De Innovatie versneller

HWBP voor sterke dijken

De Innovatieversneller Hoogwaterbescherming

De Blomboogerd 1
4003 BX Tiel
Postbus 599
4001 AN Tiel

Contactpersoon
Han Knoeff

div@wsrl.nl

memo

Toepassing BRP in pipegroei analyse dijkversterking Neder-Betuwe (nr. 34)

Datum
16-5-2025

Ons kenmerk
ons kenmerk

Uw kenmerk
Uw kenmerk

Bijlage(n)
bijlage

1. Vraag en aanpak

Het dijktraject Neder-Betuwe (NeBe) is afgekeurd op piping, Royal HaskoningDHV heeft hiervoor een urgentiebepaling uitgevoerd op basis van WBI- en beslisboom uitgangspunten. Uit de urgentiebepaling kwam naar voren dat de versterking op sommige plekken verantwoord uitgesteld kon worden.

De redenering van het uitstellen van maatregelen is voornamelijk gebaseerd op het meenemen van voorland in de piping analyse. De volledige voorlandlengte is in de beoordeling niet meegenomen. Bij het meenemen van voorland is er een risico op pipegroei onder de dijk en kortsluiting naar maaiveld aanwezig waardoor falen van de dijk kan optreden. De maximum kwelweglengte is in de gedetailleerde toets van het WBI begrensd op twee keer de dijkbasis. Hierdoor wordt relatief weinig voorland meegenomen.

Kennis om deze aanname beter te onderzoeken was tijdens de beoordeling nog in ontwikkeling. In een Kennis voor Keringen (KvK) onderzoek Voorlanden [ref. 2] is onderzoek gedaan naar het voorspellen van pipegroei. Op basis van de eerste resultaten van dit onderzoek is het mogelijk een ruwe inschatting te maken van pipelengtes bij verschillende waterstanden. De resultaten uit het KvK voorlanden onderzoek zijn enkel van toepassing op een homogeen, niet anisotroop en één-laags watervoerend pakket. Om een beter beeld te krijgen van het risico op pipegroei onder het voorland is voor het dijktraject Neder Betuwe een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd in D-Geo Flow met variërende eigenschappen van het watervoerend pakket.

Vanwege onzekerheden in verschillende aspecten van zowel de piping als de pipegroei analyse was de keuze voor het wel of niet uitstellen van maatregelen niet overal evident. Om deze reden is het Beslisondersteunend Raamwerk Piping (BRP) toegepast. Deze methode geeft de mogelijkheid om de relevantie van nieuwe kennis voor de beslissing af te wegen.

In dit memo wordt beschreven:

1. hoe het risico op pipegroei onder het voorland is bepaald, op basis van KvK voorlanden;

2. hoe het Beslisondersteunend Raamwerk Piping (BRP) is toegepast als hulpmiddel om de invloed van aanwezige onzekerheden in het ontwerp mee te nemen.

Daarbij wordt opgemerkt dat beide onderzoeken (KvK voorlanden en BRP) waren tijdens de pilotstudie nog in ontwikkeling. Hierdoor is tijdens de analyse mogelijk niet de meest recente kennis toegepast. Voor de laatste stand van zaken wordt de lezer verwezen naar: [ref. 1] en [ref. 3].

Hoofdstuk 2 geeft achtergrond informatie over het dijkversterkingsproject NeBe, de WBI- en Beslisboom uitgangspunten en de urgentiebepaling. Hoofdstuk 3 gaat over hoe het risico op pipegroei onder het voorland is bepaald op basis van KvK voorlanden. Hoofdstuk 4 beschrijft hoe BRP is toegepast.

2. Beschrijving situatie

2.1 Inleiding project

Het BRP is uitgevoerd voor dijkversterking Neder-Betuwe (NeBe). Deze dijkversterking is gelegen in het bovenrivierengebied. De Waalbandijk Neder-Betuwe is de primaire waterkering gelegen tussen Wolferen en Tiel, welke als onderdeel van normtraject 43-5, het achterland beschermt tegen overstromen. De Waalbandijk in de gemeente Neder-Betuwe loopt van de Prins Bernhardsluizen bij het Amsterdam-Rijnkanaal tot aan Wolferen nabij Andelst (Figuur 1).

Deze kering is afgekeurd en dient versterkt te worden. Het dijktraject heeft een lengte van ongeveer 20 km, een signaleringsfaalkans van 1/30.000 en een ondergrensfaalkans van 1/10.000 volgens de norm.

Figuur 1: Het projectgebied van de dijkversterking Neder-Betuwe. Het dijktraject is met een blauwe lijn aangegeven en het plangebied met een rode lijn.

In het projectgebied zijn veel zandbanen aanwezig wat resulteert in een sterk heterogeen achterland met zowel dunne (0 tot 2 m) als dikkere deklagen (4 tot 6 m). Het pleistocene watervoerend pakket bestaat uit de formatie van Kreftenheye met een hoge doorlatendheid (50 tot 100 m/dag) en de formatie van Peize Waalre met een relatief lage doorlatendheid (15 tot 25 m/dag). Op het pleistocene watervoerend pakket is in veel gevallen ook een holocene zandlaag aanwezig (doorlatendheid ca. 15 tot 20 m/dag).

2.2 Piping ontwerp en uitgangspunten

Voor het piping ontwerp van het dijkversterking NeBe is een urgentie-afweging uitgevoerd vooruitlopend op kennisontwikkeling. De urgentie-afweging is uitgevoerd op basis van de beslisboom piping [ref. 5]. Het dijktraject is ingedeeld in urgente en niet urgente trajecten. In de urgente trajecten wordt een maatregelen uitgevoerd en in de niet urgente trajecten wordt de maatregel uitgesteld.

Het piping ontwerp is uitgevoerd door het ontwerp te baseren op twee analyses met verschillende uitgangspunten, namelijk:

1. Analyse op basis van WBI-uitgangspunten:
2. Analyse op basis van beslisboom uitgangspunten.

Het verschil tussen beide uitgangspunten is samengevat in Tabel 1. De uitleg per uitgangspunt is hieronder weergegeven.

Tabel 1: Verschil tussen WBI- en beslisboom uitgangspunten.

Uitgangspunt	WBI-uitgangspunten	Beslisboom uitgangspunten
1. Korrelgrootte (D70-waarde)	Verwachtingswaarde toegepast in beide analyses	
2. Voorland	Volledige voorlandlengte toegepast in beide analyses	
3. Doorlatendheid watervoerend pakket	Hoog gemiddelde waarde	Verwachtingswaarde
4. Pipegroei onder het voorland	Afgekeurd wanneer de verwachte pipelengte langer is dan de dijkbasis (2x dijkbasisregel)	Niet afgekeurd op basis van mogelijke pipegroei onder het voorland

1. Verwachtingswaarde van de korrelgrootte

In overleg met Waterschap Rivierenland is besloten om zowel in de beslisboom als WBI-analyse een verwachtingswaarde van de korrelgrootte (D70) te hanteren (in plaats van een laaggemiddelde waarde). Hier is voor gekozen omdat het gemiddelde D70-waarde als goede representatieve waarde wordt beschouwd. Dit vanwege de verwachte uitmiddeling van de verwachte korrelgrootte in de baan van de pipe.

2. Volledige voorland is in rekening gebracht

Het volledige voorland is in rekening gebracht. Het voorland is dus niet begrenst op basis van de dijkbasisregel. Hierbij is de effectieve voorlandlengte bepaald op basis van de spreidingslengte en de geometrische lengte van het voorland. De spreidingslengte (weerstand van het voorland) is afgeleid op basis van een geohydrologisch grondwaterstromingsmodel (MORIA). Dit model is gekalibreerd op basis van 13 peilbuisraaien welke het hoogwater van februari 2018 hebben gemeten. Tijdens dit hoogwater stond het volledige voorland onder water waardoor een goede inschatting van de spreidingslengte van het voorland gemaakt kon worden.

