

Kennis voor Keringen: Syntheserapport pipingonderzoek 2018-2019

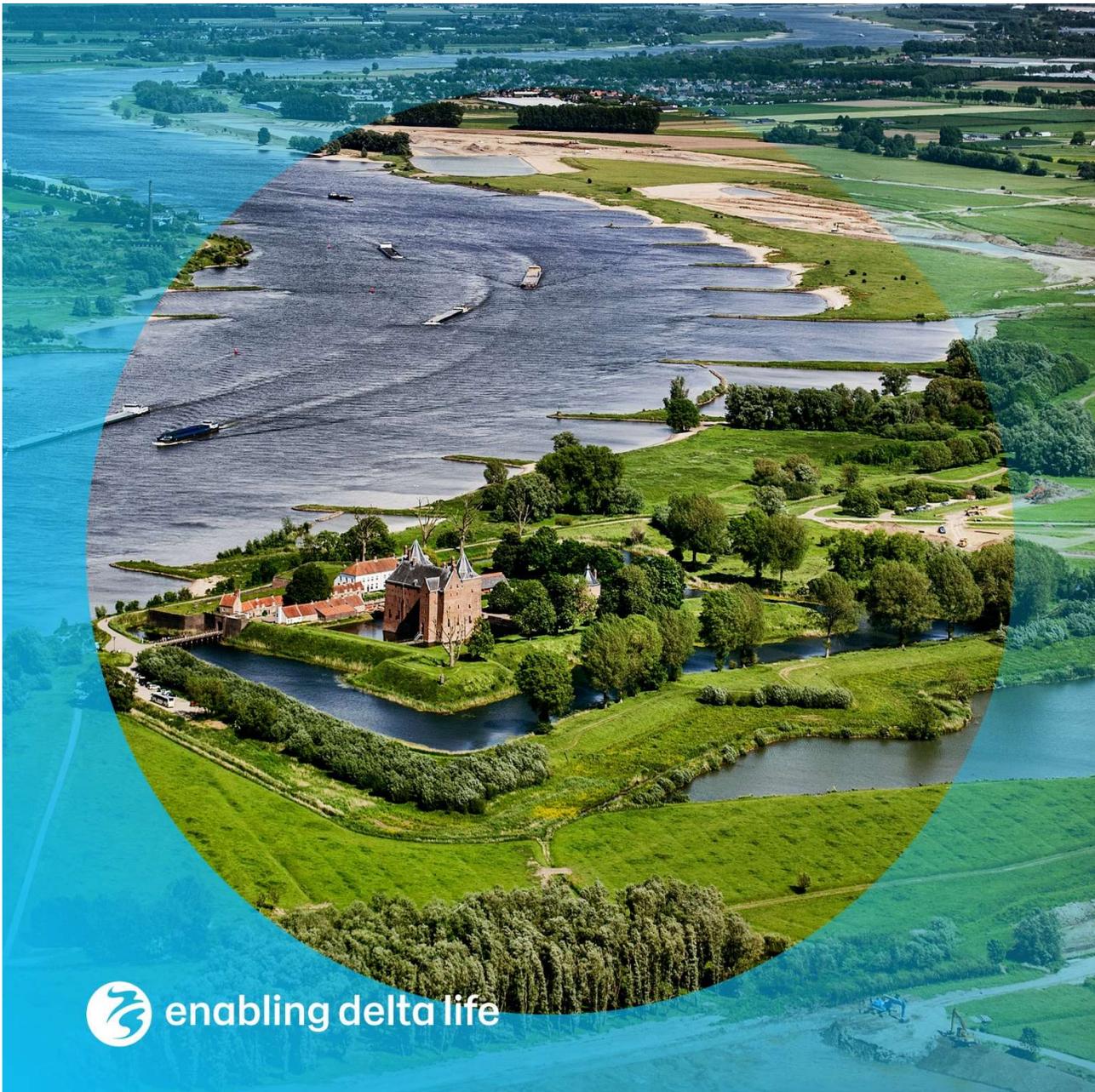
Auteur(s)

Vera van Beek

Ruud Hoogendoorn

Esther Rosenbrand

Marc Hijma



Kennis voor Keringen: Syntheserapport pipingonderzoek 2018-2019

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Henk van Hemert

Documentgegevens

Versie	v2
Datum	15 maart 2020
Projectnummer	11203719-019
Document ID	11203719-019-GEO-0003
Pagina's	100
Status	Definitief

Auteurs(s)

	Vera van Beek	
	Ruud Hoogendoorn	
	Esther Rosenbrand	
	Marc Hijma	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
2	Vera van Beek 	Ulrich Förster 	Leo Voogt 	

Samenvatting

Het faalmechanisme piping speelt een belangrijke rol bij de beoordeling van waterkeringen. Naar verwachting zullen bij het gebruik van het WBI 2017 vele dijktrajecten niet aan de norm voldoen. De hoge faalkansen sluiten in de praktijk niet aan bij het gevoel van de beheerder. Een mogelijke oorzaak hiervoor is dat de gebruikte rekenregel van Sellmeijer is afgeleid onder geïdealiseerde omstandigheden en de berekeningsresultaten bij het toepassen van deze regel op echte dijken grote onzekerheden bevatten. Deze onzekerheden ontstaan doordat er verschillende aspecten uit het veld niet of niet goed begrepen worden, meerdere aspecten die een rol spelen niet voldoende meegenomen kunnen worden in de huidige beoordelingsmethodiek en omdat de huidige benodigde parameters lastig in het veld te bepalen zijn. Daarom bestaat de wens om deze grote onzekerheid te verkleinen voor zowel een scherpere beoordeling als ontwerp, zodat er meer vertrouwen ontstaat in de toepassing van het aangepaste rekenmodel in het veld en dat investeringen op basis van dit rekenmodel beter onderbouwd kunnen worden.

De naar aanleiding van deze bevinding opgestelde visie heeft uiteindelijk geleid tot het onderzoek in het programma Kennis voor Keringen (KvK) in 2018 en 2019, waarin optimalisaties op het gebied van anisotropie, fijne fractie, voorland en achterland, observaties, de 0.3D regel, heterogeniteit in de baan van de pipe, 3D effecten en gecombineerde effecten zijn beschouwd.

Dit rapport vat het onderzoek voor KvK Piping 2018 en 2019 samen en geeft een doorkijk naar de consequenties van dit onderzoek voor de praktijk (consequentie analyse). De bevinding is dat door het scherper oordelen zowel positieve als negatieve effecten te benoemen zijn voor het deelmechanisme terugschrijdende erosie en dat de mate waarin de effecten de beoordeling zal beïnvloeden afhankelijk is van de locatie in Nederland.

Voor sommige gebieden in Nederland kan de de toegenomen kennis op gebied van terugschrijdende erosie tot een kleinere overstromingskans leiden. Voor andere gebieden is het van belang om ook rekening te houden met de overige gebeurtenissen die op moeten treden voordat piping tot een overstroming leidt. De meeste onderwerpen zijn in een verkenning uitgevoerd. In deze rapportage zijn aanbevelingen gedaan voor mogelijkheden van implementatie en vervolgacties binnen de kennisontwikkeling.

Over Deltares

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme innovaties, oplossingen en toepassingen voor mens, milieu en maatschappij. We richten ons voornamelijk op delta's, kustregio's en riviergebieden. Omdat het beheer van deze dichtbevolkte en kwetsbare gebieden complex is, werken we nauw samen met overheden, ondernemingen, kennisinstellingen en universiteiten in binnen- en buitenland. Ons motto is 'Enabling Delta Life'.

Als toegepast kennisinstituut zijn we succesvol wanneer onze kennis wordt verzilverd in en voor de samenleving. We stellen hoge eisen aan de kwaliteit van onze kennis en adviezen, rekening houdend met nieuwe wetenschappelijke inzichten, maar ook met de gevolgen die onze adviezen hebben voor milieu en samenleving.

Al onze opdrachten en projecten leveren een bijdrage aan het verstevigen van de kennisbasis. We kijken vanuit een lange termijn perspectief, naar bijdragen voor de oplossingen voor nu. Wij hechten zeer aan openheid en transparantie. Die houding is onder meer terug te zien in het vrij toegankelijk maken van de door Deltares ontwikkelde software en modellen. Open source werkt, is onze vaste overtuiging. Deltares heeft ruim 800 medewerkers en is gevestigd in Delft en Utrecht.

www.deltares.nl

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Introductie	8
2	Samenvatting uitgevoerd onderzoek	10
2.1	Anisotropie	11
2.2	Getijdenafzettingen	15
2.3	Doorlatendheid deklaag en voorland	19
2.3.1	Achterland	19
2.3.2	Voorland	20
2.4	Observaties	23
2.4.1	Een review van case studies	23
2.4.2	Verklaring voor zandmeevoerende wellen in West-Nederland	26
2.4.3	Uitgraven van wellen bij de Willemspolder	28
2.5	Heave en 0.3D-regel	30
2.5.1	Heave	31
2.5.2	De 0.3D-regel	32
2.6	Heterogeniteit	32
2.6.1	Micro-meso schaalvariatie in de baan van de pipe	33
2.6.2	Variatie onderkant deklaag	36
2.7	Piping in 3D	37
2.7.1	Advies John Rice	37
2.7.2	Involed van geohydrologische situatie bij 3D uitstroom	38
2.8	Optimalisaties gecombineerd beschouwen	41
2.9	Synthese	43
3	Consequentie-analyse	45
3.1	Factoren	45
3.1.1	Slibfractie	46
3.1.2	Helling deklaag	46
3.1.3	Heterogeniteit in de baan van de pipe	46
3.1.4	Anisotropie	47
3.1.5	Meerlaagsheid	49
3.1.6	3D-effect / Achterland	49
3.1.7	Voorland	50
3.1.8	0.3D regel	51
3.1.9	Samenvatting factoren	52
3.2	Differentiatie naar representatieve gebieden en kaart van NL	53
3.2.1	Slibfractie	53
3.2.2	Anisotropie	54
3.2.3	Meerlaagsheid	55
3.2.4	3D effect / achterland	56
3.2.5	Voorland	58
3.2.6	Drukval in het opbarstkanaal	58
3.2.7	Differentiatie in gebieden	59
3.3	Bepalen beïnvloedende parameters per deelgebied	61
3.4	Effect op kritiek verval voor alle deelgebieden	61

3.5	Indicatie van kostenreductie bij verdergaand gebruik van voorland	65
4	Conclusies en aanbevelingen	71
4.1	Conclusies	71
4.2	Aanbevelingen	72
4.2.1	Implementatie in het BOI	73
4.2.2	Doorontwikkeling en implementatie in projecten	73
4.2.3	Ontwikkeling kennisstrategie	74
5	Referenties	76
A	Kaarten	79
B	Bepaling gemiddelde SOS parameters per segment / scenario	85
C	Plan van aanpak bepaling drukval in het opbarstkanaal	87
C.1	De 0.3D-regel	87
C.2	Heave	88
D	Analyse meerlaagsheid	91
D.1	Aanpak	91
D.2	Overzicht van de analyse	91
D.3	Resultaten en analyse	94
D.4	Conclusies	96
E	Effectieve voorlandlengte	97

1 Introductie

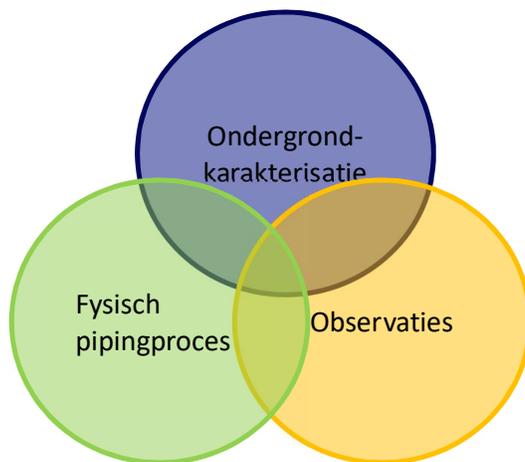
Het faalmechanisme piping speelt een belangrijke rol bij de beoordeling van waterkeringen. Naar verwachting zullen bij het gebruik van het WBI 2017 vele dijktrajecten niet aan de norm voldoen. De toename van de versterkingsopgave met betrekking tot het faalmechanisme piping wordt veroorzaakt door de veranderingen die zijn doorgevoerd bij het opstellen het WBI 2017 t.o.v. het VTV2006. Het onderzoek dat uitgevoerd is in het kader van het WBI 2017 en het desbetreffende advies van ENW hebben onder andere geleid tot het verwerpen van de regel van Bligh en het aanpassen van het model van Sellmeijer. Een grote verandering die veel invloed op de versterkingsopgave heeft is het afschaffen van het onterecht begrenzen van de resultaten uit het model van Sellmeijer op 18H. De overgang naar een overstromingskansbenadering maakt het expliciet meenemen van onzekerheden, bijvoorbeeld over de grondopbouw, mogelijk. Daarnaast wordt er nu rekening gehouden met het lengte-effect, waardoor de eis die aan piping wordt gesteld groter wordt. Als gevolg van deze aanpassingen wordt meestal een grotere kans op piping berekend dan voorheen.

De hoge faalkansen sluiten in de praktijk niet aan bij het gevoel van de beheerder. Een mogelijke oorzaak hiervoor is dat de gebruikte rekenregel van Sellmeijer is afgeleid onder geïdealiseerde omstandigheden en de berekeningsresultaten bij het toepassen van deze regel op echte dijken grote onzekerheden bevatten. Deze onzekerheden ontstaan doordat er verschillende aspecten uit het veld niet of niet goed begrepen worden, meerdere aspecten die een rol spelen niet voldoende meegenomen kunnen worden in de huidige beoordelingsmethodiek en omdat de huidige benodigde parameters lastig in het veld te bepalen zijn. Dit maakt dat de uitkomsten van de beoordeling een ongewenst grote onzekerheid kennen.

Van oorsprong is het model van Sellmeijer, en de daarvan afgeleide rekenregel, gebaseerd op een homogene ondergrond en een constante belasting. Dit zijn veilige uitgangspunten, omdat een heterogene ondergrond minder gevoelig is voor piping dan een homogene ondergrond. Dergelijke veilige uitgangspunten passen bij de oude overschrijdingskansbenadering waarbij het belangrijk is om aan te tonen dat een bepaalde hydraulische belasting zeker gekeerd kan worden. Bij de nieuwe overstromingskansbenadering wordt een kans op overstromen berekend. Daarbij kunnen geen veilige uitgangspunten meer worden gehanteerd maar moeten onzekerheden expliciet in rekening worden gebracht. Wanneer er echter geen rekening wordt gehouden met heterogeniteit en tijdsafhankelijkheid worden te hoge faalkansen uitgerekend. Met andere woorden: de faalkansbenadering is wel veranderd, maar het onderliggende pipingmodel niet. Hierdoor is een mismatch ontstaan die zo snel mogelijk opgelost dient te worden.

Voor de toekomst bestaat daarom de wens om deze grote onzekerheid te verkleinen voor zowel een scherpere beoordeling als ontwerp, zodat er meer vertrouwen ontstaat in de toepassing van het aangepaste rekenmodel in het veld en dat investeringen op basis van dit rekenmodel beter onderbouwd kunnen worden. Naar aanleiding hiervan heeft Deltares in opdracht van Rijkswaterstaat een visie opgesteld. Deze piping visie is samengevat in de volgende zin en Figuur 1.1:

'Een naar de ondergrond gedifferentieerde beoordelingsmethodiek, eenvoudig waar het kan en complex waar het nodig is, met handvatten voor slim en zinvol meten, waarin gebruik wordt gemaakt van de observaties uit de praktijk.'



Figuur 1.1 Relevante kennisvelden voor piping

De uiteindelijke beoordeling van een dijk met betrekking tot piping ligt in het centrum van de drie velden, waar modellering, ondergrondkarakterisatie en observaties samenkomen. De acties die benodigd zijn om de visie te bewerkstelligen zullen deels in de afzonderlijke velden liggen, maar, heel belangrijk, ook in de overlappende velden.

De visie is nader vorm gegeven in het plan van aanpak (Hijma et al., 2018), wat uiteindelijk heeft geleid tot het onderzoek in het programma Kennis voor Keringen (KvK) in 2018 en 2019. Veel onderzoeken die in 2018 en 2019 uitgevoerd zijn, waren mogelijk door eerder uitgevoerd onderzoek voor WBI. Dit betreft onder andere het implementeren van het model van Sellmeijer in DgFlow, wat optimalisatie in de schematisering mogelijk maakt, de eerste aanzetten voor het begrijpen en modelleren van piping in heterogene ondergrond en het begrijpen van de drukval in het opbarstkanaal. Ook de verschillende studies die binnen de POV-piping zijn uitgevoerd, hebben nog niet geleid tot een aanpassing van de beoordelingsmethodiek, maar bieden wel aanknopingspunten, bijvoorbeeld voor verbeteringen in de schematisering.

Dit rapport vat het onderzoek voor KvK Piping 2018 en 2019 samen en geeft een doorkijk gegeven naar de consequenties van dit onderzoek voor de praktijk (consequentie analyse). Bovendien worden aanbevelingen gedaan:

- waar wat zou kunnen/moeten landen in het (BOI) instrumentarium;
- voor vervolgacties binnen de kennisontwikkeling (in brede zin).

2 Samenvatting uitgevoerd onderzoek

Naar aanleiding van de visie op piping is een plan van aanpak opgesteld (Hijma et al., 2018), waarin deze visie nader is uitgewerkt. Op basis van dit plan is er een top 10 opgesteld van onderwerpen die geacht zijn een grote kans van slagen te hebben en naar verwachting een groot effect zullen hebben op het pipingoordeel. In overleg met RWS en het deskundigenteam is in 2018 gekozen om de volgende onderdelen naar voren te trekken:

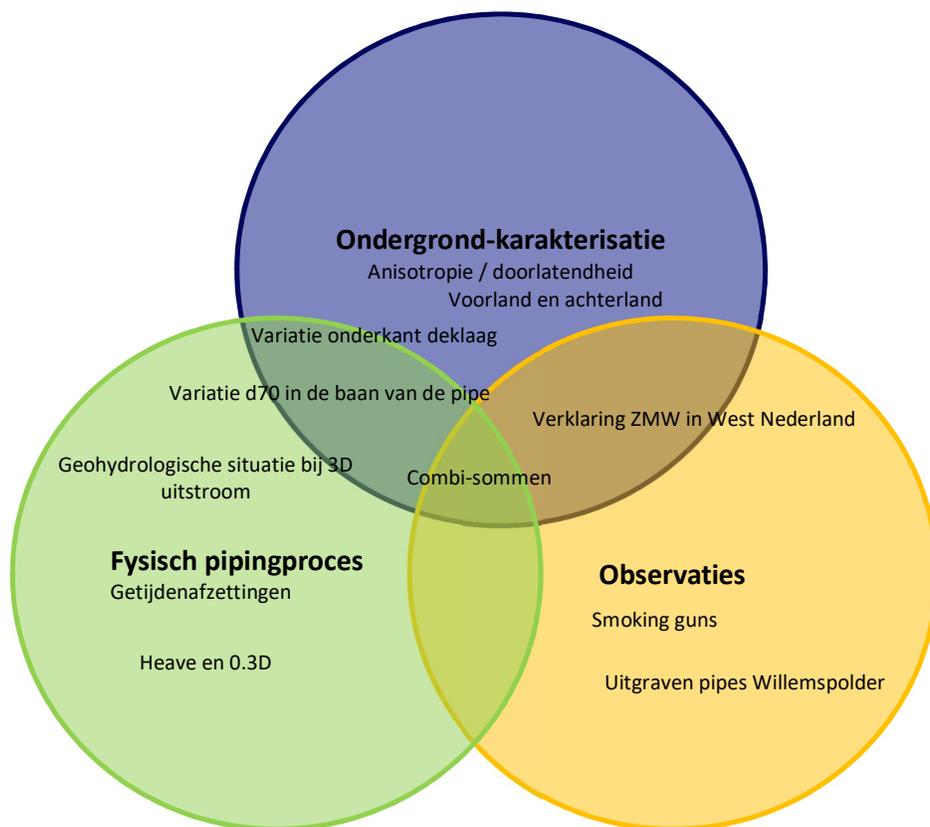
- Anisotropie
- Getijdenafzettingen
- Doorlatendheid deklaag
- Case histories ('Smoking guns')
- Verklaring zandmeevoerende wellen West Nederland
- Heave en de 0.3D regel
- Visie heterogeniteit

Ad hoc is er nog onderzoek uitgevoerd naar het blijven bestaan van pipes bij de zomerkade van de Willemspolder, wat mogelijk was door laagwater. Ook heeft John Rice een onafhankelijk advies uitgebracht naar piping in een 3D situatie.

In 2019 is onderzoek uitgevoerd voor de volgende deelprojecten:

- Getijdenafzettingen – vervolg op onderzoek 2018
- Anisotropie / doorlatendheid – vervolg op onderzoek 2018
- Voorland en achterland – deels vervolg op onderzoek 2018
- Geohydrologische situatie bij 3D uitstroom – vervolg op het advies van John Rice
- Verkenningen heterogeniteit – vervolg op de visie heterogeniteit
- Optimalisaties gecombineerd beschouwen.

Deze deelonderzoeken dekken alle drie eerder gedefinieerde voor piping relevante kennisvelden. Figuur 2.1 heeft aan waar het zwaartepunt van de verschillende deelprojecten ligt.



Figuur 2.1 Deelonderzoeken in relatie tot kennisvelden

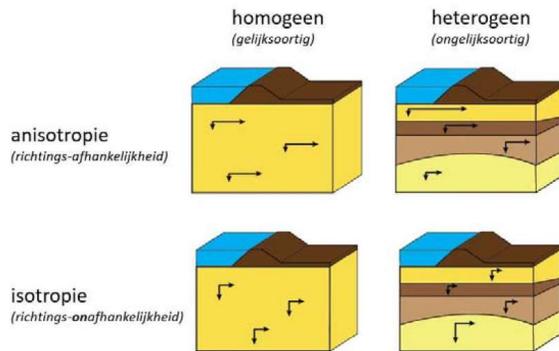
Hierna worden de deelprojecten, gegroepeerd naar de onderwerpen 'anisotropie', 'doorlatendheid deklaag en voorland', 'getijdenafzettingen', 'observaties', 'heave en 0.3D-regel', 'heterogeniteit', 'piping in 3D' en 'combi-sommen', nader toegelicht.

2.1 Anisotropie

Zowel in 2018 als in 2019 is onderzoek gedaan naar anisotropie: het niet gelijk zijn van horizontale en verticale doorlatendheid. Het onderzoek is gerapporteerd in (Kanning et al., 2018a) en (Kanning et al., 2019a). De onderstaande tekst is een samenvatting van en bevat citaten uit deze rapporten. Het onderzoek uit 2018 is uitgevoerd in een samenwerkingsverband tussen Fugro, HKV en Deltares. In 2019 is in samenwerking met Fugro op basis van de opgedane kennis ook een stappenplan ontwikkeld over hoe anisotropie-metingen kunnen worden doorvertaald naar rekenwaarden.

Anisotropie is het verschil tussen horizontale en verticale doorlatendheid van grond (Figuur 2.2). Deze kan worden uitgedrukt als een ratio: de zogenaamde anisotropiefactor, gedefinieerd als de horizontale doorlatendheid gedeeld door de verticale doorlatendheid. Pipinggevoelige zandlagen zijn mariene, fluviaatiele en eolische afzettingen uit het pleistoceen en holoceen. Deze zijn in een tijdspanne van eeuwen tot millennia laagje per laagje afgezet. Als gevolg van deze 'horizontale' afzettingsgeschiedenis is de verticale doorlatendheid veelal lager dan de horizontale doorlatendheid. De doorlatendheid van deze lagen is dus anisotroop; de mate van anisotropie is naar verwachting wel per afzetting

verschillend. In de beoordeling en het ontwerp van de dijk wordt met de anisotropie van de zandlaag niet expliciet rekening gehouden. Het wel meenemen van anisotropie heeft in principe een positief effect op de berekende sterkte van de dijk, aangezien er door de kleinere verticale doorlatendheid minder water naar de pipe stroomt dan op basis van een homogeen pakket verwacht wordt. Het gevolg van het niet meenemen van anisotropie is het mogelijk onnodig afkeuren van dijken en overdimensioneren van piping-mitigerende versterkingsmaatregelen, zoals pipingbermen.



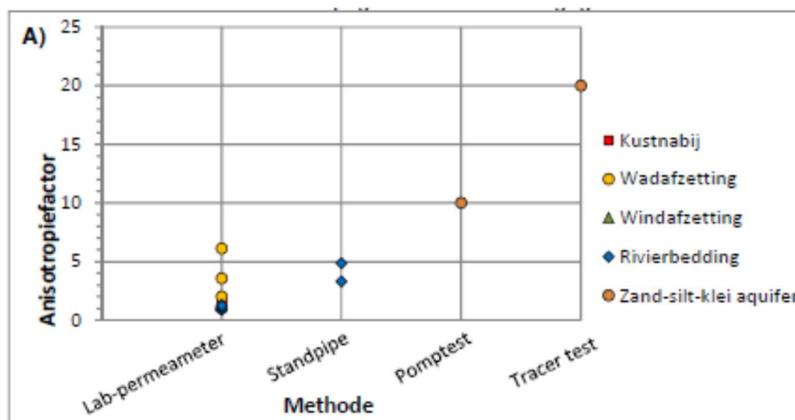
Figuur 2.2 Anisotropie en meerlaagsheid (Kanning et al., 2018)

Het doel van de verkenningen is om de invloed van anisotropie in doorlatendheid op piping beter te begrijpen, en om de anisotropie van verschillende natuurlijke afzettingen te karakteriseren. Het onderzoek van 2018 is verdeeld in twee onderdelen:

- Op basis van literatuuronderzoek een inschatting maken van anisotropiefactoren in veelvoorkomende afzettingen.
- Op basis van numerieke analyses met D-Geo Flow bepalen wat de invloed is van anisotropie op de weerstand tegen piping.

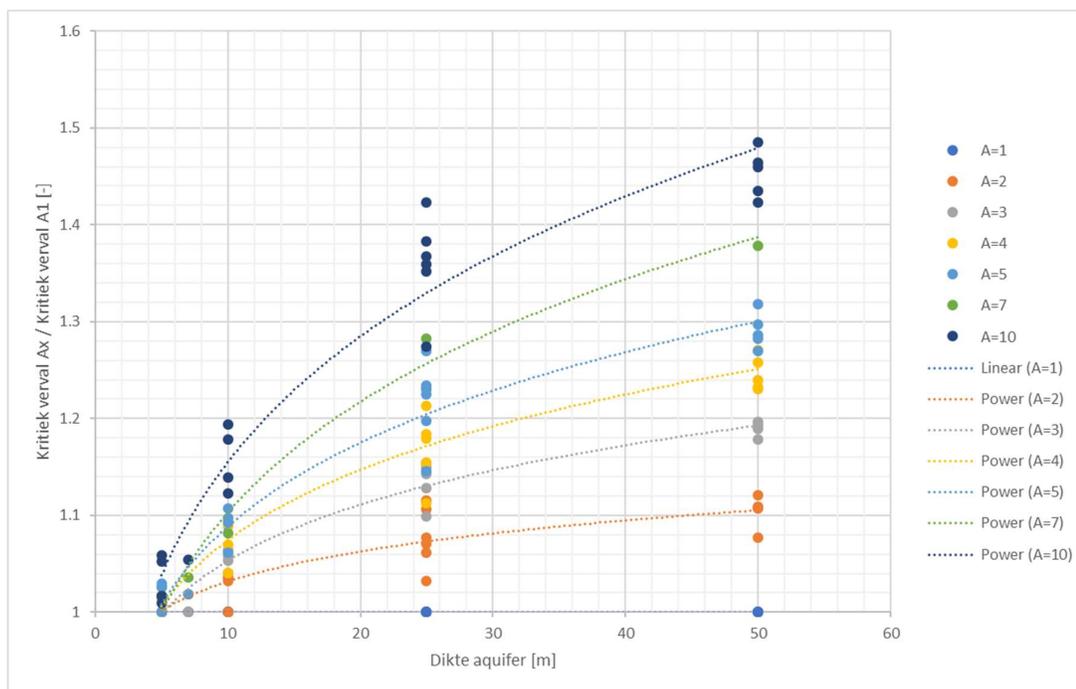
In het onderzoek van 2019 is een methodiek onderbouwd om rekenwaarden van anisotropiefactoren af te leiden ten behoeve van pipinganalyses.

De literatuurstudie laat zien dat voor de meeste WBI-SOS afzettingen naar verwachting een anisotropiewaarde wordt gevonden die significant groter is dan 1. Echter, deze is wel gekarakteriseerd door grote variaties en er zijn voor vele afzettingen ook maar weinig metingen beschikbaar. Tevens wordt een aanwijzing voor de aanwezigheid van een schaafeffect in anisotropiemetingen gevonden, waarbij grotere proefmonsters overeenkomen met hogere anisotropiefactoren. Dit is in principe gunstig voor piping-analyses aangezien piping waarschijnlijk een (relatief t.o.v. de meeste metingen) grootschalig grondwaterstromingsproces is. Er dient te worden opgemerkt dat de hoeveelheid gegevens uit de literatuur niet toereikend is om een nauwkeurige relatie tussen afzettingsschaal en anisotropie aan te kunnen tonen. Daarom is hier in 2019 nader op ingegaan door metingen in projecten te analyseren. Een kaart met indicaties voor de grootte van anisotropiefactoren is weergegeven in Appendix A.



Figuur 2.3 Invloed schaalgrootte op waarde anisotropie in het 2018 onderzoek

De invloed van anisotropie op het doorgroeien van een pipe is verkend door middel van numerieke berekeningen in D-Geo Flow aan de hand van een representatieve basisgeometrie, waarvoor variaties van anisotropie, kwelweglengte, aquifer dikte, doorlatendheid en korreldiameter zijn toegepast. Deze analyses laten zien dat anisotropiefactoren groter dan 1 (ongeveer 2 en groter) al een significant effect hebben op de weerstand tegen piping. Het kritieke verval kan oplopen met een toename tot enkele tientallen procenten. Door de afname van de verticale stroming neemt het debiet naar de pipe af en daarmee de weerstand toe. Een voorbeeld van het effect van de anisotropie factor A en dikte van de aquifer op de toename van de ratio kritiek verval met anisotropie (H_c) gedeeld door kritiek verval met een anisotropiefactor van 1 (H_{c_A1}) staat weergegeven in Figuur 2.4. Ter indicatie is hier een machtsfunctie door gefit. Het doorrekenen van verschillende scenario's laat zien dat vooral de dikte van het zandpakket de invloed van anisotropie op het kritieke verval bepaalt. Dit komt vooral doordat anisotropie er voor zorgt dat niet het hele zandpakket in gelijke mate zorgt voor stromingsdruk in de pipe, maar vooral het bovenste gedeelte. Overige parameters zoals doorlatendheid, leklengte en korreldiameter beïnvloeden het effect van anisotropie niet wezenlijk. Analyses naar de invloed van ruimtelijke variatie in anisotropie laten zien dat vooral anisotropie aan de rivierkant van invloed is op het kritieke verval.



