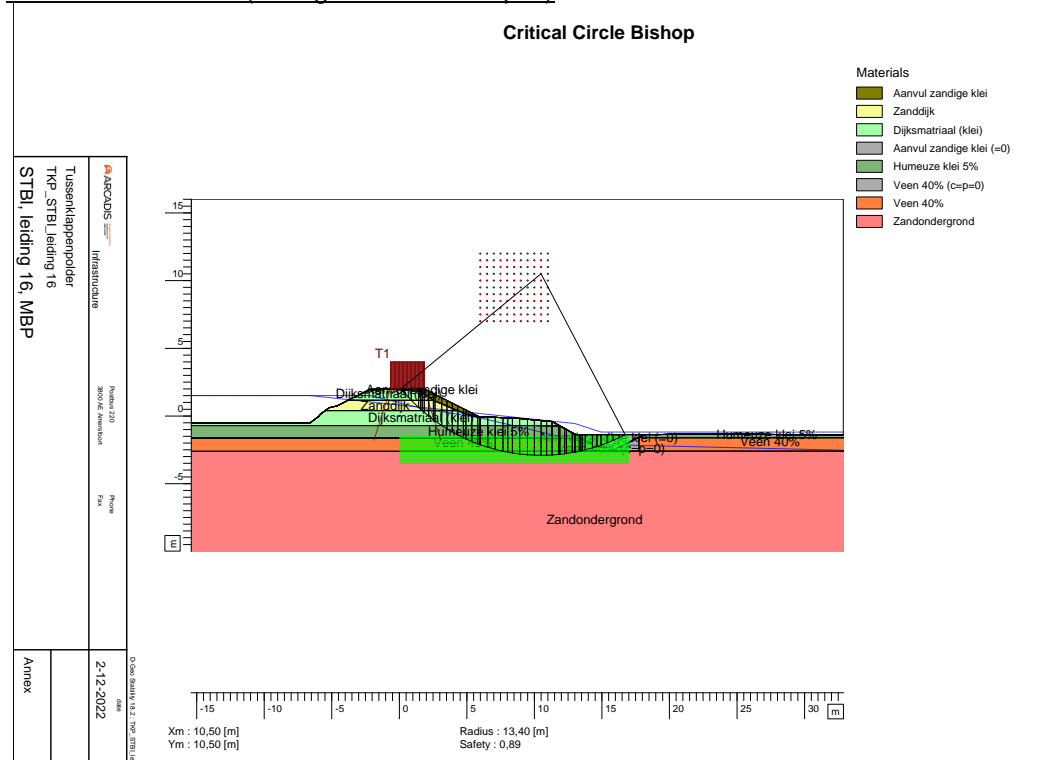
Met erosiekrater (dagelijkse freatische lijn)



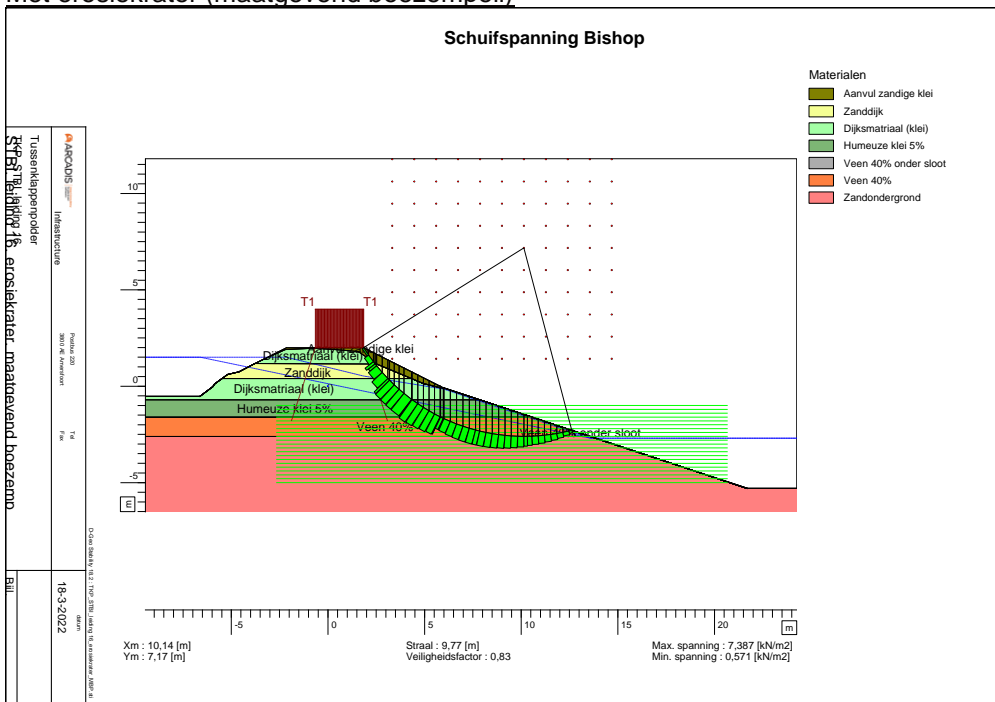
Leiding 16

Binnenwaartse stabiliteit

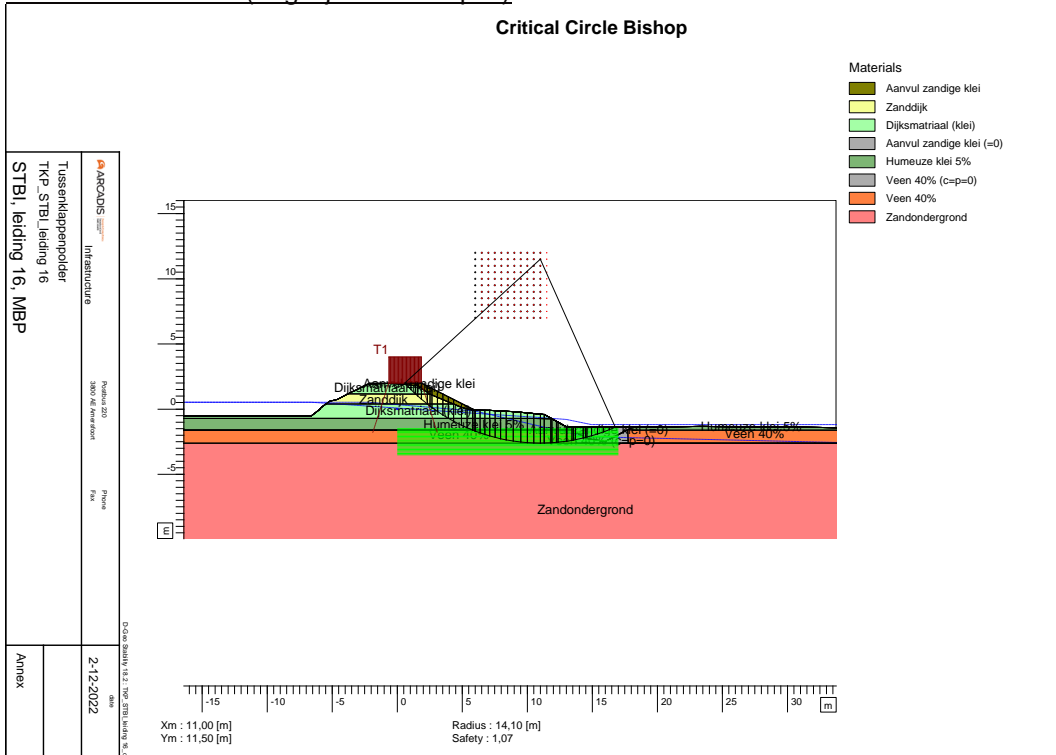
Zonder erosiekrater (maatgevend boezempeil)