3. Verwachtingswaarde van de doorlatendheid

De verwachtingswaarde van de doorlatendheid is gebruikt voor het watervoerend pakket (in plaats van een hoog gemiddelde). De verwachtingswaarde is toegepast omdat:

- Net als de D70, is de doorlatendheid heterogeen over de kwelweglengte. Stukken grover en fijner zand wisselen elkaar op relatief korte afstand af. Verondersteld is dat daarom voor de kwelweglengte het gemiddelde toegepast zou mogen worden;

- Geohydrologie mag niet losgekoppeld worden van de rekenregel van Sellmeijer. Dit betekent dat een hoge doorlatendheid ongunstig is in de rekenregel van Sellmeijer maar resulteert in een langere spreidingslengte. Omdat in het geohydrologisch model een verwachtingswaarde is gehanteerd is het daarom consistent om dit ook toe te passen in de piping (Sellmeijer) analyse.

4. Afkeuring op basis van de verwachte pipelengte zoals afgeleid met behulp van de dijkbasisregel
De aanname achter de dijkbasisregel is dat de lengte van de pipe maximaal gelijk is aan ½x de minimaal benodigde kwelweglengte. Door nooit meer dan 2x de dijkbasis als kwelweglengte in rekening te brengen is dus geen risico aanwezig op pipegroei onder het voorland. Hierdoor wordt echter geen inzicht verkregen in het werkelijke risico. In de WBI-analyse is daarom de kwelweglengte niet "afgekapt" op 2 x dijkbasis maar is de dijkbasisregel gebruikt om de lengte van de pipe in te schatten. Op deze manier is na de reguliere beoordeling op basis van de formule van Sellmeijer getoetst of de pipe niet te ver onder het voorland groeit. Als dit het geval is, is het traject afgekeurd.

2.3 Samenvatting piping scope/ urgentiebepaling

De piping analyse is uitgevoerd met de PipingTool. De PipingTool (ook wel uittredepuntenmethode genoemd) is ontwikkeld in samenwerking tussen RHDHV en waterschap Rivierenland en maakt het mogelijk om een zeer groot aantal potentiële uittredepunten te analyseren waardoor een vlakdekkend beeld van de piping opgave ontstaat.

In Figuur 2 is zowel het resultaat van de WBI als beslisboom piping analyse weergegeven. Vanzelfsprekend wordt in de beslisboom piping analyse op (veel) meer trajecten aan de faalkanseis voldaan. De belangrijkste reden hiervoor is het verschil in omgang met de pipelengte al zijn er meer verschillende uitgangspunten toegepast, zie Tabel 1.

Figuur 2: Boven: WBI-oordeel rekening houdend met een maximale pipelengte van 2 keer de dijkbasis. Onder: Piping oordeel berekend met de beslisboom piping zonder rekening te houden met maximale pipelengte. Groen: voldoet, rood: voldoet niet

De urgentiebepaling piping uit het Definitief Ontwerp (DO) op basis van de beslisboom analyse is gepresenteerd in Figuur 3. In totaal is 11,1 km beoordeeld als urgent. Op deze trajecten is een piping maatregel voorzien. 9,1 km van het traject voldoet op basis van de beslisboom piping (groen in Figuur 3). Deze trajecten zijn beoordeeld als niet urgent. Op deze trajecten wordt de versterking uitgesteld waardoor ze als oranje lijn zijn weergegeven.

Figuur 3: Urgentie bepaling piping. Oranje: niet urgent (maatregel uitstellen), rood: urgent (maatregel nodig), zwart: vanuit de beslisboom beoordeeld als "niet urgent" maar de langsconstructie wordt toch ontworpen op heave (stap 3 uit de beslisboom)

In Figuur 4 zijn historische (zandmeevoerende) (k)wel locaties weergegeven. In de figuur is ook een inschatting van kritieke locaties opgenomen op basis van de ervaringen van de dijkbeheerder. De definitieve urgentiebepaling sluit goed aan bij deze bronnen.

Figuur 4: Boven: Historische kwel, wel en zandmeevoerende wel locaties. Rood: zandmeevoerende wel, blauw: kwel of wel locatie. Onder: Inschatting van meeste kritieke locaties volgens dijkbeheerder Wim Cornelissen

Doormiddel van gevoeligheidsanalyses (o.a. met D-Geo Flow en op basis van enkele uitgevoerde HPT-(A)MPT-sonderingen) is onderzocht of het in rekening brengen van anisotropie en/of meerlaagsheid kan zorgen voor optimalisatie van de urgentiebepaling. Op basis van de analyse kon slechts over een beperkt deel van het traject geoptimaliseerd worden waardoor is besloten om geen aanvullend (grond)onderzoek uit te voeren. De kosten van dit onderzoek wegen namelijk niet op tegen de mogelijk te behalen winst.

3 Pipelengte KvK Voorlanden

In de KvK rapportage: "Achtergrondrapport Voorlanden" [ref. 2] is een conceptueel model ontwikkeld, waarmee pipelengtes kunnen worden berekend op basis van formules, hierna 'KvK formules' genoemd. In het nieuwste rapport staat een stappenplan om voorlanden mee te nemen, zie hiervoor [ref. 3]. Echter, voor deze studie waren alleen de formules beschikbaar. Er werd sterk aanbevolen om een 'sanity check' uit te voeren. Dit zijn extra analyses waarbij met behulp van D-GeoFlow de invloed van aspecten als meerlaagsheid en anisotropie in rekening kunnen worden gebracht. Deze sanity check is uitgevoerd als onderdeel van de BRP, zie paragraaf 4.2.

Pipelengtes zijn afhankelijk van waterstanden, hierdoor zijn twee formules opgesteld om twee type pipelengtes te bepalen:

1. Optredende pipelengte, dit zijn pipelengte behorend bij een bepaalde waterstand. Hier wordt optredende pipelengte gebruikt om de pipelengte te noemen bij WBN2075 waterstand met schadefactor.
2. Kritieke pipelengte, dit zijn pipelengte gevonden bij kritiek verval.

In het rapport "Pipegroei analyse Neder-Betuwe" [ref. 4] is de voorledige analyse opgenomen met kaarten van berekend pipelengtes. Op basis van de kaarten kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Ter plaatse van de niet urgente trajecten is de lengte van de pipe in geen enkel geval langer dan de dijkbasis;
- De lengte van de pipe bij WBN_{2075} is ter plaatse van de niet urgente trajecten significant korter dan de kritieke pipelengte;
- De lengte van de pipe bij WBN_{2075} is relatief lang aan de randen van urgente trajecten (hier wordt een piping maatregel getroffen zoals een heavescherm). Naast deze urgente trajecten wordt net voldaan op piping is de lengte van de pipe bij WBN_{2075} in sommige gevallen bijna gelijk aan de kritieke pipelengte.

In de berekende lengte van de pipe is nog geen rekening gehouden met aspecten die niet zijn opgenomen in de KvK formules. Deze aspecten worden aan de hand van het BRP meegenomen in hoofdstuk 4.