Figuur 2.4 Invloed van de dikte van de zandlaag op de ratio tussen kritieke verval bij anisotropie en het kritiek verval bij isotropie ondergrond voor verschillende anisotropiefactoren

Door het onderzoek van 2019 is een methodiek onderbouwd om rekenwaarden van anisotropiefactoren af te leiden ten behoeve van pipinganalyses. De uitkomsten van dit onderzoek zijn toegepast in Fase III van het Spui-project van Waterschap Hollandse Delta waar bij traject 20-3 op basis van HPT-AMPT metingen de mate van anisotropie in doorlatendheid van relevante lagen werd bepaald om zo een scherpere pipinganalyse te kunnen maken. Vanwege de grote hoeveelheid aan beschikbare metingen bij traject 20-3 zijn de analyses in dit rapport vooral op de hier aanwezige getijdenafzettingen gericht.

Om rekenwaarden (met materiaalfactor 1) te kunnen bepalen voor de anisotropiefactoren zijn de volgende studies uitgevoerd:

- Het effect van schaal op de anisotropie is onderzocht door het vergelijken van anisotropiemetingen op verschillende schalen.
- D-Geo Flow berekeningen zijn uitgevoerd om vast te stellen of een karakteristieke waarde van de gemiddelde anisotropiefactor als rekenwaarde kan worden gebruikt.

Voor schaafeffecten wordt geconcludeerd dat de schaal waarop de anisotropiemeting wordt gedaan van groot belang is. Pompproeven geven informatie over de bulk-anisotropie van het gehele zandpakket en kunnen dus gebruikt worden voor een bepaling van de anisotropiefactor van het watervoerende zandpakket. Anisotropiemetingen op basis van HPT-AMPT metingen geven de anisotropiefactor voor enkele m^3 grond. Bij meerdere HPT-AMPT metingen binnen hetzelfde zandpakket geeft het gemiddelde van deze metingen doorgaans een hogere anisotropiefactor dan volgend uit een pompproef, met name doordat hoge outliers het gemiddelde sterk beïnvloeden. Het schaafeffect tussen HPT-AMPT en pompproef kan worden ondervangen door het gemiddelde van de HPT-AMPT metingen te bepalen zonder de hoge outliers. Op basis van kleine monsters, zoals afkomstig uit boorkernen, kan de anisotropiefactor niet op een betrouwbare manier worden bepaald.

Op basis van de uitgevoerde D-Geo Flow analyses wordt geconcludeerd dat variaties in anisotropie in de meeste gevallen uitmiddelen en dat dus gerekend mag worden met de gemiddelde anisotropiefactor van een afzetting. Dit is met name geldig als de variaties een korte correlatielengte hebben (10 m of minder). In sommige gevallen is het rekenen met een gemiddelde anisotropiefactor echter niet conservatief, bijvoorbeeld in geval er grotere zones met lage anisotropie in het zandpakket voor de dijk (bijvoorbeeld in geval van geen/beperkt voorland) of onder het voorland zijn of er sterke gelaagdheid aanwezig is.

Op basis van de uitgevoerde analyses is een rekenmethodiek opgesteld voor het afleiden van de rekenwaarde van de anisotropiefactor. De rekenmethodiek omhelst een stappenplan voor het afleiden van een conservatieve schatting van de gemiddelde anisotropiefactor voor een dijktraject waarin de bevindingen van de schaaffecten en D-Geo Flow analyses zijn opgenomen. Dit is gedaan op basis van de beste beschikbare kennis van HPT-AMPT metingen voor traject 20-3. Echter, het is de eerste keer dat een rekenwaarde voor anisotropiefactoren is afgeleid en nieuwe informatie uit traject 20-3 en andere trajecten dienen goed beschouwd te worden om na te gaan of deze geen aanleiding geven om de voorgestelde methodiek te veranderen.

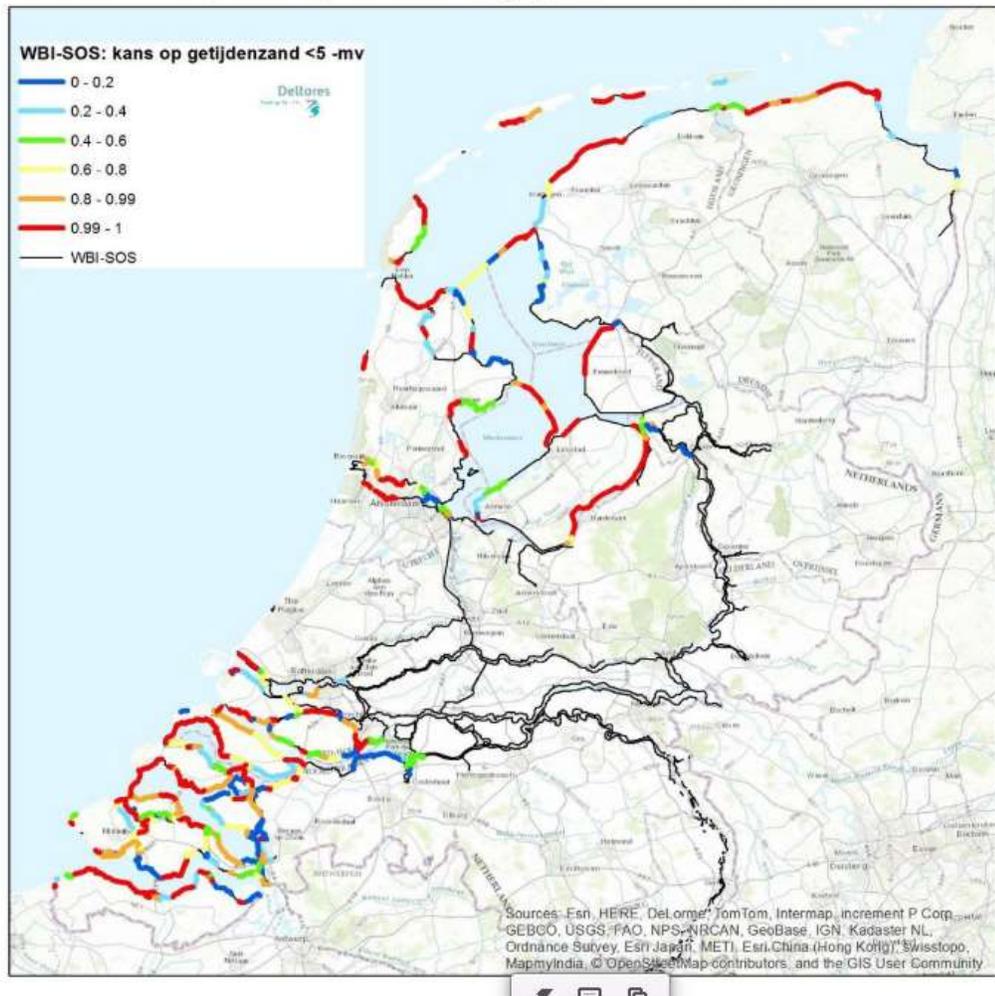
Op dit moment is D-Geo Flow de meest voor de hand liggende tool om anisotropie in de beoordeling mee te nemen. D-Geo Flow en de bijbehorende veiligheidsfilosofie zijn hiervoor nog onvoldoende ontwikkeld. Daarnaast zijn er te weinig metingen beschikbaar om goed onderbouwde rekenwaarden per afzettingmilieu te kunnen geven en is verdere validatie van de HPT-AMPT techniek wenselijk.

2.2 Getijdenafzettingen

Zowel in 2018 als in 2019 is onderzoek gedaan naar gevoeligheid van getijdenafzettingen (getijdengeul- en getijdenplatafzettingen) voor piping. Het onderzoek is gerapporteerd in (Hijma en Oost, 2018a) en (Hijma, 2019). De onderstaande tekst is er een samenvatting van en bevat citaten uit deze rapporten.

De ondergrond in Nederland is sterk heterogeen als gevolg van een complexe geologische geschiedenis. Toch wordt er voor de bepaling van de kans op piping slechts een rekenregel toegepast, die gebaseerd is op pipingproeven met zand zonder de fractie $<63 \mu\text{m}$ en met een smalle korrelgrootteverdeling (homogeen zand). Daarnaast is bij de pipingproeven meestal zand gebruikt dat van origine meestal afgezet is door rivieren. Getijdenzand wijkt sterk af van rivierzand: het bevat in de regel relatief veel lutum- en siltdeeltjes. Het is dan ook de vraag of de rekenregel wel geldig is voor getijdenzand, een type zand dat onder circa 1000 km dijk aanwezig is (in met name in Zeeland, Zuid- en Noord-Holland, Friesland, Groningen). Deze vraag wordt mede ingegeven door het feit dat in gebieden met getijdenafzettingen er zeer weinig zandmeevoerende wellen zijn waargenomen (<10 voor heel Nederland) en in gebieden met rivierafzettingen juist zeer veel (>200 voor heel Nederland).

WBI-SOS - Kans op aanwezigheid Holoceen getijdenzand in de bovenste 5 m - Totaal 970 km



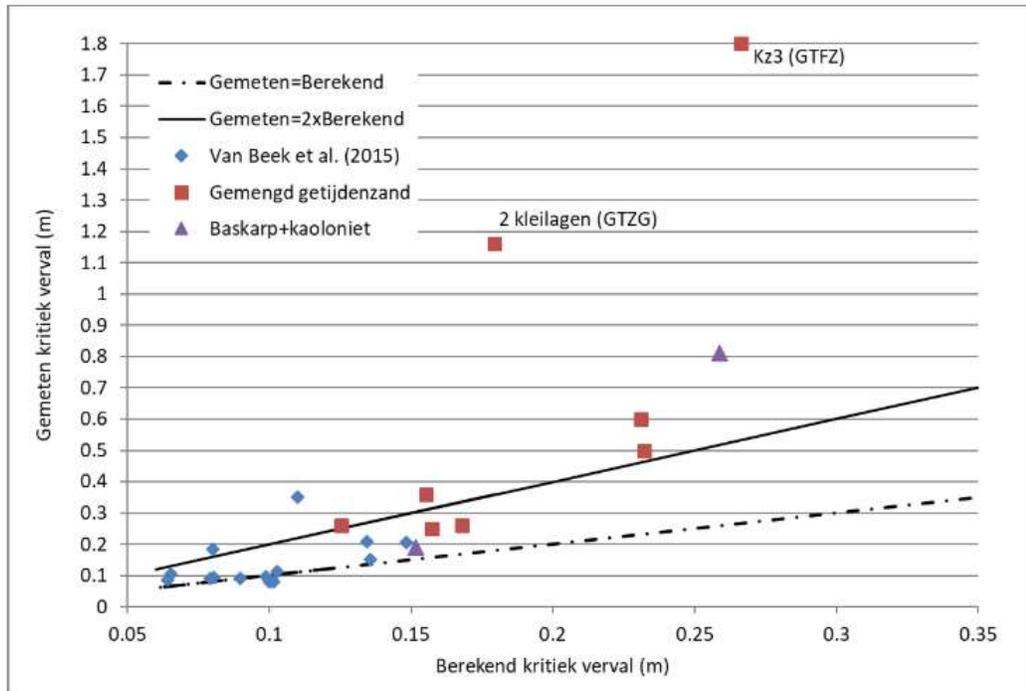
Figuur 2.5 Overzicht van het voorkomen van getijdenafzettingen onder de primaire waterkeringen in (Hijma and Oost, 2018a)

Het onderzoek naar getijdenzanden (zowel het onderzoek van 2018 als dat van 2019) draait daarom om het beantwoorden van de volgende vragen:

- Is getijdenzand minder pipinggevoelig dan rivierzand?
- Zo ja, waardoor komt dit?
- Zo ja, hoe kan dit meegenomen worden bij de beoordeling?

Om de bovenstaande vragen te beantwoorden zijn proeven uitgevoerd in een kleine-schaalopstelling met getijdenzand (gehomogeniseerd) en met Baskarpzand met toegevoegde fijne fractie. Getijde afzettingen zijn gronden met verschillende eigenschappen die relevant zijn voor grondwaterstroming en het ontstaan van piping. De afzettingen kennen een relatief grote fijne fractie, de korrelgrootte en -vorm wijken af van het zand in het (boven-) rivierengebied. Ook zijn de afzettingen vaak gelaagd, daardoor is sprake van anisotropie. De laagjes zijn van nature niet continue. Het onderzoek heeft zich met name gericht op de fijne fractie. Anisotropie en heterogeniteit worden afzonderlijk behandeld in andere deelonderzoeken.

Figuur 2.16 laat de gemeten en berekende kritieke vervallen zien voor alle proeven met getijdenzand, de proeven met Baskarpzand en kaoliniet, en voor de proeven op rivierzand zonder fijne fractie uit Van Beek et al. (2015). De zwarte stippellijn geeft de lijn aan waarop de punten zouden liggen indien de berekende en gemeten vervallen gelijk zouden zijn. De grafiek wordt sterk naar boven uitgerekt door de proef met kleiig zand (Kz3) en 2 kleilagen: de gemeten kritieke vervallen zijn daar maar liefst 6-7 keer zo groot als het berekende kritieke verval. De resultaten bevestigen dat er extra sterkte is in getijdenzand.



Figuur 2.6 Berekende kritieke vervallen en gemeten kritieke vervallen (Hijma, 2019)

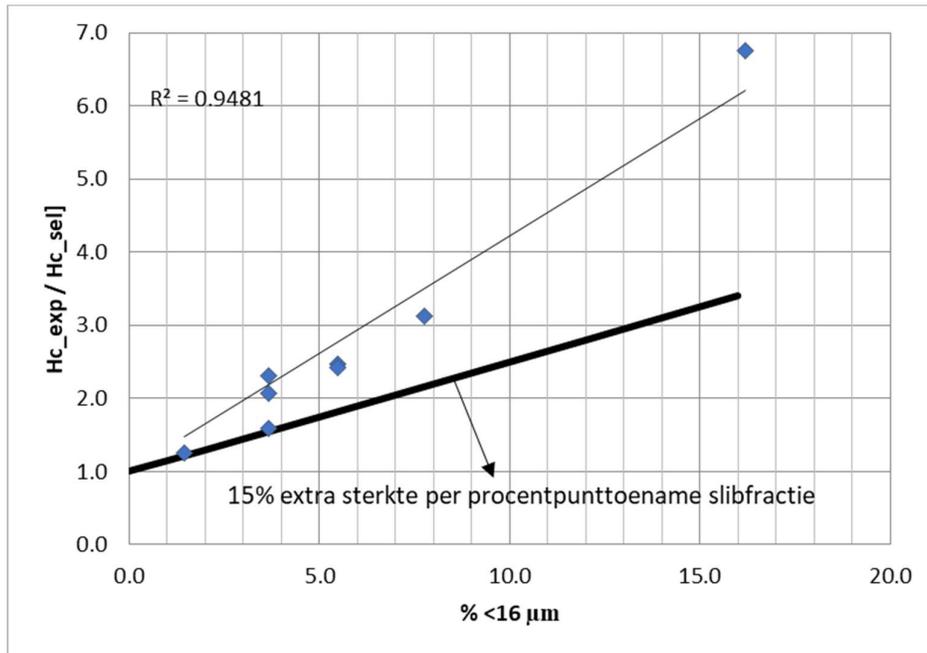
Er kunnen verschillende oorzaken zijn waardoor het getijdenzand sterker is dan door de regel van Sellmeijer wordt voorspeld:

- de aanwezigheid van kleilagen
- cohesie, zowel fysisch als biologisch
- aanwezigheid fijne fractie

Om aan te tonen waardoor het getijdenzand sterker is, zijn de proeven deels uitgevoerd op getijdenzand uit het veld en deels op Baskarpzand waaraan kaolinietklei is toegevoegd. Deze laatstgenoemde proeven zijn uitgevoerd omdat kaolinietklei beperkt cohesief is. Door proeven uit te voeren met een fijne fractie (in dit geval kaolinietklei) die beperkt cohesief is en geen biofilms bevat, kan inzicht verkregen worden in de bijdrage van cohesie aan de extra sterkte. De proeven met Baskarpzand en kaolinietklei laten zien dat ook nu nog extra sterkte aanwezig is. Deze sterkte winst wordt mogelijk veroorzaakt door de invloed van de fijne fractie op het losmaken van korrels, ook als de fijne fractie zelf niet cohesief is, of door lokale variatie in doorlatend die niet door de rekenregel van Sellmeijer gevat worden. Een andere mogelijkheid is dat hoewel kaoliniet beperkt cohesief is, de aanwezige cohesie toch nog van invloed is.

Het plotten van het percentage lutum-, slib- of fijne fractie versus de sterktefactor (het quotiënt van gemeten/berekend kritiek verval) laat een duidelijke relatie zien, waarbij toenemende percentages leiden tot hogere sterktefactoren. De sterkte relatie is vooralsnog gevonden tussen het percentage slib

(< 16 µm) en de sterktefactor. Hoewel deze relatie nog beter onderbouwd moet worden, zou bij beoordelings- en versterkingsprojecten de extra sterkte door de fijne fractie al wel meegenomen kunnen worden. Gezien de nog aanwezige onzekerheden moet dit met enig conservatisme gebeuren.



Figuur 2.7 Verhouding tussen experimentele kritieke vervallen en berekende kritieke vervallen, uitgezet tegen het percentage materiaal dat kleiner is dan 16 µm (slibfractie). De dikke zwarte lijn is de voorgestelde extra sterkte die gebruikt kan worden binnen de 'toets op maat' (Hijma, 2019).

Hieronder wordt een concreet handelingsperspectief voorgesteld:

- 1 *Bepalen % slibfractie in de ondergrond (fractie < 16 µm)*
- 2 *Toepassen extra sterkte getijdenzand*
Het kritieke verval kan verhoogd worden met een percentage dat afhangt van het percentage slib. Een voorlopige veilige relatie is (zie ook (Hijma, 2019)):
 - Bij 1% slibfractie, toename kritieke verval met 15%
 - Bij 2% slibfractie, toename kritieke verval met 30%
 - Etc.
- 3 *Voorzichtige toepassing rekenregel*
Er dient nog voorzichtig omgegaan te worden met bovenstaande rekenregel, maar deze kan wel gebruikt worden in de 'toets op maat'. Indien door de gebruiker afgeweken wordt van voorgestelde rekenregel zou dit goed onderbouwd moeten worden.

Daarnaast zou bij het prioriteren van versterkingen vast rekening gehouden kunnen worden met een sterktefactor van 2. Dijktrajecten die door deze sterkte winst goedgekeurd worden, zouden voorlopig niet versterkt hoeven te worden in afwachting van onderzoek dat gepland staat voor 2020 en 2021. Dit onderzoek bestaat wellicht uit een voortzetting van het KvK-programma, maar zeker ook uit de piping praktijkproef in Friesland en mogelijk andere veldproeven.

2.3 Doorlatendheid deklaag en voorland

Zowel in 2018 als in 2019 is onderzoek gedaan naar de invloed van de doorlatendheid van de deklaag op piping. In 2019 is ook onderzoek gedaan naar het effect van het meenemen van voorland. Het onderzoek is gerapporteerd in (Lam, 2018), (Lam, 2019a), (Lam, 2019b), (Lam, 2019c), (Lam, 2020) en (Rosenbrand, 2020). De onderstaande tekst is een samenvatting van en bevat citaten uit deze documenten.

2.3.1 Achterland

De verwachting is dat de doorlatendheid van de deklaag aan de polderzijde een gunstige invloed kan hebben op de deelfaalmechanismen van piping; opbarsten, heave en terugschrijdende erosie. Dit blijkt onder andere uit waarnemingen van Waterschap Rivierenland en Waterschap Limburg waarbij minder zandmeevoerende wellen zijn geconstateerd in gebieden met dunne doorlatende deklaag. Deze gunstige invloed van de doorlatende deklaag wil men waar mogelijk ook meenemen in de beoordeling van piping.

In de gedetailleerde toets kan voor de deelmechanismen opbarsten en heave al rekening gehouden worden met de invloed van een doorlatende deklaag in het achterland door de dempingsfactor op de stijghoogte aan te passen aan de hand van de leklengte. Een hogere doorlatendheid zorgt voor een afname van de stijghoogte, en heeft daarmee een gunstig effect op de veiligheidsfactor voor opbarsten en heave. Het gunstige effect van een doorlatende deklaag op het stijghoogteverloop is relatief groot bij geometrieën/configuraties waarbij de leklengte kleiner is dan 100 - 30 m (respectievelijk 10% en 50% verlaging van de stijghoogte).

Voor de gedetailleerde toets voor terugschrijdende erosie is de formule van Sellmeijer in het WBI voorgeschreven waarbij een doorlatende deklaag niet (expliciet) kan worden meegenomen (de rekenregel veronderstelt een ondoorlatende deklaag). De doorlatendheid van een deklaag kan wel in de rekensoftware D-Geo Flow worden meegenomen die binnen een toets op maat kan worden uitgevoerd om de weerstand tegen terugschrijdende erosie te bepalen.

Het onderzoek van 2018 richtte zich op het achterland en had als doel:

- te bepalen hoe variatie in doorlatendheid van de deklaag impact heeft en kan worden meegenomen bij het beoordelen van opbarsten, heave en terugschrijdende erosie. Hierbij is de doorlatendheid per WBI-SOS eenheid, en dus per geologische afzetting, bepaald.
- configuraties met een doorlatende deklaag te bepalen waarbij het optreden van de deelfaalmechanismen van piping zeer waarschijnlijk niet kan optreden (uitsluitcriteria).
- beter inzicht te krijgen in de relatie tussen ontstaan en doorgroeien van een pipe, aan de hand van de doorlatendheid van de deklaag en de lokale configuratie.

In 2019 is aanvullend hierop onderzoek gedaan naar het effect van een teensloot op de stijghoogte, zijn er op basis van het werk in 2018 kaarten van Nederland opgesteld waarbij de aanwezigheid van doorlatende deklaag is weergegeven en zijn verschillende situaties met doorlatende/gefragmenteerde deklaag beschouwd om vast te stellen of er een risico voor piping is.

De inventarisatie op basis van literatuur en bestaande studies bevestigt het gunstige effect van de doorlatendheid van de deklaag op de deelmechanismen opbarsten en heave. Hoewel de kennis voor het bepalen van de stijghoogte al beschikbaar is, kan deze beter toegankelijk gemaakt worden. De stijghoogte kan analytisch bepaald worden aan de hand van analytische modellen, zoals de 'blanket

equations', beschreven in (U.S. Army Corps of Engineers, 2000), of kan bepaald worden met numerieke grondwaterstromingsmodellen. De in deze verkenning uitgevoerde analyses laten een goede overeenstemming zien tussen de blanket equations en numerieke modellen.

De aanwezigheid van een teensloot, die niet in analytische modellen, maar wel in numerieke modellen kan worden meegenomen, kan een gunstig effect hebben op de dissipatie van water naar het maaiveld. Vooral bij zeer doorlatende deklaagen (>1 m/dag) in combinatie met diepe sloten, die een groot deel van de deklaag doorsnijden, kan het effect significant zijn (tot ca. 25% verlaging van de stijghoogte).

Berekeningen met D-Geo Flow tonen aan dat effect van een doorlatende deklaag in het achterland op het kritiek verval voor terugschrijdende erosie beperkt is (ordegrootte 1-10%), maar wel gunstig. Er zijn in de uitgevoerde D-Geo Flow berekeningen geen geometrieën/configuraties gevonden waarbij terugschrijdende erosie kon worden uitgesloten.

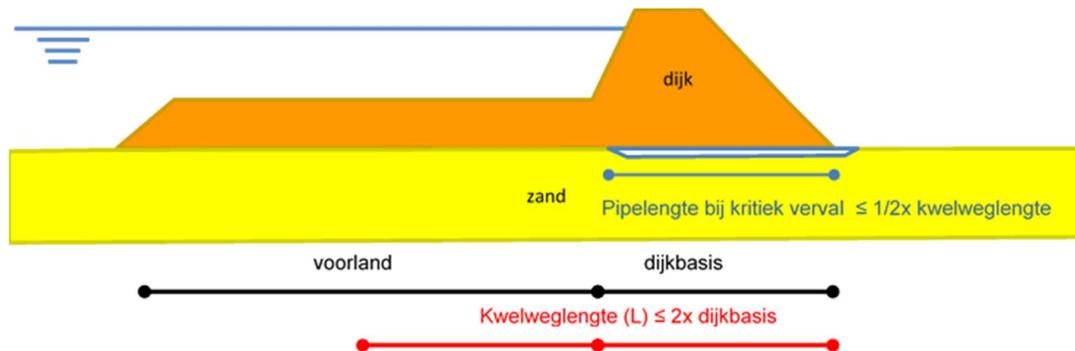
Tot slot volgt uit de inventarisatie dat een doorlatende deklaag afhankelijk is van de minst doorlatende (sub)laag in de deklaag en de dikte van de deklaag. De doorlatendheid van een deklaag is niet eenvoudig te achterhalen, maar er zijn voldoende (gangbare) technieken beschikbaar om de doorlatendheid van de deklaag met bepaalde mate van nauwkeurigheid te bepalen om deze mee te kunnen nemen in de pipinganalyse, zoals de HPT+MPT sondering of het plaatsen van peilbuizen. Peilbuismetingen lijken voorlopig het meest geschikt, omdat deze effecten van de weerstand van de hele deklaag meten (dikte en doorlatendheid), in plaats van dikte of doorlatendheid op één plek. Een nadeel bij peilbuismetingen is wel dat er mogelijk een hoogwatergolf nodig is, om te komen tot relevante metingen.

Op basis van een inventarisatie bij verschillende waterschappen is bekeken of er situaties zijn waarbij een doorlatende of gefragmenteerde deklaag aanwezig is, waarbij de regel van Sellmeijer niet toepasbaar is. Hierbij is slechts een situatie gevonden die niet onder de beoordelingsmethodiek voor piping zou vallen: de situatie met een zandige doorlatende deklaag, waarbij de teen onder het maaiveldniveau ligt. In deze situatie moet het zand in de deklaag fluïdiseren voordat er horizontale pipe-vorming kan plaatsvinden. De aanwezigheid van een doorlatende deklaag biedt in geen van de aangereikte cases reden voor directe uitsluiting van piping.

De doorlatendheid van de deklaag heeft in de huidige beoordelingsmethodiek dus vooral gunstig effect op de deelmechanismen opbarsten en heave. De kennis is aanwezig om deze winst te verzilveren, maar kan nog beter toegankelijk worden gemaakt in bijvoorbeeld de Schematiseringshandleiding piping. Wel zal het nodig zijn om lokaal data te verzamelen met betrekking tot de doorlatendheid van de deklaag.

2.3.2 Voorland

In de huidige beoordelingsmethodiek kan voorland al worden meegenomen door de effectieve voorlandlengte te berekenen op basis van de leklengte van het voorland en de lengte van het aanwezige voorland. Het mee te nemen voorland in de beoordeling van het toetsspoor piping voor het deelmechanisme terugschrijdende erosie wordt nu gemaximeerd tot 1 keer de dijkbasis. De dijkbasis is daarbij gedefinieerd als de afstand tussen de buitenteen en het opbarstpunt. Deze eis is gebaseerd op de verwachting dat de pipe-groei bij het kritieke verval maximaal de helft is van de kwelweglengte, om te voorkomen dat de pipe in de deklaag van het voorland "doorbreekt" (kortsluiting maakt met het buitenwater) (zie Figuur 2.8). Daarnaast zijn naar verwachting de analytische vergelijkingen voor de effectieve voorlandlengte niet meer geldig wanneer de pipe onder het voorland groeit.



Figuur 2.8: Dwarsdoorsnede van een dijk in de situatie van een (breed) voorland voor terugschrijdende erosie. Omdat de pipelengte bij kritiek verval maximaal de helft van de kweweglengte kan zijn en de pipe niet onder het voorland mag doorlopen, wordt de kweweglengte gelimiteerd tot 2 keer de dijkbasis (Lam, 2019b).

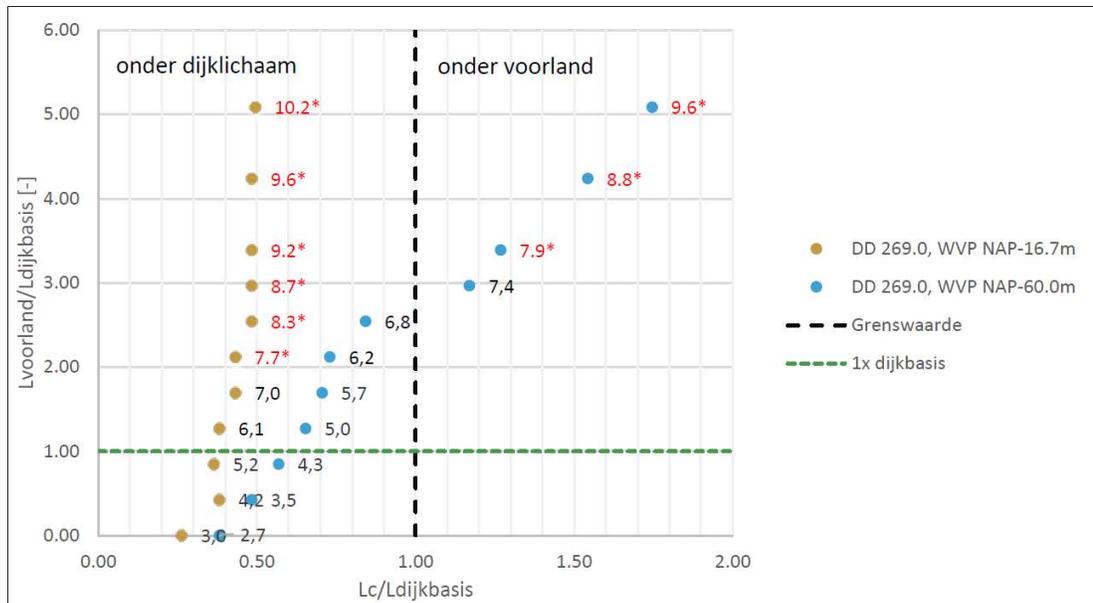
Voor (smalle) dijken met (zeer) brede voorlanden zorgt bij het toetsen op het deelmechanisme terugschrijdende erosie het meenemen van maximaal 1 keer de dijkbasis ervoor dat een groot deel van het aanwezige voorland niet wordt benut. Het onderzoek van 2019 heeft zich daarom met name gericht op het voorland met als doel:

- Het oprekken van het mee te nemen voorlanddeel bij de kweweglengte. (Deze verkenning is in combinatie uitgevoerd met Fugro en het gezamenlijke onderzoek vanuit de Versterking Waaldijk Wolfereen-Sprok (WOS) naar de rol van het voorland bij piping.)
- Het meenemen van de geohydrologische effecten van het aanwezige voorland.