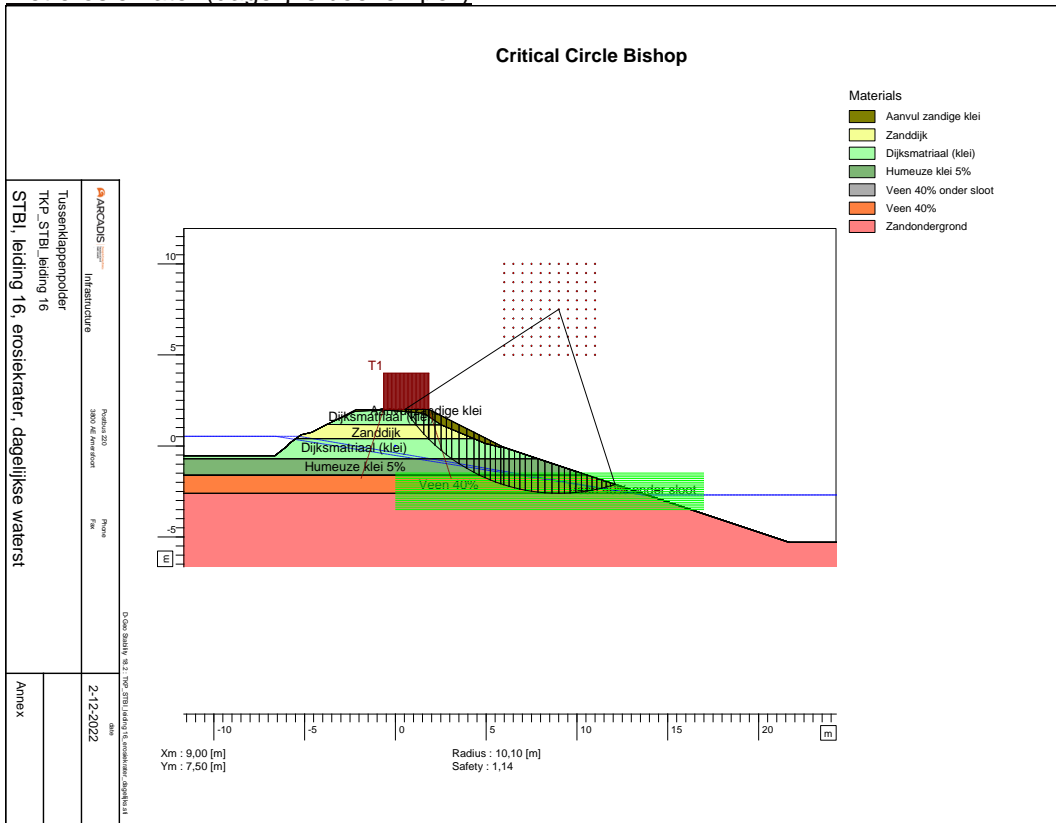
Met erosiekrater (maatgevend boezempeil)



Zonder erosiekrater (dagelijks boezempeil)

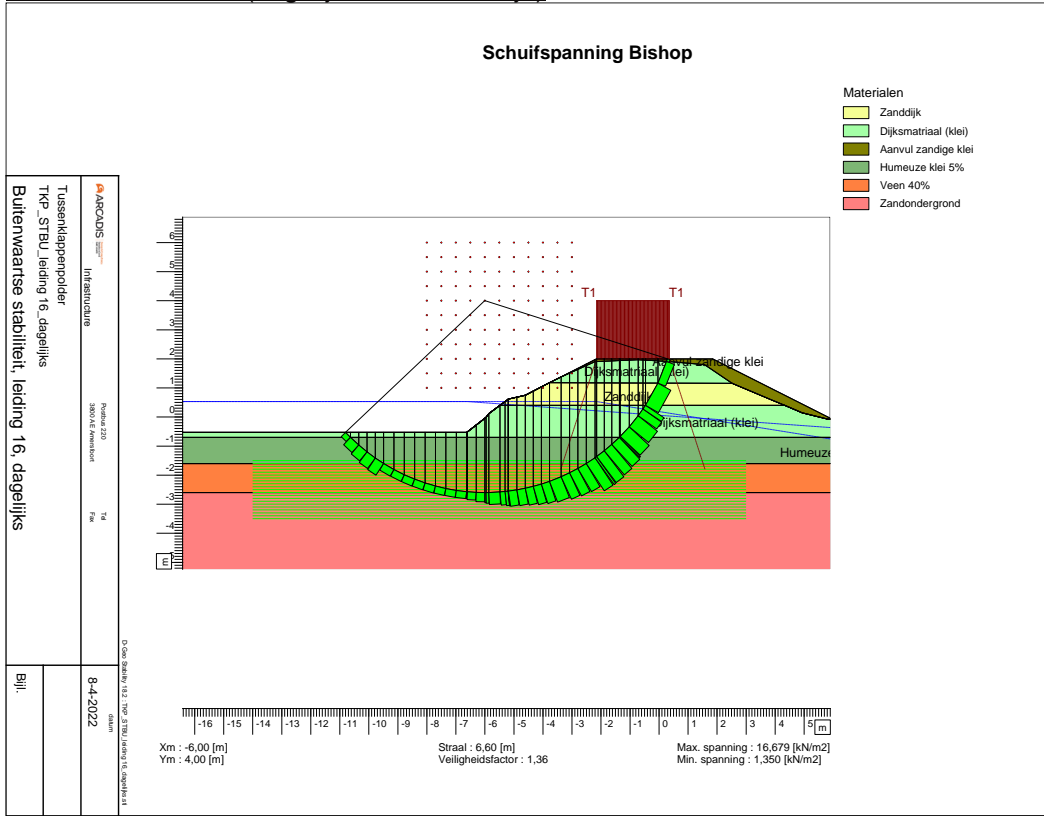


Met erosiekrater (dagelijks boezempeil)

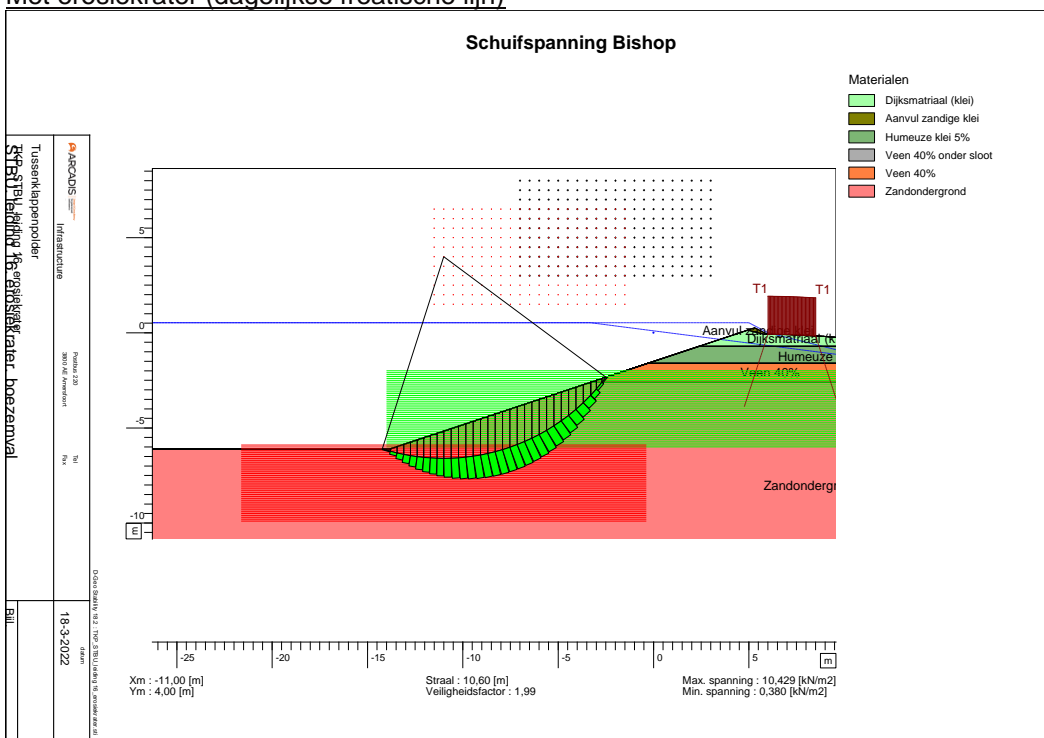


Buitenwaartse stabiliteit

Zonder erosiekraater (dagelijkse freatische lijn)