Tijdens het uitwerken van de analyse was er nog geen veiligheidsfilosofie beschikbaar rondom pipegroei. In overleg met Deltares is in de analyse de volgende veiligheidsfilosofie toegepast:

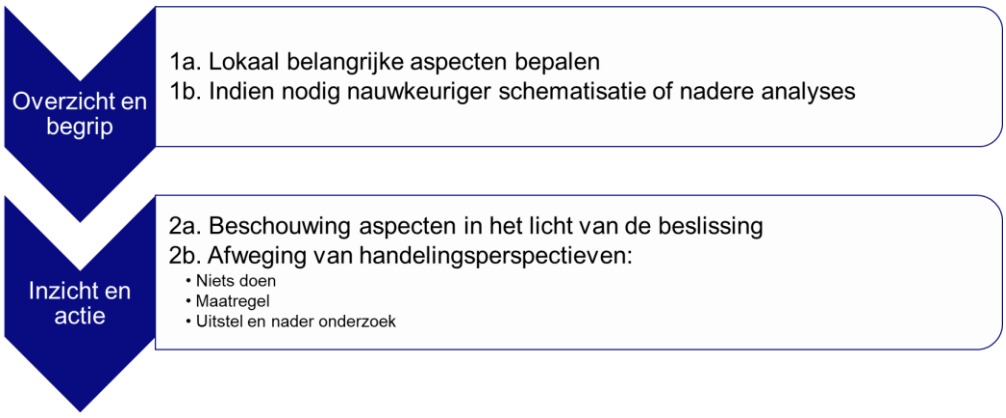
- Modelfactor: In het KvK onderzoek is een verkenning uitgevoerd voor een veiligheidsbenadering. Hierbij is geconcludeerd dat een modelfactor van 1,5 toegepast dient te worden op de berekende pipelengte;
- Schadefactor: De pipegroei analyse is uitgevoerd op basis van hetzelfde berekende kritiek verval uit de beslisboom piping analyse. Dit betekent dat voor de pipelengte dezelfde schadefactor is gehanteerd als in de Sellmeijer analyse, namelijk: 1,32. Deze schadefactor is afgeleid voor het faalmechanisme piping. Momenteel is er nog geen schadefactor specifiek afgeleid voor het mechanisme pipegroei.

Bovengenoemde veiligheidsfilosofie is project specifiek afgeleid en niet meer actueel. In een nieuwe pipegroei analyse dienen de laatste inzichten rondom pipegroei toegepast te worden in de veiligheidsfilosofie [ref. 3].

4. Het BRP

Het BRP gebruikt voor deze studie bevat vier stappen, zie Figuur 5. Voor de nieuwste stand van zaken wordt de lezer verwezen naar [ref. 1].

- Stap 1a: Afleiden bepalende aspecten
- Stap 1b: Individueel analyse van de belangrijkste aspecten
- Stap 2a: Afwegen van de belangrijkste aspecten relatief aan elkaar
- Stap 2b: Beslissing



Figuur 5 Stappen van de BRP. Stap 1: overzicht en begrip. Stap 2: Inzicht en actie.

4.1 BRP-stap 1a: belangrijke aspecten NeBe

De BRP-analyse is opgesteld omdat in de generieke WBI-rekenregels voor de analyse van piping niet alle kennis van nieuwe ontwikkelingen bevatten. Deze nieuwe ontwikkelingen kunnen marginale of veel invloed hebben op de piping opgave afhankelijk van lokale kenmerken. Stap 1a van de BRP is bedoelt om een zo goed mogelijk overzicht te krijgen van hoe alle nieuwe kennis het project beïnvloed en om niet de focus te leggen op één kennisontwikkeling.

Deze stap wordt uitgevoerd door Tabel 2 in te vullen.

- De eerste kolom "**Aspect**" bevat alle aspecten op basis van nieuwe kennis van belang kan zijn voor piping.
- De tweede kolom "**Kennisniveau**" bevat een beschrijving van hoe goed deze kennis is ontwikkeld in een generieke zin.
- De kolom "**Relevantie voor NeBe**" is specifiek voor dijkversterkings-project NeBe ingevuld op basis van de lokale kenmerken en kan dus anders zijn voor andere trajecten. Vanwege een sterke heterogeniteit is ook binnen traject NeBe de invloed van enkele aspecten verschillend. Deze verschillen zijn voor NeBe voornamelijk het gevolg van een variërende deklaagdikte. Deze verschillen zijn in de tabel naar voren gebracht.

4.1.1 Invullen van de BRP Tabel

Tabel 2 is ingevuld met het kennisniveau van 2023. Tabel 2 heeft twee focus punten: het kritieke verval, zoals gebruikelijk, en de (kritieke) pipelengte. De aspecten van Tabel 2 kunnen namelijk een andere invloed hebben op het kritieke verval en de (kritieke) pipelengte. Echter kritiek verval en pipelengtes beïnvloeden elkaar, en zijn hierdoor niet helemaal los van elkaar te zien. Hoe ze elkaar beïnvloeden is niet eenvoudig te voorspellen en is in stap 2 geanalyseerd.

De "**Relevantie voor NeBe**" kolom is kwalitatief ingevuld op basis van:

- Op basis van lokale kenmerken is beoordeel of het aspect geen, weinig (laag) of veel (hoog) invloed heeft op het kritieke verval en de (kritieke) pipelengte.
- Of het aspect een positieve of negatieve invloed heeft op het kritieke verval en de (kritieke) pipelengte. Hoog positief betekend dat het aspect in potentie kan resulteren in een significant lager kritiek verval of korte pipelengte.

Het doel van de tabel is om de resultaten uit de **pipegroei analyse** met de KvK formules beter te onderbouwen.

Aspect		Kennis niveau[1]	Relevantie voor NeBe	
			Invloed op kritiek verval	Invloed op pipelengte
Opbarsten	1. Meenemen sterkte deklaag bij opbarsten (toename sterkte)	Laag	In het projectgebied zijn veel zandbanen aanwezig wat resulteert in een sterk heterogeen achterland met zowel dunne (0 tot 2 m) als dikkere deklagen (4 tot 6 m). Het aspect kan daarmee relevant zijn afhankelijk van de situatie. Laag positief bij dunne deklaag Hoog positief bij dikkere deklaag	Geen invloed
Opbarsten	2. Reductie belasting door meenemen tijdsafhankelijkheid grondwaterstroming	Hoog	Laag positief voor kritiek verval en pipelengte, in het project (bovenrivierengebied) is sprake van een lange belastingduur en geen beïnvloeding van getijden	
Opbarsten	3. Scherpere bepaling belasting door meenemen 3D geohydrologische aspecten, zoals zandbanen, en bochten in rivier.	Hoog	Matig negatief voor kritiek verval en pipelengte, weinig bochten, voornamelijk zandbaan.	
Terug schrij	4. Reductie belasting door meenemen aanwezigheid voorland[2]	Hoog	Hoog positief voor kritiek verval en pipelengte, langs het traject is er veel voorland aanwezig.	

[1] Niveau van de huidige kennis (niet het kennisniveau dat de gebruiker zou moeten hebben om het mee te kunnen nemen in de analyse).

[2] Belangrijk aandachtspunt bij het in rekening brengen van het voorland is het risico op pipegroei onder het voorland en kortsluiting van de pipe naar maaiveld.

Aspect	Kennis niveau[1]	Relevantie voor NeBe	
		Invloed op kritiek verval	Invloed op pipelengte
5. Meenemen extra sterkte van fijne fractie	Hoog	Laag positief voor kritiek verval en pipelengte, weinig fijne siltfractie (<63 µm) aanwezig	
6. Meenemen extra sterkte uit sortering / uniformiteit zandpakket.	Laag	Laag positief voor kritiek verval en pipelengte, korrelverdeling bij NeBe niet nader onderzocht. De ervaring leert dat het meenemen van deze extra sterkte slechts beperkt positief is zie [ref. 8].	
7. Scherper bepalen belasting door drukval (hoger of lager dan 0.3d) in opbarstkanaal.	Laag	Hoog of matig afhankelijk van deklaag dikte voor kritiek verval en pipelengte. Kan positief of negatief zijn	
8. Meenemen extra sterkte heterogeniteit korrelgrootte in baan van de pipe	Laag	Matig kan positief of negatief zijn voor kritiek verval en pipelengte. Er is veel heterogeniteit in korrelgrootte	
9. Scherper bepalen sterkte door fluctuatie van de diepte of helling van de deklaag in de baan van de pipe	Laag	Laag kan positief of negatief zijn voor kritiek verval en pipelengte. Het hangt af van naar welke kant de helling gaat, in het algemeen geen grote fluctuatie in de onderkant van de deklaag tussen binnen en buitenteen. Lokaal is er wel sprake van grote verschillen in onderkant deklaag tot 3 – 4 m verschil binnen de dijkbasis.	
10. Stijging belasting door 3D concentratie van stroming naar de pipe	Laag	Hoog negatief voor kritiek verval en pipelengte, door aanwezigheid van dikke deklagen en kopsloten. Er zijn ook stukken met langsloten en dunne deklagen waar dan 3D minder invloed heeft.	
11. Meenemen tijdsafhankelijkheid voor terugschrijdende erosie.	Middel	Laag positief voor kritiek verval en pipelengte, bovenrivierengebied waardoor belasting tijd lang is	
12. Reductie belasting door anisotropie van doorlatendheid	Hoog	Hoog positief op kritiek verval, er is anisotropie aanwezig	Laag negatief op kritieke pipelengte Effect op optredende pipelengte kan positief of negatief zijn