Met behulp van D-Geo Flow berekeningen (meer details in (Vollering and Stoop, 2019)) kan de kritieke pipe-lengte worden bepaald. Hierbij wordt opgemerkt dat het pipingmodel nog niet gevalideerd is voor de bepaling van de pipe-lengte. De situatie waarbij de pipe onder het voorland uitkomt is ook niet eerder in proeven gesimuleerd. Voordat een oprekking van het mee te nemen voorland toegestaan wordt, zouden deze aspecten nog nader uitgezocht moeten worden. Uit de analyses kan geconcludeerd worden dat het maximeren van het mee te nemen voorlanddeel op 1 keer de dijkbasis veilig is, maar in veel gevallen ook zeer conservatief. Ter illustratie zijn in Figuur 2.9 de berekeningsresultaten gepresenteerd waarbij is af te lezen dat de kritieke pipelengte (L_c) onder de dijkbasis blijft bij voorlandlengtes tot bijna 3 keer de dijkbasis. Voor het gepresenteerde profiel met een (relatief) dun watervoerend pakket (DD269.0, WVP NAP-16.7 m) blijft de berekende kritieke pipelengte onder de dijkbasis voor alle uitgevoerde berekeningen met voorlandlengtes tot wel 5 keer de dijkbasis.

Ter vergelijking met de huidige toetsing op het deelmechanisme terugschrijdende erosie waarbij het voorland wordt gemaximeerd tot 1 keer de dijkbasis, betekent dit dat in Figuur 2.9 alleen de punten onder de groene horizontale lijn in de huidige toetsing meegenomen kunnen worden. Alle punten (met bijbehorende weergegeven kritieke vervallen) boven de groene lijn is "winst" als de maximering van het voorland wordt opgerekt.

Bij alle punten links van de zwarte verticale lijn is de kritieke pipelengte kleiner dan de dijkbasis. Bij de punten rechts van de zwarte lijn is de kritieke pipelengte langer dan de dijkbasis. Dit betekent dat de pipe onder de dijkbasis doorgroeit in het voorland, waarbij kortsluiting van de pipe door de deklaag een risico kan vormen. Er zijn geen punten onder de groene horizontale lijn (maximering in de huidige toetsing) die rechts van de zwarte lijn bevinden, waaruit volgt dat de maximering van het mee te nemen voorland op 1 keer de dijkbasis een veilige grens is voor de beschouwde situaties.



Figuur 2.9 Kritieke pipe-lengtes op basis van D-Geo Flow berekeningen voor 1 profiel (DD 269.0) en 2 watervoerende pakketdiktes (dun: 25 m - WVP NAP -16.7m, dik: 65 m -WVP NAP -60.0m), waarbij de aanwezige voorlandlengte (Lvoorland) is uitgezet tegen de kritieke pipelengte behorende bij het kritiek verval (Lc). Beide variabelen zijn weergegeven ten opzichte van de dijkbasis. De getallen bij de punten betreffen het kritieke verval. Rode getallen met een asterisk betreffen kritieke vervallen die in de betreffende profielen hoger zijn dan de aanwezige kruinhoogte (Lam, 2019b)

Uit de verkenning kan geconcludeerd worden dat het mogelijk is om de bestaande eis met betrekking tot het mee te nemen voorlanddeel kan worden opgerekt. Door het uitvoeren van een D-Geo Flow berekening zou het mogelijk zijn om voorlanddelen breder dan 1 keer de dijkbasis mee te nemen bij het bepalen van het kritiek verval voor het deelmechanisme terugschrijdende erosie.

In de verkenning is het (voorsnog) niet gelukt om een kwantitatieve relatie te leggen tussen de kritieke pipelengte en de eigenschappen van de geometrie, de deklaag in het voorland en het watervoerende pakket. Uit de verkenning is wel gebleken dat een relatief dun watervoerend pakket of een doorlatende/ontbrekende deklaag in het achterland leidt tot relatief beperkte pipelengtes. Dit zijn dan ook de situaties (uiteraard in combinatie met een breed voorland) waarbij de meeste winst valt te behalen bij het oprekken van het mee te nemen voorlanddeel.

Geadviseerd wordt om ook bij het uitvoeren van een onderbouwende berekening in D-Geo Flow (voorsnog¹) geen pipegroei onder het voorland toe te staan. Om beheerredenen is het lastig om te waarborgen dat er geen zwakke plekken zijn in het voorland waardoor een pipe kan "doorbreken"/"doorgroeien" in de deklaag. Daarnaast is de berekende situatie waarbij een pipe onder de deklaag in het voorland een evenwichtssituatie vormt niet met pipingproeven gevalideerd. Mocht er in de D-Geo Flow berekening de kritieke pipelengte tot onder het voorland doorgroeien, dan wordt er geadviseerd om voor het kritieke verval het verval te kiezen waarbij de pipelengte kleiner is dan de dijkbasis.

¹ In de huidige overstromingskansbenadering kunnen scenario's worden meegenomen. Gezien de kans niet groot is dat er precies bij de buitenteen een zwakke plek zit, biedt dit wellicht mogelijkheden voor nader onderzoek, bijvoorbeeld bij het onderzoek naar faalpaden voor piping.

De met D-Geo Flow berekende kritieke pipelengtes zijn niet gevalideerd met resultaten uit pipingproeven. Aanbevolen wordt om de hiermee berekende kritieke pipelengtes op zijn minst te valideren met het beperkte aantal reeds uitgevoerde pipingproeven. De verwachting is dat in de praktijk de kritieke pipelengte een bepaalde onzekerheid kent. Door validatie met reeds uitgevoerde pipingproeven kan op korte termijn inzicht worden verkregen in de onzekerheid van de berekende kritieke pipelengtes en hoe hiermee om te gaan in de beoordeling.

Omdat D-Geo Flow berekeningen niet in de gedetailleerde toets kunnen worden uitgevoerd en meer inspanning vragen dan het gebruik van de rekenregel, is bekeken of er op een andere manier rekening gehouden kan worden met het voorland, waarbij van het feit wordt uitgegaan dat een kortsluiting in het voorland nauwelijks invloed heeft op het kritieke verval. In (Lam, 2020) wordt een methode gepresenteerd om het genegeerde deel van de effectieve leklengte als een stukje hydraulische weerstand mee te nemen. Een vergelijking tussen de methode en vergelijkbare D-Geo Flow berekeningen geeft aan dat de benadering conservatief is, maar wel winst biedt ten opzichte van de huidige aanpak. In deze benadering wordt verondersteld dat de kritieke pipelengte niet wordt beïnvloed door de aanwezigheid van het voorland. Voor dit aspect is nog nadere validatie nodig.

2.4 Observaties

Observaties van piping, van opgetreden zandmeevoerende wellen en analyses van door piping gefaalde dijken, zijn belangrijk voor het beter kunnen begrijpen van het mechanisme en laten zien welke situaties gevoelig of juist niet gevoelig zijn voor dit fenomeen. Daarom zijn observaties een belangrijk onderdeel van dit onderzoek en leveren een bijdrage aan het beter aansluiten van de beoordeling op de praktijk.

Er zijn drie onderzoeken uitgevoerd waarin observaties zijn benut ten behoeve van het betere begrip van piping:

- Een review van case studies (Wiersma, 2018)
- Onderzoek naar het optreden van zandmeevoerende wellen in West-Nederland (Hijma en Oost, 2019)
- Uitgraving van wellen bij de Willemspolder (van den Ham, 2019)

De onderstaande tekst is een samenvatting van deze onderzoeken en bevat citaten uit deze documenten.

2.4.1 Een review van case studies

Piping is een belangrijk faalmechanisme dat speelt bij dijken, maar in de praktijk zijn er niet veel faalgevallen bekend. Relatief recente faalgevallen ("smoking guns") kunnen veel informatie verschaffen van de werking van piping in de praktijk. Zo kunnen geologische situaties die gevoelig zijn voor piping worden geïdentificeerd, en kunnen de (bijna) faalgevallen worden gebruikt om voorspelmodellen te valideren.

Voor een aantal case studies uit het verleden ("cold cases") kan op basis van ooggetuigenverslagen worden geconstateerd dat piping de waarschijnlijke oorzaak is geweest voor het falen van de desbetreffende dijk, omdat er zandmeevoerende wellen zijn geobserveerd. Het nadeel van deze historische dijkdoorbraken is dat de beschikbare data met betrekking tot de condities die geleid hebben tot falen, zoals waterniveaus, ondergrondprofielen, exacte locaties en maatregelen, beperkt zijn. Daarom is de studie gericht op recente dijkdoorbraken ("smoking guns"), waarvoor het beter mogelijk is om de exacte condities te reconstrueren. In het buitenland hebben recentelijk een aantal dijkdoorbraken plaatsgevonden.

De algemene onderzoeksvragen voor deze studie zijn:

- Wat kunnen we leren van recente dijkdoorbraken?
- Wat is de sequentie van gebeurtenissen voorafgaand aan de doorbraak?
- Wat zijn de overeenkomsten in de geologische setting?
- Kunnen we het falen verklaren aan de hand van de geologische setting of menselijk ingrijpen?
- Kunnen modellen deze faalgevallen verklaren, en kunnen deze modellen eventueel worden verbeterd aan de hand van deze faalgevallen?

De studie heeft zich als eerste stap vooral gericht op het verzamelen van (documentatie van) potentiële cases en de daarbij horende observaties.

De literatuurstudie en bezoeken aan de instituten AiPo en USACE hebben geresulteerd in een samenvatting van een groot aantal dijkdoorbraken, een aantal "near-failures" en grote zandmeevoerende wellen in de VS, Italië, China, Hongarije en Nieuw-Zeeland. Het aantal gevallen dat direct aan piping kan worden gelinkt is betrekkelijk klein en dat lijkt in tegenspraak met het idee dat terugschrijdende erosie een belangrijk faalmechanisme is.

- Mogelijk zijn noodmaatregelen effectief geweest.
- Mogelijk zijn andere faalmechanismen eerder opgetreden (zoals overtopping).
- Mogelijk zijn door beperkte documentatie of taalbarrières zijn veel gevallen niet gedocumenteerd of beschikbaar.

Een lijst van case studies waarin (bijna) falen is opgetreden als gevolg van piping is weergegeven in Tabel 2.1. Deze case studies zijn mogelijk geschikt voor het vergelijken met piping modellen. Voor elke case is een rating gegeven, gebaseerd op de beschikbare documentatie, waaruit blijkt dat de cases Kaskasia, Bois Brulee, Greenville, Trotters Bend en A.V. Watkins Dam uit de V.S. en de cases Colorno and Boretto uit Italië het meest geschikt zijn voor dit doel.

Amerikaanse studies hebben al sinds begin vorige eeuw benadrukt dat de geologische setting beïnvloedt waar zandmeevoerende wellen voorkomen. Kleipluggen zorgen ervoor dat grondwater op wordt gestuwd en concentreert naar het oppervlak, waardoor wellen eerder zullen optreden. Op deze locaties is deklaag ook relatief dun. In Nederland zullen dit soort situaties ook voorkomen, met name wanneer de dijk gelegen is op oude zandbanen (meanders). Zandmeevoerende wellen komen zowel voor in de riviervlaktes als deltas van de Po en de Mississippi, terwijl dit verschillende geologische milieus zijn. De riviervlakte draineert het grondwater, wat kan resulteren in droogvallende deklagen, terwijl in de delta het water infiltreert vanuit de rivier, resulterend in verzadigde lagen. Dit kan tot een ander gedrag leiden, wanneer er hoogwater optreedt. In Nederland komen beide situaties voor, wat het belang van differentiatie benadrukt.

Tabel 2.1 Samenvatting van geïdentificeerde cases van dijkdoorbraken of "near failures" veroorzaakt door piping

Case history	Country	River	Year	Failure / near failure / sand boils	BEP	Geology	Water levels	Sequence of events
A.V. Watkins Dam	USA, Utah	Reservoir	2006	Near failure	++	++	++	++
Linda Levee	USA, California	Yuba River	1986	Failure	?	+	+	+
Trotters Bend (Mile 55)	USA (Mississippi)	Mississippi	1937	Near failure	++	++	+	+
Greenville	USA (Mississippi)	Mississippi	1937	Near failure	++	++	+	+
Buck Chute	USA (Mississippi)	Mississippi	2011	Sand boils	+	++	++	++
Tara's wildlife lodge	USA (Mississippi)	Mississippi	2011	Sand boils	+	++	++	++
Bois Brulee	USA, (Missouri)	Mississippi	1993	Failure	++	+	+	+
Kaskasia	USA (Illinois)	Mississippi	1993	Failure	++	++	+	+
Mezzani	Italy	Po River	1951	Failure	+	+	++	+
Colorno	Italy	Po River	1951	Failure	++	+	++	+
Boretto	Italy	Po River	1951, 1994, 2000	Sand boils	+	+	++	++
Paizhou levee	China	Yangtze River	1998	Failure	++	+	+	+
Menxi Levee	China	Hudu River	1998	Failure	++	+	+	+
Kettős-Körös river	Hungary	Kettős-Körös river	1980	Failure	?	+	+	+
Edgecumbe	New Zealand	Rangitaiki	2004	Failure	+	+	+	+

De observaties tonen aan dat er verschil kan zijn in de tijd tot bezwijken. In Hongarije wordt onderscheid gemaakt tussen twee typen piping ((Tóth, 2004): langzame piping en snelle piping. De variant snelle piping komt overeen met een aantal ooggetuigenverslagen, zoals die van de cases uit Nieuw-Zeeland, de 'liquefactie' bij de Linda Levee in Californie en een aantal 'blow outs' in de V.S.. De geologische omstandigheden die voor 'snelle piping' zorgen zouden nader onderzocht moeten worden.

De snelheid tot falen is af te leiden uit de (beperkt beschikbare) ooggetuigenverslagen en varieert tussen minuten (Hongarije), een aantal uur (Nieuw-Zeeland), een aantal dagen (Paizou Levee, China) tot ongeveer een maand (Menxi Levee, China). In een aantal gevallen waren maatregelen niet voldoende om het proces tot stilstand te brengen. Alle verslagen laten zien dat, zodra een fontein van modderig water wordt geobserveerd, het slechts minuten duurt tot falen op gaat optreden (zie ook Figuur 2.10), wat ook overeenkomt met de observaties bij de IJkdijkproeven (van Beek et al., 2011).



Figuur 2.10 Tevergeefse poging om de zandmeevoerende wel bij Kaskaskia Island op te kisten: de dijk bezweek enkele minuten later (Navin, 2016)

De nog benodigde vervolgstappen zijn het samenvatten van de relevante parameters en toepassen van de beschikbare pipingmodellen om vast te kunnen stellen in hoeverre de verschillende modellen daadwerkelijk functioneren. Een samenwerking met de betreffende instituten is hierbij zinvol. In 2019 is deze stap niet opgepakt, omdat het voorspellen van piping in praktijkcases veel inzicht vergt in de invloed van de lokale omstandigheden. Inmiddels is er meer onderzoek beschikbaar naar de invloed van 3D effecten, heterogeniteit en fijne fractie op het pipingproces, waardoor een vergelijking nu beter zou kunnen worden uitgevoerd.

2.4.2 Verklaring voor zandmeevoerende wellen in West-Nederland

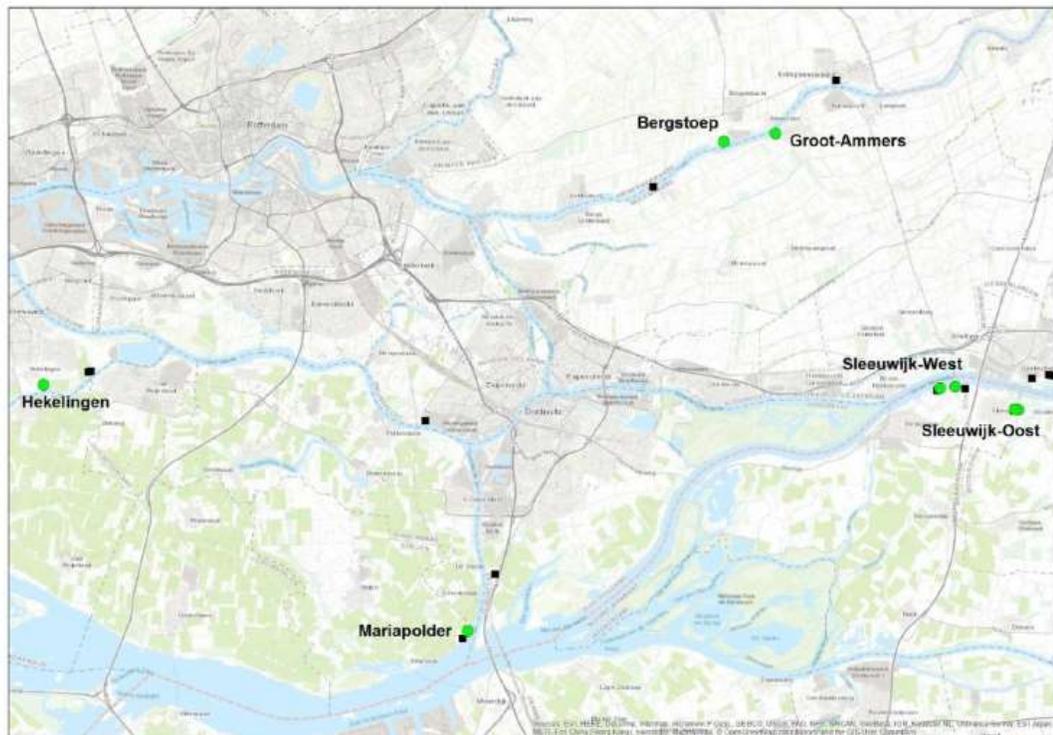
In het benedenrivierengebied, ruwweg ten westen van de lijn Montfoort-Gorinchem, worden opvallend weinig zandmeevoerende wellen waargenomen. Er zijn verschillende factoren die hierbij een rol kunnen spelen, bijvoorbeeld:

- De aanwezigheid van een dikkere, maar wellicht ook anders opgebouwde deklaag (meer veen in het westen);
- Smallere zandige stroomgordels ingebed in dikke klei en veen pakketten waar de dijk op is gebouwd
- Minder elkaar snijdende en smallere zandbanen, maar ook minder zandbanen die in contact staan met diepere zandlagen;
- De invloed van een andere korrelgrootteverdeling (fijner, meer silt, meer klei) ten opzichte van bovenstroomse gebieden (hierdoor ook meer intredeweerstand).

De bijbehorende vraag , “Waarom zijn er weinig zandmeevoerende wellen in West-

Nederland waargenomen?” is belangrijk, omdat de oorzaak zou kunnen bijdragen aan het optimaliseren van de beoordeling van piping.

Deze vraag is onderzocht door het uitvoeren van veldonderzoek bij 7 zandmeevoerende wellen in het westen van Nederland en numerieke simulaties voor de locaties in D-Geo Flow. Hiertoe is met een viertal waterschappen contact gelegd. In het gebied van drie waterschappen is veldwerk uitgevoerd bij locaties waar zandmeevoerende wellen zijn opgetreden (Schieland en Krimpenerwaard, Hollandse Delta en Rivierenland). In het gebied van Scheldestromen is vooralsnog geen veldwerk uitgevoerd, maar dat zou nog wel mogelijk kunnen zijn in een vervolgtraject.



Figuur 2.11 De locaties van de zandmeevoerende wellen waar veldwerk uitgevoerd is (groene cirkels). De zwarte vierkantjes tonen de zandmeevoerende wellen zoals momenteel geregistreerd in de landelijke database. Enkele daarvan zijn niet bekend bij de waterschappen (Hijma, 2019), (Hijma, M., Oost, 2019)(Hijma, M., Oost, 2019)(Hijma, M., Oost, 2019).

Aan de hand van deze studie kan de vraag “Waarom zijn er weinig zandmeevoerende wellen in West-Nederland waargenomen?” nog niet volledig beantwoord worden, maar er zijn wel een aantal belangrijke aspecten naar voren gekomen:

- Langs rivieren zoals de Lek, waar het zandlichaam ingebed ligt in dikke klei-/veenlagen, leidt een snelle polderwaartse overgang van zand naar klei/veen (kleiplug) tot sneller opbarsten en wellicht de vorming van een kleine zandvulkaan. Het heeft echter weinig invloed op de kans op piping. Langs de Lek worden inderdaad veel wellen gerapporteerd, maar zeer weinig zandmeevoerende wellen.
- De invloed van kortsluiting tussen het Holocene en Pleistocene zand kan behoorlijk groot zijn: pipevorming begint na opbarsting bij 30-50% lagere vervallen. Vooralsnog lijken alle zandmeevoerende wellen voor te komen op locaties waar er kortsluiting is. Het is niet voor alle

locaties zeker, maar bij sommige locaties zijn er sterke aanwijzingen dat de kortsluiting alleen in de omgeving van de zandmeevoerende wel aanwezig is.

- Daarnaast kan het weinig voorkomen van zandmeevoerende wellen in West-Nederland niet los gezien worden van de invloed van getijdenafzettingen. De quick scan naar getijdenafzettingen (Hijma & Oost, 2018; Hijma, 2019) laat zien dat deze afzettingen minder pipinggevoelig zijn.

Bovenstaande drie factoren kunnen prima onderzocht worden in het veld en kunnen dus eventueel in een later stadium nog eenvoudig meegenomen worden in een beoordeling. Daarnaast zou het goed zijn om aan de volgende aspecten aandacht te besteden in de schematiseringshandleiding:

- Het wel/niet gefundeerd zijn van Holocene zandlichamen zit in principe al verwerkt in de lokale SOS-scenario's. Wel kan meer de nadruk gelegd worden op het uitsluiten/aantonen van kortsluiting. Uit andere studies volgt wel dat het versimpelen van de ondergrond tot één zandlaag leidt tot veel hogere faalkansen, dan als de zandlagen apart beschouwd worden binnen bijvoorbeeld D-Geo Flow. Meerlaags-rekenen wordt daarom aanbevolen en zou meegenomen kunnen worden in het WBI en het ontwerpinstrumentarium. Bij het meerlaags-rekenen zal het wel/niet gefundeerd zijn van lagen van grotere invloed zijn.
- Snelle polderwaartse overgangen van zand naar klei/veen worden momenteel niet meegenomen binnen WBI. In principe zal dit de kans op opbarsten vergroten, maar de kans op piping niet.
- In het rapport van 2018 is gesteld dat de invloed van een fijne fractie in de rivierafzettingen op dit moment nog niet meegenomen kan worden binnen WBI-SOS: binnen de rivierafzettingen wordt namelijk hierin geen onderscheid gemaakt. Voor getijdenafzettingen wordt hierboven voorgesteld om de Hc met 15% te verhogen per procentpunt slib. Het valt te verwachten dat een aanwezige slibfractie ook in rivierafzettingen leidt tot extra sterkte. Dit is echter nog niet onderzocht, maar zou onderdeel van discussie moeten zijn met RWS-WVL en het regieteam rond het KvK-programma.

2.4.3 Uitgraven van wellen bij de Willemspolder

In November 2018 was de waterstand in de rivieren zeer laag. Dit laagwater gaf de mogelijkheid om eerder gevormde wellen in de Willemspolder (nabij IJzendoorn) uit te graven en om het voorland te onderzoeken. Het onderzoek is uitgevoerd in samenwerking met Waterschap Rivierenland. Het doel van dit onderzoek was tweeledig:

1. Vaststellen of eerder gevormde pipes blijven bestaan
2. Vaststellen of er weerstand is in de toplaag van de zandwinput in het voorland, verbonden aan de Waal.

Van januari tot juni 2016 werd er een veldtest uitgevoerd op de locatie van de Willemspolder. Het doel van deze veldtest was om de effectiviteit van een verticaal zanddicht geotextiel (VZG) te testen. Ook was er over een gedeelte van het traject een grofzandbarrière (GZB) aangelegd. Zowel het VZG als de GZB waren hiertoe juist achter de zomerkade aangelegd. Een systeem van kopsloten achter de zomerkade moest het pipingproces bevorderen (Figuur 2.12). In de periode januari tot juni 2016 waren er verschillende hoogwaters, hoog genoeg om zandmeevoerende wellen te veroorzaken en laag genoeg om onder het niveau van de zomerkade te blijven.

Er ontstonden verschillende wellen, waarvan een aantal grote wellen bij de sloten langs het GZB (sloten 7, 8 en 9), waarvoor de kwelweg ca. 65 m bedroeg en het verval ca. 2,5 m. De wel in sloot 7 werd tijdens het laagwater uitgegraven. Tijdens het laagwater was het waterniveau in de Waal ongeveer NAP+2,4 m, ongeveer 2 m onder de slootbodem.

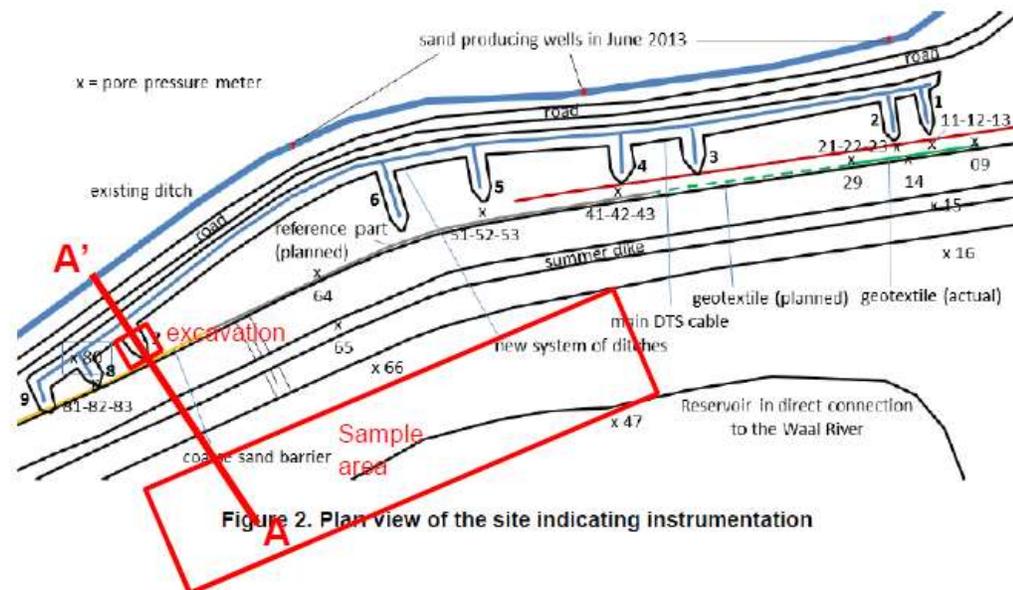


Figure 2. Plan view of the site indicating instrumentation

Figuur 2.12 Top view van de Willemspolder met daarin de 9 sloten, de locatie van het GZB en VZG, en het onderzochte gebied tijdens laagwater (van den Ham, 2019).

Bij het uitgraven van de wel zijn pipes teruggevonden die van de wel naar de GZB liepen. Het contact met de barrière kon niet goed worden vastgesteld. Opvallende bevindingen hierbij waren:

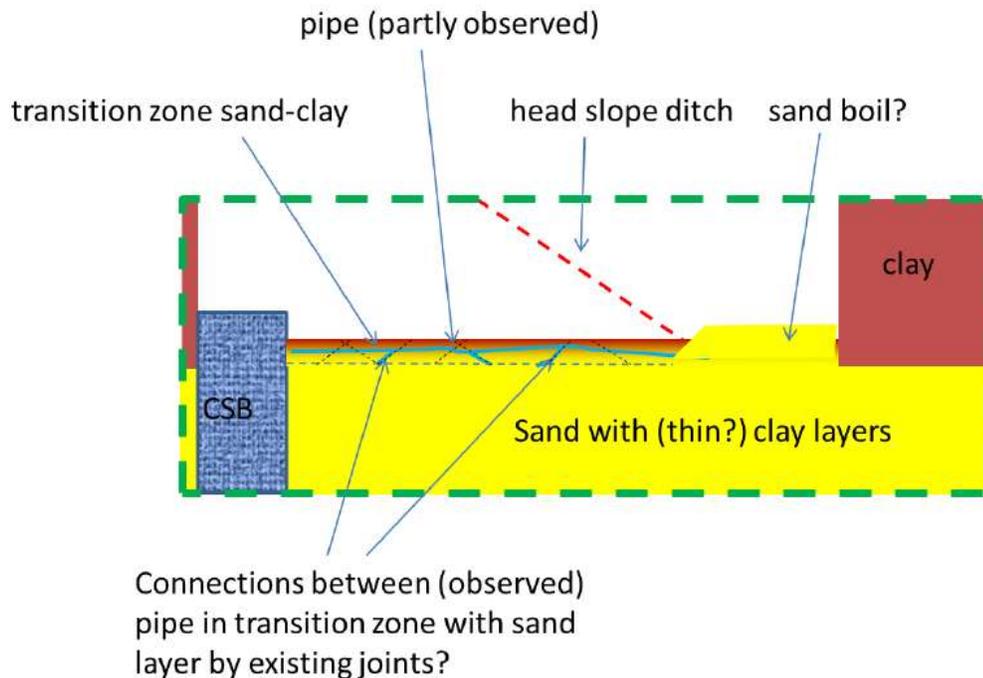
- De pipe leek zich te bevinden in de onderkant van de deklaag, niet in de top van het zandige watervoerende pakket
- De pipe was niet duidelijk in verbinding met de zandlaag, maar leek zich te bevinden in een overgangszone tussen zand en klei. De omgeving waarin de pipe zich bevond was zachter dan de omringende overgangszone.
- Er was weinig tot geen zand in de toplaag aanwezig.
- De pipe leek te zijn beïnvloed door scheuren in de toplaag.

De weerstand van het voorland is in kaart gebracht door monsters van de bovenste decimeters met plastic buisjes te steken. De monsters zijn geclassificeerd en er zijn zeefanalyses uitgevoerd. De data is niet geïnterpreteerd.

Uit het onderzoek kan geconcludeerd worden dat het vooralsnog mogelijk is dat pipes over een langere periode blijven bestaan (in dit geval ruim 2 jaar). Het onderzoek roept ook verschillende vragen op:

- Ontstaan pipes in een overgangslaag of is dit een uitzondering gerelateerd aan deze locatie (GZB) en wat betekent dit voor de modellering?
- Zijn er ook pipes ontstaan in het zand en zijn deze mogelijk weer verdwenen?

Voordat conclusies kunnen worden getrokken voor de praktijk is het nodig om meer locaties te onderzoeken, mogelijk ook na een kortere periode of juist een langere periode vanaf het laatste hoogwater.