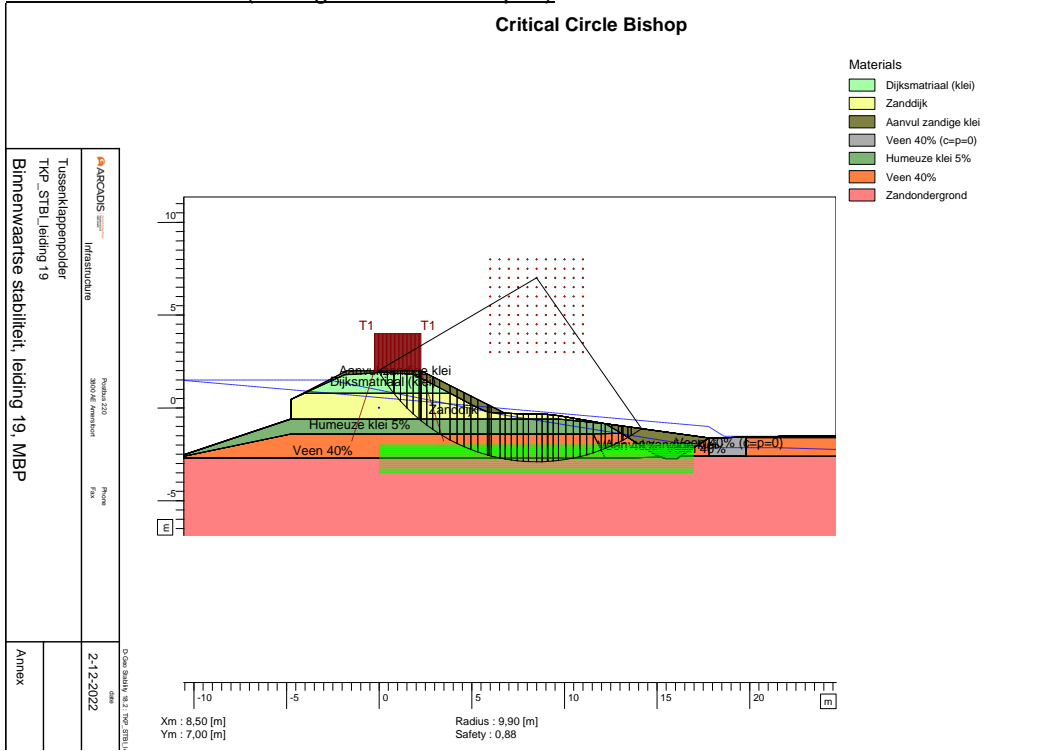
Met erosiekraater (dagelijkse freatische lijn)



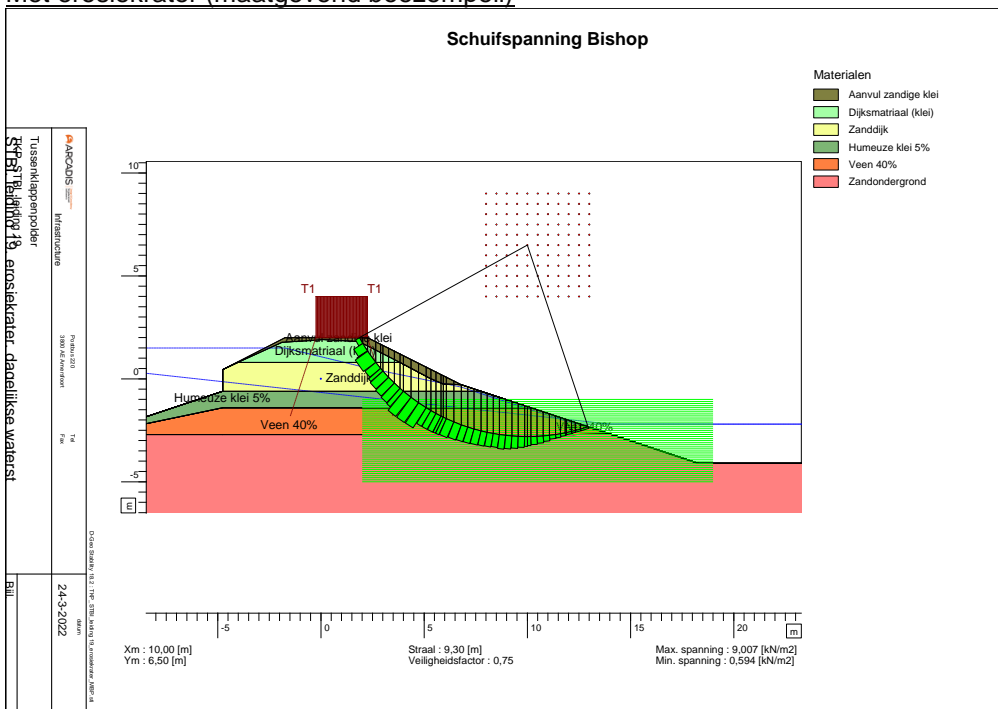
Leiding 19

Binnenwaartse stabiliteit

Zonder erosiekrater (maatgevend boezempeil)

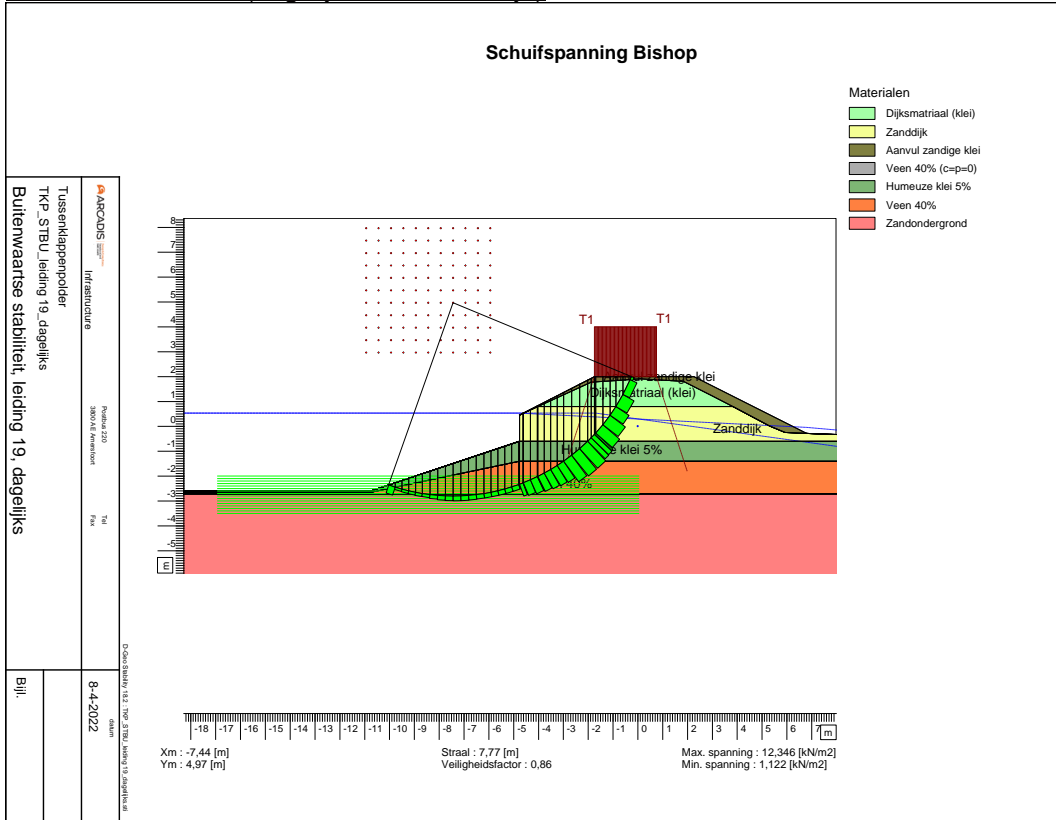


Met erosiekrater (maatgevend boezempeil)