Aspect		Kennis niveau[1]	Relevantie voor NeBe	
			Invloed op kritiek verval	Invloed op pipelengte
	13. Scherper bepalen belasting bij meerlaagsheid watervoerend pakket	Hoog	Matig tot hoog positief op kritiek verval Er is meerlaagsheid aanwezig, fijn zand op grof zand.	Hoog negatief voor kritieke pipelengte Effect op optredende pipelengte vooral hoog negatief [3]
Vervolg-processen	14. Tijdsafhankelijke stroming en duur van bezwijkproces	Laag	Hoog positief voor kritiek verval en pipelengte, er is tijd tussen het ontstaan van een zandmeevoerende wel en het bezwijken van de dijk ook bij bovenrivierengebied met lange belasting tijden	

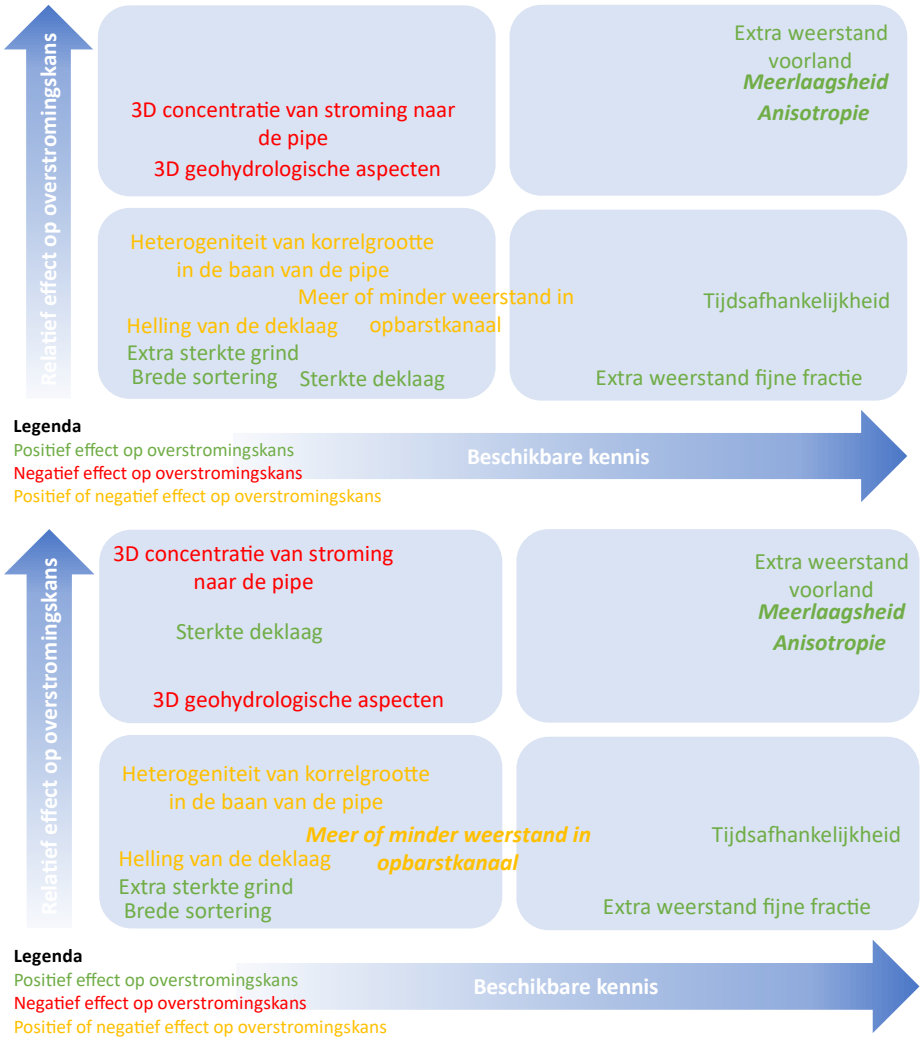
Tabel 2: Overzicht relevantie piping aspecten voor NeBe. Tabel ingevuld ten opzichte van standaard piping analyse conform generieke regels BOI.

[3] In vergelijking met een gewogen gemiddelde van de doorlatendheden van het watervoerend pakket

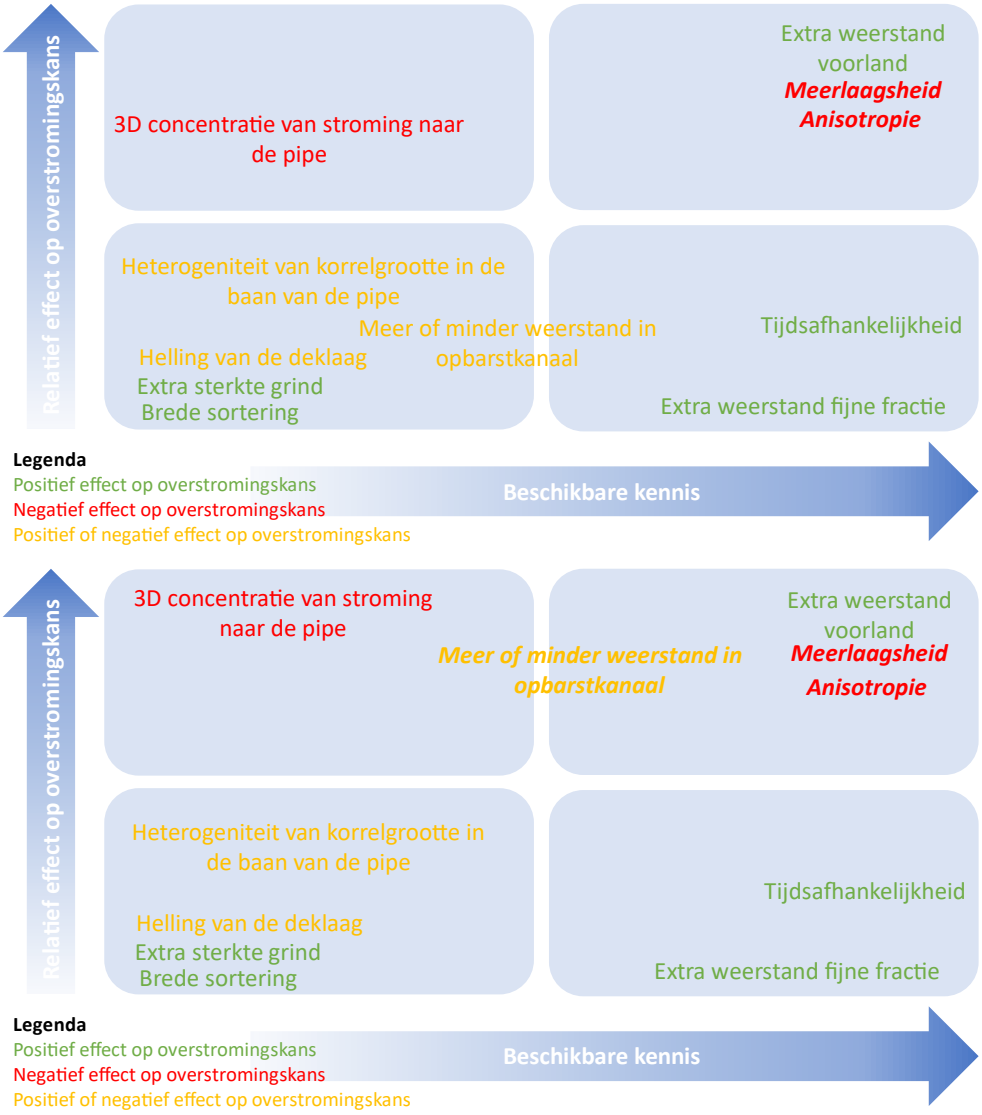
Om de resultaten van Tabel 2 inzichtelijker te maken zijn deze in een matrix geplaatst, zie Figuur 6 en Figuur 7. De bovenste figuren zijn voor dunne deklagen (2-3 m) en onder voor dikkere deklagen (5-6 m). De volgende aspecten hangen af van de deklaag dikte:

- Meenemen sterkte deklaag bij opbarsten (toename sterkte)
- Scherper bepalen belasting door drukval (hoger of lager dan 0.3d) in opbarstkanaal
- Stijging belasting door 3D concentratie van stroming naar de pipe

De verschillen tussen Figuur 6 en Figuur 7 zijn vet en cursief gedrukt. Deze aspecten beïnvloeden het kritieke verval anders dan de pipelengte. Hieruit komt naar voren dat een positief aspect op de pipelengte, een negatief effect kan hebben op het kritieke verval. Dit is het geval voor meerlaagsheid en anisotropie. Pipelengtes en kritiek verval beïnvloeden elkaar, hierdoor is de netto uitkomt nog niet duidelijk.



Figuur 6: Relevantie aspecten piping voor het kritiek verval boven voor dunne deklagen (2-3 m) en onder voor dikkere deklagen (5-6 m). In groen zijn de aspecten met een positief effect op overstromingskans, in rood met een negatief effect op overstromingskans en in geel met een positief of negatief effect op overstromingskans.



Figuur 7: Relevantie aspecten piping voor de kritieke pipelengte links voor boven deklagen (2-3 m) en onder voor dikkere deklagen (5-6 m). In groen zijn de aspecten met een positief effect op overstromingskans, in rood met een negatief effect op overstromingskans en in geel met een positief of negatief effect op overstromingskans. Voor optredende pipelengtes wordt anisotropie en meerlaagsheid geen in plaats van rood.

4.1.2 Belangrijkste aspecten volgens de tabel

Op basis van de figuren zijn de belangrijkste aspecten voor kritiek verval en pipelengte bij NeBe waar al **veel kennis** beschikbaar is:

- Meenemen extra weerstand voorland;
- Anisotropie;
- Meerlaagsheid.

Uit de figuren volgen ook enkele aspecten waarvan relatief **weinig kennis** beschikbaar is:

- 3D concentratie van stroming naar de pipe
- Sterkte van de deklaag

4.2 BRP-stap 1b: nadere analyse relevante aspecten

Het doel van deze stap is om een betere onderbouwing te krijgen van de inschatting van de pipelengte uit de KvK rapportage "Achtergrondrapport Voorlanden" [ref. 2]. Deze stap is hiermee een vervolg op de uitgevoerde analyse die is beschreven in hoofdstuk 3.

Een gevoeligheidsanalyse met D-Geo Flow is uitgevoerd om het effect van de belangrijke aspecten met veel kennis uit stap 1a te onderzoeken, zie 4.2.1. De vertaling van deze resultaten naar het hele traject wordt in 4.2.2 besproken.

De belangrijkste aspecten met weinig kennis uit stap 1a zijn ook onderzocht. Dit is gedaan voor de volgende aspecten:

- Vervalreductiefactor (0,3d regel), zie 4.2.3;
- 3D stroming, zie 4.2.4.

Als laatst is ook gekeken naar de kans op **kortsluiting** van de pipe naar maaiveld in 4.2.5. Voor de gedetailleerde uitwerking van onderstaande analyses wordt verwezen naar de rapportage "Pipegroei analyse Neder-Betuwe" [ref. 4].

4.2.1 Gevoeligheidsanalyse in D-GeoFlow

Met behulp van D-Geo Flow zijn enkele aspecten uit stap 1a van de BRP onderzocht. Aanvullend is ook de invloed van enkele modelrandvoorwaarden onderzocht. De resultaten van deze onderzoeken worden altijd vergelijken met de pipelengte inschatting op basis van de 'KvK formules' (zie hoofdstuk 3). Het gaat om de volgende aspecten:

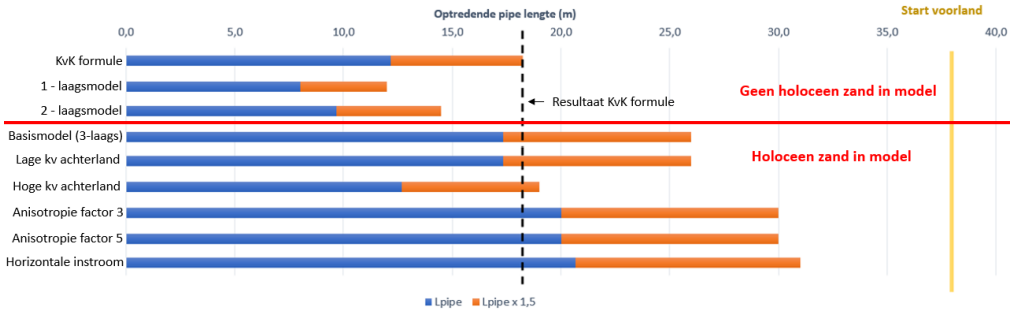
- Meerlaagsheid (BRP);
- Anisotropie (BRP);
- Doorlatendheid van het achterland (model randvoorwaarden);
- Horizontale instroom in het watervoerend pakket (model randvoorwaarden).

Er zijn op drie locaties D-GeoFlow berekeningen uitgevoerd, zie Figuur 8. Deze locaties zijn representatief voor de meeste niet urgente trajecten zodat alle aspecten die bepalend kunnen zijn in de pipegroei analyse meegenomen worden. Hierbij is rekening gehouden met de dikte van het watervoerend pakket, de deklaagdikte en de lengte van het voorland.

Figuur 8: Meest kritieke locaties op basis van de KvK analyse (pipegroei bij WBN2075): DT056, DT143 en DT192 (blauwe cirkels). De oranje trajecten zijn aangeduid als niet urgent. Hier wordt geen maatregel getroffen en is mogelijk een risico aanwezig op pipegroei onder het voorland. Ter plaatse van de rode (urgente) trajecten wordt een verticale piping maatregel getroffen en is geen risico aanwezig op pipegroei onder het voorland.

In onderstaande figuur zijn de resultaten van de uitgevoerde gevoeligheidsanalyse met D-GeoFlow weergegeven voor locatie DT056 als voorbeeld. Voor een gedetailleerd overzicht van alle uitgangspunten en resultaten wordt verwezen naar rapportage "Pipegroei analyse Neder-Betuwe" [ref. 4].

- De **zwarte** lijn geeft de optredende pipelengte aan volgens de KvK formules,
- De **gele** lijn geeft de dijkbasis aan.
- In **blauw** zijn de optredende pipelengtes van D-GeoFlow weergegeven
- De **oranje** lijnen zijn dezelfde optredende pipelengtes met een 1.5 factor van de eerste veiligheidsfilosofie die inmiddels verouderd is.