Figuur 2.13 Schets van dwarsdoorsnede uitgraving (van den Ham, 2019)

2.5 Heave en 0.3D-regel

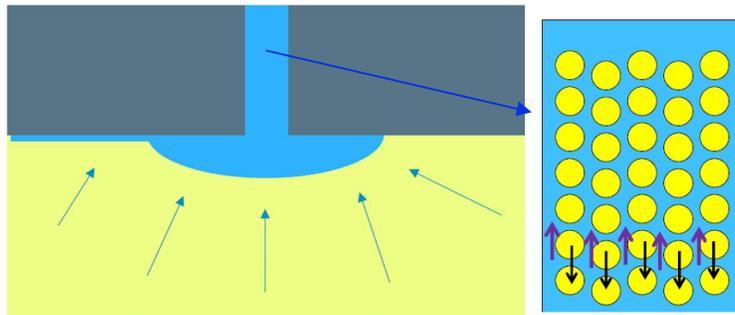
Bij de beoordeling van het faalmechanisme piping wordt getoetst op de deelmechanismen opbarsten, heave en terugschrijdende erosie. Het deelmechanisme heave en de 0.3D-regel, welke toegepast wordt bij de toetsing op terugschrijdende erosie, vertonen gelijkenissen, omdat beide uitgaan van het transport van korrels door het opbarstkanaal. Voor het mechanisme heave wordt verondersteld dat er een drukval over de deklaag aanwezig moet zijn om de korrels naar het oppervlak te kunnen brengen. Bij de toetsing voor terugschrijdende erosie mag het aanwezige verval gereduceerd worden met de drukval in het opbarstkanaal (0.3D-regel). Voor beide mechanismen wordt een gradiënt van 0.3 als kritieke/maatgevende waarde aangehouden. Op basis van de theorie spelen echter verschillende parameters een rol voor deze gradiënt. Het beperkte aantal veldmetingen dat beschikbaar is laat een variatie van waarden zien voor de gradiënt.

Het korreltransport is daarom voor beide toepassingen onderzocht in (van den Ham, 2018). De onderstaande tekst is een samenvatting ervan en bevat (vertaalde) citaten uit dit rapport.

De oorspronkelijke doelstelling van het project was om meer metingen van de drukval in het opbarstkanaal uit te voeren en om de uitvoering van deze metingen te optimaliseren. In de loop van het project bleek echter dat het niet haalbaar was om deze metingen uit te voeren. Een studie naar mogelijke optimalisering van de uitvoering van de metingen bleek op dit moment daarom niet mogelijk: meer geavanceerde methoden zijn ofwel niet beschikbaar, te duur om te ontwikkelen of ongeschikt voor gebruik in een opbarstkanaal.

Daarom is het doel van het onderzoek verschoven naar het beschouwen van de gevoeligheid van parameters die de gradiënt in het opbarstkanaal bepalen aan de hand van beschikbare modellen. Een

literatuurstudie bevestigt de eerdere bevindingen van (Koelewijn, 2009) dat de basis van de 0.3D regel zwak is, gebaseerd op de laagste gradiënt gemeten in kolomproeven. Deze laagste gradiënt reflecteert echter het moment waarop de proeven zijn stopgezet en zeggen dus niets over een kritieke waarde. De (vergelijkbare) modellen van (Bezuijen, 2015) en (B.A. Robbins et al., 2019b) veronderstellen dat de drukval in de pipe wordt bepaald door de concentratie van deeltjes in het opbarstkanaal. Om deze deeltjes in evenwicht te houden is een kritieke snelheid benodigd, gebaseerd op de Wet van Stokes. De parameters die op basis van deze theorie de drukval in het opbarstkanaal beïnvloeden zijn de stroomsnelheid door het opbarstkanaal en de korreldiameter. Theoretisch gezien kan de gradiënt variëren tussen vrijwel 0 en 1.



Figuur 2.14 Schematisatie van het opbarstkanaal

De stroomsnelheid door het opbarstkanaal is moeilijk te bepalen. Deze snelheid is afhankelijk van:

- De afmeting van het opbarstkanaal
- Het debiet uit het watervoerend pakket, wat wederom afhankelijk is van:
 - De grootte van de erosielen / lengte en weerstand van de pipe
 - De doorlatendheid en dikte van het pakket
 - De weerstand van het achterland
 - Het verval over de kering

Het onderzoek heeft zich met name gericht op de 0.3D regel, maar heeft daarmee ook effect op het deelmechanisme heave. Beide onderwerpen zijn daarom hier besproken.

2.5.1 Heave

Het deelmechanisme heave is opgezet voor situaties met een lichte deklaag. Deze situaties hebben een hoge kans op opbarsten, maar vervolgens moet de gradiënt over de deklaag ook voldoende zijn om de korrels naar het oppervlak te kunnen brengen. In eerste instantie werd hiervoor een kritieke gradiënt gehanteerd van 0.5, maar dit is later gewijzigd naar 0.3, om beter aan te sluiten bij de 0.3D regel.

Kijkend naar het literatuuronderzoek is de manier waarop het heave mechanisme wordt getoetst opmerkelijk. Uit de voorgaande tekst blijkt al dat er geen gronden zijn om de gradiënt van 0.3 aan te houden. Daar komt bij dat bij de heave toets wordt uitgegaan van de stijghoogte *voorafgaand* aan opbarsten. Het is duidelijk dat de stijghoogte direct verandert nadat opbarsten is opgetreden: deze wordt lager. In de toets op terugschrijdende erosie wordt bovendien al rekening gehouden met de drukval in het opbarstkanaal, waardoor er een dubbeling ontstaat. Hierdoor is de manier waarop nu rekening gehouden wordt met heave niet zinvol.

Het zou mogelijk zijn dat zo er weinig toestroming naar het opbarstpunt is voorafgaand aan pipevorming, dat de snelheid nooit zo groot kan worden dat er korrels naar het maaiveld worden afgevoerd.

Dit is in de huidige studie niet onderzocht. Een mogelijk onderzoek zou zich kunnen richten op de mogelijkheid van het geleidelijk afvoeren van korrels, naarmate de erosielens groter wordt. Ook dan is echter de grootte van het opbarstkanaal alleen een aanname.

2.5.2 De 0.3D-regel

Voor de 0.3D-regel zijn berekeningen gemaakt met D-Geo Flow (2D) en DgFlow (3D). Het doel van deze berekeningen was om vast te stellen:

- Wat de interactie is tussen de drukval in het opbarstkanaal en eigenschappen van de aquifer
- Hoe de drukval in het opbarstkanaal kan veranderen ten gevolge van verval over de kering en toename van de pipelengte
- Wat het verschil is tussen een 2D en 3D benadering.

Uit de 2D berekeningen volgt dat de drukval in het opbarstkanaal toeneemt met:

- toename van korreldiameter
- afname van de diameter van het opbarstkanaal
- toename van stroming naar het achterland (afname van leklengte)

Een toename van het verval resulteert in een grotere pipe-lengte. De bijbehorende toename in debiet zorgt voor een afname van de drukval in de pipe.

In de 3D berekeningen concentreert de waterstroming sterker naar één punt. Hierdoor is de drukval in het opbarstkanaal lager dan in een 2D berekening, vooral bij lange leklengtes.

Uit de berekeningen wordt geconcludeerd dat de drukval geen constante kan zijn. De drukval wordt beïnvloed door de eigenschappen van het watervoerend pakket, de korreldiameter, de leklengte, het verval en de mate van pipe-vorming. Daarmee is de drukval in het opbarstkanaal niet alleen niet constant voor een specifieke locatie, maar ook niet in de tijd.

Omdat de drukval afneemt naarmate de pipe langer wordt, is het de vraag of er een pipe kan ontstaan na erosielensvorming. Idealiter zou er daarom een gekoppelde analyse uitgevoerd moeten worden, waarin zowel de drukval in de pipe als de pipe-ontwikkeling wordt meegenomen. Dit zou gevalideerd kunnen worden aan de hand van enkele lab-proeven, waarin een grotere deklaag wordt gesimuleerd dan in de beschikbare proeven. Een andere aanbeveling is om gereed te staan voor metingen in het veld, zodra deze situatie zich voordoet.

2.6 Heterogeniteit

Vanwege de hoge faalkansen die met het Sellmeijer model berekend worden, worden er vragen gesteld bij de toepasbaarheid van het model, hetgeen uitgaat van en gevalideerd is voor een homogene ondergrond. In werkelijkheid is de ondergrond niet homogeen, maar treedt variatie van korrelgrootte en doorlatendheid op verschillende schalen op. Het beeld bestaat dat als gevolg van de aanname van een homogene ondergrond de berekende faalkansen te conservatief zijn.

De heterogeniteit van de ondergrond uit zich in variaties in korrelgrootte, doorlatendheid of dikte van deklaag en watervoerend zandpakket. Vanuit de praktijk is er de nadrukkelijke wens om de beoordeling beter te laten aansluiten op de praktijk. Het in rekening brengen van heterogeniteit vormt hier een belangrijk onderdeel in. Dit is echter niet eenvoudig te realiseren, en het is de vraag of dit überhaupt haalbaar is, en zo ja, of het ook een gerechtvaardigde investering is.

In 2018 is daarom een visiedocument geschreven om de mogelijkheden en uitdagingen rondom de invloed van heterogeniteit op piping inzichtelijk te maken en zo een goede afweging te kunnen maken over hoe verder te gaan met heterogeniteit (van Beek and Wiersma, 2018). Hiertoe is de haalbaarheid van het in rekening brengen van heterogeniteit (onderverdeeld in de volgende onderwerpen: 1. Variatie doorlatendheid en d70 in de baan van de pipe, 2. Gradatie, 3. Onregelmatigheden in de deklaag, 4. Variatie in doorlatendheid, 5. Architectuur zandlichaam en opbouw ondergrond) in de beoordelingsmethodiek beschreven aan de hand van benodigde activiteiten voor karakterisering/meten in het veld, modellering en de relevantie voor de praktijk.

Uit deze visie volgt dat de onderwerpen die al eerder geselecteerd waren, anisotropie en getijdenafzettingen, nog steeds aspecten zijn die veel invloed op het kritieke verval hebben en die kunnen leiden tot een verbeterd toetsoordeel. Daarnaast werd aanbevolen verkenningen uit te voeren voor micro-meso schaal heterogeniteit in de baan van de pipe en variatie van de onderkant van de deklaag, welke beide naar verwachting tot een gunstiger oordeel zullen leiden.

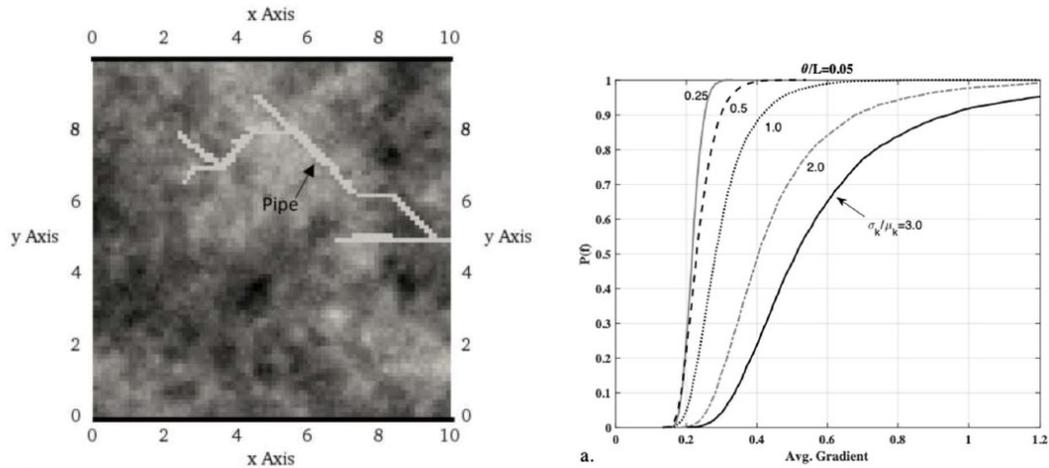
In 2019 zijn deze twee verkenningen uitgevoerd (Kanning et al., 2019b) en (van Beek et al., 2019). De onderstaande tekst is een samenvatting ervan en bevat citaten uit deze documenten.

2.6.1 Micro-meso schaalvariatie in de baan van de pipe

Het meenemen van micro-meso schaalvariatie in de baan van de pipe is complex: de parameters (correlatielengtes en variaties) zijn moeilijk te bepalen en de beschikbare pipingtool (DgFlow) is nog niet gereed om analyses uit te kunnen voeren met variaties in de baan van de pipe. Omdat het de verwachting is dat variatie in de baan van de pipe een belangrijke invloedsfactor vormt is een verkenning uitgevoerd om te beoordelen of het zinvol zou zijn dit nader te onderzoeken.

Hiervoor zijn berekeningen benut die uitgevoerd zijn door USACE. Het model dat voor de berekeningen gebruikt is, is beschreven in Robbins en Griffith (2018a, 2018b), hierna verder genoemd het USACE model. Dit model is gebaseerd op primaire erosie, waarin de optredende lokale gradiënt aan de kop van de pipe wordt berekend en vergeleken met een vooraf gedefinieerde kritieke gradiënt. Als de optredende gradiënt groter is dan de kritieke gradiënt, groeit de pipe. Op deze manier kan een heel pipe pad worden doorlopen om zo de het verval (en daarmee de globale gradiënt) te kunnen bepalen waarbij een doorgaande pipe gaat optreden, zie Figuur 2.15. Dit is gebaseerd op een eindige elementen grondwatersom. De erosie in de pipe wordt ook gemodelleerd om de drukval in de pipe te bepalen (secondaire erosie). Het model is nog in ontwikkeling en nog niet gevalideerd.

Dit model is toegepast in Robbins en Griffith (2019) op een tweedimensionaal bovenaanzicht van een zandpakket. Ruimtelijke variaties in doorlatendheid zijn vervolgens gemodelleerd met zogenaamde random field analyses. Dit zijn analyses waarbij duizenden willekeurige realisaties van het zandpakket worden gemaakt waarbij van tevoren de ruimtelijke samenhang (correlatielengte) en spreiding (standaardafwijking) worden opgegeven. Per realisatie wordt de globale kritiek gradiënt (i_{cr}) bepaald: het kritieke verval, gedeeld door de kwelweglengte. Aangezien elke realisatie anders is (ze hebben uiteindelijk wel allemaal dezelfde statistische eigenschappen), komt er ook een andere i_{cr} uit de verschillende realisaties. Door dit honderden keren te herhalen krijg je dus uiteindelijk een verdeling van i_{cr} gegeven een bepaalde opgegeven correlatielengte en standaardafwijking. Deze cumulatieve verdelingsfunctie (CDF; ook wel fragility curve genoemd) van i_{cr} is de basis van de analyses in dit rapport, zie ook Figuur 2.15 voor een voorbeeld. De CDF is gegeven in Robbins en Griffith (2019) voor verschillende standaardafwijkingen en correlatielengtes van de doorlatendheid.



Figuur 2.15 Bovenaanzicht van een pipe die door een zand met random field doorlatendheid ontwikkeld (links) en voorbeelden van CDFs voor een correlatielengte/kwelweglengte van 0.05 (B.A. Robbins et al., 2019a)

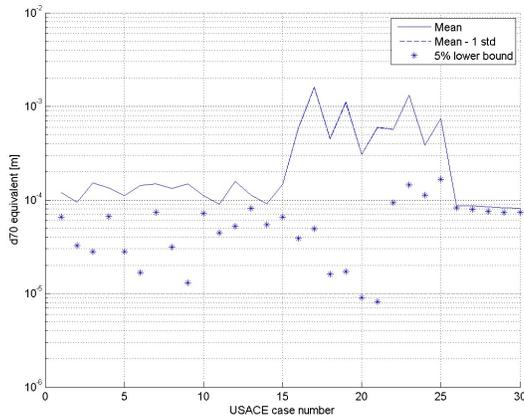
De CDFs zijn niet direct toepasbaar in de praktijk maar geven wel een indicatie van het effect van micro-schaalvariatie op het kritieke verval. De kleine-schaal variaties kunnen niet worden meegenomen in het Sellmeijer model. Om de mogelijke impact te verkennen van variatie van lokale eigenschappen op basis van het USACE model, worden de volgende twee stappen doorlopen:

1. De berekende CDF van de i_{cr} van het USACE model wordt omgerekend naar een equivalente d_{70} in het Sellmeijer model. Er wordt een verdeling door deze d_{70} gefit, zodanig dat de staart (van belang voor betrouwbaarheidsanalyse) goed wordt weergegeven. Ook wordt een CDF bepaald van een geval zonder ruimtelijke variabiliteit (maar met een standaardafwijking op de doorlatendheid) ter referentie.

2. De equivalente d_{70} verdeling wordt vervolgens toegepast in een betrouwbaarheidsanalyse van twee case studies, een representatieve zee- en meerdijk.

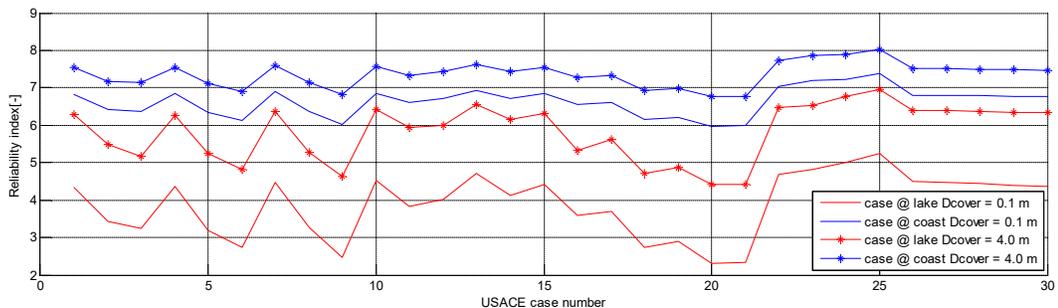
Dit wordt gedaan voor verschillende correlatielengtes en standaardafwijkingen, resulterend in totaal 25 cases met variaties in random field eigenschappen en 5 cases met homogene eigenschappen ter vergelijking.

De karakteristieke waarde, de 5% ondergrenswaarde, van de equivalente d_{70} staat weergegeven in Figuur 2.16, samen met het gemiddelde van de gefitte verdeling (het gemiddelde is minder van belang). Wat duidelijk opvalt is de relatief grote spreiding in de karakteristieke waarde van de equivalente d_{70} , tot wel een factor 20. Wat verder opvalt is dat de karakteristieke waarde van de equivalente d_{70} van de heterogene cases (1-25) in de meeste gevallen lager ligt dan de karakteristieke waarde van de homogene cases (26-30), maar ook in enkele gevallen hoger. Dit komt door 2 tegengestelde effecten in de random field analyses. Aan de ene kant zorgt het zoeken naar steeds de zwakste schakel tot een zwak pad. Aan de andere kant moet de pipe ook vaak sterke zones door. Welke van de 2 effecten dominant is bepaalt of de karakteristieke waarde hoger of lager is dan het homogene geval; in de meeste gevallen is het eerste effect dus dominant.



Figuur 2.16 gemiddelde (mean) en karakteristieke waarde (5% lower bound) van de equivalente d70 verdeling.

Het effect van een equivalente d70 op de betrouwbaarheid van twee representatieve cases is weergegeven in Figuur 2.17. Hierin is te zien dat voor sommige gevallen de invloed op de betrouwbaarheid beperkt is (case 10 t/m 15 vs. case 26 t/m 30). Echter, voor de case met een wat grotere correlatiecoëfficiënt (bv. case 16 t/m 26), kan het verschil significant worden, met een afwijking tot 2 in betrouwbaarheidsindex. We zien ook dat de betrouwbaarheidsindex voor de 'coast' case iets minder gevoelig is voor variaties van de d70aangezien voor kustgevallen de belangrijkste variabele de waterstand is en variaties in d70 dus minder effect hebben op de betrouwbaarheid.. De betrouwbaarheid kan zowel toenemen als afnemen ten opzichte van het homogene geval. In geval van een equivalente d70 verdeling met een relatief hoog gemiddelde en lage standaardafwijking (bijvoorbeeld bij relatief kleine correlatielengtes met als gevolg dat er altijd een sterke zone wordt doorkruist door het piping kanaal) neemt de betrouwbaarheid toe. In geval van een lager gemiddelde en/of hogere standaardafwijking (bijvoorbeeld bij grotere correlatielengtes en een hiermee grotere kans op een zwakke baan) neemt de betrouwbaarheid af.



Figuur 2.17 Betrouwbaarheid (reliability index) voor de verschillende USACE cases, toegepast op 2 case studies (lake en coast)

De resultaten geven op dit moment niet direct aanleiding om de Nederlandse beoordeling met Sellmeijer te herzien. Enerzijds omdat voor veel gevallen de impact beperkt is, anderzijds omdat de vergelijking tussen het Sellmeijer model en het gebruikte primaire erosiemodel niet zomaar mogelijk is; ook is het USACE model nog niet voldoende gevalideerd.

Wel geeft het USACE model een goede eerste indruk van de mogelijke invloed van variaties in doorlatendheid op kleine schaal. Het wordt daarom aanbevolen om geïnformeerd te blijven van de

ontwikkelingen bij het USACE model; vooral als hierin naast doorlatendheid ook korrelgrootte gevarieerd wordt, waardoor de invloed van heterogeniteit naar verwachting groter wordt.

2.6.2 Variatie onderkant deklaag

De pipe ontwikkelt zich rond het grensvlak tussen de deklaag en de onderliggende zandlaag. In de huidige beoordelingsmethodiek wordt verondersteld dat dit grensvlak glad is en horizontaal ligt, waarbij de pipe dus ook een horizontaal pad volgt. In de praktijk zal de interface tussen deklaag en bovenkant zandpakket niet vlak zijn: er is variatie op kleine schaal (ordegrootte centimeters, hier aangeduid met 'microhobbels' en variatie op grotere schaal (ordegrootte meters tot tientallen meters).

Een helling kan de pipe-ontwikkeling zowel bevorderen als tegenwerken: worden de korrels tegen de zwaartekracht in afgevoerd, dan wordt de pipe-ontwikkeling gehinderd, worden de korrels met de zwaartekracht mee afgevoerd, dan wordt de pipe-ontwikkeling bevorderd. Deze invloed geldt zowel voor de korrels bovenstrooms van de pipe, als die in de pipe. Experimenten met een niet horizontaal pipe pad (Van Essen et al., 2014) tonen aan dat het kritiek verval hoger is wanneer de korrels tegen de zwaartekracht in moeten worden afgevoerd.

Kleine onregelmatigheden aan de onderkant van de deklaag, die vrijwel altijd aanwezig zijn, bieden een interessante kans om het pipingoordeel te verbeteren. Deze kleine onregelmatigheden bieden juist in afzettingen waarvoor andere vormen van heterogeniteit minder aanwezig zijn, zoals eolische afzettingen, een kans om het model beter te laten aansluiten bij de praktijk. Maar ook in rivierafzettingen komen dit soort variaties zeker voor, waardoor het totale areaal groot is.



Figuur 2.18 Top van de beddingafzettingen in de uiterwaarden bij Afferden. De basis van de deklaag is zeer variabel, en in de beddingafzettingen zijn kleilaagjes aanwezig van 1 en 5 cm dik (van Beek and Wiersma, 2018)

In deze verkenning is onderzocht wat de variatie van de onderkant van de deklaag is voor dekzand en wat het effect hiervan is op het kritiek verval. De meso-schaalvariatie van de top van dekzand is onderzocht aan de hand van boringen en profielen waar het dekzand aan het oppervlak komt. Op basis van de boringen wordt gevonden dat de steilste helling gemiddeld 0.007 m/m is. Deze waarde onderschat de lokale variatie over een kleinere afstand. Op basis van de profielen worden hellingen gevonden die oplopen tot 0.05. Deze waarde is gebaseerd op dekzandruggen die nu aan het oppervlak

liggen. Het is mogelijk dat de hellingen zoals deze onder een dijk aanwezig zijn lager zijn. Voor deze gevoeligheidsstudie is daarom gekozen voor hellingen van 0.007, 0.025 en 0.05 m/m die over de hele kwelweglengte aanwezig zijn. Voor micro-schaalvariatie zijn er geen kwantitatieve waarden gevonden voor de helling. Toch is er altijd wel variatie aanwezig. Op basis van expert judgement en foto's uit proefsleuven zijn daarom waarden gekozen voor variatie die redelijkerwijs te verwachten is: hellingen van 0.1, 0.2 en 0.3, afwisselend positief en negatief over een afstand van 10 cm (zaagtand).

Het effect van deze meso-schaal en micro-schaal (zaagtand) variatie van de onderkant van de deklaag is onderzocht met behulp van DgFlow. Het effect van meso-schaalvariatie is door de lage hellingen beperkt: het effect is tussen de -6 en +6% ten opzichte van een situatie zonder helling. Het effect van meso-schaalvariatie kan met de Sellmeijer regel voorspeld worden, door te rekenen met een aangepaste beddinghoek. Voor micro-schaalvariatie is het effect op het kritiek verval altijd positief, maar blijft beperkt tot een maximum van +7% bij de geëvalueerde hellingen. Wanneer zowel meso- als micro-schaal variatie wordt meegenomen ligt het effect op het kritiek verval tussen -6% en +12%. Aanbevolen wordt om te beschouwen waarom het effect van micro-schaalvariatie zo klein is, door een vergelijking met MSEEP berekeningen en proeven.

De validatie van het aangepaste criterium is zeer beperkt: er zijn in het verleden slechts enkele kleine-schaalproeven uitgevoerd, die niet exact zijn gereproduceerd. Voorafgaand aan praktijktoepassing is het noodzakelijk de validatiestudie uit te breiden.

2.7 Piping in 3D

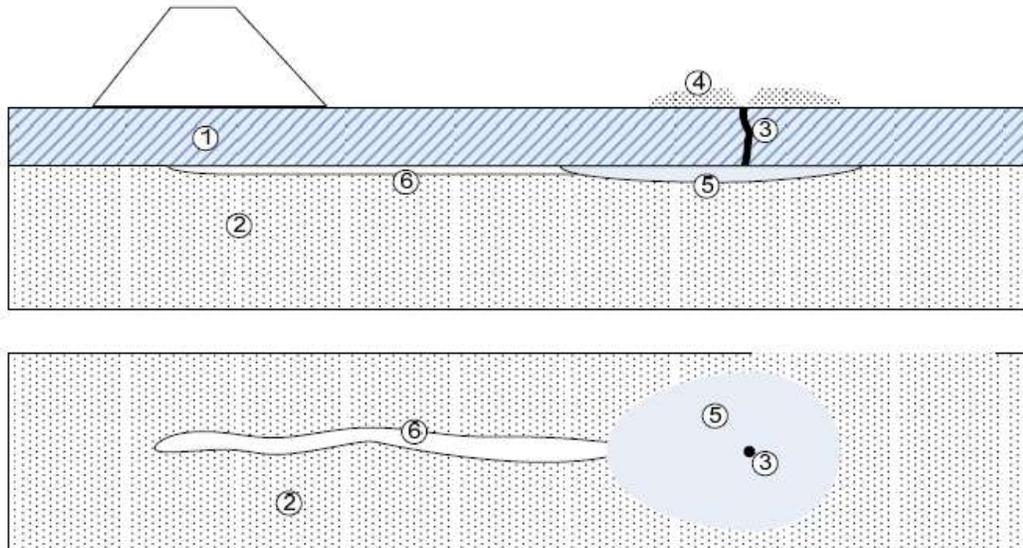
Het Sellmeijer model in D-Geo Flow en de rekenregel van Sellmeijer zijn gebaseerd op een 2D situatie: de grondwaterstroming is twee-dimensionaal en de pipe wordt oneindig breed verondersteld, uitstromend in een teensloot die over de gehele breedte in contact met het zandpakket staat. In werkelijkheid is de situatie 3D en kan niet altijd met een 2D model gesimuleerd worden: water stroomt toe vanuit het watervoerend pakket, zich in veel gevallen concentrerend richting een zwak punt in de deklaag.

Over wat de 2D-aanname betekent voor de praktijk is de laatste jaren veel discussie ontstaan. Laboratorium-proeven tonen aan dat het kritiek verval afneemt wanneer de stroming concentreert naar een puntvormige uitstroom, in plaats van een sloot of een vlak ((Allan, 2018), (Van Beek et al., 2015), (De Wit, 1984)). (Vandenboer et al., 2015) toonde met experimenten aan dat het kritiek verval afneemt, naarmate er meer toestroming vanaf de zijkanten mogelijk is, door de breedte van het zandpakket te variëren. Dit zou betekenen dat de huidige aanpak voor situaties met 3D stroming onveilig is. In (Burger et al., 2018) is echter op basis van numerieke grondwaterstromingsberekeningen met puntvormige uitstroom in 2D en 3D geconcludeerd dat de huidige 2D aanname leidt tot een overschatting van het pipingrisico.

Deze discussie vormde de basis voor twee deelprojecten. In 2018 heeft professor John Rice van Utah State University, internationaal specialist op het gebied van opbarsten en piping, een advies uitgebracht ten aanzien van dit onderwerp (Rice, 2018). In 2019 is door Acacia Water en Deltares een gezamenlijk onderzoek uitgevoerd naar de invloed van de geohydrologische situatie in 3D op lensvorming (De la Loma et al., 2019). De onderstaande tekst is een samenvatting ervan en bevat citaten uit deze documenten.

2.7.1 Advies John Rice

Prof. Rice geeft aan dat de stromingssituatie verandert door de opeenvolging van gebeurtenissen leidend tot falen als gevolg van piping. De stromingssituatie is afhankelijk van een aantal factoren, welke geïllustreerd zijn in Figuur 2.19.



Figuur 2.19 Zij- en bovenaanzicht van de componenten die effect hebben op piping: 1. Weerstand deklaag, 2. Toestroom water door watervoerend pakket, 3. De afmetingen van het opbarstkanaal, 4. De grootte van de zandmeevoerende wel, 5. De vorm en afmeting van de erosielen, en 6. Pipe(s) (Rice, 2018)

De vorming van een lens, en vervolgens een pipe en wordt beïnvloed door de drukval in het opbarstkanaal. In de sequentie van gebeurtenissen zijn een aantal aspecten niet goed begrepen:

- Wat is de vorm van de erosielen?
- Wanneer ontstaan er pipes uit de erosielen?
- Hoe relateert de grootte van de uitstroom aan de grootte van het uitstroompunt?
- Wanneer groeit een pipe door?
 - In geval van een 3D omgeving met uitstroom door een lens
 - In geval van een 3D omgeving met uitstroom door een sloot
 - In geval van een 3D omgeving met uitstroom door een lens en een gedeeltelijk doorlatende deklaag
- Wat is het effect van anisotropie op bovenstaande vragen?