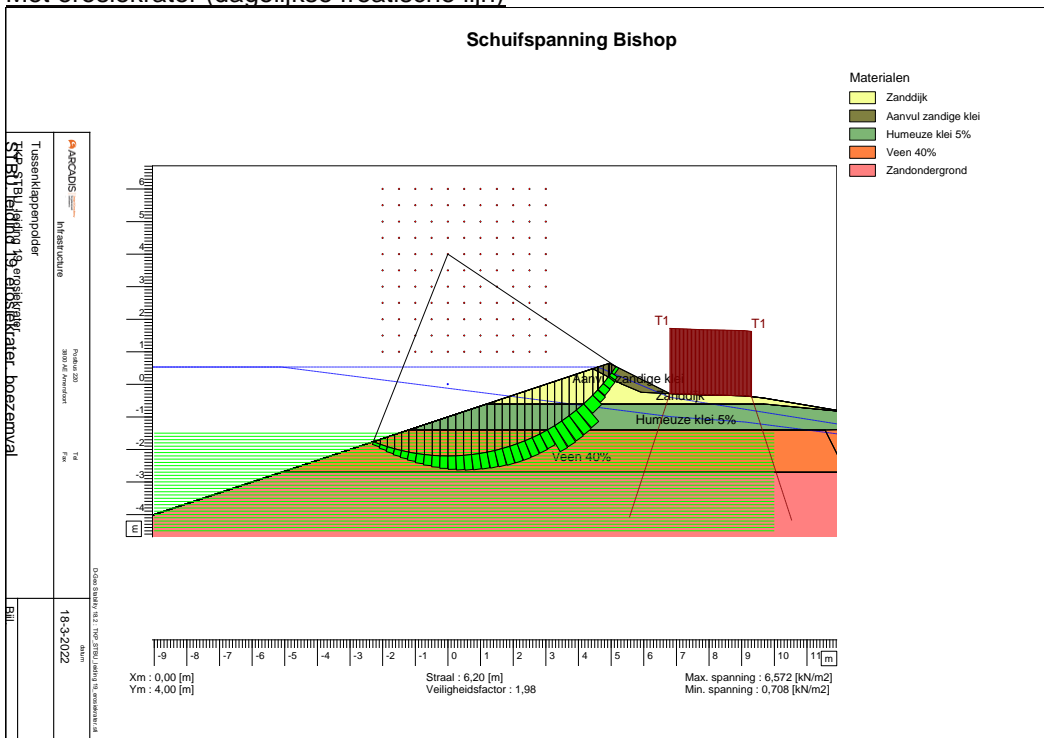


Buitenwaartse stabiliteit

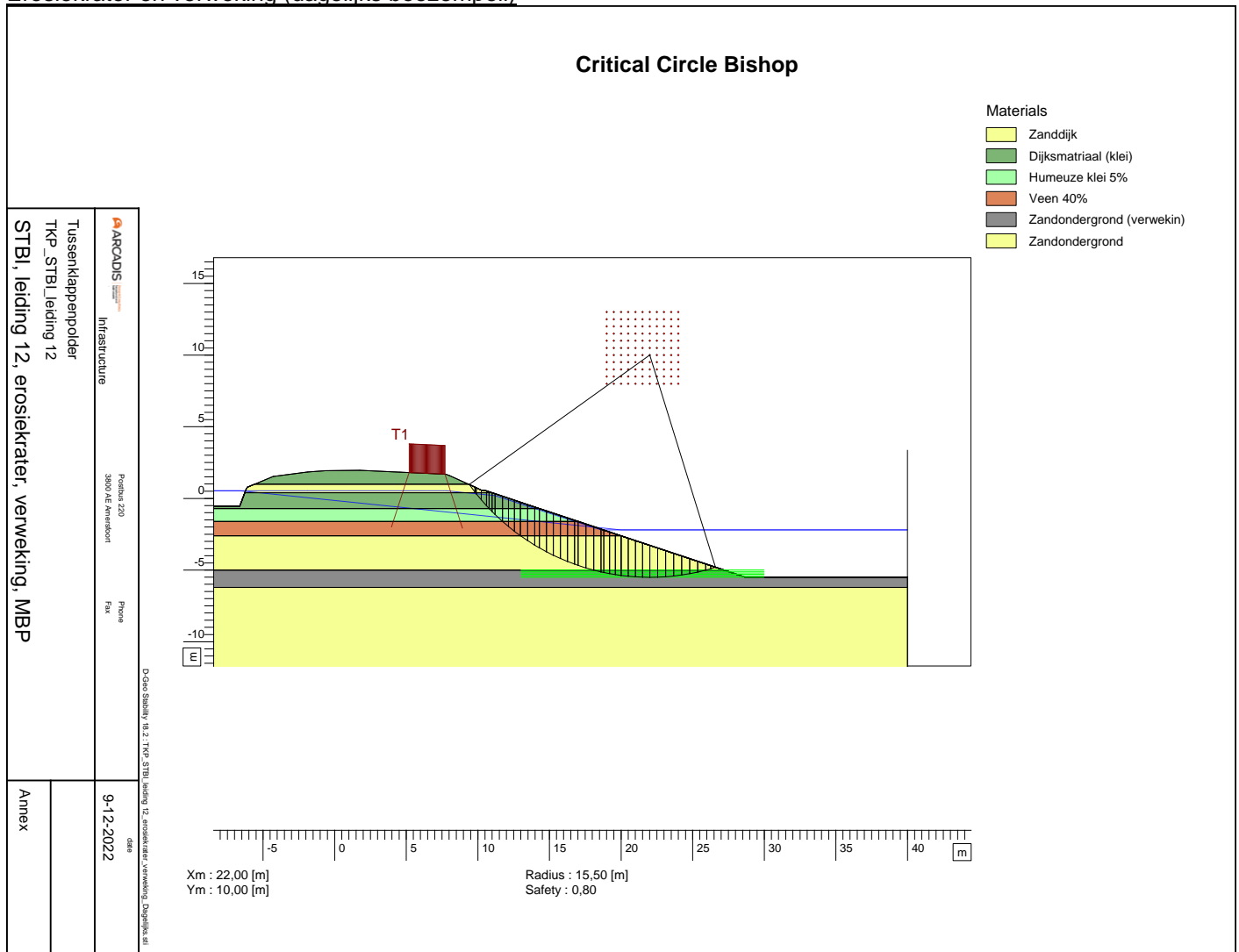
Zonder erosiekrater (dagelijkse freatische lijn)



Met erosiekrater (dagelijkse freatische lijn)



Erosiekrater en verweking (dagelijks boezempeil)



<p>ARCADIS Infrastructure</p> <p>Postbus 202 3800 AE Amersfoort</p> <p>Phone Fax</p> <p style="font-size: small;">De Gea, Sluis 12, TKP STBI Leiding 12, erosiekrater, verweking, Dagelijks st</p>	<p>Tussentkloppenvolder TKP_STBI_leiding 12</p> <p>STBI, leiding 12, erosiekrater, verweking, MBP</p>
<p>9-12-2022</p>	<p>Annex</p>