Figuur 9: Optredende pipelengte bij WBN_{2075} (Lpipe) inclusief schadefactor in D-Geo Flow op locatie DT056 zonder (blauw) en inclusief (oranje) additionele modelfactor

De volgende conclusies kunnen worden getrokken door de uitgevoerde D-Geo Flow berekeningen te vergelijking met de 'KvK formules' op de drie locaties:

- Als een holocene zandlaag aanwezig is in het watervoerend pakket (zie 2.2.3) is de berekende pipelengte in D-Geo Flow langer dan berekend met de KvK formules;
- Bij rekenlocatie DT056 wordt een 1,7 x langere pipelengte gevonden ten opzichte van de KvK formules en bij rekenlocatie DT143 is de pipelengte 1,3 x langer t.o.v. de KvK formules. In beide rekenlocaties is sprake van een holocene zandlaag maar ter plaatse van DT143 is sprake van een dikkere formatie van Kreftenheye met een hoge doorlatendheid;
- Momenteel is niet bekend op welke manier de instroom van water in het watervoerend pakket het beste geschematiseerd kan worden in D-Geo Flow. Uit de analyses blijkt een directe horizontale instroom in het watervoerend pakket maatgevend. Dit is mogelijk een te conservatieve schematisatie;
- Bij rekenlocatie DT056 groeit de pipe in geen van de onderzochte scenario's door tot onder het voorland;
- Bij rekenlocatie DT143 groeit de pipe in het maatgevende scenario (horizontale instroom in het watervoerend pakket) 3,5 m door onder het voorland;
- Bij rekenlocatie DT192 is geen holocene zandlaag aanwezig in het watervoerend pakket. In dit geval is de berekende pipelengte in D-Geo Flow in geen enkel geval langer dan de helft van de dijkbasis;

In onderstaande tabel is een overzicht gegeven van de maatgevende resultaten uit de D-Geo Flow analyse.

Locatie	**Optredende Pipelengte bij WBN_{2075}[1]**		**KvK factor[3] [-]**	**Dikte holocene zandlaag [m]**	**Dikte Kreftenheye formatie [m]**	**Dikte Peize Waalre formatie [m]**	**Maatgevende berekening**
	D-Geo Flow[2]	**KvK**					
DT056	31,0	18,3	1,7	5,5	10,0	30,0	Horizontale instroom WVP

DT143	44,0	33,8	1,3	5,5	27,0	5,0	Horizontale instroom WVP
DT192	27,0	29,5	0,9	0	27,0	13,0	Anisotropie 5

[1] *Op basis van beslisboom uitgangspunten inclusief schadefactor 1,32 en modelfactor 1,5*

[2] *De maatgevende pipelengte van alle onderzochte scenario's*

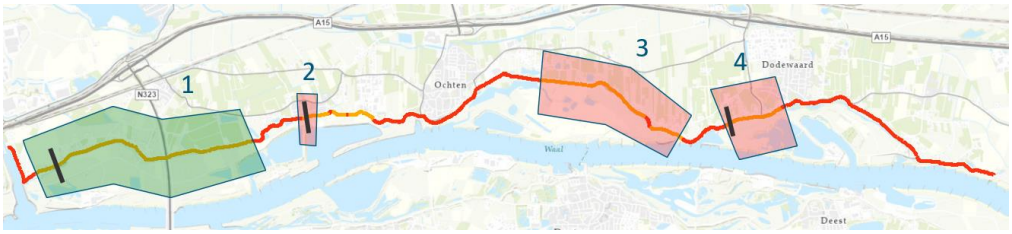
[3] *Ratio tussen de maximaal berekende pipelengte in D-GeoFlow en de berekende pipelengte op basis van de formules uit de KvK rapportage [ref. 2].*

4.2.2 Gebiedsdekkend resultaat onzekerheden pipelengte op basis van gevoeligheidsanalyse

De doorvertaling van de resultaten van de gevoeligheidsanalyse met D-GeoFlow naar een gebiedsdekkend beeld is gebaseerd op de rekenwaarde van de pipelengte. De rekenwaarde van de pipelengte is gelijk aan de berekende pipelengte op basis van de KvK formules vermenigvuldigd met een "Gevoeligheidsanalyse factor". Deze factor is afhankelijk van de opbouw van het watervoerend pakket:

- Geen holocene zandlaag: gevoeligheidsanalyse factor = 1,0;
- Holocene zandlaag en een relatief dikke formatie van Kreftenheye: gevoeligheidsanalyse factor = 1,3;
- Holocene zandlaag en een relatief dunne formatie van Kreftenheye: gevoeligheidsanalyse factor = 1,7.

In onderstaande figuur is weergegeven waar in het te beschouwen traject een holocene zandlaag aanwezig is in het watervoerend pakket. De factor van 1,3 is enkel van toepassing in deelgebied 2 (zie Figuur 10).



Figuur 10: Locaties zonder holocene zandlaag (groen) en met een holocene zandlaag in het watervoerendpakket (rood). Met zwarte lijnen zijn de rekenlocaties (D-GeoFlow) weergegeven.

4.2.3 Vervalreductiefactor (0,3d-regel)

Momenteel is er veel onzekerheid aanwezig over de vigerende vervalreductiefactor van 0,3 (0,3d-regel). In 2020 is in opdracht door KvK door Deltares een onderzoek uitgevoerd naar de 0,3d regel [ref. 7]. Dit onderzoek wijst uit dat: "*de benodigde drukval voor korreltransport theoretisch gezien kan variëren tussen vrijwel 0 en 1, afhankelijk van korreldiameter, de afmetingen van het opbarstkanaal en het debiet in het opbarstkanaal (van den Ham, 2018)*"

De hoogte van de vervalreductiefactor heeft direct invloed op het optredende verval en is daarmee (naast pipegroei) van grote invloed op de algehele piping scope. Momenteel zijn er echter geen concrete aanwijzingen dat de vervalreductiefactor aangepast zal worden. Om deze reden is de vigerende 0,3d regel in de analyse gehandhaafd.

Indien de vervalreductiefactor in de toekomst gereduceerd zal worden resulteert dit in een lager kritiek verval en daarmee een langere verwachte pipelengte. De invloed zal het grootst zijn ter plaatse van de meest kritieke locaties (zie Figuur 14) en locaties met een dikke deklaag (zie Figuur 11).

Figuur 11: Variatie in de dikte van de deklaag over het traject. De rekenlocaties zijn weergegeven met een zwarte stippellijn.

4.2.4 3D stroming

De huidige D-Geo Flow modellen zijn gebaseerd op 2D stroming van water naar de pipe. In werkelijkheid zal er altijd sprake zijn van (enige) 3D stroming. Hierdoor wordt momenteel een gedeelte van de stroming naar de pipe, mogelijk onterecht, verwaarloosd. Met het huidige onderzoek worden een lagere kritieke verval en langere pipelengtes verwacht vanwege de extra zijstroom. Dit wordt nog onderzocht.

Het effect van 3D stroming kan nog niet gemodelleerd worden, wel is bekend dat dit effect groter is bij situaties met een enkel uittredepunt (met een enkele pipe)

en een relatief ondoorlatend achterland. In situaties met een meer doorlatend achterland, of een insnijdende sloot (parallel aan de dijk) is het 3D effect naar verwachting kleiner maar nog steeds aanwezig.

Om voor het traject inzicht te verkrijgen in de mate van de verwachte 3D werking is langs het traject onderzocht waar er sprake is van:

1. Langssloten of een doorlatend achterland (dunne deklagen). In dit geval wordt een netwerk aan pipes verwacht waardoor de mate van 3D stroming waarschijnlijk kleiner is;
2. Kopsloten of een ondoorlatend achterland (dikke deklaag). In dit geval worden solitaire pipes verwacht waardoor het 3D effect waarschijnlijk groter is.

In Figuur 12 is langs het traject van niet-urgente locaties onderzocht waar sprake is van kopsloten/geen sloten of langssloten. Samen met Figuur 11 (deklaagdiktevariatie over het traject) is een overzicht gemaakt van locaties waar meer invloed van 3D stroming wordt verwacht. Dit overzicht is weergegeven in Figuur 13. Zoals gezegd is ook ter plaatse van de niet gemarkeerde locaties mogelijk nog steeds invloed aanwezig van 3D stroming.