2.7.2 Invloed van geohydrologische situatie bij 3D uitstroom

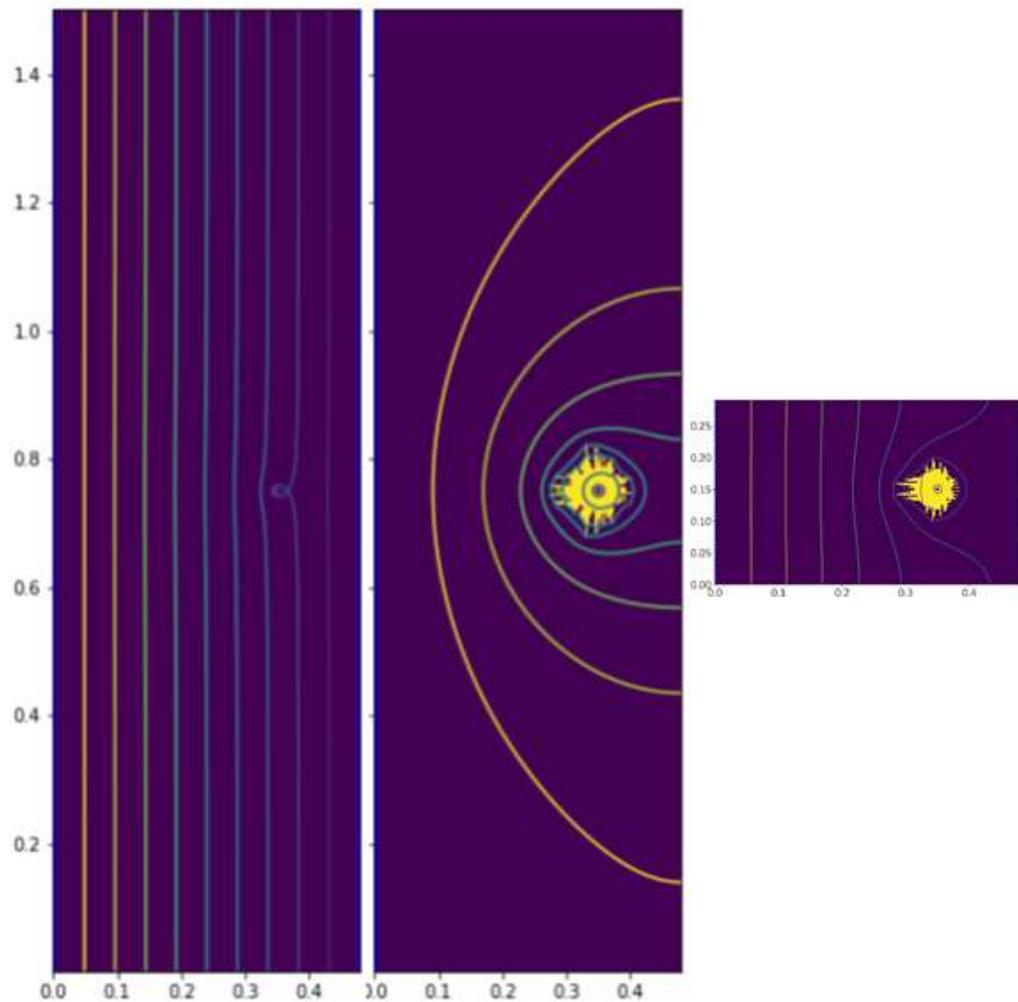
In navolging van het onderzoek van Acacia Water (Burger et al., 2018) en het advies van John Rice hierover is binnen een samenwerking van Deltares en Acacia Water onderzocht wat het effect is van de geohydrologische situatie op lensvorming bij een 3D uitstroom (De la Loma et al., 2019). Het onderzoek heeft zich beperkt tot lensvorming, omdat pipe-vorming in 3D nog in ontwikkeling is en niet in alle grondwaterstromingssoftware mogelijk is.

In het onderzoek zijn berekeningen gemaakt in ModFlow en DgFlow (zonder pipe-vorming) waarbij bekeken is hoe groot een erosielen zou kunnen worden in verschillende situaties. Er zijn berekeningen uitgevoerd om een lab-proef te simuleren, waarna een veldsituatie is gemodelleerd. Aan de hand van de grootte van de gevormde lens en het debiet kon het effect van de 3D stroming worden ingeschat. Uit de resultaten volgt:

- dat het vergroten van de breedte van het model leidt tot een toename van de grootte van erosielen ten opzichte van de labproeven, hierbij ontwikkeld het model zich vooral meer in de breedte en maar in

zeer beperkte mate extra in stroomopwaartse richting. Dit sluit aan bij de bevindingen van (Vandenboer et al., 2015) en het 3D-aspect is daarmee als relevant bevonden.

- dat een (te) korte lengte van het model (en daarmee simulatie van afvoer van water door het achterland) leidt tot afwijkende resultaten. De keuze van de randvoorwaarde op de achterrand dicteert de uitkomst van het numerieke model, en een andere randvoorwaarde resulteert in een andere isohypsenverdeling en daardoor tot een andere vorm van de erosielens. Als de werkelijkheid verkeerd wordt geschematiseerd door de keuze van de randvoorwaarde, is de berekende uitkomst ook verkeerd.
- dat de deklaagweerstand invloed heeft op de vorming van de erosielenzen; een lagere deklaagweerstand leidt tot een lagere initiële stijghoogte ter plaatse van de wel (voorafgaand aan de aanwezigheid van een uitstroompunt) en meer afstroming via het achterland. Een lagere deklaagweerstand (kleinere lek lengte) heeft een kleiner erosievolume tot gevolg. Figuur 2.20 laat zien dat naarmate er meer afstroom naar het achterland is, de stromingssituatie meer 2D wordt.
- dat de gekozen randvoorwaarde in het computermodel bepalend is voor de uitkomst. Een andere randvoorwaarde op de achterrand (bijvoorbeeld gesloten of een vaste stijghoogte), leidt tot totaal andere resultaten (zie Figuur 2.20).



Figuur 2.20 Simulatie van erosielensvorming in de lab-proef, in ModFlow. Voor de twee linker figuren is de breedte van het zandmonster vergroot, links is de achterrand open, midden en rechts gesloten (De la Loma et al., 2019).

Tevens is een doorkijk gegeven wat deze bevindingen nu voor de praktijk betekenen. Hiervoor moet eerst gekeken worden naar de huidige aanpak: het model van Sellmeijer in D-Geo Flow is 2D, zowel qua grondwaterstroming als qua pipe-stroming. De deklaag is gesloten in de rekenregel, maar uit D-Geo Flow berekeningen met doorlatende deklaag blijkt dat de weerstand van de deklaag een beperkt effect heeft op het kritiek verval. Dit is goed verklaarbaar, want doordat de pipe over de hele breedte aanwezig is, draineert deze de grondwaterstroming al dusdanig dat de afstroming naar het achterland er niet zoveel meer toe doet. Door de aanwezigheid van de 2D pipe wordt dus een situatie met zeer korte leklengte gecreëerd.

Deze studie illustreert dat de invloed van de geohydrologische situatie op het pipingproces heel anders zal zijn in een 3D situatie, waarin het water naar enkele pipes stroomt en er dus veel minder drainage capaciteit aanwezig is dan in een 2D model met oneindig brede pipes. Het achterland heeft in een 3D situatie dus meer invloed.

Dit ontkracht eerdere conclusies uit de literatuur (Allan, 2018 de Wit, 1984; van Beek et al., 2015) echter niet dat het kritieke verval voor een situatie met een puntvormige uitstroom lager is dan voor een 2D uitstroom (bijv. een sloot, waar het Sellmeijer model op gebaseerd is). De factor 2 die gevonden wordt in Van Beek et al. (2015) is echter gebaseerd op een situatie met gesloten achterland. In dat opzicht zijn de proeven met gat-uitstroom in het lab conservatief ten opzichte van de 3D praktijk, waar die afstroming wel aanwezig is. Hierdoor kan het verschil tussen een labproef met 2D uitstroom (vrije uitstroom naar sloot of vlak) en een labproef met 3D uitstroom (geconcentreerde uitstroom naar 1 punt) groter zijn dan in de praktijk, waar de afstroom naar het maaiveld voor een 'semi-3D' situatie zorgt.

Technisch gezien komt de 2D situatie waarmee nu gerekend wordt voor de praktijk enigszins overeen met de 3D situatie waarbij er over de hele breedte vrije stroming naar het maaiveld is, bijv. via een sloot of een doorlatende deklaag. Een 3D situatie is dan ongunstiger omdat er meer concentratie naar de pipe is, wat nog beperkt kan worden door afstroming door de deklaag. In gebieden met een zeer doorlatende deklaag zullen bij een relatief laag waterstandsverschil wellicht geen zandmeevoerende wellen ontstaan. Dit betekent echter niet dat er bij een hoger waterstandsverschil geen opbarsten kan optreden, gevolgd door zandmeevoerende wellen en vervolgens piping, of dat piping bij een (veel) hoger verval zal plaatsvinden dan op basis van het model van Sellmeijer voorspeld wordt: immers, het Sellmeijer model is gebaseerd op 2D situaties met een vrije uitstroom over de hele breedte.

De conclusie is daarom dat de kritieke vervallen voor een labproef met gat als uitstroom weliswaar te conservatief zijn (conservatisme deels verminderd door de beperkte breedte van de bak), omdat er geen stroming naar het achterland is, maar dat de 2D Sellmeijer berekeningen nog altijd onveilig zijn voor situaties met stroming naar 1 punt, omdat er door de 2D-aanname verondersteld wordt dat er zeer veel water kan afstromen over de gehele breedte van het zandpakket. De mate van onveiligheid is groter voor situaties met grote leklengte. In Figuur 2.21 is deze conclusie gevisualiseerd.



Figuur 2.21 Visualisatie van de invloed van de geohydrologische situatie op de vorming van de erosielen, en indirect op het kritiek verval.

Dit betekent dat 3D analyses tot zeer afwijkende beoordelingsresultaten kunnen leiden. Aanbevolen wordt om nader te onderzoeken hoe groot dit effect voor terugschrijdende erosie is.

2.8 Optimalisaties gecombineerd beschouwen

In 2018 en 2019 zijn veel deelaspecten onderzocht met als doel het pipingoordeel te optimaliseren. In de praktijk gaat het echter altijd om een combinatie van effecten. In (Rosenbrand and Wiersma, 2019) zijn de effecten die het piping mechanisme beïnvloeden gecombineerd beschouwd voor realistische situaties. De onderstaande tekst is een samenvatting ervan en bevat citaten uit dit rapport.

Voor dit project zijn 3 cases, representatief voor; het getijdegebied (Spuicase), het boven rivierengebied (Ijsselcase), en het rivierengebied (Riviercase), doorgerekend in 2D modellen in DgFlow. Voor twee cases zijn de schematisaties met de betreffende beheerders (WDOD, WSHD) besproken. De derde case is geschematiseerd op basis van data van HSK door geologen van Deltares. De ondergrondparameters zijn geschat op basis van de beschikbare gegevens en expert judgement.

Effecten die zijn beschouwd zijn:

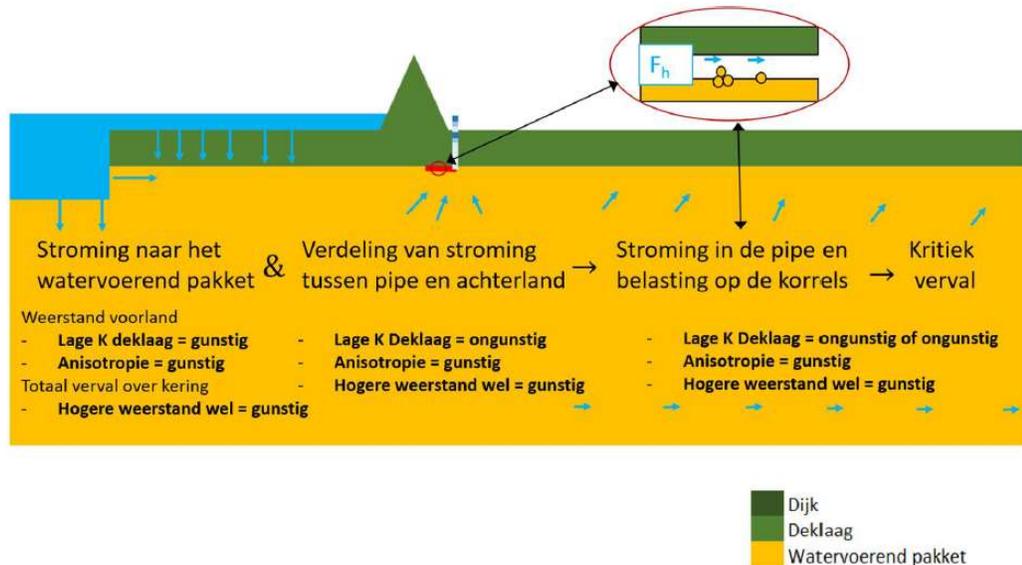
- Anisotropie (3 waarden per case).
- Doorlatendheid deklaag in voor- en achterland (3 waarden per case).
- Weerstand in de wel (3 waarden per case).

Extra sterkte van getijdenzand is niet in DgFlow mee te nemen, maar is wel los behandeld voor de getijdegebied case. De berekeningen zijn uitgevoerd in 2D: het 3D effect zoals beschreven in paragraaf 2.7.2, is nog niet meegenomen in de beschouwing, omdat er nog onvoldoende vertrouwen is in de berekeningsresultaten van DgFlow met piping in 3D. Heterogeniteit in de baan van de pipe (zoals behandeld in paragraaf 2.6) is ook niet meegenomen: voor alle cases geldt dat het kritieke verval een paar procent hoger wordt als de variatie van de onderkant van de deklaag meegenomen wordt². Variatie in korreldiameter en doorlatendheid in de baan van de pipe kunnen nog niet verdisconteerd worden.

Door combinatie van alle effecten zijn 81 berekeningen gedaan (27 per case). Voor de basis schematisatie van iedere case is het kritieke verval eveneens berekend met de rekenregel van Sellmeijer.

Om de resultaten te duiden en voor nieuwe cases te bekijken welke parameters het meest van belang zijn is gekeken naar de effecten op de grondwaterstroming, en daarmee op de krachten in de pipe. Het kritieke verval wordt volgens het model van Sellmeijer bepaald door het krachtenevenwicht op korrels in de pipe, en dus door de stroming in de pipe en de erosieweerstand van het zand. De stroming in de pipe wordt beïnvloed door de *stroming naar het watervoerend pakket*, en de *verdeling van de stroming* in het watervoerend pakket tussen stroming naar de *pipe* en stroming naar het *achterland*. De effecten van anisotropie, deklaag doorlatendheid en weerstand in de wel op het kritieke verval kunnen daarom ook begrepen worden in termen van hun effect op deze twee factoren, zoals hieronder is geschematiseerd. Daarnaast hebben getijdezanden vermoedelijk ook een hogere weerstand tegen erosie dan berekend wordt aan de hand van het Sellmeijer model, en de sterkte hiervan zou dus door het model worden onderschat.

² In een case is er strikt gezien sprake van heterogeniteit in de baan van de pipe doordat er een overgang van één type afzetting naar een ander type afzetting is. Dit had echter geen significant effect omdat de pipe op het kritieke punt ofwel in de ene ofwel in de andere afzetting was maar niet bij het grensvlak.



Figuur 2.22 Illustratie van effecten op de grondwaterstroming, en daarmee op de belasting op de pipe en het kritieke verval (gunstig leidt tot lagere belasting c.q. hoger kritiek verval).

Uit de onderzochte cases volgt dat de bandbreedte van parameters in combinatie met de ondergrondschematisatie beïnvloedt welke factor het meeste effect heeft. De huidige analyse is bedoeld om relatieve effecten te vergelijken voor schematisaties van realistische cases. Daardoor zijn de bandbreedtes van parameters anders voor verschillende cases, wat het vergelijken van effecten soms ook bemoeilijkt.

Voor de hier beschouwde cases leiden de combinatie van een hoge anisotropie factor, een hogere weerstand in de wel en een hoge doorlatendheid van de deklaag tot een hoger kritiek verval voor de twee situaties waar het voorland beperkt (20-25 m lang) is, doordat meer water naar het achterland wegvloeit en daarmee de pipe ontlast. Dat zijn de Spuicase (getijde gebied) en de Riviercase.

In de Spuicase, met een relatief dikke ondoorlatende deklaag, heeft de deklaagdoorlatendheid echter een verwaarloosbaar effect, en zijn anisotropie en de weerstand in de wel het belangrijkste, waarschijnlijk doordat er bij alle berekende varianten weinig water door de deklaag wegstroomt. In de Riviercase is de deklaag doorlatender en dunner en heeft de deklaag doorlatendheid een vergelijkbaar effect met de anisotropie factor en de weerstand in de wel.

Een hoge doorlatendheid van de deklaag is juist ongunstig voor het kritieke verval voor de IJsselcase, met 200 m voorland. Daar is de deklaag doorlatendheid veruit de belangrijkste parameter, en door het effect van de voeding van het watervoerend pakket door het voorland is een lage doorlatendheid van de deklaag het gunstigste.

Factoren zoals anisotropie en het effect van de doorlatendheid van de deklaag kunnen niet of beperkt meegenomen worden met de rekenregel van Sellmeijer. Daarom biedt DgFlow/D-Geo Flow de kans om het kritieke verval voor piping beter te kunnen bepalen. Echter doordat de software nog een prototype is, zijn er ook aandachtspunten bij het in de praktijk brengen van deze optimalisaties.

De componenten die effect hebben op sterkte, zoals de fijne fractie, kunnen onafhankelijk van elkaar in rekening worden gebracht. Componenten die invloed hebben op de belasting (waterstroming door de ondergrond), moeten gecombineerd geanalyseerd worden.

2.9 Synthese

De uitgevoerde onderzoeken geven aan dat het dichterbij de praktijk brengen grote invloed heeft op het pipingoordeel: meestal wordt het oordeel daar gunstiger van, maar soms ook niet. De berekeningen waarin de optimalisaties gecombineerd zijn beschouwd, geven al aan dat het sterk locatie-afhankelijk is hoeveel effect een bepaalde optimalisatie heeft.

In de consequentie-analyse wordt hier in meer detail op ingegaan. In Tabel 2.2 is samengevat hoeveel effect een onderdeel op basis van de huidige kennis heeft op het toetsoordeel. De factor F is de toename in het kritiek verval voor terugschrijdende erosie. Ook is aangegeven wat er nog nodig is om de verbeteringen in de praktijk te brengen. Het effect op het toetsoordeel is uiteraard sterk afhankelijk van de lokale condities: in de tabel wordt een indicatie gegeven op basis van de onderzochte variaties. Voor alle situaties waarbij gekeken wordt naar grondwaterstroming met behulp van D-Geo Flow is doorontwikkeling van de software en ontwikkeling van een veiligheidsfilosofie nodig.

Tabel 2.2 Overzicht van optimalisaties

Onderdeel	Effect op oordeel	Wat is er nog nodig?
Anisotropie	F=1-1.5, afhankelijk van dikte aquifer (5-50) en anisotropie factor (1-10)	<ul style="list-style-type: none"> - Ervaring opdoen in andere trajecten - Rekenwaarden per afzettingmilieu - Verdere validatie HPT-AMPT - Veldproeven
Getijdenafzettingen/fijne fractie	F=1-7, afhankelijk van % <16 µm. Voorstel: nu al 15% sterkte per % <16 µm gebruiken Mogelijk beslisregels voor kleiige getijdenzanden	<ul style="list-style-type: none"> - Veldproeven en medium-schaalproeven nodig voor verdere onderbouwing
Doorlatendheid deklaag achterland (2D)	F=1-1.1 Groot effect op opbarsten	<ul style="list-style-type: none"> - Lokaal bepalen doorlatendheid deklaag - bij zandige deklaag: methodiek opstellen voor meenemen van fluïdisatie deklaag.
Voorland	F=1.1-1.5, potentieel meer	<ul style="list-style-type: none"> - Validatie kritieke pipe-lengte in D-Geo-Flow - Reduceren verval door verrekenen weerstand voorland - Uitsluiten kortsluiting in voorland - Peilbuismetingen
Case studies	n.v.t.	<ul style="list-style-type: none"> - Narekenen met beschikbare modellen - Nader onderzoeken 'snelle piping'
ZMW in W-NL	Kleiplug: effect op opbarsten groot, op Hc klein Kortsluiten Holocene-Pleistoceen: groot effect op Hc Fijne fractie	<ul style="list-style-type: none"> - Meer nadruk uitsluiten/aantonen kortsluiten en meerlaags rekenen - Kleiplug: aanbevelingen in SH - Aftappen van getijdenafzettingenonderzoek - Uitbreiden veldonderzoek naar Zeeland
Uitgraven wellen Heave	n.v.t. Klein: komt niet vaak voor	<ul style="list-style-type: none"> - Andere locaties onderzoeken - Volgen ontwikkelingen 0.3D-regel

0.3D-regel	Groot in gebieden met dikke deklaag: 0D-0.6D	<ul style="list-style-type: none"> - Veldmetingen? - Opnemen in beheer? - Gevoeligheidsstudies i.c.m. scenario's?
Variatie d70 of k in baan pipe	Klein, m.u.v. grote correlatielengtes	<ul style="list-style-type: none"> - Afwachten ontwikkelingen USACE
Variatie micro-schaal deklaag	F=1-1.07	<ul style="list-style-type: none"> - Validatie uitbreiden - Error oplossen DgFlow voor hellende pipes - Vaststellen micro-variantie per afzetting
Variatie meso-schaal deklaag	F= variabel	<ul style="list-style-type: none"> - Validatie uitbreiden - Error oplossen DgFlow voor hellende pipes - Lokale metingen uitvoeren
Piping in 3D	F=0.5-1 Effect groot in gebieden met grote leklengte	<ul style="list-style-type: none"> - 3D analyses terugschrijdende erosie - Vaststellen invloed van 3D grondwaterstroming in verschillende situaties - Veldproeven

3 Consequentie-analyse

In de consequentie-analyse wordt een schatting gemaakt van wat de implicaties zijn van de optimalisaties voor Nederlandse dijken. Dit wordt gedaan aan de hand van het deelmechanisme terugschrijdende erosie. Hoewel er ook onderzoek is uitgevoerd dat effect heeft op opbarsten, is het deelmechanisme terugschrijdende erosie op veel plekken dominant.

Voor de uitgevoerde onderzoeken is geëvalueerd welke parameters van invloed zijn en worden factoren op het kritiek verval afgeleid afhankelijk van de beïnvloedende parameters. Hierbij wordt uitgegaan van verwachte afwijkingen ten opzichte van de regel van Sellmeijer (gedetailleerde toets). Vervolgens is Nederland opgesplitst in deelgebieden aan de hand van de beïnvloedende parameters, zodat voor elk gebied bekeken kan worden wat de (gemiddelde) verwachting is. Tenslotte is voor een deelgebied bekeken wat het effect is op de versterkingsopgave.

3.1 Factoren

Op basis van het uitgevoerde onderzoek in 2018 en 2019 is een lijst van optimalisaties ten opzichte van de huidige rekenregel opgesteld. Deze optimalisaties zijn onder te verdelen in effecten die invloed hebben op de weerstand tegen erosie:

- Fijne fractie
- Helling deklaag
- Heterogeniteit in de baan van de pipe

en effecten die invloed hebben op de belasting op de korrels en gerelateerd zijn aan grondwaterstroming:

- Anisotropie
- Meerlaagsheid
- 3D-effect / Achterland
- Voorland
- 0.3D-regel

In onderstaande tekst wordt ingegaan op deze effecten, en wordt toegelicht hoe deze effecten worden meegenomen in de consequentie-analyse. Voor veel van deze factoren is nog onderzoek nodig voordat de optimalisaties daadwerkelijk toegepast kunnen worden. De consequentie-analyse loopt vooruit op dit uit te voeren onderzoek en past de resultaten op basis van de huidige stand van zaken toe, om een vooruitblik te geven wat de resultaten mogelijk zouden kunnen zijn. Hierbij wordt geen rekening gehouden met conservatisme of veiligheidsfactoren. Voor toepassing in de beoordeling voor de praktijk zal uiteindelijk een benadering gekozen moeten worden die past in de huidige veiligheidsfilosofie. Op dit moment is de kennis daarvoor nog niet gereed.

De factoren zijn gedefinieerd als een toename van het kritiek verval op basis van de rekenregel:

$$F_x = H_{c,x} / H_{c, \text{rekenregel}}$$

Een factor groter dan 1 betekent dus een verhoging van het kritiek verval als effect x wordt meegenomen (gunstig effect). Een factor kleiner dan 1 betekent dat het meenemen van de optimalisatie tot een verlaging van het kritiek verval leidt (ongunstig effect).

3.1.1 Slibfractie

(Hijma, 2019) heeft aangetoond dat de aanwezigheid van een fijne fractie leidt tot een toename van het kritieke verval. Op basis van de uitgevoerde kleine-schaal proeven is vastgesteld dat de correlatie tussen de sterkte-toename en het aandeel van de fijne fractie het meest duidelijk is voor de fractie <16 μm (Figuur 2.7). Omdat de slibfractie vermoedelijk invloed heeft op het losmaken van korrels aan de kop van de pipe, is de verwachting dat deze sterkte-toename ook bij andere schaalgroottes geldig is. Dit dient nog gevalideerd te worden in toekomstig onderzoek.

Een voorlopige veilige relatie is dat het kritiek verval met 15% toeneemt per procenttoename slibfractie. In de consequentie-analyse zou ook een steilere lijn gehanteerd kunnen worden, omdat de gemiddelde sterkte aanzienlijk hoger is dan deze veilige lijn. De fit op basis van de kleinste kwadraten methode wordt echter door één enkel punt omhooggetrokken, waardoor de meeste punten onder de best-fit lijn vallen (Figuur 2.7). Daarom wordt in de consequentie-analyse toch voor de veilige benadering gekozen. De factor voor de slibfractie is daarmee gedefinieerd als:

$$F_{\text{slibfractie}} = 1 + 0.15 \cdot p_{<16\mu\text{m}}$$

3.1.2 Helling deklaag

(van Beek et al., 2019) hebben aangetoond dat de variatie van de onderkant van de deklaag invloed heeft op het kritieke verval. Hierbij is onderscheid gemaakt in variatie op meso-schaal (hellende pipe over de hele dijkbasis) en variatie op micro-schaal (afwisselend positieve en negatieve helling over een afstand van centimeters).

De invloed van de meso-schaal op het kritiek verval kan gunstig en ongunstig zijn, afhankelijk van of de korrels naar boven rollen (gunstig) of naar beneden rollen (ongunstig). Bij kleine hellingen tot 0.05 blijft het effect op het kritiek verval beperkt ($F = 0.94 - 1.06$). Omdat de helling per locatie varieert en het effect op het kritiek verval beperkt is bij kleine hellingen, is de meso-schaal heterogeniteit niet in de consequentie-analyse meegenomen.

De micro-schaal heterogeniteit werkt altijd gunstig op het kritiek verval. Hoewel het effect op basis van de berekeningen vooralsnog gering lijkt (dit moet nog nader gevalideerd worden) is er altijd wel variatie te verwachten. De factor voor een helling van 20% is op basis van het huidige onderzoek 1.05.

$$F_{\text{micro-0.2}} = 1.05$$

De verwachting is dat deze factor ook voor andere configuraties van toepassing is. Dit is echter nog niet gevalideerd.

3.1.3 Heterogeniteit in de baan van de pipe

(Kanning et al., 2019b) hebben onderzocht wat de invloed van variatie van de korreldiameter op de faalkans is. Random field analyses (B.A. Robbins et al., 2019a) illustreren dat het effect van deze variatie in individuele gevallen groot kan zijn. Er is echter voor een bepaalde locatie niet te voorspellen hoe de exacte variatie zal zijn. Door veel situaties te modelleren met random fields kan wel bekeken worden wat het effect op de faalkans is van al deze analyses. Uit het onderzoek van (Kanning et al., 2019b) blijkt dat het effect op de faalkans door het voorkomen van zowel gunstigere als ongunstigere kritieke vervallen zowel positief als negatief kan werken. Het effect kan nog meer uitgesproken zijn wanneer de doorlatendheid en korreldiameter gecombineerd worden, maar dat is in deze verkenning nog niet meegenomen.

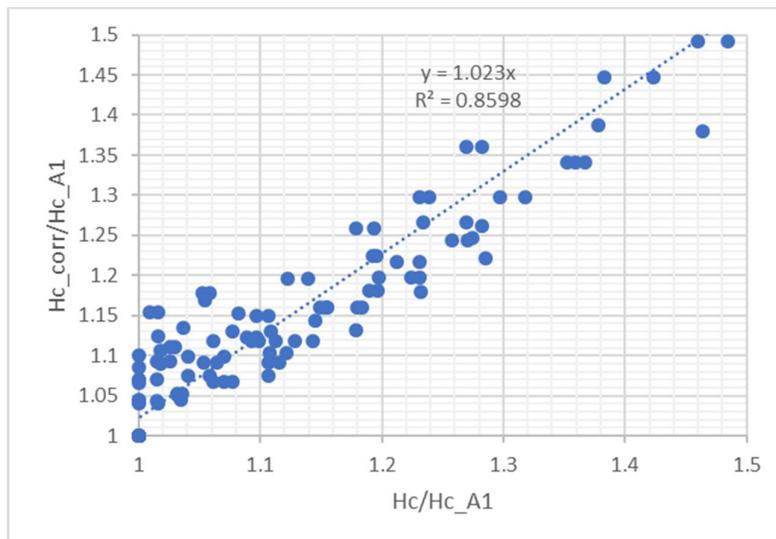
Gezien de onzekerheden in deze verkenning (er is uitgegaan van bestaande analyses met het USACE model, dat nog niet gevalideerd is) en de wisselende impact, is besloten dit effect niet mee te nemen in de consequentie-analyse.

3.1.4 Anisotropie

Het meenemen van anisotropie zorgt voor een hoger kritiek verval (Kanning et al., 2018b). De mate waarin het kritiek verval toeneemt is vooral afhankelijk van de anisotropie factor en de dikte van het watervoerende pakket. Bij dunne zandlagen (<10 m) is het effect van anisotropie klein. Idealiter wordt voor iedere situatie met D-Geo Flow berekend wat het precieze effect van anisotropie is. Voor de consequentie-analyse wordt echter uitgegaan van een benadering.

Nick Stoop van Fugro (2018, persoonlijke communicatie) heeft een vergelijking afgeleid voor het corrigeren van het kritiek verval op basis van anisotropie. Wanneer deze vergelijking wordt toegepast op de beschikbare resultaten uit (Kanning et al., 2018b) is te zien (Figuur 3.1) dat de toename van kritiek verval vrij goed voorspeld wordt, door een correctie uit te voeren op de dikte van het watervoerend pakket in de vergelijking van Sellmeijer op basis van de anisotropiefactor, evenals een factor op de geometriefactor zelf. In deze aangepaste Sellmeijer formule wordt de geometrie factor aangepast. Het zo verkregen gecorrigeerde verval H_c_corr wordt verkregen door de geometrie factor in de oorspronkelijke formule van Sellmeijer aan te passen:

$$F_3 = F_{geometrie} = 0,91 \cdot A^{0,2} \left(\frac{D \cdot A^{0,6}}{L} \right)^{\frac{0,28}{(D \cdot A^{0,6})^{2,8}} + 0,04} - 1$$



Figuur 3.1 Vergelijking van de toename in kritiek verval door anisotropie volgens D-Geo Flow (x-as) en de toename in kritiek verval zoals voorspeld met de formule van Stoop (y-as).