Bijlage 3 Damwandberekeningen

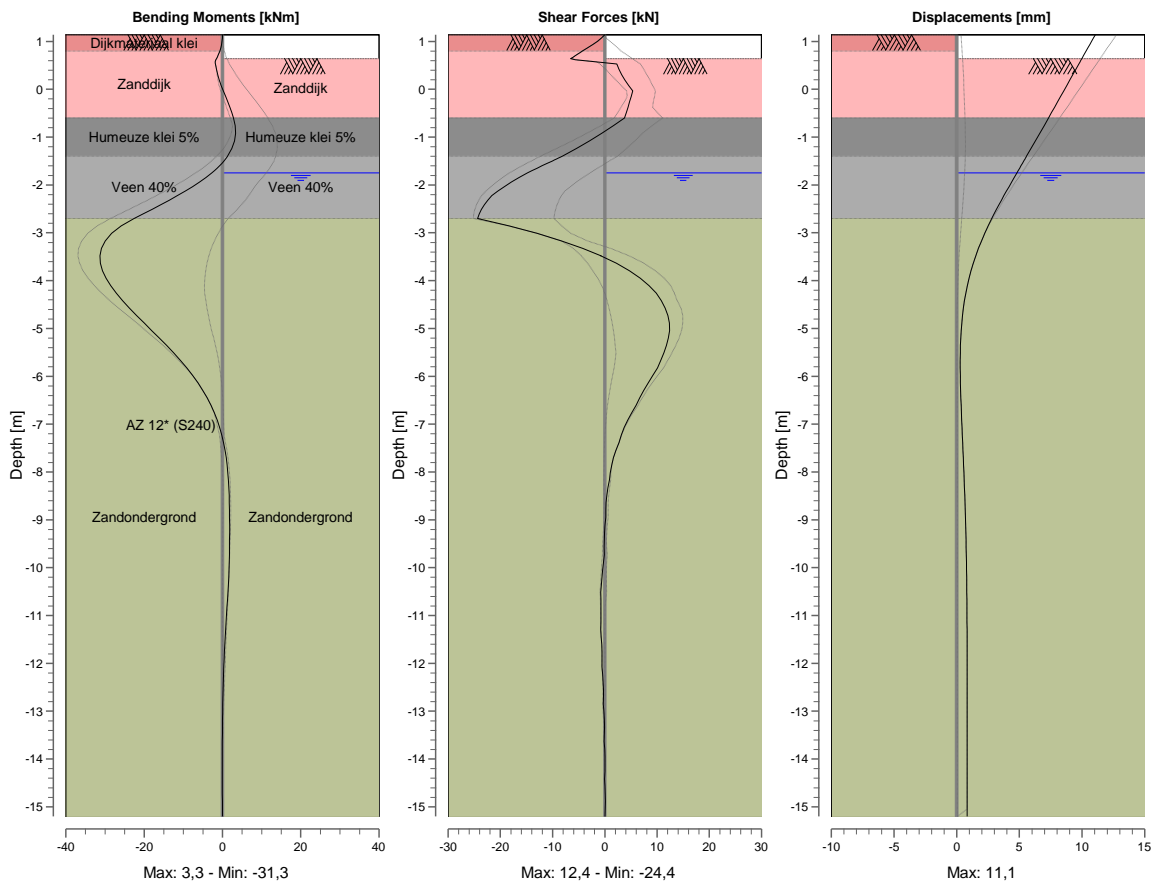
Leiding 20

Binnenwaartse erosiekrater

Maatgevend boezempeil

Moments/Forces/Displacements - Stage 3: MHW

Step 6.3 - Partial factor set: RC 2



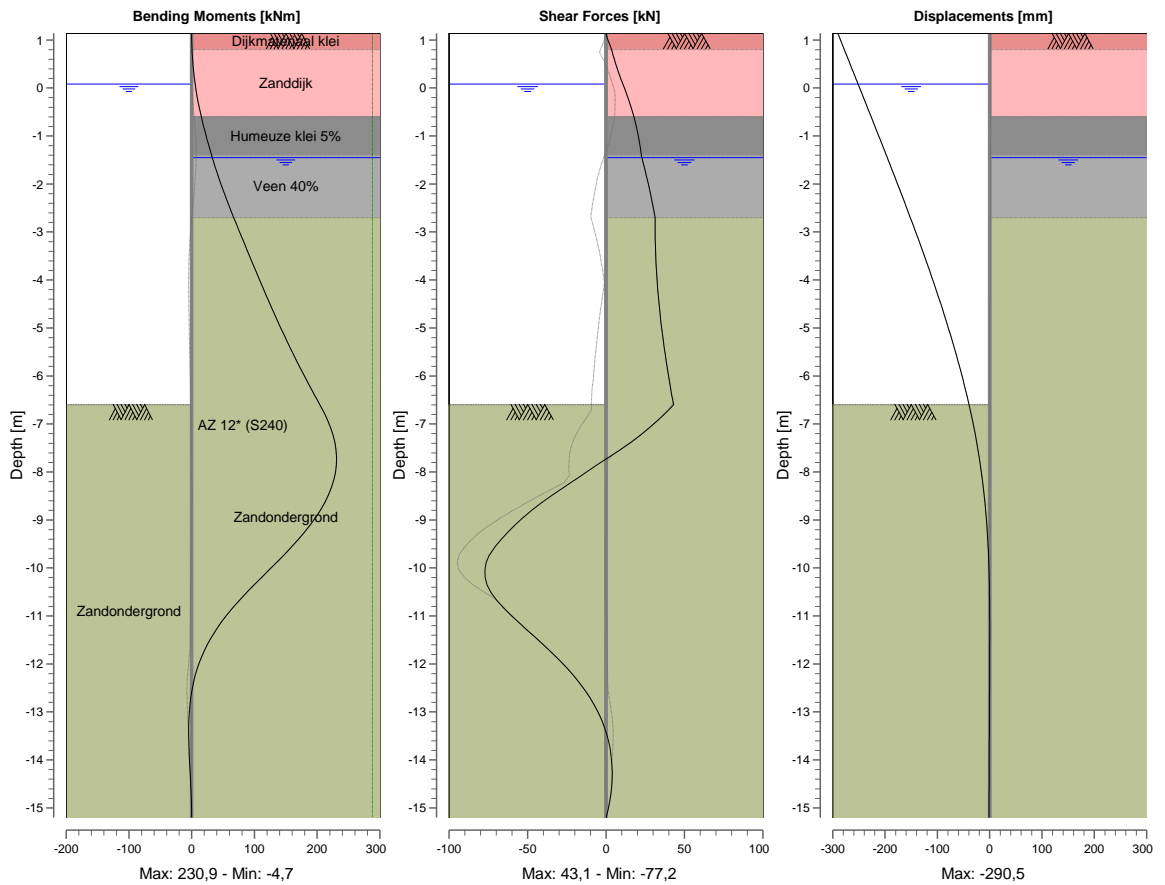
Beoordeling damwand leiding 20 damwand .. mm dik, , lang 16,3 m Corrosie .. % erosiekrater -8,12 m,	ARCADIS Infrastructure Postbus 202 3000 AE Amsterdam Phone Fax	D: Snelweg 202 - TRP - IndigoKoning 20 mm 130° Keerend naar binnen, aangetrokken inwendige RC2-30	4/7/2022	d/ba
			Annex	-

Buitenwaartse erosiekrater

Maatgevend lage boezemwaterstand

Moments/Forces/Displacements - Stage 3: MLW

Step 6.3 - Partial factor set: RC 2



Beoordeling damwand leiding 20 damwand .. mm dik, , lang 16,3 m Corrosie .. % erosiekrater - 8,12 m,	ARCADIS Infrastructure	Project 220 3000 AE Amsterdam	Date 4/7/2022
	D:Sheet/Bing 2022 - TRP andengedeling 20 (m) 1,387, versie 01 naar buiten aanpak van erosiekrater RC2 JM	Phone F.W.	Date 4/7/2022
Annex -	-	-	-
A4	-	-	-

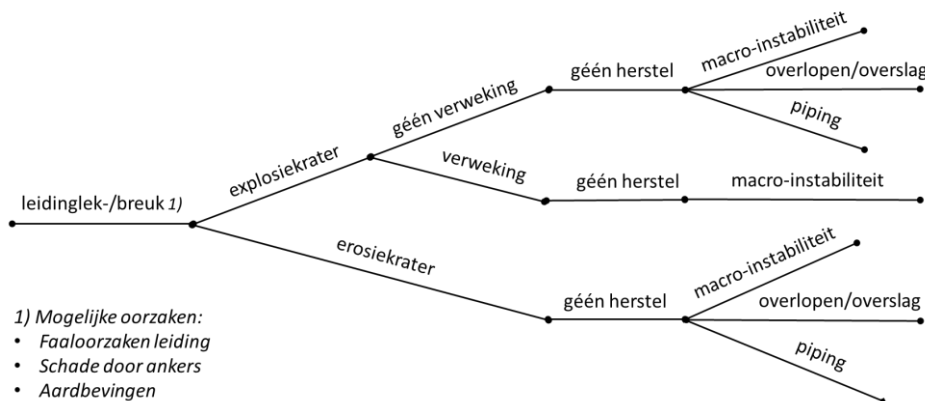
Bijlage 8: Faalpaden en gebeurtenissenbomen

Opgesteld door: Harry Schelfhout (Schelfhout Advies)

Datum: 24 juli 2023 (definitief)

1. Faalpaden

Voorafgaand aan de faalkansanalyse is een inventarisatie gemaakt van alle mogelijke faalpaden waarlangs leidingfalen tot dijkfalen kan leiden. In de volgende figuur is dat nader uitgewerkt.



Figuur 1.1: Overzicht van faalpaden die van leidingfalen tot dijkfalen kunnen leiden.

Deze faalpaden zijn de basis voor de uitwerking van faalscenario's met bijbehorende faalkansen in een gebeurtenissenboom.

2. Faalscenario's

In deze bijlage worden per leidingkruising de faalscenario's gepresenteerd met daarin de binnen de veiligheidszones en centrale zone te combineren faalkansen van leidingfalen, herstel en dijkfalen en de daaruit voortvloeiende additionele faalkansen, die moet voldoen aan de faalkanseis. De gebeurtenissenbomen worden gebaseerd op een analyse van faalscenario's, zoals weergegeven in de volgende figuur.