Figuur 12: Locaties van langssloten of locaties zonder sloten of met kopsloten

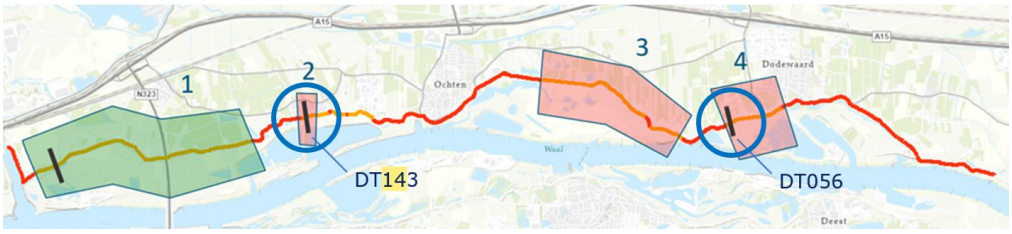
Figuur 13: Ter plaatse van de blauw gemarkeerde trajecten wordt verwacht dat er een grotere invloed aanwezig is van 3D werking

4.2.5 Risico op kortsluiting

Indien sprake is van pipegroei onder het voorland zal dit niet in alle gevallen direct leiden tot kortsluiting van de pipe naar maaiveld. In sommige gevallen is namelijk sprake van een dikke deklaag of een hoog maaiveld in het voorland. Als de deklaag dikker is dan 3 m, is aangenomen dat er geen risico aanwezig is op kortsluiting van de pipe naar maaiveld.

4.3 BRP-stap 2: beschouwing aspecten en afweging handelingsperspectief

Gebaseerd op de kennis uit de gevoeligheidsanalyse is een gebiedsdekkend overzicht gemaakt van de rekenwaarde van de pipelengte[4]. In deze kaarten is te zien dat enkel op twee locaties de pipe verder groeit dan de dijkbasis, namelijk ter plaatse van DT056 en ter plaatse van DT143. Beide locaties bevinden zich direct naast een verticale piping maatregel (urgent traject) en zijn berekend in D-Geo Flow. De locaties zijn weergegeven in onderstaand figuur.



Figuur 14: Locaties zonder holocene zandlaag (groen) en met een holocene zandlaag in het watervoerend pakket (rood). Met zwarte lijnen zijn de rekenlocaties (D-GeoFlow) weergegeven.

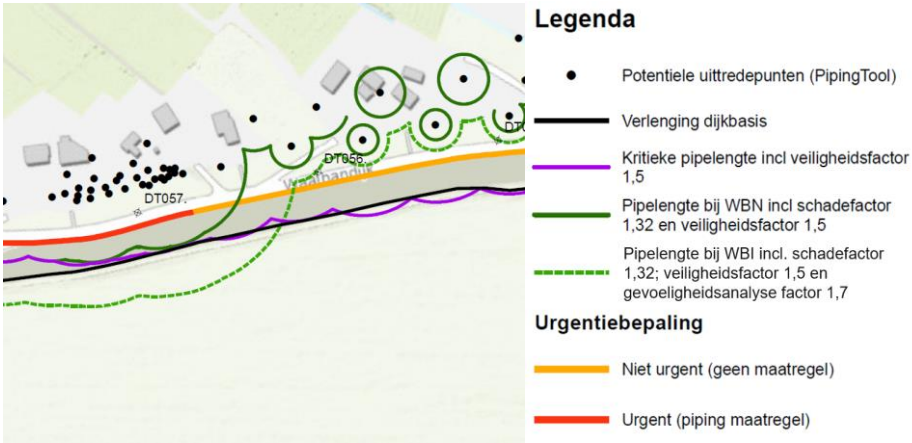
In deze paragraaf wordt voor beide locaties een overzicht gegeven van de onzekerheden van alle onderzochte aspecten. Op basis van dit overzicht kan vervolgens afgewogen worden of een maatregel noodzakelijk is.

Of de pipe daadwerkelijk verder zal groeien dan de dijkbasis is niet evident. In de berekening van de pipelengte zijn, aanvullende op de gevoeligheidsanalyse, namelijk veel partiële veiligheidsfactoren in rekening gebracht, namelijk: de schadefactor van 1,32 en een aanvullende modelfactor van 1,5. Als de veiligheidsfilosofie nader is uitgewerkt is het de verwachting dat deze factoren aangescherpt kunnen worden al is het niet mogelijk hierop vooruit te lopen.

4.3.1 Locatie DT056

In Figuur 15 zijn de berekende pipelengtes weergegeven. Zoals in de figuur is te zien groeit de pipe direct naast de piping maatregel tot in het voorland uitgaande van de gevoeligheidsanalyse factor van 1,7 (berekend met D-Geo Flow, zie 4.2.2).

[4] De kaarten zijn opgenomen in de rapportage "Pipegroei analyse Neder-Betuwe" [ref. 4]. In onderstaande paragraven is een uitsnede van de kaarten opgenomen ter plaatse van de kritieke locaties.



Figuur 15: Berekende pipelengte ter plaatse van DT056

In de gevoeligheidsanalyse zijn scenario's berekend waarin de pipe significant korter is. Voornamelijk het scenario met een doorlatend achterland is plausibel aangezien de deklaagdikte in dit vak beperkt is (0 tot 2 m). Een scenario met anisotropie is echter ook zeker niet uit te sluiten. De aanwezigheid van anisotropie resulteert in een langere pipelengte maar lagere kritiek verval, netto is het effect moeilijk te voorspellen.

Als de pipe begint te groeien zal deze waarschijnlijk vooruitschrijden in de tegengestelde richting van de stromingsrichting van het grondwater. In Figuur 16 is de locatie van het (fictieve) intredepunt weergeven. Hieruit blijkt dat de preferente stromingsrichting niet loodrecht op de dijk is maar schuin vanaf het open water, zie blauwe pijlen. De pipe kan hierdoor enkel onder het voorland groeien wanneer de pipe tegen de stromingsrichting in om de piping maatregel heen groeit. De stroming rond een verticale piping maatregel is echter complex, waardoor pipegroei onder het voorland niet is uit te sluiten.

Figuur 16: Locatie effectief/fictief intredepunt (blauwe lijn, stromingsrichting met blauwe pijlen)

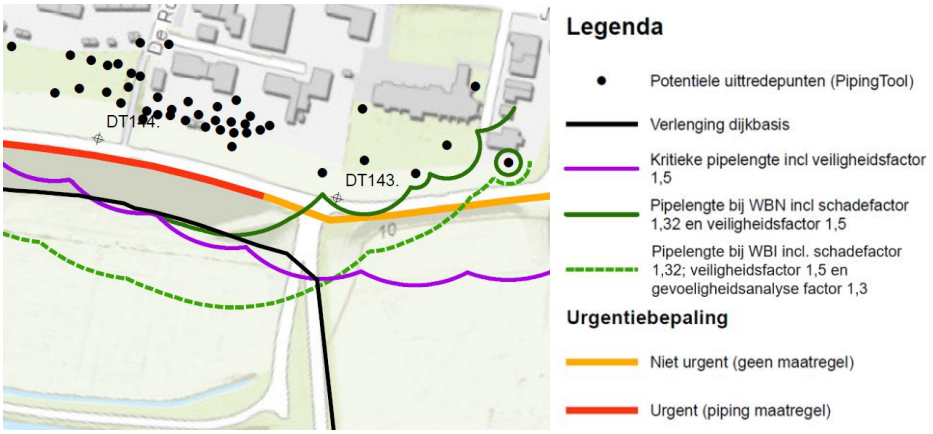
Ondanks dat er verschillende scenario's zijn waarbij het pipegroei onder het voorland op deze locatie onwaarschijnlijk is, is dit niet uit te sluiten. In de berekende pipelengte is namelijk nog geen rekening is gehouden met 3D stroming naar de kop van de pipe en een mogelijke toekomstige reductie van de vervalreductiefactor (0,3d-regel). Beide aspecten zijn van grotere invloed op locaties met een dikkere deklaag maar kunnen desondanks zeker van invloed zijn.