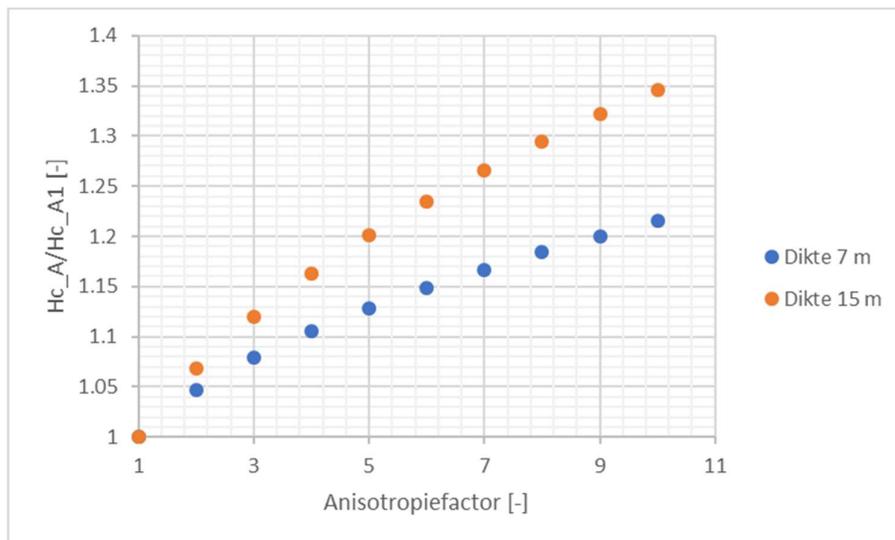
In (Rosenbrand and Wiersma, 2019) zijn verschillende effecten, waaronder ook anisotropie, gecombineerd beschouwd. De riviercase en de Spuicase zijn het meest geschikt voor het vergelijken

met de regel van Stoop (2018) en de berekeningen (Figuur 2.4), de IJsselcase heeft een meer complexe geometrie.

Bij de Riviercase is bij een anisotropiefactor van 3 een factor op het kritiek verval van 1.05 tot 1.1 gevonden in de DgFlow berekeningen. De factor is niet erg hoog, omdat de anisotropie alleen op de eerste zandlaag (dikte 7 m) is toegepast en niet op het Pleistocene zandpakket eronder (dikte 31 m). Uit Figuur 2.4 is af te leiden dat bij een dikte van 7 m inderdaad niet veel toename van het kritiek verval kan worden verwacht. Bij een dikte van 38 m zou een factor van ca. 1.18 worden verwacht. De regel van Stoop geeft factoren van 1.08 en 1.21 voor diktes van respectievelijk 7 en 38 m. Deze case illustreert dat wanneer anisotropie alleen aanwezig is in de bovenste zandlaag, het effect van anisotropie beperkt wordt.

Bij de Spuicase is bij een anisotropiefactor van 5 een factor op het kritiek verval van 1.05-1.08 gevonden. Deze lage waarde komt waarschijnlijk doordat het zandpakket vrij dun was (13 m). Uit Figuur 2.4 is af te leiden dat bij deze dikte een factor van ongeveer 1.12 verwacht wordt. Met de formule van Stoop (2018) wordt, wanneer het voorland van 25 m wordt meegenomen in de analyse een factor van 1.13 berekend. Dit voorbeeld illustreert dat zowel de formule van Stoop als Figuur 2.4 het kritiek verval iets overschat. Gezien de spreiding ten opzichte van de best fit lijnen in Figuur 2.4 is dit niet vreemd. Het uitvoeren van D-Geo Flow berekeningen verdient daarom altijd de voorkeur boven het gebruik van de formule van Stoop (2018) of Figuur 2.4.

In de praktijk zal de bovenste zandlaag over het algemeen de meeste anisotropie vertonen. Daarom wordt voor het bepalen van het effect van anisotropie alleen naar deze laag gekeken. Voor een dikte van 7 m en 15 m en een lengte van 35 m, worden de factoren gevonden zoals in Figuur 3.2. De effecten van kleine anisotropiewaarden in het pleistocene pakket, in combinatie met hogere waarden in de toplaag, zijn niet onderzocht, in deze studie, wel zijn dit soort analyses gedaan in (Kanning et al., 2019a).



Figuur 3.2 Effect van anisotropie volgens de regel van Stoop (2018) voor een kwelweglengte van 35 m en een dikte van 7 of 15 m.

3.1.5 Meerlaagsheid

Het effect van meerlaagsheid is niet expliciet bestudeerd in het KvK onderzoek van 2018 en 2019. Bij toepassing van de rekenregel wordt bij de aanwezigheid van meerdere lagen een equivalente doorlatendheid berekend. Doordat de bovenste zandlaag voor piping altijd wat zwaarder meeweegt is de schatting van de doorlatendheid iets te hoog en levert een berekening in D-Geo Flow waarin de lagen afzonderlijk worden gemodelleerd een gunstiger kritiek verval dan de regel, waarin de equivalente waarde is meegenomen voor een enkele zandlaag.

Hoewel er geen studie is uitgevoerd naar het effect van meerlaagsheid op het kritiek verval in het onderzoek van KvK, is er in het kader van VNK wel onderzoek naar gedaan, wat geresulteerd heeft in een neurale netwerk voor het berekenen van het kritiek verval bij twee lagen (Sellmeijer, 2006). Met behulp van dit netwerk is bepaald welke parameters de grootste invloed hebben op de toename van het kritiek verval bij het expliciet meenemen van meerlaagsheid ten opzichte van de equivalente doorlatendheid. Deze studie is nader toegelicht in Bijlage D. De bestudeerde variabelen zijn: de verhouding van de doorlatendheid (k_2/k_1) en dikte (D_1/D_2) van de bovenste en onderste zandlaag en de lengte/dikte (L/D) verhouding van het zandpakket.

Uit de berekeningen werd het volgende geconcludeerd:

- Voor contrasten kleiner dan 5 is het effect van meerlaagsheid minder dan 1.1 voor alle hier beschouwde D_1/D_2 verhoudingen. Dat betreft 73% van de SOS scenario's.
- Wanneer het contrast groter is (27% van de scenario's) is er een grote variatie in het effect van meerlaagsheid, tussen een factor 1.1 en 2 afhankelijk van L/D , D_1/D_2 en van k_2/k_1 . Hier is dus mogelijk een aanscherping te behalen mits $\frac{k_2}{k_1} > 5$. Het effect van meerlaagsheid is dan het grootste bij een lage L/D , dit zijn juist die situaties die gevoelig zijn voor piping door een korte kwelweglengte in combinatie met een dik watervoerend pakket.

De berekeningen die ten grondslag liggen aan het neurale netwerk zijn uitgevoerd met MSEEP. Resultaten van MSEEP kunnen iets afwijken van de resultaten van DgFlow. De verwachting is dat het verschil voor deze studie klein is.

3.1.6 3D-effect / Achterland

(De la Loma et al., 2019) en (Lam, 2018) hebben beiden onderzoek gedaan naar de invloed van stroming naar het achterland op piping, in respectievelijk 3D en 2D simulaties. In 2D was het effect van stroming naar het achterland op het kritieke verval in de ordegrootte van 1-10%. Dit komt doordat de 2D pipe veel water draineert: extra drainage naar het achterland heeft dan niet veel effect. Uit de 3D berekeningen volgde echter dat afstroming naar het achterland zeer veel invloed had op de vorming van een erosielen. Het 3D-effect en het achterland kunnen daarom niet als afzonderlijke effecten worden beschouwd.

De rekenregel veronderstelt dat piping een 2D fenomeen is: de stroming in en naar de pipe, naar het uittredepunt en naar het achterland zijn allen gemodelleerd in 2D. In werkelijkheid is de situatie 3D. Door de uitstroom als een punt te modelleren (een situatie die vaak voorkomt in de praktijk) wordt zowel de stroming door het watervoerend pakket als door de pipe 3D. Deze situatie is meerdere malen beproefd in het laboratorium op kleine- en mediumschaal. Vergelijking van deze proeven met de rekenregel laat zien dat de factor 3D/2D voor het kritiek verval ongeveer 0.5 is (Van Beek et al., 2015). Nu moet daarbij vermeld worden dat deze proeven uitgaan van een gesloten achterland, wat in de praktijk vaak niet zo is. Kijkend naar de conclusies van (De la Loma et al., 2019) is de verwachting dat stroming naar het achterland veel invloed heeft op het kritiek verval.

Hoewel er nog geen relaties zijn opgesteld voor terugschrijdende erosie, is de verwachting dat bij veel afstroming naar het achterland, de situatie sterk 2D wordt, zodat de rekenregel geldig is. Bij geen

afstroming naar het achterland (grote leklengte) lijkt de situatie meer op de proeven met puntvormig uitstroom: de best guess op dit moment zou dan een factor van 0.5 zijn, alhoewel de uitgevoerde proeven allemaal op beperkte schaal zijn uitgevoerd en de factor op een andere schaal anders zou kunnen zijn. De leklengte is een bepalende parameter voor het vaststellen van de mate van het 3D effect. In Tabel 3.1 is een voorstel gegeven voor toe te passen factoren, waarbij bij gebrek aan kennis over dit onderwerp geëxtrapoleerd is tussen 0.5 en 1. Gezien de grote onzekerheid rondom de achtergrond van deze factoren moeten deze waarden als zeer rudimentair gezien worden.

Tabel 3.1 3D factor

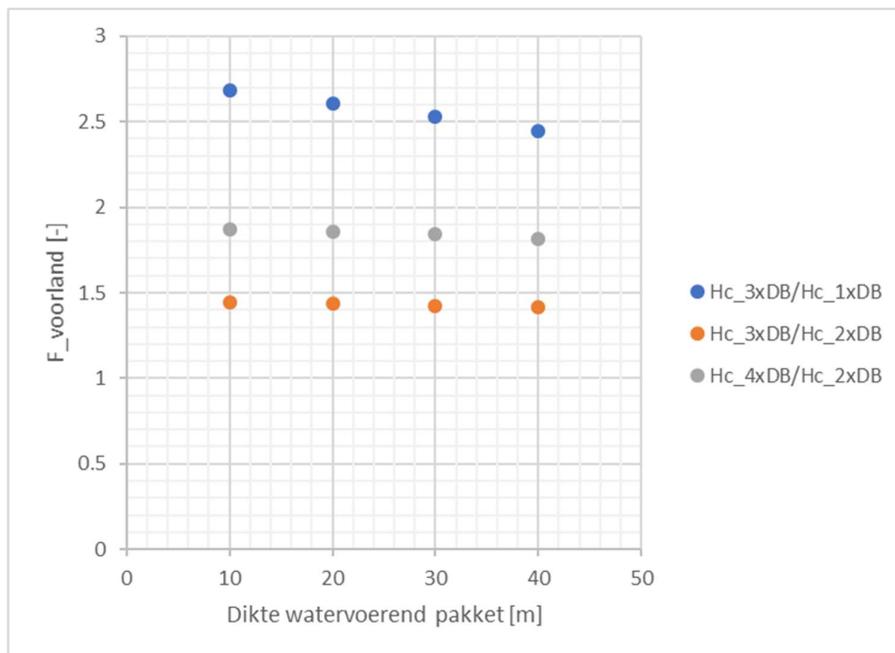
Situatie	F _{3D}
Grote leklengte – gesloten achterland	0.5
Middel-grote leklengte – beperkte afstroming	0.6
Kleine-middel leklengte – afstroming naar achterland	0.8
Kleine leklengte – afstroming naar teensloot	1

3.1.7 Voorland

Het meenemen van het voorland heeft een grote invloed op het kritieke verval (Lam, 2019b). Het voorland mag op dit moment echter nog maar beperkt worden meegenomen (maximaal 2x afstand buitenteen-uittredepunt), omdat er risico bestaat dat de pipe onder de dijk uitgroeit en kortsluiting maakt en omdat de analytische vergelijkingen voor het meenemen van het voorland niet meer geldig zijn wanneer de pipe onder het voorland komt.

Een belangrijke veronderstelling bij deze regel is dat de pipe op de kritieke lengte maximaal de helft van de kwelweglengte beslaat. (Lam, 2019b) toont echter aan dat deze kritieke lengte vaak veel korter is. Hoewel de kritieke lengte nog onvoldoende gevalideerd is, lijkt het gerechtvaardigd om aan te nemen dat in veel gevallen de kritieke lengte maximaal tot een derde van de kwelweglengte komt. Voor de consequentie-analyse is ervan uitgegaan dat toekomstig onderzoek tot deze uitspraak leidt.

Uitgaande van een aanwezige lengte van x m en reeds meegenomen voorland van x m, levert x m extra (L= 3 x dijkbasis) een factor van ca 1.4 op het kritiek verval op (uitgaande van de rekenregel) en 2x m extra (L= 4 x dijkbasis) een factor van ca. 1.8. Wanneer nog helemaal geen voorland is meegenomen levert 2x m extra voorland een nog grotere factor op, ordegrootte 2.5, afhankelijk van de dikte van het watervoerende pakket (Figuur 3.3).



Figuur 3.3 Voorlandfactor als functie van de dikte van het watervoerende pakket, bepaald voor een dijkbasis van 35 m, aan de hand van de Sellmeijer regel

3.1.8 0.3D regel

De 0.3D regel heeft geen effect op het kritiek verval voor terugschrijdende erosie, maar wordt wel toegepast als correctie in dit toetsspoor om de drukval in het opbarstkanaal te verdisconteren. De 0.3D regel heeft een groot effect op de beoordeling. (Van den Ham, 2018) illustreerde dat de waarde van 0.3 niet goed onderbouwd is, en dat de gradiënt theoretisch kan variëren tussen 0 en 1.

De waarde van de gradiënt in het opbarstkanaal is van vele factoren afhankelijk, zoals de korreldiameter, de eigenschappen van het watervoerend pakket, de diameter van het opbarstkanaal en de weerstand van de deklaag. In algemene zin zal gelden dat de gradiënt afneemt met toename van de leklengte, en met afname van korreldiameter en opbarstkanaal-diameter. De correctie hangt daarnaast uiteraard af van de dikte van de deklaag: hoe groter de deklaagdikte, hoe meer stijghoogteverschil in het opbarstkanaal.

De leklengte speelt daarom wederom een grote rol bij het bepalen waar eventuele aanpassingen in de regel een rol spelen. Immers gebieden met een grote leklengte, zorgen voor meer concentratie van stroming, waardoor het opbarstkanaal eerder wordt schoongespoeld. Bovendien gaat een grote leklengte vaak gepaard met een dikke deklaag, waardoor de verandering van het stijghoogteverschil een grotere rol speelt.

Omdat het niet bekend is welke kritieke gradiënt waar gehanteerd mag worden, worden scenario's voorgesteld met 0.1, 0.3 en 0.6, waarbij de eerste ongunstig is, en de laatste gunstig. De factor is dan gedefinieerd als:

$$F_{0,xD} = (H - 0.xD)/(H - 0.3D)$$

Waarin H gedefinieerd is als het aanwezige verval over de kering (toetspeil – polderpeil). In tegenstelling tot de andere factoren werkt deze factor niet direct op de weerstand tegen piping (sterkte component: het kritiek verval), maar op de belastingscomponent (aanwezig waterstandsverschil). Zoals te zien is in de vergelijking voor de stabiliteitsfactor voor terugschrijdende erosie:

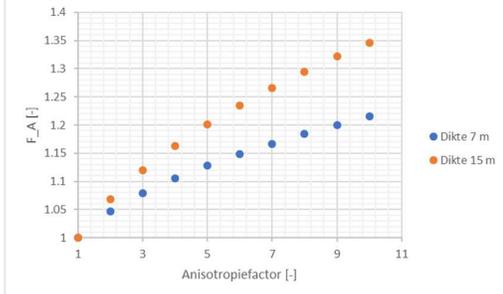
$$F_p = \frac{\Delta H_c}{(h - h_{\text{exit}} - r_c D_{\text{deklaag}})}$$

Werkt de inverse van $F_{0,xD}$ wel direct op het kritiek verval. De inverse van deze factor is daarom gehanteerd in de kaarten, waarin een waarde groter dan 1 meer sterkte representeert en een waarde <1 een verzwakking ten opzichte van de huidige situatie.

3.1.9 Samenvatting factoren

In Tabel 3.2 zijn de factoren die bij de consequentieanalyse worden meegenomen samengevat.

Tabel 3.2 Samenvatting factoren

Effect	Parameters	Factor
Slibfractie	%<16 μm	$F_{\text{fijne fractie}} = 1 + 0.15 \cdot p_{<16\mu\text{m}}$
Helling deklaag - micro	Helling (0.20)	$F_{\text{micro-0.2}} = 1.05$
Anisotropie	Anisotropiefactor en dikte aquifer	
Meerlaagsheid	k2/k1	k2/k1<5: F<1.1 k2/k1>5: F 1.1-2 afhankelijk van L/D
3D-effect / Achterland	Leklengte $\lambda = \sqrt{Ic} = \sqrt{\frac{kDD'}{k'}}$ Afstroming naar achterland Uittredepunt – sloot of punt	Grote leklengte – gesloten achterland 0.5 Middel-grote leklengte – beperkte afstroming 0.6 Kleine-middel leklengte – afstroming naar achterland 0.8 Kleine leklengte – afstroming naar teensloot 1
Voorland	Leklengte voorland Lengte voorland	F=1.4 uitgaande van uitbreiding kwelweglengte van 2xDB naar 3xDB F=1.8 uitgaande van uitbreiding kwelweglengte van 2xDB naar 4xDB
0.3D	Leklengte Dikte deklaag Diameter opbarstkanaal Kritiek verval	$1/F_{0,xD} = (H_c - 0.3D)/(H_c - 0.xD)$ Scenario's x=0.1, 0.3 of 0.6

3.2 Differentiatie naar representatieve gebieden en kaart van NL

Om een inschatting te maken wat het effect is van de factoren voor de veiligheid in Nederland is Nederland gedifferentieerd aan de hand van de beïnvloedende parameters. In Tabel 3.3 is weergegeven welke parameters een rol spelen voor de verschillende effecten. In Tabel 3.3 is per effect aangegeven hoe de differentiatie is aangepakt. In de navolgende paragrafen is meer informatie gegeven over de differentiatie voor de effecten van fijne fractie, anisotropie, meerlaagsheid, 3D effect / achterland, voorland en drukval in het opbarstkanaal.

Voor de micro-schaalvariatie van de onderkant deklaag en de 0.3D regel is geen differentiatie naar gebied gemaakt. Het effect van de micro-schaalvariatie van de helling is klein: een beperkte mate van variatie is door heel Nederland aanwezig. Er is geen kennis beschikbaar om dit nauwkeuriger in te schatten. De drukval in het opbarstkanaal wordt door zeer veel factoren beïnvloed: daarom is er voor gekozen om de indeling op basis van de overige effecten aan te houden, maar wel een kaart van Nederland te maken met factor per segment.

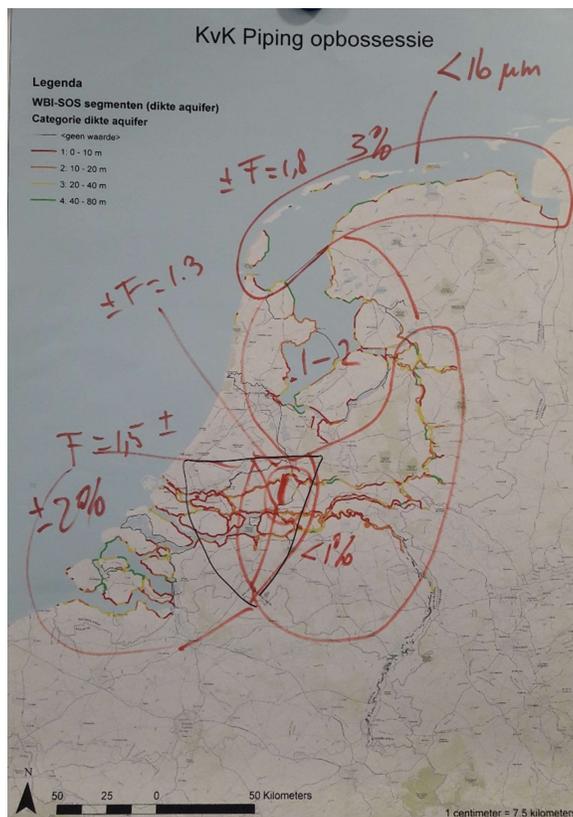
Tabel 3.3 Samenvatting aanpak differentiatie per effect

Effect	Aanpak differentiatie
Slibfractie	Differentiatie naar afzettingsgebied op basis van engineering judgement
Helling deklaag - micro	Geen differentiatie
Anisotropie	Differentie naar afzettingsgebied. De invloed van dikte van het pakket is niet meegenomen, omdat de anisotropie vaak beperkt in diepere lagen aanwezig is.
Meerlaagsheid	k2/k1
3D-effect / Achterland	Differentiatie aan de hand van leklengte en inschatting van afstroming naar het achterland
Voorland	Aanwezige voorlandlengte bepaald aan de hand van Okader studie en google maps
Drukval in het opbarstkanaal	Indeling aan de hand van overige effecten

3.2.1 Slibfractie

In het algemeen kan gesteld worden dat getijdenzand gemiddeld slibrijker is dan rivierzand en dat in Nederland het rivierzand richting het westen gemiddeld slibrijker worden. Daarnaast wordt er een verschil in het gemiddelde slibpercentage verwacht voor getijdenzand nabij de keringen in Zeeland en in Noord-Nederland (Hijma and Oost, 2018b). In Zeeland liggen de keringen namelijk vaak naast grote getijdengeulsystemen, terwijl in Noord-Nederland de keringen gelegd zijn aan de randen van het Waddengebied. Dit betekent dat in Noord-Nederland het getijdenzand gemiddeld in een rustiger milieu is afgezet, waardoor deze gemiddeld meer slib bevat.

De toegekende percentages voor de getijdengebieden zijn gebaseerd op enkele korrelgrootteproeven die uitgevoerd zijn op getijdenzand uit ZW-Nederland (Spui-West: Fugro; Grevelingen - Hijma & Oost) en in Noord-Nederland (Hijma, 2019). Voor het rivierengebied is vervolgens een lager percentage gekozen en het IJsselmeergebied is beschouwd als een overgangsgebied. De getallen zijn indicatief, geschikt voor de toepassing in dit rapport, maar in de toekomst is nadere detaillering nodig. Figuur 3.4 toont een schets van de indeling van gebieden t.b.v. de slibfractie. Het is belangrijk hierbij te beseffen dat voor het getijdengebied deze percentages gekozen zijn met getijdenzand in het achterhoofd en niet met (zandige) getijdenafzettingen in zijn algemeenheid. In deze laatste categorie kan het percentage slib oplopen tot ruim boven de 10%,

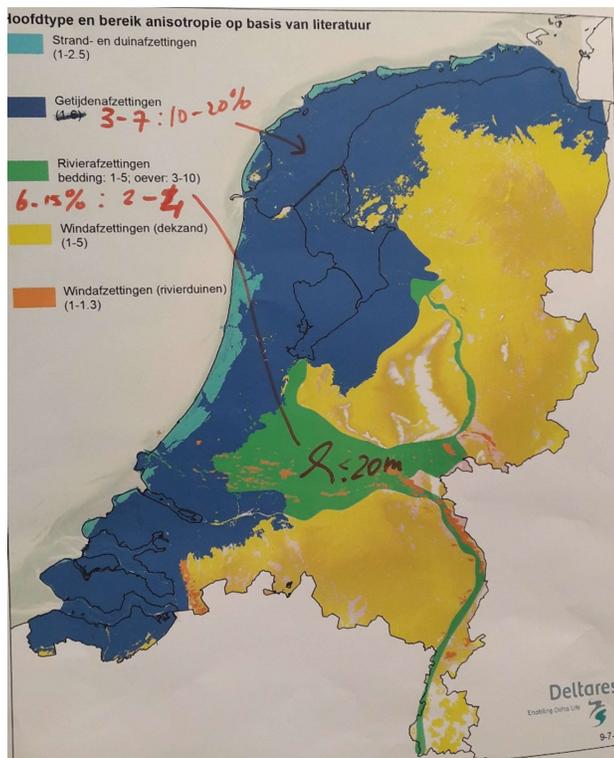


Figuur 3.4 Slibfracties voor verschillende gebieden in Nederland

3.2.2 Anisotropie

In (Van Asselen et al., 2018) wordt beschreven hoe de anisotropie in doorlatendheid kan verschillen per type afzetting. Op basis daarvan is een kaart gemaakt van het type afzetting dat direct onder de kering aanwezig is en waarvan aangenomen kan worden dat deze relevant is voor piping. Het type afzetting varieert hierbij van relatief homogeen (dekzand, duinafzettingen) tot sterk heterogeen (getijdenafzettingen). Op basis van beschikbare metingen van anisotropie en expert kennis is vervolgens aan elke type afzetting het mogelijke bereik in representatieve anisotropiewaarden gegeven.

Sinds dat rapport zijn relatief veel nieuwe anisotropiemetingen uitgevoerd (met HPT-AMPT sonderingen), met name langs het Spui (getijdenafzettingen) en in het rivierengebied. Daarnaast is aandacht besteed aan de verschillende meetmethodes die gebruikt zijn om anisotropie te meten: kleine monsters uit boringen, HPT-AMPT en pompproeven. Hieruit volgt dat metingen op kleine monsters uit boringen veelal erg lage anisotropiewaarden laten zien, omdat de neiging bestaat de relatief homogene delen uit een boorkern te beproeven. Dit is de oorzaak voor de vaak relatief lage gemeten anisotropiewaarden (rond 1) in de literatuur. Op basis van de nieuwe metingen en inzichten zijn de representatieve waarden voor getijdenzand en rivierzand aangescherpt: respectievelijk van 1-6 naar 3-7 en van 1-5 naar 2-4. Gezien de sterke toename in HPT-AMPT metingen kan verwacht worden dat zowel voor deze twee typen zand, als voor de overige zandige afzettingen, er meer ruimtelijke differentiatie mogelijk zal zijn in onderstaande kaart.



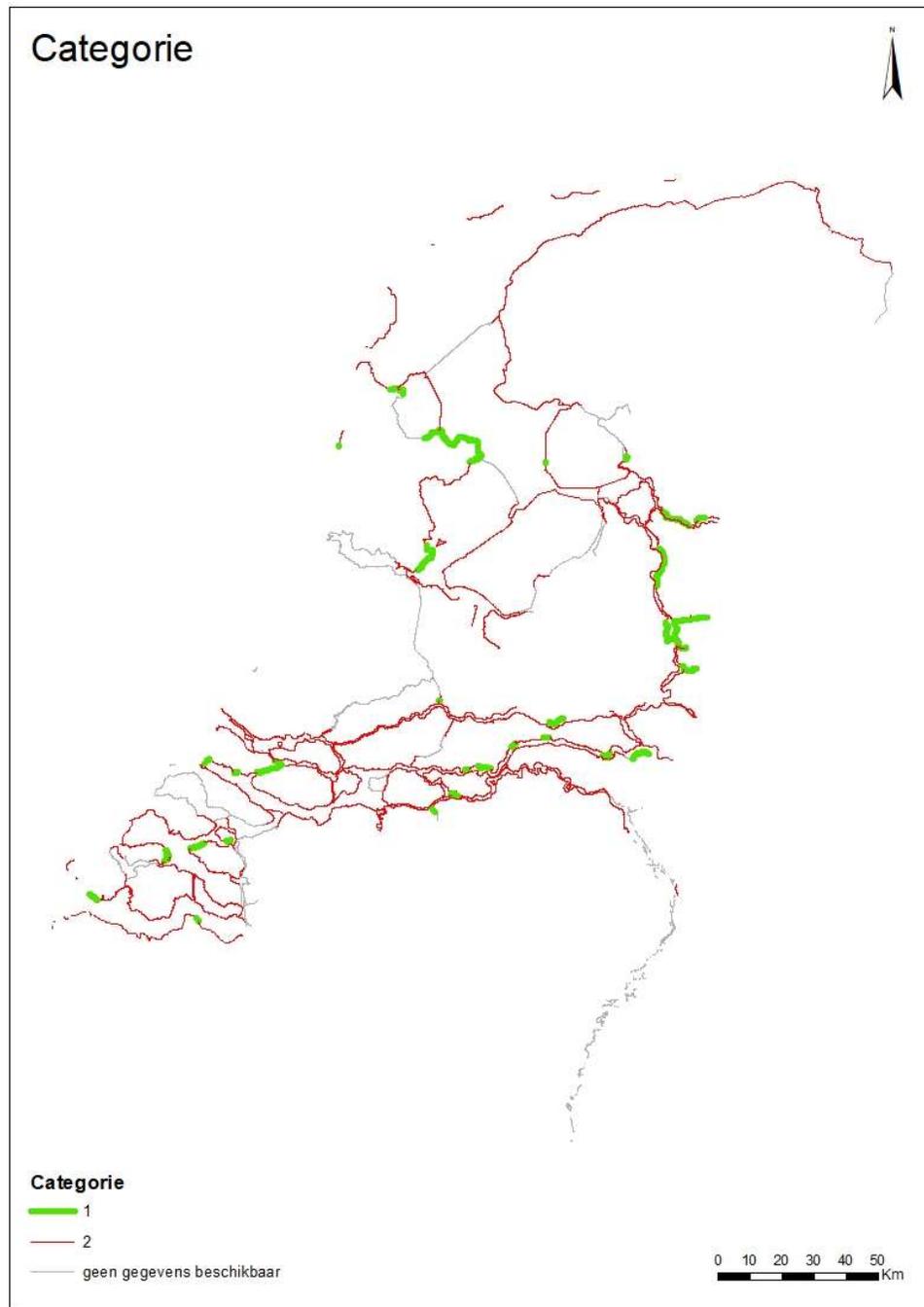
Figuur 3.5 Anisotropiefactoren voor verschillende gebieden in Nederland

3.2.3 Meerlaagsheid

Om het potentieel van meerlaagsheid weer te geven aan de hand van de SOS data kan geen gebruik gemaakt worden van L/D aangezien L afhankelijk is van de lokale geometrie. Wel kan gesteld worden dat op locaties waar $\frac{k_2}{k_1} < 5$ er relatief weinig aanscherping te behalen valt. Aangezien er meerdere scenario's per vak mogelijk zijn, is per vak bepaald of de totale kans van scenario's met $\frac{k_2}{k_1} > 5$ groter is dan 50%. Indien dit het geval is, is er reële kans dat het meerlaags rekenen tot een verhoging van het kritieke verval leidt, met een factor tussen 1.1 en 2, afhankelijk van de L/D verhouding. Deze situaties zijn ingedeeld als categorie 1. Indien de kans op scenario's met $\frac{k_2}{k_1} > 5$ kleiner dan 50% is, is de kans op winst kleiner: deze situaties zijn ingedeeld als categorie 2.