		LEIDINGFALEN	HERSTEL	DIJKFALEN	DIJKFALEN LEIDING	
		$P_{LEIDINGFALEN}$	\times	$P_{GÉÉN HERSTEL}$	\times	$P_{DIJKFALEN LEIDINGFALEN} = P_{ADDITIONEEL}$
falen kruising gastransportleiding	falen gastransportleiding door faaloorzaken leiding	leidinglek/-breuk $P1 = P_{F,LEIDING, (I)}$	hoogwater vóór of tijdens herstel $P2 = P_{GÉÉN HERSTEL, (I)}$	macro-instabiliteit buitenwaarts $P3 = P_{STBU EROSEKRATER, (I)}$	$P4 = P1 \times P2 \times P3$	
				overlopen/overslag $P5 = P_{O/O EROSEKRATER, (I)}$	$P6 = P1 \times P2 \times P5$	
				macro-instabiliteit binnenwaarts $P7 = P_{STBU EROSEKRATER, (I)}$	$P8 = P1 \times P2 \times P7$	
	falen gastransportleiding door aardbeving	verweking leidinglek/-breuk $P11 = P_{F,LEIDING, (II)}$	hoogwater vóór of tijdens herstel $P12 = P_{GÉÉN HERSTEL, (II)}$	macro-instabiliteit buitenwaarts $P13 = P_{STBU VERWEKING, (II)}$	$P14 = P11 \times P12 \times P13$	
				macro-instabiliteit binnenwaarts $P15 = P_{STBU VERWEKING, (II)}$	$P16 = P11 \times P12 \times P15$	
		leidinglek/-breuk verweking/compactie $P17 = P_{F,LEIDING, (III)}$	hoogwater vóór of tijdens herstel $P18 = P_{GÉÉN HERSTEL, (III)}$	macro-instabiliteit buitenwaarts $P19 = P_{STBU VERWEKING, (III)}$	$P20 = P17 \times P18 \times P19$	
		macro-instabiliteit binnenwaarts $P21 = P_{STBU VERWEKING, (III)}$	$P22 = P17 \times P18 \times P21$			
Additionele faalkansen waterkering ten gevolge van leidingfalen: $P_{ADD} = \sum P_{(i)}$					$(\leq P_{ES})$	

Figuur 2.1: Overzicht faalscenario's van leidingfalen naar dijkfalen voor kruisingen van gastransportleidingen.

Voor de casus Tussenklappenpolder worden de volgende gebeurtenissen (A), (B) en (C) gedefinieerd:

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

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

$P(C) = P_{\text{F,DIJK | VERSTORINGSZONE}}$ = de kans op falen van de dijk, gegeven leidingfalen en 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 dijk faalt uitgaande van continu aanwezige schade door leidingfalen. Dit zijn de kansen die voor verschillende faaloorzaken van de leiding zijn bepaald.

De additionele faalkans volgt uit het combineren van de gebeurtenissen P (A) èn (B) èn (C) met behulp van de volgende formule:

$$P_{\text{ADD}} = P(A) \times P(B|A) \times P(C | A,B)$$

waarin:

- P_{ADD} = additionele faalkans = de kans op dijksfalen ten gevolge van leidingfalen
- $P(B | A)$ = $P_{\text{GÉÉN HERSTEL}}$ = kans op hoogwater vóór of tijdens herstel, gegeven leidingfalen [-]
- $P(C, | A, B)$ = kans op dijksfalen, gegeven de kans op hoogwater vóór of tijdens herstel, gegeven leidingfalen

Hoewel de notatie van de kansbijdragen verschilt, is de bovenstaande vergelijking identiek aan vergelijking (15) in *Bijlage 2: Toelichting faalkansaanpak bij stappenplan Tussenklappenpolder*.

De faalkansen worden per leidingkruising gepresenteerd in de gebeurtenissenbomen van hoofdstuk 3.

In feite wordt aangenomen dat de faalmechanismen “disjunct” zijn en elkaar uitsluiten, wat niet hetzelfde is als onafhankelijke gebeurtenissen. In de laatste stap is dat strikt genomen niet zo. Hier staan gebeurtenissen die in feite afhankelijk zijn, wat echter voor de getalsmatige uitwerking nauwelijks uitmaakt.

3. Gebeurtenissenboom leidingkruising nr. 12

LEIDINGFALEN	ZONE	HERSTEL	DIJKFALEN LEIDINGFALEN	ADDITIONELE FAALKANS
leidinglek/-breuk door faaloorzaken leiding	veiligheidszone buitenzijde 2,66E-08	géén herstel 0,05	(erosiekrater) macro-instabiliteit buitenwaarts 5,29E-11	7,03E-20 0,00%
		géén herstel 0,05	(verwekingszone) macro-instabiliteit buitenwaarts 2,26E-09	3,00E-18 0,00%
	centrale zone 1,74E-08	géén herstel n.v.t.	(geen erosiekrater) overlopen/overslag n.v.t.	0,00E+00 0,00%
	veiligheidszone binnenzijde 5,98E-08	géén herstel 0,05	(erosiekrater) piping 2,01E-01	6,00E-10 57,04%
leidinglek/-breuk door aardbeving	alle zones <<	géén herstel n.v.t.	(erosiekrater) macro-instabiliteit binnenwaarts 4,95E-02	1,48E-10 14,06%
			(verwekingszone) macro-instabiliteit binnenwaarts 1,02E-01	3,04E-10 28,90%
			(verwekingszone) n.v.t. <<	
P_{ADD} = som:				1,05E-09 /jaar

Figuur 3.1: Gebeurtenissenboom voor leidingkruising nr. 12 Gasunie A-633 (schildboring).

Uit de gebeurtenissenboom volgt voor leidingkruising nr. 12 een additionele faalkans van $1,05 \times 10^{-9}$ per jaar en dat de dijkfaalmechanismen piping (57%) en macro-instabiliteit binnenwaarts (29%) daaraan de grootste kansbijdrage leveren.

4. Gebeurtenissenboom leidingkruisingen nr. 16 en 17

		veiligheidszone buitenzijde 2,51E-08	géén herstel 0,05	(erosiekrater) macro-instabiliteit buitenwaarts 7,86E-16	9,86E-25	0,00%
leidinglek/-breuk door faalorzaken leiding	centrale zone 2,51E-08	géén herstel 1,00	(erosiekrater) overlopen/overslag 1,00E+00	2,51E-08	94,92%	
	veiligheidszone binnenzijde 5,65E-08	géén herstel 0,05	(erosiekrater) piping 4,31E-01	1,22E-09	4,61%	
			(erosiekrater) macro-instabiliteit binnenwaarts 4,42E-02	1,25E-10	0,47%	
	veiligheidszone binnenzijde <<	géén herstel 0,05	(verwekingszone) n.v.t. <<			
leidinglek/-breuk door aardbeving	alle zones <<	géén herstel n.v.t.	(verwekingszone) n.v.t. <<			
				Leidingkruisingen nr. 16 en 17: Som =	2,64E-08	/jaar

Figuur 4.1: Gebeurtenissenboom voor leidingkruisingen nr. 16 NAM 501014 en nr. 17 NAM 501024 (zinkers).

Deze figuur is representatief voor het falen van de dijk met twee dicht bij elkaar liggende gastransportleidingen, waarvan de erosiekraters elkaar overlappen. Dit betekent dat het falen van beide leidingkruisingen een kansbijdrage levert aan het falen van de dijk. Uit de gebeurtenissenboom volgt voor zowel leidingkruising nr. 16 als leidingkruising nr. 17 een additionele faalkans van $2,64 \times 10^{-8}$ per jaar. Per afzonderlijke leidingkruising wordt die voor 95% bepaald door de kans op overlopen/overslag.

5. Gebeurtenissenboom leidingkruising nr. 19

LEIDINGFALEN	ZONE	HERSTEL		ADDITIONELE FAALKANS	
leidinglek/-breuk door faalorzaken leiding	veiligheidszone buitenzijde 3,73E-08	géén herstel 0,05	(erosiekrater) macro-instabiliteit buitenwaarts 1,22E-15	2,27E-24	0,00%
	centrale zone 3,73E-08	géén herstel 1,00	(erosiekrater) overlopen/overslag 1,00E+00	3,73E-08	95,36%
	veiligheidszone binnenzijde 8,40E-08	géén herstel 0,05	(erosiekrater) piping 3,31E-01	1,39E-09	3,55%
		géén herstel 0,05	(erosiekrater bij MHW = +1,50 m) macro-instabiliteit binnenwaarts 1,02E-01	4,27E-10	1,09%
	veiligheidszone binnenzijde <<	géén herstel n.v.t.	(verwekingszone) n.v.t. <<		
	leidinglek/-breuk door aardbeving	alle zones <<	géén herstel n.v.t.	(verwekingszone) n.v.t.	
				Som = P_{ADD} = 3,92E-08 /jaar	

Figuur 5.1: Gebeurtenissenboom voor leidingkruising nr. 19 Gasunie A-590 (zinker).