Daarnaast is in de analyse rekening gehouden met de uitgangspunten op basis van de beslisboom piping. De hierdoor in rekening gebrachte gemiddelde d70-waarde en doorlatendheid zijn toegepast vooruitlopend op te verwachte kennisontwikkeling (zie hiervoor de DO piping rapportage [ref. 6]).

Omdat pipegroei onder het voorland niet is uit te sluiten is, en om achterloopsheid te voorkomen, is besloten om de bestaande verticale piping maatregel met 20 meter te verlengen op basis van de berekende pipelengte met de KvK formule. Het 20 meter verlengen van de verticale maatregel is een relatief beperkte maatregel waarmee de veiligheid tegen piping wordt vergroot. Daarnaast is de aanvullende overlast voor de omgeving beperkt. Ook is er geen directe indicatie dat door het uitvoeren van aanvullend onderzoek geoptimaliseerd kan worden waardoor er weinig draagvlak is voor het uitstellen van de maatregel.

4.3.2 Locatie DT143

In Figuur 17 zijn de berekende pipelengtes weergegeven. Zoals in de figuur is te zien groeit de pipe direct naast de piping maatregel door tot in het voorland uitgaande van de gevoeligheidsanalyse factor van 1,3 (zie 4.2.2). In de uitgevoerde gevoeligheidsanalyse in D-GeoFlow ter plaatse van DT143 was in het maatgevende scenario ook sprake van pipegroei onder het voorland. Ook zonder een aanvullende factor is de afstand tot het voorland niet groot.



Figuur 17: Berekende pipelengte ter plaatse van dijkpaal DT056

Net als ter plaatse van DT056 is in de berekening van de pipelengte nog geen rekening gehouden met 3D stroming en een mogelijke toekomstige reductie van de vervalreductiefactor (0,3d-regel).

Omdat pipegroei onder het voorland niet is uit te sluiten is besloten om de bestaande verticale piping maatregel te verlengen met ca. 25 m (tot dijkpaal DT143) tot waar hoge grond in het voorland aanwezig is. Door de maatregel te verlengen tot het hoge voorland (met meer geohydrologische weerstand) wordt een meer robuust ontwerp gerealiseerd. De afweging is verder vergelijkbaar als voor DT056. Zo is de aanvullende overlast voor de omgeving beperkt en is er geen directe indicatie dat door het uitvoeren van aanvullend onderzoek geoptimaliseerd kan worden.

3. Conclusie en aanbevelingen

In de analyse van het faalmechanisme piping voor dijkversterking Neder Betuwe is de weerstand van het volledige voorland in rekening gebracht waardoor de scope sterk gereduceerd kon worden. In voorliggende analyse is het risico dat hierbij pipes onder het voorland groeien en kortsluiting naar maaiveld ontstaat onderzocht met behulp van KvK rapportage "Achtergrondrapport Voorlanden" [ref. 2] en het BRP. De belangrijkste conclusie van het onderzoek is dat, ondanks alle onzekerheden, het risico op pipegroei onder het voorland in de onderzochte situatie klein is en dat dit geen belemmering moet zijn voor het meenemen van de volledige weerstand in het voorland.

Het toepassen van het Beslisondersteunend Raamwerk Piping (BRP) heeft een overzicht opgeleverd van relevante aspecten en de onzekerheden binnen deze aspecten. Hierdoor was het mogelijk om een onderbouwde afweging te maken voor het wel of niet uitvoeren van maatregelen.

Het BRP is specifiek toegepast op pipegroei. Aspecten kunnen een andere invloed hebben op pipegroei als op het kritiek verval. Het is daarom belangrijk om bij het vaststellen van de relevante aspecten altijd de impact op beide mechanismes te beschouwen. Zeker aangezien effecten op kritiek verval de optredende pipegroei sterk beïnvloeden.

Bij de analyse kwam als belangrijke conclusie naar voren dat de aanwezigheid van een holocene, minder goed doorlatende, zandlaag op een sterk doorlatende pleistocene zandlaag kan leiden tot relatief lange pipelengtes gegeven het kritieke verval. Deze opbouw van het watervoerend pakket resulteerde in significant (tot 1,7x) langere berekende pipelengtes met D-GeoFlow dan op basis van de KvK formules uit KvK rapportage "Achtergrondrapport Voorlanden" [ref. 2] was voorspeld. Bij een meerlaagswatervoerend pakket is het daarom altijd aanbevolen om het effect op zowel kritiek verval als de lengte van de pipe te onderzoeken.

Er wordt aanbevolen om onderzoek te doen naar in welke situaties mogelijk sprake is van een relatief lange pipe zodat in projecten geen risico's worden onderschat bij het inschatten van de pipelengte op basis van de KvK formules uit KvK rapportage "Achtergrondrapport Voorlanden" [ref. 2]. Hierbij dient goed de relatie te worden gelegd met het kritieke verval aangezien deze in hoge mate de veiligheid bepaald en de kans dat een bepaalde pipelengte wordt bereikt.

Er zijn nog veel onzekerheden rondom pipegroei. Het is mogelijk om de lengte van de pipe te bereken in D-GeoFlow. Echter, ten tijde van de onderzoek was er nog geen validatie van het model waardoor een veiligheidsfactor in rekening gebracht werd. Daarnaast was er bij het uitvoeren van het project nog geen veiligheidsfilosofie aanwezig. In voorliggend project is hierdoor voor pipegroei dezelfde schadefactor toegepast als voor het faalmechanisme piping door de ontwerpwaterstand te verhogen. Verder zijn altijd onzekerheden aanwezig over de schematisatie van het watervoerend pakket en modelrandvoorwaarden. Er wordt aanbevolen om meer onderzoek uit te voeren naar bovengenoemde punten zodat een zo realistisch mogelijk beeld wordt verkregen van de lengte van de pipe.

Referenties

1. Deltares, juli 2024, Beslissingsondersteunend raamwerk piping - Beschrijving en factsheets, documentnummer: 11209268-021-GEO-0001
2. Rijkswaterstaat WVL, Deltares, februari 2022, Kennis voor Keringen 2021: Achtergrondrapport Voorlanden, documentnummer: 11206817-010-GEO-0003
3. Deltares, februari 2023, Onderzoek rapport Voorlanden - KvK2022, documentnummer: 11208057-046-GEO-0002
4. Royal HaskoningDHV, november 2022, Pipegroei analyse Neder-Betuwe. Referentie: WATRC_BF6777-115-102_R0102, Waterschap Rivierenland
5. Waterschap Rivierenland, 06-06-2021. Urgentiebepaling pipingopgave (adviesvraag), versie 1.1.
6. Royal HaskoningDHV, maart 2022, Piping: DO scope, urgentie- en consequentiebepaling, referentie: WATRC_BF6777-114-102_R0080_905329_f3.0, Waterschap Rivierenland
7. Deltares, 2020, KvK Piping 2018-2019: toepassing ontwikkelde kennis
8. Sellmeijer, H., de la Cruz, J. L., van Beek, V. M., & Knoeff, H. (2011). Fine-tuning of the backward erosion piping model through small-scale, medium-scale and IJkdijk experiments. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 15(8), 1139-1154.

Colofon:
Vraagsteller(s): Michiel Schotvanger (WSRL), Tom de Wit (Royal HaskoningDHV)
Project: Neder Betuwe
Waterschap: WSRL

Auteur(s): Ligaya Wopereis (Deltares), Tom de Wit (Royal HaskoningDHV)

Kwaliteitsborging: Wim Kanning (Deltares), Han Knoeff (DIV)