In Figuur 3.6 zijn de ingedeelde segmenten weergegeven. Hierbij valt op dat voor een groot deel van Nederland het expliciet meenemen van meerlaagsheid niet tot (veel) winst zou leiden. Dat betekent echter niet dat dit in individuele situaties binnen de segmenten niet tot winst zou kunnen leiden: de kaart geeft slechts een globaal beeld op basis van het SOS.

De categorieën in Figuur 3.6 leiden niet tot een nadere differentiatie van gebieden. De categorie die in een gebied in termen van lengte het meeste voorkomt, is toegewezen aan het betreffende gebied.



Figuur 3.6 Indeling segmenten voor meerlaagsheid: categorie 1: de kans op scenario's met $k_2/k_1 > 5$ is groter dan 50%, categorie 2: de kans op scenario's met $k_2/k_1 > 5$ is kleiner dan 50%.

3.2.4 3D effect / achterland

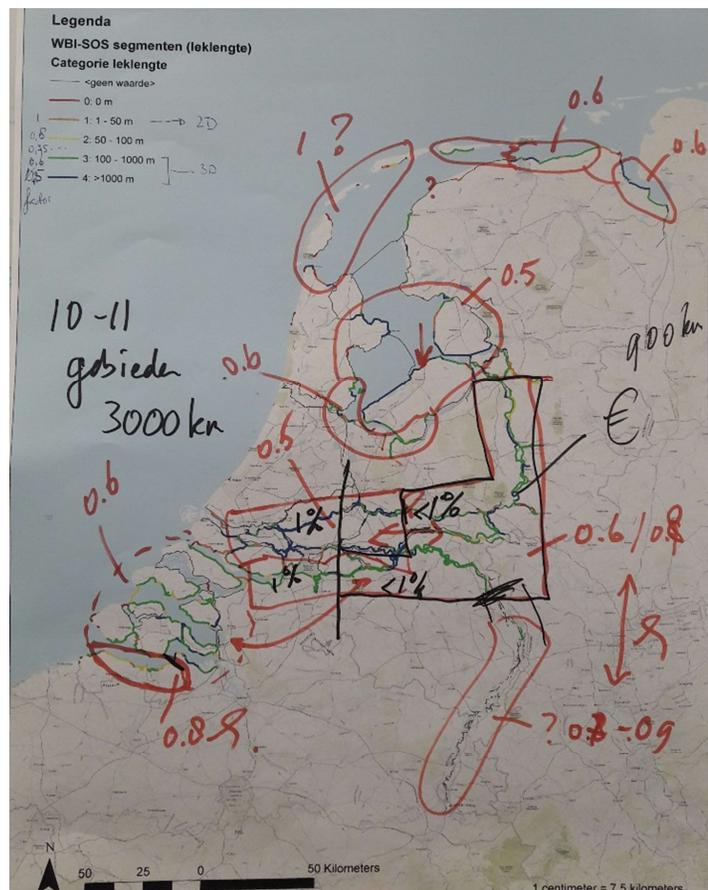
Zoals besproken in paragraaf 3.1.6 is voor de factoren voor het 3D effect de mate van afstroming naar het achterland bepalend, wat bepaald wordt door de leklengte van het achterland. Lokale fenomenen zouden ook invloed op de afstroming naar het achterland kunnen hebben, zoals de aanwezigheid van

een drainerende waterpartij. Omdat dit lokale fenomenen zijn, is de indeling uitsluitend gemaakt op basis van de leklengte.

De parameters benodigd voor de bepaling van de leklengte, dikte en doorlatendheid van het zandpakket en de deklaag zijn bepaald aan de hand van het SOS, zoals toegelicht in Appendix B. Om tot een leklengte per segment te komen zijn de volgende stappen gevolgd:

- Bepaling pipinggevoelige zandlaag, dikte van de daarboven gelegen deklaag, dikte van het totale (aaneengesloten) watervoerende pakket en equivalente doorlatendheid van het watervoerend pakket, per scenario. Bij het bepalen van de pipinggevoelige laag is verondersteld dat een watervoerend pakket met dikte <1 m niet pipinggevoelig is.
- Bepaling gewogen gemiddelde van dikte deklaag, dikte en doorlatendheid watervoerend pakket, per segment.
- Bepaling doorlatendheid deklaag op basis van de gewogen dikte van de deklaag. Hierbij is verondersteld dat een dunne laag meer zwakke plekken heeft en dus doorlatender zal zijn dan een dikke laag. Boven een bepaalde dikte zal de doorlatendheid niet veel meer toenemen. Op basis van expert judgement is gekozen voor interpolatie tussen 0.1 m/d bij een laag van 1 m dikte naar 0.001 m/d bij 5 m dikte en 0.001 m/d voor lagen >5 m dikte.
- Bepaling leklengte op basis van gewogen parameters per segment.

De leklengte per segment is weergegeven op een kaart, opgenomen in Appendix A. Figuur 3.7 laat een schets zien van de indeling in gebieden op basis van leklengte.



Figuur 3.7 Indeling segmenten op basis van leklengte.

3.2.5 Voorland

Het meenemen van extra voorland zorgt voor een grotere kwelweglengte en daarmee voor een gunstigere beoordeling. Op dit moment kan slechts eenmaal de dijkbasis als extra voorland worden meegenomen (maximale kwelweglengte is 2x dijkbasis). Vaak is er echter veel meer voorland aanwezig. Dit voorland zou bij oprekking van de regels meegenomen kunnen worden, indien het voldoende ondoorlatend is. Het voorland dat (zonder afknottingsregels) maximaal mag worden meegenomen is de effectieve voorlandlengte. Deze lengte is afhankelijk van de leklengte van het voorland en de totale voorlandlengte.

In appendix E is aangetoond dat bij een voorland van meer dan 100 m, in veel gevallen vrijwel al het voorland mag worden meegenomen. Daarom is voor de bepaling van het effect van voorland uitsluitend gekeken naar het aanwezige voorland. Op basis van google maps is een inschatting gemaakt van het % dijk lengte met voorland >100 m. Dit percentage is geen input voor de differentiatie, maar is bepaald per deelgebied.

3.2.6 Drukval in het opbarstkanaal

De mate waarin de drukval in het opbarstkanaal een rol speelt is afhankelijk van de dichtheid van de slurry, die in scenario's gevarieerd wordt als 0.1, 0.3 en 0.6, van de dikte van de deklaag en het aanwezig verval, waarvoor de drukval een correctie is.

De dikte van de deklaag is per segment bepaald, volgens de methode beschreven in paragraaf 3.2.4. Het aanwezig verval is bepaald aan de hand van het toetspeil en het polderpeil. Voor het toetspeil was een batch van 216 waarden verspreid over heel Nederland beschikbaar ten behoeve van testen van Riskeer. Deze waarden zijn gebaseerd op de signaleringswaarde. De 216 waarden zijn gekoppeld aan het meest nabijgelegen segment: indien er meer toetspeilen per segment beschikbaar waren, is het gemiddelde van de betreffende toetspeilen genomen. Het polderpeil is niet voor heel Nederland beschikbaar: daarom is het maaiveld uit het SOS als representatieve waarde voor het polderpeil genomen. Vervolgens is de factor $1/F_{0,xD}$ berekend.

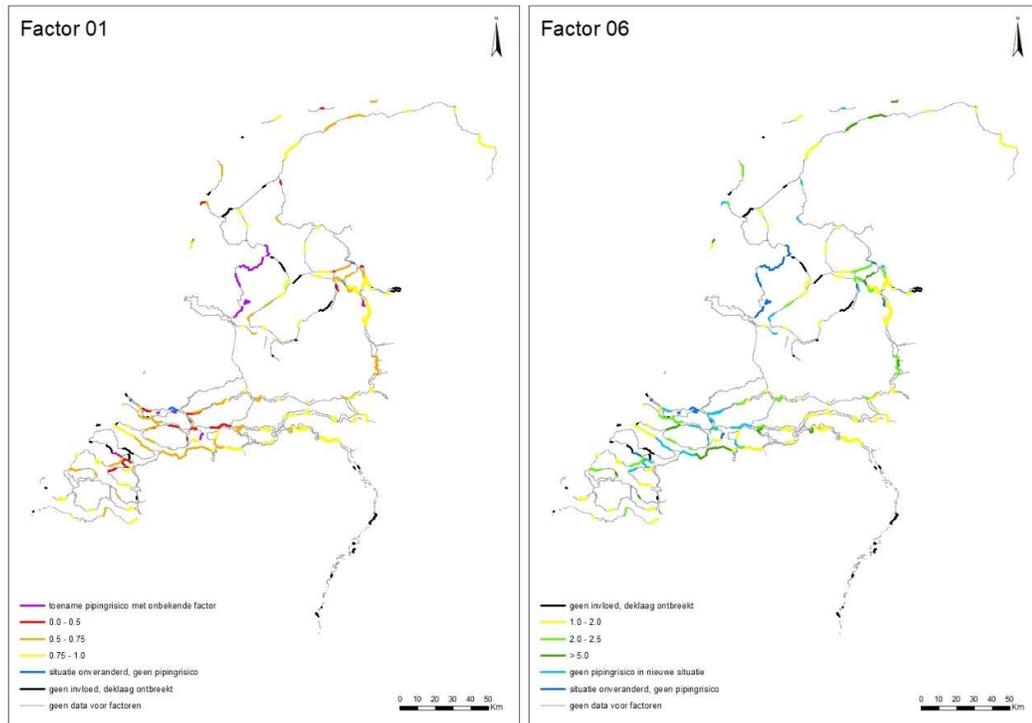
In sommige gevallen was de deklaag zo dik, dat $H - 0. xD$ tot negatieve waarde leidde. Hiervoor zijn de volgende aparte categorieën opgesteld:

- Als $H-0.3D < 0$ en $H-0.xD < 0$: zowel voor als na de verandering van de 0.3D regel is de dikte van de deklaag zo groot dat de weerstand in het opbarstkanaal groter is dan het toetspeil. Er is dan geen risico op piping.
- Als $H-0.3D < 0$ en $H-0.1D > 0$: In deze situatie was er bij de toepassing van de 0.3D regel geen risico op piping, maar bij toepassing van een 0.1D regel wel. De factor waarmee het kritiek verval verandert kan daardoor niet bepaald worden. Er is dus een onbekende toename van het pipingrisico.
- Als $H-0.3D > 0$ en $H-0.6D < 0$: In deze situatie was er bij toepassing van de 0.3D regel een mogelijk pipingrisico, maar bij toepassing van een 0.6D regel niet.

In Figuur 3.8 zijn de kaarten weergegeven. In Appendix A zijn de kaarten in groot formaat opgenomen. In het rivierengebied neemt het effect van de drukval in het opbarstkanaal – in positieve of negatieve zin – toe richting het westen, veroorzaakt door de gemiddeld dikkere deklaag. De verdeling van factoren leidt niet tot aanvullende differentiatie van gebieden gebaseerd op leklengte en afzettingstype.

Bij de kaarten wordt opgemerkt dat deze zijn opgesteld om globale trends te achterhalen: lokaal kunnen uiteraard andere effecten verwacht worden. De term 'geen pipingrisico' mag hier dan ook niet geïnterpreteerd worden als een uitsluiting van de beoordeling: globaal gezien zal de

beoordeling in deze gebieden gunstiger uitvallen, maar dit hoeft voor individuele situaties niet zo te zijn.

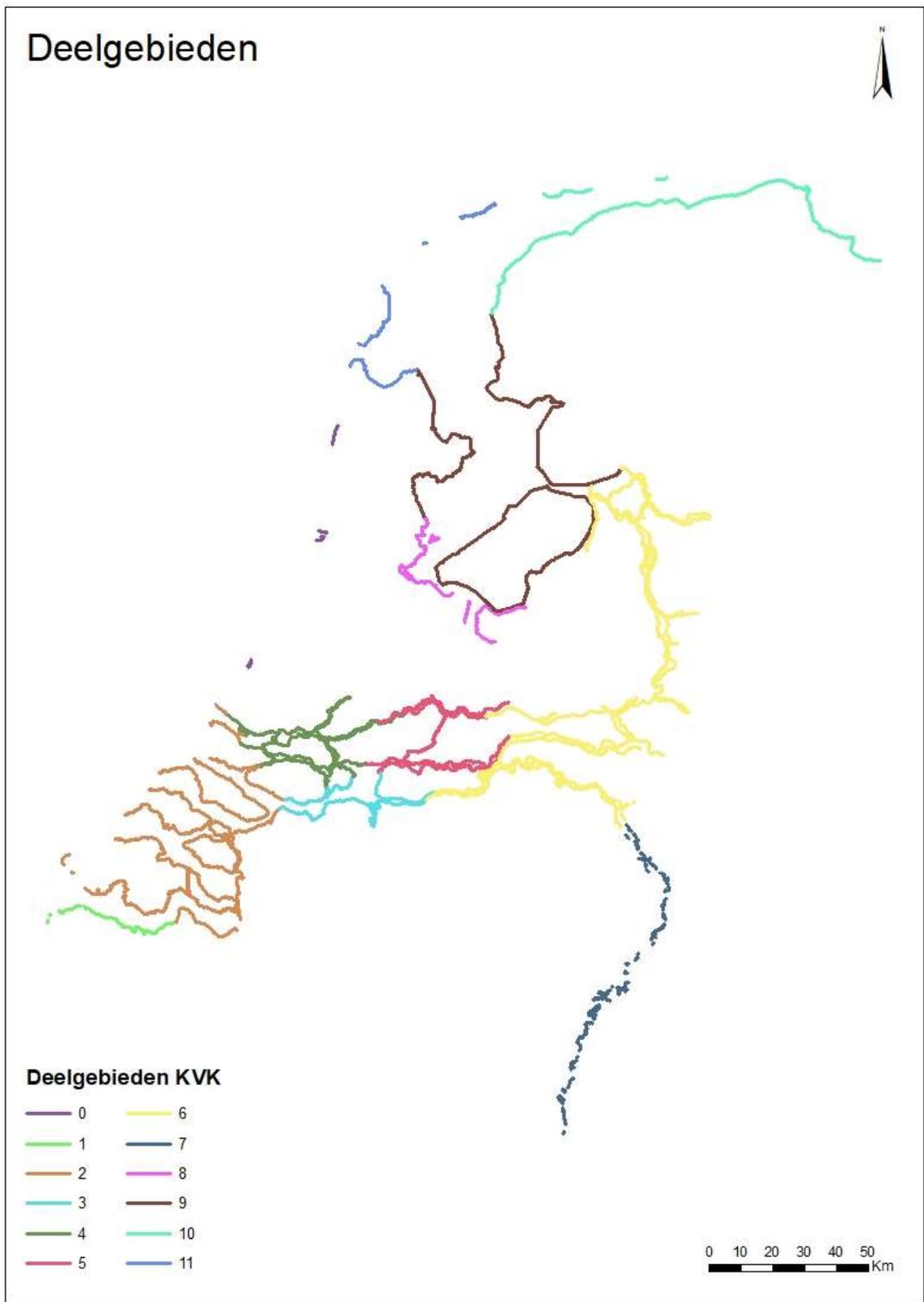


Figuur 3.8 Effect van wijziging 0.3D regel naar 0.1D of 0.6D

3.2.7 Differentiatie in gebieden

Uiteindelijk is op basis van de leklengte en het type afzetting een indeling gemaakt voor Nederland: de overige effecten hebben niet tot een nadere verdeling geleid. In totaal zijn 11 gebieden gedefinieerd. In Figuur 3.9 zijn deze gebieden weergegeven. In onderstaande tabel is het aantal kilometer per deelgebied opgenomen.

KvK-deelgebied	2960 km	
1	52	2%
2	541	18%
3	151	5%
4	295	10%
5	229	8%
6	818	28%
7	148	5%
8	116	4%
9	349	12%
10	189	6%
11	72	2%



Figuur 3.9 Deelgebieden op basis van leklengte en afzettingstype

3.3 Bepalen beïnvloedende parameters per deelgebied

In Tabel 3.4 is een overzicht gegeven van de beïnvloedende parameters per deelgebied. Slibfractie en anisotropiefactor zijn bepaald aan de hand van expert judgement en Figuur A.1. (zie bijlage A). Het % categorie 1 voor meerlaagsheid is bepaald aan de hand van data uit Figuur 3.6. De gemiddelde leklengte is bepaald aan de hand van data uit Figuur A.2. Een indicatie van het percentage voorland breder dan 100 m is bepaald met Google Maps. In paragraaf 3.5 is de voorlandlengte voor een deel van Nederland nauwkeuriger bepaald op basis van de Okader studie. Uit deze studie volgt een % groter dan 100 m voor deelgebied 5 en 6 van respectievelijk ca. 50 en 60 %, wat hoger is dan de geschatte waarden van 30 en 40%. De schatting op basis van Google maps lijkt dus wat aan de conservatieve kant te zijn.

Tabel 3.4 Overzicht beïnvloedende parameters per deelgebied

Deelgebied	Slibfractie	Anisotropiefactor (min)	Anisotropiefactor (max)	categorie 1 Meerlaagsheid	Gemiddelde leklengte	Voorland > 100 m
	[%]	[-]	[-]	[%]	[m]	[%]
1	2	3	7	0	178	35
2	2	3	7	5	553	35
3	1.5	3	7	0	527	20
4	1.5	2	4	4	2025	10
5	0.75	2	4	4	1874	30
6	0.5	2	4	11	898	40
7	0.5	2	4	0	443	50
8	1.5	3	7	11	631	30
9	1.5	3	7	9	897	10
10	3	3	7	0	1001	30
11	3	3	7	3	334	80

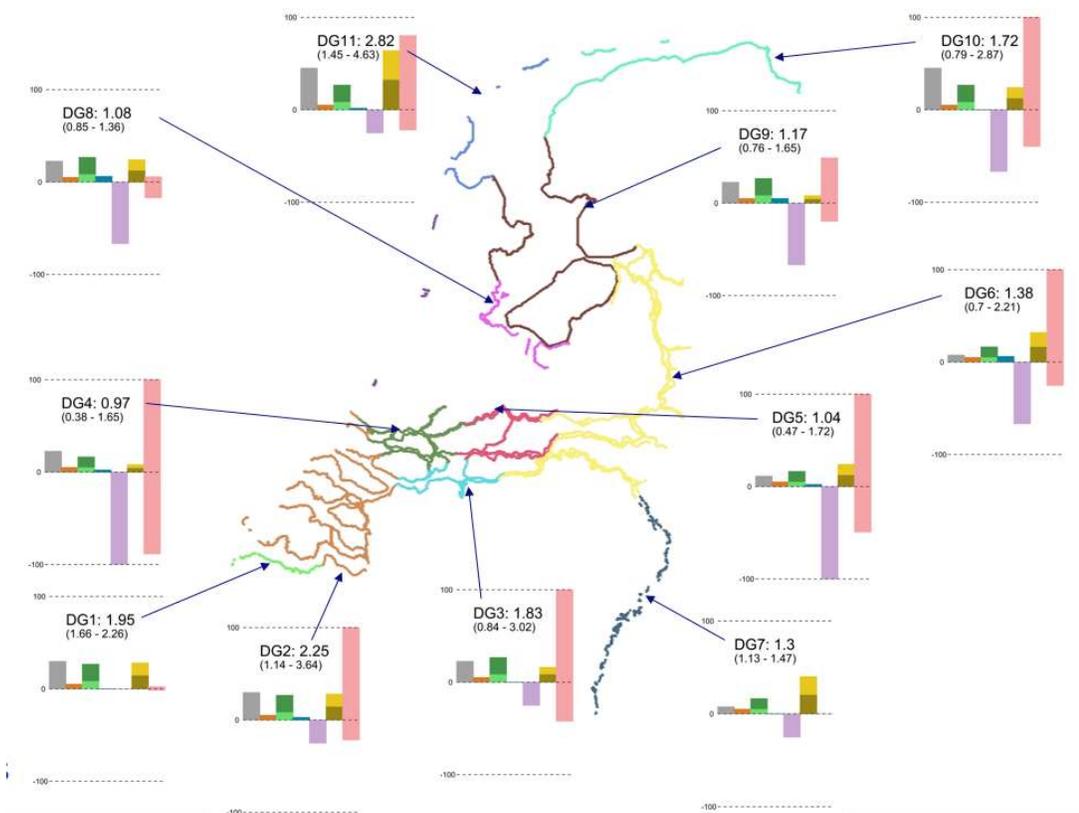
3.4 Effect op kritiek verval voor alle deelgebieden

Per deelgebied is bepaald hoe de effecten uitwerken in factoren op het kritiek verval. Deze factoren zijn weergegeven in Figuur 3.10. De afleiding van factoren is bedoeld om algemene trends weer te geven, de factoren zijn geen vervanging voor de huidige beoordelingsmethodiek: op lokaal niveau kunnen de factoren sterk verschillen van de algemene trends. De kaart geeft inzicht welke effecten het belangrijkste zijn per gebied en hoe effecten zich onderling verhouden.

De factoren zijn in principe bepaald volgens Tabel 3.2. Hieronder volgt een toelichting hierop:

- Anisotropie: minimum effect gebaseerd op aquiferdikte van 7 m en ondergrenswaarde anisotropiefactor in het betreffende gebied; maximum effect gebaseerd op aquiferdikte van 15 m en bovengrenswaarde van anisotropiefactor in het betreffende gebied.
- Meerlaagsheid: Gemiddelde factor bepaald door voor het gedeelte van het deelgebied met categorie 1 (P_{cat1}) een factor van 1.55 (gemiddelde van 1.1 en 2) toe te kennen en het overige gebied een factor van 1: $F = P_{cat1} \frac{1.1+2}{2} + (1 - P_{cat1}) \cdot 1$.
- Voorland: Gemiddelde factor bepaald voor een totale kwelweglengte van 3x en 4x de dijkbasis, uitgaande van een dijkbasis van 35 m, toegepast op het gedeelte van het deelgebied met een voorlandlengte > 100 m en een factor 1 voor het overige gebied:
 $F_{VL_{min}} = P_{VL>100} \cdot 1.4 + (1 - P_{VL>100}) \cdot 1$ of $F_{VL_{max}} = P_{VL>100} \cdot 1.8 + (1 - P_{VL>100}) \cdot 1$
- 3D-factor: interpolatie aan de hand van leklengte, de invloed van de 3D-factor is echter zeer onzeker omdat deze onvoldoende is onderzocht.
- Drukval in opbarstkanaal: minimum factor gebaseerd op 0.1D-scenario, maximum factor gebaseerd op 0.6D-scenario (segmenten met negatieve waarden voor de met 0.xD gecorrigeerde waterstand zijn niet meegenomen in de bepaling van de factor). De factor voor het 0.6D-scenario kan zeer hoog oplopen, doordat er na correctie van de drukval nog slechts een klein verval overblijft: dit is echter niet realistisch in de praktijk. Een maximumfactor van 2 is gehanteerd.

In Figuur 3.10 zijn de factoren gevisualiseerd in grafieken waarin het % toe- of afname van het kritiek verval is weergegeven (gekleurde balken). Tevens is per deelgebied een gemiddelde waarde gegeven van de factor op het kritiek verval en een minimum en maximum (gemiddelde) waarde aan de hand van de hierboven beschreven ranges van parameters. Lokaal kunnen de waarden uiteraard nog meer variëren dan in de minimum en maximum waarde zijn beschreven.



Figuur 3.10 Deelgebieden met overzicht van effect van factoren (gekleurde balken van links naar rechts: grijs: slibfractie, oranje: variatie helling deklaag, groen: anisotropie, blauw: meerlaagsheid, donkerpaars: 3D, geel: voorland en rood 0.xD.

Kijkend naar Figuur 3.10 vallen direct een aantal zaken op. De grootste uitschieters worden veroorzaakt door de factoren van het 3D-effect en de 0.3D-rekenregel. Dat deze factoren zo een grote bandbreedte / effect hebben wordt deels veroorzaakt doordat er voor beide effecten nog grote kennisleemtes zijn: de onzekerheden zijn groot. Daardoor kan een meer realistische aanpak voor deze effecten tot grote verandering in het berekende kritieke verval leiden. Dat deze twee fenomenen veel effect hebben op het kritieke verval is al langer bekend (Bezuijen, 2015; Koelewijn, 2009), (Bryant A. Robbins et al., 2019), (Van Beek et al., 2015; Vandenboer et al., 2017) en het (beperkte) onderzoek dat is uitgevoerd binnen het KvK programma bevestigt dit beeld.

Er valt met name veel te optimaliseren op het gebied van de 3D-factor: het SOS geeft mogelijk geen juist beeld van de lokale afstroming naar het achterland waardoor het effect veel kleiner kan zijn. Het meenemen van de 3D geohydrologie kan zelfs gunstig werken, bijvoorbeeld voor situaties waar de zandbaan slechts een beperkte breedte heeft, maar dat is nog niet onderzocht. Om deze effecten beter in te schatten is een beter inzicht in het optreden van piping in een 3D-situatie nodig. Ook voor de 0.3D-regel is nog optimalisatie mogelijk. In Appendix C is een plan van aanpak gegeven voor het realistischer bepalen van de drukval in het opbarstkanaal.

De overige effecten leiden allemaal tot een verhoging van het kritieke verval en bevatten bovendien minder kennisleemten: hoewel de factoren kleiner zijn, is er in het KvK programma meer aandacht naar deze onderdelen gegaan en zijn de voornaamste kennisleemten opgevuld.

Effecten die naast het 3D-effect en de 0.3D-rekenregel grote invloed hebben op het kritieke verval zijn de slibfractie en het voorland. Voor beide effecten kan worden opgemerkt dat de hier getoonde factoren waarschijnlijk nog aan de lage kant zijn: voor het inschatten van de invloed van de fijne fractie is een ondergrenslijn aangehouden: de experimenten tonen over het algemeen meer winst. Ook zijn de experimenten grotendeels uitgevoerd op gehomogeniseerd zand, terwijl er in werkelijkheid een laagjesstructuur is. De verwachting is dat het kritieke verval hier nog verder van omhoog zal gaan. Dit kan in een vervolgstudie worden uitgezocht. De factor van het voorland is afgeleid op basis van een schatting van het percentage dijk lengte waarvoor het voorland groter is dan 100 m. Dit betreft waarschijnlijk een conservatieve schatting. Het lokaal beschouwen van het effect van voorland, zoals uitgevoerd in 3.5, geeft een nauwkeuriger beeld.

Het effect van anisotropie is relatief klein ten opzichte van voornoemde effecten en sterk afhankelijk van de anisotropiefactor die gehanteerd wordt. Het effect is wel altijd positief. Het effect van meerlaagsheid is nog veel kleiner, omdat er maar weinig situaties in het SOS voorkomen waarbij het doorlatendheidscontrast voldoende groot is om een verschil te maken ten opzichte van het gebruik van de equivalente doorlatendheid. Bij die situaties waarbij dit wel het geval is, is het echter wel de moeite waard om dit effect mee te nemen, omdat de factor hoog op kan lopen. Ook wordt bij dit onderdeel opgemerkt dat de aanwezigheid van stoorlaagjes (die mogelijk niet altijd in SOS zijn opgenomen) veel effect kunnen hebben op de toestroming naar de pipe.

Tenslotte is ook het effect van de variatie in de helling in de onderkant deklaag beperkt. Bij dit fenomeen resteert nog wel de vraag waarom deze invloed (tegen de verwachting in) zo klein is en of het model deze variatie goed voorspelt.

Landelijk gezien is het opmerkelijk dat in het westelijk deel van het rivierengebied de beoordeling sterk geraakt wordt door het 3D-effect en mogelijk ook het 0.3D-effect, terwijl hier juist geen zandmeevoerende wellen worden waargenomen. Hierbij moet bedacht worden dat de factoren ingezet zijn op het deelmechanisme terugschrijdende erosie: dat wil zeggen dat opbarsten en heave al moeten zijn opgetreden. Het 3D-effect is vooral sterk aanwezig in gebieden met weinig afstroming naar het achterland, wat bij dikke deklagen uiteraard het geval is. Bij dikke deklagen heeft ook een wijziging in de 0.3D-regel veel invloed. In deze gebieden zou het wellicht beter zijn om te kijken naar het optimaliseren van het oordeel op opbarsten door het meenemen van voorland, introdeweerstand, in plaats van het optimaliseren voor terugschrijdende erosie, mede gelet op de onzekerheden rondom het 3D-effect en de 0.3D-regel. Optimalisaties zoals anisotropie, het meenemen van voorland, en meerlaagsheid hebben ook een gunstig effect op het kritieke verval voor opbarsten.

De gemiddelde factor wordt sterk beïnvloed door de onzekerheden rondom het 3D-effect, maar vooral de 0.3D-regel. In Tabel 3.5 zijn de factoren weergegeven zonder de invloed van de 0.3D-regel.

Tabel 3.5 Overzicht factoren per deelgebied, waarbij het effect van de 0.3D-regel niet is meegenomen.

Deelgebied	Fgemiddeld	Fmin	Fmax
1	1.94	1.68	2.21
2	1.59	1.38	1.82
3	1.35	1.20	1.51
4	0.77	0.72	0.83
5	0.78	0.70	0.86
6	0.98	0.87	1.10
7	1.30	1.13	1.47
8	1.13	0.99	1.29
9	1.01	0.91	1.11
10	1.26	1.10	1.43
11	2.15	1.76	2.57

De landelijke variatie in factoren voor de verschillende effecten biedt mogelijkheden voor een gedifferentieerde aanpak op basis van gebieden met specifieke kenmerken qua geologie, geohydrologie, dijkopbouw en belasting. De faalpadenaanpak, waarbij alle knopen tot falen worden geëvalueerd, zou hier een goede methode voor kunnen zijn. Op deze manier kan per gebied worden afgewogen op welke knoop kan worden ingezet. Als voorbeeld kan hierbij genoemd worden dat in de kustgebieden mogelijk toegewerkt kan worden naar een eenvoudiger regel, omdat er meer sterkte is ten gevolge van de slibfractie die zorgt voor een lage doorlatendheid en de anisotropie van het watervoerend pakket. Voor de knoop terugschrijdende erosie speelt de slibfractie ook een rol door de hogere erosieweerstand die hiermee samenhangt. In het westelijke rivierengebied kan ook meer gefocust wordt op de knoop opbarsten aangezien deklagen hier veelal dik zijn en er ook situaties zijn waar de rivier niet insnijdt in het watervoerend pakket waardoor de belasting lager is. In situaties waar nog geen wellen geobserveerd zijn kan een actuele sterkte / bewezen sterkte aanpak ook leiden tot een reductie van de kans op overstroming ten gevolge van piping. In het midden rivierengebied, waar zandmeevoerende wellen vaak voorkomen, kan de architectuur van de zandbanen en de geohydrologische situatie relevant kan zijn, en hiervoor is het daarom van belang de onzekerheid met betrekking tot het 3D-effect rondom terugschrijdende erosie te verkleinen. De indeling in gebieden biedt daarnaast de mogelijkheid om ook andere knopen gebiedsspecifiek te evalueren, zodat het gehele proces tot falen in beeld blijft.