Uit de gebeurtenissenboom volgt voor leidingkruisingen nr. 19 een additionele faalkans van $3,92 \times 10^{-8}$ per jaar en dat het dijkfaalmechanisme overlopen/overslag (94%) daaraan de grootste kansbijdrage levert.

6. Gebeurtenissenboom leidingkruising nr. 20

LEIDINGFALEN	ZONE	HERSTEL	DIJKFALEN LEIDINGFALEN	ADDITIONELE FAALKANS	
leidinglek/-breuk door faalorzaken leiding	veiligheidszone buitenzijde 2,66E-08	géén herstel n.v.t.	(erosiekrater) macro-instabiliteit buitenwaarts n.v.t.		
	centrale zone 1,74E-08	géén herstel n.v.t.	(geen erosiekrater) overlopen/overslag n.v.t.	0,00E+00	0,00%
	veiligheidszone binnenzijde 5,98E-08	géén herstel 0,05	(erosiekrater) grondbreuk (RC2) 7,23E-05	2,16E-13	4,16%
	met damwand in binnenkruinlijn		(erosiekrater) plankvloeit (RC2) 7,23E-05	2,16E-13	4,16%
	veiligheidszone binnenzijde <<	géén herstel n.v.t.	(erosiekrater) piping 1,59E-03	4,77E-12	91,68%
	leidinglek/-breuk door aardbeving	alle zones <<	géén herstel n.v.t.	(verwekingszone) n.v.t. <<	
				Som: 5,20E-12 /jaar	

Figuur 6.1: Gebeurtenissenboom voor leidingkruising nr. 20 Gasunie A-666 (schildboring).

Opgemerkt wordt dat het dijkfaalmechanisme macro-instabiliteit buitenwaarts niet van toepassing is. Dat komt door de aanwezigheid van de damwand in de binnenkruinlijn, waardoor het dijkfaalmechanisme geen bijdrage levert aan de additionele faalkans van de leidingkruising.

Uit de gebeurtenissenboom volgt voor leidingkruising nr. 20 een additionele faalkans van $5,20 \times 10^{-12}$ per jaar, die bijna volledig wordt gedomineerd door het dijkfaalmechanisme piping (92%).

7. Conclusies

Uit de resultaten van de gebeurtenissenbomen kan het volgende worden geconcludeerd.

Voor de leidingkruisingen die zijn aangelegd door middel van een zinker wordt de faalkans gedomineerd door het dijkfaalmechanisme overlopen/overslag. Dit komt omdat leidingfalen met een erosiekrater in de centrale zone de belangrijkste faaloorzaak is en er geen tijdig herstel van de gevolgschade mogelijk is.

Voor de leidingkruisingen die zijn aangelegd door middel van een schildboring wordt de faalkans gedomineerd door de dijkfaalmechanismen piping en macro-instabiliteit binnenwaarts. Dit komt omdat leidingfalen met een erosiekrater in de veiligheidszone aan de binnenzijde zone de belangrijkste faaloorzaak is, waarbij tevens tijdig herstel van de gevolgschade mogelijk is.

Bij de aanwezigheid van een compenserende damwand in de binnenkruinlijn wordt de faalkans gedomineerd door het dijkfaalmechanisme piping.

Bijlage 9: Beoordeling conditie leidingkruisingen

Opgesteld door:

- Jan Spiekhout (B&B Advisor)

Datum: 24 juli 2023 (definitief)

1. Scope van de te beoordelen kruisingen

In de volgende tabel zijn de te beoordelen kruisingen met de belangrijkste leidingkenmerken aangegeven.

Parameter	Kenmerken leidingkruisingen Gasunie in westelijke kade A.G. Wildervanckkanaal				
Hectometer	0.9 + 65 m	1.0 + 83 m	1.0 + 86 m	1.3 + 65 m	1.3 + 87 m
Leiding nummer	12	16	17	19	20
Leiding code	GU A-633	NAM 501014	NAM 501024	GU A-590	GU A-666
Aanlegmethode	schildboring + open sleuf	zinker + open sleuf	zinker + open sleuf	zinker + open sleuf	schildboring + open sleuf
Jaar van aanleg	1992	1966	1970	1980	2010
Diameter (inch/mm]	48"/1219	28"/711	28"/711	12"/324	48"/1219
Wanddikte [mm]	30 (kruising) 18,3 (veld)	18 (kruising) 18,3 (bochten) 15,8 (veld)	18 (kruising) 18,3 (bochten) 15,8 (veld)	17,48 (kruising) 12,7 (veld)	22,7 (kruising) 18,7 mm (veld)
Ontwerpdruk (bar)	79,9	83	83	79,9	79,9
Materiaal	St.E 415	X52	X52	Grade B	L 480
Product	Aardgas*	Aardgas*	Aardgas*	Aardgas*	Aardgas*
Bouwjaar	1992	1966	1970	1981	2010

* - droog, niet corrosief aardgas

Tabel 1 – Overzicht met de belangrijkste kenmerken van te beoordelen leidingkruisingen.

2. Conditieverklaringen

2.1 Algemeen

De huidige leidingconditie dient op het niveau te zijn zoals de 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, intelligent pigging (ILI = In-Line Inspectie) of no pig inspectie (DC 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 welke Groep I stoffen transporteren) valt onder toezicht van een inspectie instelling. Dit is een Eigen Inspectiedienst, een externe inspectie instelling 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 geschiedt 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 (Bewijs 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 eerder genoemde inspectie instelling.

2.2 Bevindingen

Per kruising uit de scope als aangegeven in tabel 1, zijn in het volgende de bevindingen aangegeven:

- NAM 501014: - Opgesteld door de NAM Technical Authority Pipelines en geaccordeerd door de NAM Technical Authority Inspection Body, NAM document EP202111204991 . De conditieverklaring is gecontroleerd en geeft geen aanleiding tot vragen. De rapportage betreft de gehele leiding waar de kruising onderdeel van is.
- NAM: 501024 - Opgesteld door de NAM Technical Authority Pipelines en geaccordeerd door de NAM Technical Authority Inspection Body, NAM document EP202111204991 . De conditieverklaring is gecontroleerd en geeft geen aanleiding tot vragen. De rapportage betreft de gehele leiding waar de kruising onderdeel van is.
- GU: A-633 - De conditieverklaring is opgemaakt door de Eigen Inspectiedienst van Gasunie en heeft als nummer Gasunie VA 21.0491. De conditieverklaring is gecontroleerd en geeft geen aanleiding tot vragen.
- GU: A-590 - De conditieverklaring is opgemaakt door de Eigen Inspectiedienst van Gasunie en heeft als nummer Gasunie VA 21.0489. De conditieverklaring is gecontroleerd en geeft geen aanleiding tot vragen.
- GU: A-666 - De conditieverklaring is opgemaakt door de Eigen Inspectiedienst van Gasunie en heeft als nummer Gasunie V 21.0492A. De conditieverklaring is gecontroleerd en geeft geen aanleiding tot vragen.

2.3 Bedrijfsdrukken

Zowel bij NAM als Gasunie zijn de bedrijfsdrukken lager dan de gestelde ontwerpdrukken (= Maximaal Toelaatbare Bedrijfsdruk).

2.3.1 NAM

Als bedrijfsdruk wordt de ontwerpdruk aangehouden.

2.3.2 Gasunie

Als bedrijfsdruk wordt de ontwerpdruk aangehouden.

3. Zettingen

3.1 Kruising 12 (boring)

Bij deze kruising heeft tijdens aanleg een dijkdoorbraak plaatsgevonden welke resulteerde in een ondergelopen polder (ref.: J.M. de Wit, H.J.A.M. Hergarden, J.A. Ringers en J. Spiekhout: “Boringen vragen extra zorgvuldigheid - Lessen van de dijkdoorbraak A.G. Wildervanck-kanaal”, Land + Water, December 1992, pp 42 – 45). De bres is hier opgevuld met klei. Tijdens het boren moet de zandgrond langs en boven de leiding zijn verstoord, wat

heeft geleid tot een spleet direct onder de veenlaag en een lek in de afdichting van de kanaalbodem.

Zettingen spelen nauwelijks bij deze kruising.

3.2 Kruisingen 16 en 17 (zinkers)

Beide kruisingen (zinkers) hebben nagenoeg dezelfde omstandigheden. De vloerbuis en de veldstrekking liggen in zandige bodem waar zetting niet speelt. Alleen onder de kruin van de kade spelen (historische) zettingen.

3.3 Kruising 19 (zinker)

De vloerbuis en de veldstrekking liggen in zandige bodem waar zetting niet speelt. Alleen onder de kruin van de kade spelen (historische) zettingen.

3.4 Kruising 20 (boring)

De boring ligt in het zand. De berekening is volgens de NEN versie van 2006. De kruising is vergelijkbaar met kruising 12. Alleen onder de kruin ter plaatse van de perskuip in de dijk is sprake van zetting.

4. Sterkteberekeningen

De sterkteberekeningen zijn uitgevoerd met Ple4Win. Er hoefde geen gebruik te worden gemaakt van de plastische rekenmodule. Alleen voor leidingkruising 17 moest een controle op wisselend vloeien worden uitgevoerd.

De volgende rapporten zijn gecontroleerd:

NAM

- Leidingkruising 16, Dijkversterking A.G. Wildervanckkanaal 28" pijpleiding 501014 Tusschenklappenpolder, Sterkteberekening, Bilfinger Tebodin Netherlands B.V., Documentnummer: 55721-1931001, Revisie: B, Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V. 17-06-2022
- Leidingkruising 17, Dijkversterking A.G. Wildervanckkanaal 28" pijpleiding 501024 Tusschenklappenpolder, Sterkteberekening, Bilfinger Tebodin Netherlands B.V., Documentnummer: 55721-1931002, Revisie: B, Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V. 17-06-2022

Verder is voor kruisingen 16 en 17 verdedigbaar dat vanwege de beschikbare geotechnische informatie van ook de andere kruisingen, hier een partiële factor van 1.5 toegepast had mogen worden in plaats van factor 2. Dit geeft een extra reserve.

De veiligheidszone reikt voor kruisingen 16 en 17 tot ca. 35 à 50 m uit de as van de kruin van de dijk. Dit betekent dat de veldstrekking deels in de veiligheidszone ligt. Volgens NEN 3651 zou binnen de veiligheidszone de eis voor relatieve sterkte van toepassing zijn. Echter voor de faalkansanalyse wordt binnen de centrale zone en de veiligheidszone van de berekende sterkte (unity check UC op basis van spanningsratio's) uitgegaan, zodat relatieve sterkte niet van toepassing is. Opgemerkt wordt verder dat bij de faalkansanalyse de importantiefactor uit de

NEN 3651 geen rol speelt. Daarvoor in de plaats komt de beoordeling van de faalkans van de leidingkruising op basis van de aanwezige materiaalsterkte en wanddikte.

De conclusie is dat de sterkte van beide leidingkruisingen voldoet aan de NEN 3650 reeks en het bijbehorende betrouwbaarheidsniveau.

Gasunie

- Sterkteberekening Kadeversterking A.G. Wildervanckkanaal, Leidingkruising 12 - 48" Gasunie leiding A-633 Tusschenklappenpolder, F. Koerts, OTW-L 22.0566 rev.0, Datum 20 maart 2022
- Sterkteberekening Kadeversterking A.G. Wildervanckkanaal Leidingkruising 19 - 12" Gasunie leiding A-590 Tusschenklappenpolder, F. Koerts ,OTW-L 22.0548 rev.0, Datum 17 maart 2022
- Sterkteberekening Kadeversterking A.G. Wildervanckkanaal , Leidingkruising 20 - 48" Gasunie leiding A-666 Tusschenklappenpolder, Koerts, OTW-L 22.0567 rev.0 , Datum 21 maart 2022

Voor leidingkruising 12 is met L480 gerekend terwijl op de documenten St.E 415.7 TM wordt vermeld. De sterktes op de materiaalcertificaten voldoen echter aan L 480.

In alle gevallen, bij de opgegeven zettingen, wordt voldaan aan de criteria en zijn de spanningen binnen de toets spanning.

In de volgende tabel zijn de kenmerkende waarden voor de kruisingen vermeld.

Leiding nummer	Leiding code	UC	Vervormings ratio	Belasting geval	Locatie	Opmerking
12	GU A-633	0,87	0,47	BC 4	Onder kruin	Gerekend met L 480*
16	NAM 501014	0,97 0,95	0,46	BC 3/4	Veldstrekking Bovenbocht	
17	NAM 501024	0,86	0,57	BC 3/4	Bovenbocht	Na controle wisselend vloeien
19	GU A-590	0,42 0,30	0,02	BC 4	Veldstrekking Onderbocht	
20	GU A-666	0,81	0,45	BC 4	Onder kruin	

* de kruising is volgens de documenten uitgevoerd in St.E 415.7 TM. De materiaalsterktes op het materiaalcertificaat voldoen echter aan de vereisten voor L 480

Tabel 2 – Overzicht van kenmerkende waarden.

5. Materiaalgrootheden

De sterkte is een belangrijke parameter in verband met de sterkteberekening van de kruisingen. 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 de NEN 3651, of dat rekening moet worden gehouden met langere scheurlengtes. Met name belangrijk is 1972 als omslagpunt, waar door verbeterde productietechnieken stalen beschikbaar kwamen met betere taaiheideigenschappen.

Alle Gasunie leidingen voldoen wat betreft jaartal aan het criterium van ná 1972. De NAM leidingen voldoen hier niet aan.

Van de NAM leidingen zijn 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 review van de materiaalcertificaten. De verklaringen zijn de volgende:

- NAM: 501014 - BVT Lloyd's Register Registrernummer 4007925
- NAM: 501024 - BVT Lloyd's Register Registrernummer 4007931

De volgende verklaringen zijn aanwezig voor de Gasunie leidingen:

- A-633: Bewijs van Toezicht afgegeven door de Dienst voor het Stoomwezen d.d.5 maart 1993 en Inspectieverklaring Afdeling Veiligheid Drukhouders TV/D van Gasunie, 14-10-1993
- A-590: Bewijs van Toezicht afgegeven door de Dienst voor het Stoomwezen d.d. 3 jun i 1980
- 666: Conformiteitverklaring Veiligheid, Gezondheid en Milieu Eigen Inspectiedienst van Gasunie, TV 09.P.3516.GU05767.0027, datum 04-03-2011

Voor de Gasunie leidingen zijn tevens materiaalcertificaten aanwezig, te weten:

- A 633 – De beschikbare materiaal informatie (70016 – fabrikant Europipe – Nr. 6/44/2546.3 002, geïnspecteerd door Gasunie) 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 590 – De beschikbare materiaal informatie (963 – Order 8/15/2316 fabrikant RBS, geïnspecteerd door Gasunie) 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 666 – De beschikbare materiaal informatie (95019 – fabrikant Europipe – Nr. 96-10022, geïnspecteerd door Gasunie) 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)

6. Aardbevingen door gaswinning

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

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. Wat betreft trillingen door aardbeving 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 het rapport van Deltares over buisleidingen wordt verwezen.

Wat betreft het effect van mogelijke verweking van de ondergrond 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 de NEN 3651 wordt de belasting op de leiding door bezwijken van de waterkering niet beschouwd.

De gevolgen van geïnduceerde aardbeving voor waterkeringen in het Groningse zijn bestudeerd door Deltares in het beneden gerefereerde rapport betreffende kades en dijken.

Rapporten Deltares:

- Deltares rapport; 1208092-000-GEO-0005- gbh - Effecten geïnduceerde aardbevingen op het Gasunienetwerk in Groningen, 2013
- Deltares rapport; 1208624-002-GEO-0003 - Groningse kades en dijken bij geïnduceerde aardbevingen, 2013
- Deltares rapport; 1208624-007-GEO-0001 – Effecten aardbevingen op kritische infrastructuur - Verwekingstudie, 2013