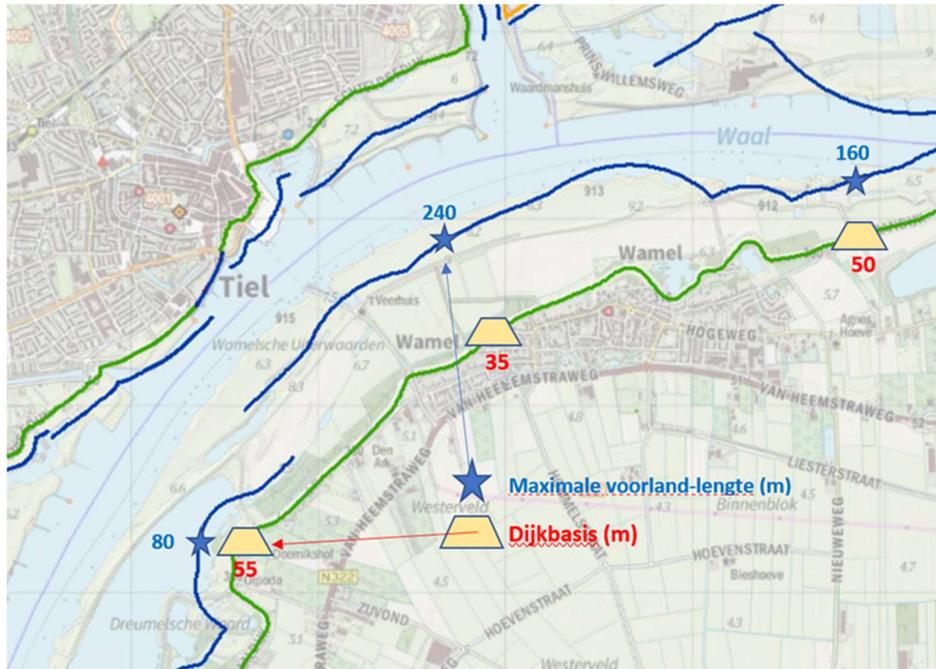
3.5 Indicatie van kostenreductie bij verdergaand gebruik van voorland

Om een idee te krijgen van de consequentie op de vermindering van de versterkingsopgave en de omvang van de kostenreductie is een analyse uitgevoerd voor het rivierengebied waar veel informatie beschikbaar is via de zogenaamde OKADER-studie. OKADER staat voor **O**pgave en **K**osten **A**nalyse **D**ijkversterking **E**n **R**ivierverruiming.

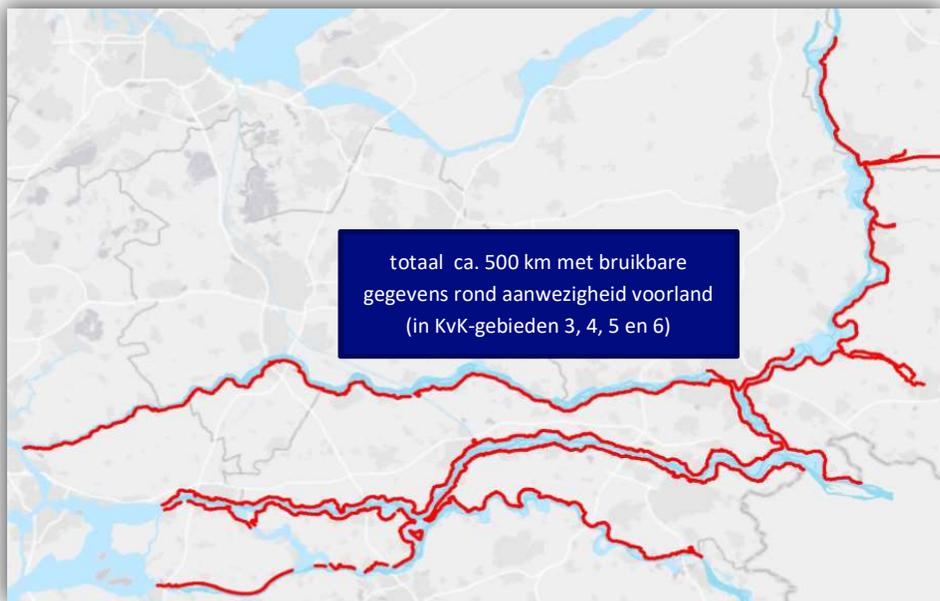
In deze (consequentie)analyse wordt gekeken naar de effecten van de verdergaande inzet van het voorland op de pipingopgave en op de besparingen in dijkversterkingskosten die hiermee bereikt kunnen worden.

In de OKADER-studie is gebruik gemaakt van de vak indeling van VNK-2. Per VNK-dijkvak (gemiddeld ca. 1 km lang) is een dwarsprofiel van de dijk beschikbaar. Hieruit is de dijkbasis of dijkzate per vak

afgeleid, d.w.z. de afstand van de buitenteen tot de binnenteen van de dijk of evt. aanwezige berm. Daarnaast is per dijkvak de maximaal benutbare voorland-lengte vak bekend. In onderstaande figuur is een voorbeeld (met fictieve getallen) gegeven.



Niet alle door de beheerders aangeleverde gegevens over de maximaal benutbare voorland-lengte bleken geschikt voor deze analyse. Er is daarom een selectie gemaakt van de dijkvakken binnen het totale OKADER-gebied. Dit levert ca. 500 km aan dijkvakken op binnen met name de KvK-gebieden 5 en 6 en in zeer beperkte mate in de gebieden 3 en 4 (zie onderstaande figuur).

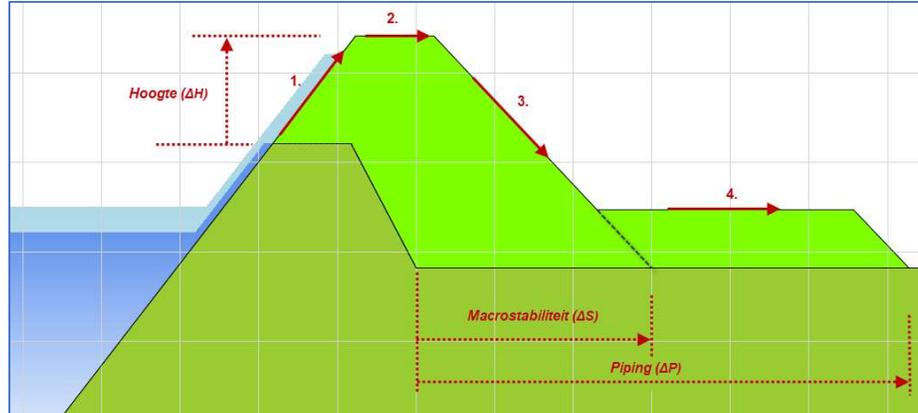


In de huidige praktijk is het meenemen van 1x de dijkbasis of dijkzate aan voorlandlengte (indien aanwezig) bij het bepalen van de aanwezige kwelweglengte gangbaar. Anders gezegd de aanwezige kwelweglengte mag (maximaal) 2x de dijkbasis zijn. Uit het KvK-onderzoek is gebleken dat dit waarschijnlijk opgerekt zou kunnen worden naar 3x de dijkbasis. Maar ook 4x de dijkbasis (indien aanwezig) zou wellicht nog benutbaar kunnen zijn bij het bepalen van de aanwezige kwelweglengte. Dit heeft uiteraard direct gevolgen voor de vermindering van de (versterkings)opgave.

Wanneer wordt gekeken naar de 500 km aan dijkvakken waar deze analyse zich op heeft gericht blijkt dat voor bijna 20% van het areaal maximaal 3x de dijkbasis en ruim 40% maximaal 4x de dijkbasis aanwezig is.

Bepalen van de versterkingskosten

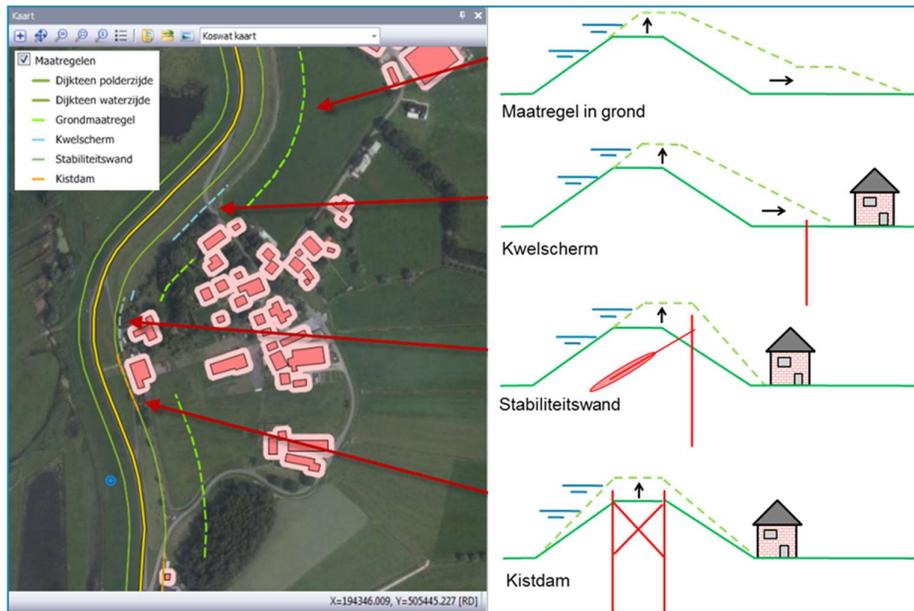
Voor het bepalen van de dijkversterkingskosten voor de 500 km wordt gebruik gemaakt van de rekenroutines in de OKADER tool. In de basis wordt in deze analyse uitgegaan van de dijkversterkingsopgave die in OKADER wordt bepaald om aan de nieuwe norm te voldoen binnen de studies naar de effectiviteit van rivierverruiming (Van der Meij et al., 2016) en (Van Vuren et al., 2016). Deze opgave wordt per dijksectie beschreven in termen van benodigde kruinverhoging, toename van de dijkbasis voor macrostabiliteit en piping (ΔH , ΔS en ΔP) zoals weergegeven in onderstaande figuur. Inzet van het voorland leidt in deze analyse tot een reductie van de berekende pipingopgave ΔP .



Figuur 3.11 Dijkversterkingsopgave voor hoogte, macrostabiliteit en piping

In OKADER wordt bij het bepalen van de dijkversterkingskosten uitgegaan van een database die is opgebouwd in KOSWAT. KOSWAT staat voor **KOS**ten van het versterken van **WAT**erkeringen.

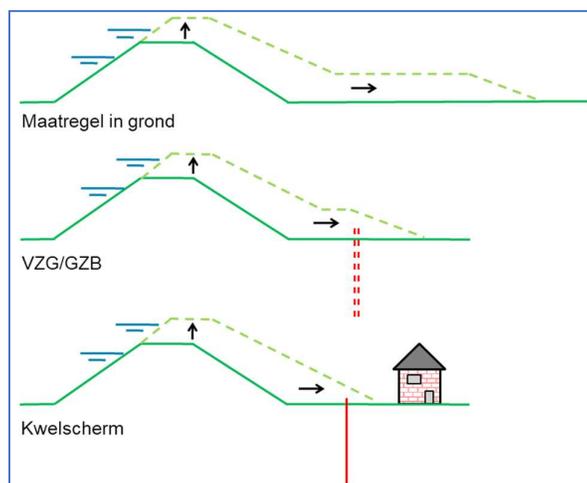
Hierbij zijn dijkversterkingskosten bij verschillende combinaties van ΔH , ΔS en ΔP op voorhand al doorgerekend. In KOSWAT wordt bij een gegeven opgave bepaald welke versterkingsmaatregelen kunnen worden ingepast in de beschikbare ruimte rond de dijk. De dijk wordt versterkt in grond waar voldoende ruimte beschikbaar is, constructief waar bebouwing of andere zaken in de weg liggen. Deze constructieve maatregelen kosten minder ruimte, maar worden wel steeds duurder. Zodoende wordt op een dijkvak bij een bepaalde opgave een mix van maatregelen gevonden, zoals weergegeven in onderstaand figuur. Weginfrastructuur in de versterkingszone van de dijk wordt standaard vervangen. Bij dit totale maatregelenpakket worden de investeringskosten (inclusief BTW) bepaald via de Standaard Systematiek voor Kostenramingen in de GWW sector (SSK).



Figuur 3.12 Dijkversterkingsmaatregelen in KOSWAT

In de rekenroutines in OKADER worden in deze analyse standaard een aantal nabewerkingen gedaan op de kostenramingen. Ten eerste wordt de pipingopgave (ΔP) altijd begrensd op 100 m, met andere woorden, bij een verder toenemende piping opgave lopen de kosten op een gegeven moment niet meer verder op. Daarnaast wordt een grens gesteld aan de maximale (verticale) wandlengte van kwelschermen en damwanden die wordt toegepast. Op de Rijntakken wordt de wandlengte begrensd op 15 meter, op de Maas wordt een maximum wandlengte van 10 meter aangehouden.

Bij het berekenen van de besparingen die met het inzetten van voorland worden bereikt, wordt een tweetal varianten beschouwd; mét en zonder de inzet van een innovatieve pipingmaatregel. Voor de eerste variant zonder innovatieve maatregelen worden de maatregelen en kosten uit KOSWAT zoals weergegeven in Figuur 3.11 (met de bovenstaande restricties) overgenomen. Voor de tweede variant is een nabewerking in de OKADER scripts gedaan, aangezien de kosten van een innovatieve maatregel niet direct in KOSWAT kunnen worden bepaald. Naast de maatregel in grond en het kwelscherm wordt een derde 'pipingmaatregel' geïntroduceerd, namelijk het Verticaal Zanddicht Geotextiel, kortweg VZG. Aangenomen wordt dat deze altijd wordt toegepast in combinatie met een berm met een lengte van 20 meter (De Grave, 2017). In de studie effectiviteit rivierversmalling is voor het VZG een eenheidsprijs (investeringskosten incl. BTW) afgeleid van 1.2 M€/km.



Figuur 3.13 Keuze maatregelen bij pipingopgave

In de rekenroutines wordt een afweging gemaakt op kosten en wordt bepaald over welke trajectlengte een bepaalde maatregel überhaupt mogelijk is (op sommige plekken zal een maatregel in grond of een VZG in combinatie met een berm van 20 meter immers niet passen door aanwezige bebouwing, hier wordt dan alsnog voor een traditioneel kwelscherm gekozen).

Reductie van de versterkingskosten

In onderstaande tabellen zijn de versterkingskosten (totale investeringskosten incl. BTW) en de reductie van de kosten weergegeven uitgaande van traditionele versterkingsmaatregelen en met meenemen van de innovatieve en veel voordeligere VZG-maatregel.

Tabel 3.6 Overzicht versterkingskosten uitgaande van traditionele versterkingsmaatregelen

	Km		Meuro	Meuro/km
OKADER met voorland (maximaal 60 meter)	502	100%	4425	8,8
Opgave Piping zonder voorland(m)	502	100%	4802	9,6
Traditionele versterking				Reductie
	km	%		in Meuro
Opgave piping met voorland maximaal 1x dijkbasis	501	99,9%	4515	-287
Opgave piping met voorland maximaal 2x dijkbasis	478	95%	3912	-603
Opgave piping met voorland maximaal 3x dijkbasis	446	89%	3499	-413
Opgave piping met voorland maximaal 4x dijkbasis	434	86%	3311	-188

In bovenstaande tabel wordt met 'Opgave piping met voorland maximaal 1x dijkbasis' de huidige praktijk bedoeld, waarbij slechts eenmaal de dijkbasis als extra voorland meegenomen mag worden (de maximale kwelweglengte is dan 2x de dijkbasis). Met 'Opgave piping met voorland maximaal 2x dijkbasis' wordt dus 2x de dijkbasis aan voorlandlengte meegenomen. De reductie in kosten is steeds uitgedrukt ten opzichte van de vorige stap. Duidelijk is dat het een substantiële reductie betreft.

Bij 75% 'benutting' van het voorland wordt de reductie bij 2x de dijkbasis aan voorland 474 Meuro (i.p.v. 603 Meuro) en bij 3x de dijkbasis aan voorland 320 Meuro (i.p.v. 413 Meuro).

Tabel 3.7 Overzicht versterkingskosten met meenemen van de innovatieve VZG-maatregel

	Km		Meuro		Meuro/km
OKADER met voorland (maximaal 60 meter)	502	100%	3688		7,3
Opgave Piping zonder voorland(m)	502	100%	3797		7,6
	km	%		Reductie in Meuro	
Opgave piping met voorland maximaal 1x dijkbasis	501	99,9%	3720	-77	7,4
Opgave piping met voorland maximaal 2x dijkbasis	478	95%	3408	-312	7,1
Opgave piping met voorland maximaal 3x dijkbasis	446	89%	3122	-286	7,0
Opgave piping met voorland maximaal 4x dijkbasis	434	86%	2968	-154	6,8

Zowel de absolute investeringskosten als de reductie bij het inzetten van meer voorland bij het meenemen van de innovatieve maatregel af ten opzichte van de traditionele versterkingsmaatregelen.

Bij 75% 'benutting' van het voorland wordt de reductie bij 2x de dijkbasis aan voorland 234 Meuro (i.p.v. 312 Meuro) en bij 3x de dijkbasis aan voorland 231 Meuro (i.p.v. 286 Meuro).

4 Conclusies en aanbevelingen

4.1 Conclusies

In dit rapport is het uitgevoerde onderzoek van het KvK programma van 2019 en 2020 samengevat. Er zijn in deze periode quick scans uitgevoerd naar verschillende onderdelen (Anisotropie, Getijdenafzettingen, Doorlatendheid deklaag en voorland, Observaties, Heave en de 0.3D-regel, Heterogeniteit in de baan van de pipe, Piping in 3D en Gecombineerde effecten) met als doel de beoordeling van piping beter aan te laten sluiten op de praktijk. De synthese van deze onderdelen is te vinden in paragraaf 2.9.

Op basis van de uitkomsten van de deelstudies is een consequentieanalyse uitgevoerd voor Nederland. Hiertoe zijn voor verschillende effecten (slibfractie, helling deklaag, anisotropie, meerlaagsheid, 3D effect / achterland, voorland en de 0.3D-regel) factoren geschat die aangeven hoe deze effecten het kritiek verval voor terugschrijdende erosie beïnvloeden. Er is gekozen voor factoren op het kritieke verval voor terugschrijdende erosie, omdat dit veelal het maatgevende deelmechanisme is, hoewel het uiteraard niet het enige mechanisme is dat een rol speelt in het faalpad. Vervolgens is Nederland verdeeld in deelgebieden, op basis van ondergrondkarakteristieken. Voor elk deelgebied en effect zijn gemiddelde factoren geschat, waarbij opgemerkt wordt dat de situatie lokaal sterk kan afwijken van het gemiddelde, en dat de factoren in sommige gevallen vooruitlopen op nog uit te voeren validatie/onderzoeken en daarmee slechts een indicatie wordt gegeven van wat er verwacht kan worden. De factoren zijn bedoeld om de effecten te kunnen vergelijken per gebied en zo aan te geven welke effecten waar het belangrijkste zijn om een realistische overstromingskans ten gevolge van piping te bepalen. De algemene conclusies uit deze consequentie-analyse zijn als volgt:

- Het 3D-effect en het 0.3D-effect hebben een grote invloed, deels omdat de factoren nog zeer onzeker zijn, deels omdat de verwachting is dat deze factoren een belangrijke rol spelen. Beide effecten kunnen zorgen voor een verlaging van het berekende kritieke verval, maar door de grote mate van onzekerheid zijn er ook veel mogelijkheden om de hier geschatte factoren te optimaliseren.
- De overige effecten hebben een positief effect op het kritieke verval en de onzekerheden zijn door het uitgevoerde KvK onderzoek voor deze effecten veel kleiner geworden.
- De slibfractie en het voorland bieden de grootste potentie om het kritiek verval te verhogen. De factoren zijn mogelijk nog aan de conservatieve kant.
- Anisotropie werkt altijd positief, maar het effect is beduidend lager dan het effect van voorland en slibfractie. Meerlaagsheid heeft alleen een effect wanneer het contrast tussen zandlagen groter is dan 5: dit komt in het SOS niet vaak voor. De invloed van de variatie in helling van de deklaag is klein, op basis van modeluitkomsten.

De deelgebieden vertonen duidelijke verschillen. Hieruit kan het volgende worden geconcludeerd:

- Het 3D-effect en de 0.3D-regel spelen vooral in gebieden met dikke deklaag. Echter, hier worden nauwelijks zandmeevoerende wellen waargenomen, en zonder uittredepunt kan terugschrijdende erosie niet tot bezwijken leiden. In deze gebieden is het, mede gelet op de onzekerheid rondom de fenomenen 3D en 0.3D-regel, wellicht beter te focussen op optimalisatie van het oordeel voor opbarsten.
- Voor de kustgebieden lijkt het kritiek verval hoger te worden door het gecombineerde positieve effect van slibfractie (wat hier mogelijk nog onderschat is) en beperkte negatieve effect van 3D-stroming.

De differentiatie in gebieden biedt mogelijkheden om een gebiedsgerichte aanpak te ontwikkelen. De faalpaden methode is hier heel geschikt voor, omdat de knopen per gebied kunnen worden afgewogen, en omdat hierbij de dialoog tussen experts van verschillende disciplines en beheerders wordt gestimuleerd. Dit zorgt voor een gedragen oordeel en aanpak waar de beheerder in de praktijk mee uit de voeten kan.

4.2 Aanbevelingen

Het doel van het pipingonderzoek van de laatste jaren is om de beoordelings- en ontwerpinstrumentaria beter te laten aansluiten bij de praktijk. Hierdoor ontstaat een realistische en beter onderbouwde pipingopgave die goed uit leggen is aan bijvoorbeeld beheerders en andere belanghebbenden. Een verbeterde aansluiting is onder andere mogelijk door te leren van observaties, een naar gebied gedifferentieerde aanpak te introduceren, een beter begrip te krijgen van het pipingproces en het invoegen van de nieuwe kennis in bestaande en te ontwikkelen modellen.

Het pipingproces kent vele aspecten en dit rapport beschrijft de werkzaamheden die uitgevoerd zijn aan verschillende van deze aspecten. Sommige resultaten leiden duidelijk tot een vermindering van de pipingopgave, maar uit sommige onderzoeken volgen kennisleemtes die in bepaalde situaties ongunstig zijn voor de pipingopgave. Door alle resultaten gezamenlijk te beschouwen ontstaat een eerste beeld van de pipingopgave die ongeveer zal overblijven. Dit beeld zal de komende jaren nog wel aangepast gaan worden, omdat sommige onderzoekslijnen nog volop in ontwikkeling zijn. De belangrijkste voorbeelden hiervan zijn het onderzoek naar getijdenzand, het pipingproces in 3D en de 0.3D-regel.

De onderzoekslijnen bevinden zich dus in verschillende stadia van rijpheid. Er zijn aspecten die direct opgenomen kunnen worden in het BOI, die de beheerder handvaten bieden bij het schematiseren. Daarnaast zijn optimalisaties die nu doorontwikkeld kunnen worden binnen HWPB versterkingsprojecten en de KIA's. Tot slot heeft de toegenomen kennis ook tot aanvullende onderzoeksvragen geleid, die van toepassing zijn op een groot deel van Nederland. Gezien de positieve en negatieve effecten op het kritiek verval en de verschillende mate van rijpheid van de onderzoeken, kan het een discussiepunt zijn hoe en wanneer de kennis naar de praktijk gebracht zou moeten worden. Hierbij zijn verschillende alternatieven denkbaar:

- Beschikbare kennis wordt zo snel mogelijk in de praktijk gebracht, en er wordt een perspectief gegeven voor de onrijpere onderdelen, zodat beheerders kunnen besluiten in hoeverre de effecten van toepassing kan zijn voor hun gebied. Hierbij is het risico dat dit leidt tot schommelingen in de beoordelingsresultaten aangezien de rijpere kennis met name vermindering van de opgave behelst.
- Er wordt gewacht met het in de praktijk brengen van kennis, totdat de onzekerheden over de onrijpe onderdelen wat kleiner zijn geworden, zodat de onderdelen gebalanceerd toegepast worden.
- De beschikbare kennis over zowel rijpere als onrijpe effecten wordt in samenwerking tussen experts en waterschappen in een gebiedsgerichte aanpak toegepast. De faalpaden-methode is hier mogelijk een geschikt instrument voor.

Een groot deel van de in dit rapport behandelde aanscherpingen was mogelijk door de recente ontwikkelingen op gebied van software. Het programma D-Geo Flow/DgFlow³ is gebruikt voor het onderzoek naar anisotropie, effecten van voorland en achterland, de helling van de deklaag, het 3D effect, de drukval in het opbarstkanaal, en de combisommen. Doordat dit een prototype betreft wordt

³ De user interface die breed beschikbaar is heet D-Geo Flow; binnen Deltares kan ook gebruik gemaakt worden van de kernel DgFlow waarin voor onderzoek aanvullende functies beschikbaar zijn. Beide betreffen een prototype.

aanbevolen dit door te ontwikkelen. Het modelleren met DgFlow biedt niet alleen de mogelijkheid om te optimaliseren, maar het biedt ook inzicht in de kennisleemtes omtrent het fysische proces. Met name het 3D-effect, en de mogelijke overschatting van de bijdrage van piping aan de overstromingskans zijn hier van belang.

Voorliggende paragraaf schetst waar de opgedane kennis zou kunnen landen. Hierbij is de indeling voorgesteld op basis van de rijpheid van de kennis, hoewel hier ook andere keuzes in gemaakt kunnen worden. Het doel van onderstaande tekst is om de belangrijkste onderdelen te benoemen. Rijpe kennis kan direct in het BOI landen, dan is er kennis die in HWBP projecten kan worden doorontwikkeld en rijp gemaakt kan worden voor implementatie, en tenslotte is er een aanbeveling voor de opzet van een kennisstrategie die gebiedsgericht invulling geeft aan belangrijke knopen voor de verschillende deelgebieden.

4.2.1 Implementatie in het BOI

- **Verklaringen voor locaties zandmeevoerende wellen in West-Nederland:** dit onderdeel liet zien dat veel, maar niet alle, locaties van (zandmeevoerende) wellen in West-Nederland verklaard kunnen worden vanuit de geologie. Twee aspecten kwamen naar voren: 1) lokale kortsluiting tussen het bovenste zandlichaam en het onderliggende eerste watervoerende pakket en 2) een snelle polderwaartse overgang van zand naar klei. Beide aspecten kunnen uitgebreider aan bod komen in de schematiseringshandleiding piping. Dit biedt beheerders de mogelijkheid om grondonderzoek gericht uit te voeren, pipinggevoelige locaties beter te identificeren en vast te stellen welke locaties een grotere overstromingskans ten gevolge van piping hebben.
- **Effect deklaag:** de theorie omtrent de stijghoogtebepaling in het voorland en achterland kan in de schematiseringshandleiding piping opgenomen worden om deze kennis beter te ontsluiten en toepasbaar te maken.

4.2.2 Doorontwikkeling en implementatie in projecten

De implementatie en doorontwikkeling kunnen zowel in versterkingsprojecten als in de KIA's plaatsvinden, en enkele onderwerpen in het voorliggende rapport vallen hier reeds onder. Een voorstel voor een indeling is hieronder gegeven, echter veel onderwerpen kunnen onder beide typen project vallen.

HWBP versterkingsprojecten

- **Sterkte van getijdezanden:** hiervoor zijn reeds veldproeven in Noord-Friesland (Lontkade), en Zeeland (Hedwigepolder) voorzien. In het kader van het onderzoek in de Hedwigepolder worden ook kleine en medium-schaal proeven uitgevoerd, als ook proeven waarin de gelaagdheid van getijdenzanden wordt nagebootst. Dit onderzoek kan leiden tot een factor waarmee het kritieke verval kan worden verhoogd (afhankelijk van type getijdenafzetting), maar ook tot uitsluitcriteria voor piping in bepaalde geologische afzettingen.
- **Uitgraven van pipes** om zo inzicht te krijgen in de dimensies hiervan. Ook het uitgraven op verschillende tijdsduren na een hoogwater om zo inzicht te krijgen in hoeverre pipes in stand blijven na een hoogwater. Dit wordt in de veldprojecten voor de sterkte van getijdezanden voorzien, maar kan ook vallen onder de KIA. Bevindingen hiervan zijn van belang voor de doorontwikkeling van de modellering van piping en de omgang met 3D-stroming.
- **Anisotropie:** hiervoor worden validatie van de HPT-AMPT techniek in projecten, en ook het bepalen van waarden van anisotropie factoren per afzettingsmilieu aanbevolen. Projecten waarin hier de HPT-AMPT techniek gebruikt wordt zijn ondermeer Spui 20-3, de veldproef in de Hedwigepolder, Wolferen-Sprok, Grebbedijk, en Lontkade. Het beter bepalen van de doorlatendheid is niet onderzocht in het KvK, maar kan ook zeker bijdragen aan een betere beoordeling.

HWBP Kia

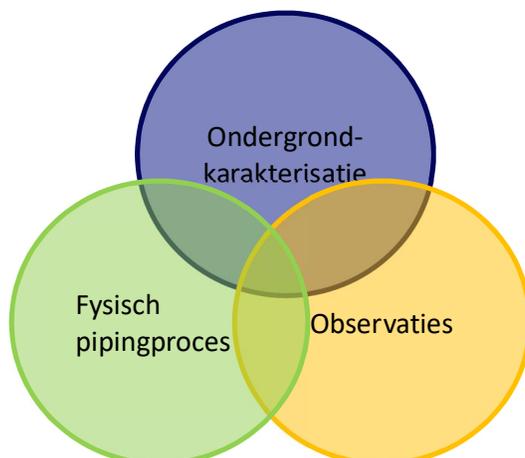
- **Proef Willemspolder:** veldproef in rivierafzettingen.
- **Nader onderzoek naar wellen in Zeeland:** dit onderzoek zou eventueel ook in het kader van HWBP versterkingsprojecten of in het fundamenteelere KvK onderzoek plaats kunnen krijgen. Hierbij gaat het om het verklaren waarom deze wellen worden waargenomen, analoog aan het onderzoek dat in het voorliggende rapport voor andere delen van West-Nederland is gedaan.

4.2.3 Ontwikkeling kennisstrategie

Aanbevolen wordt om een meerjaren Kennisstrategie Piping op te stellen waarin de benodigde kennisontwikkeling die nodig is wordt uitgewerkt. Deze kennisontwikkeling hangt nauw samen met de implementatie van de rijpere kennis in pilots en projecten en de interactie tussen fundamenteel onderzoek en toepassing en verdient daarom een belangrijke rol in deze strategie. De binnen de overkoepelende kennisstrategie aanbevolen kennisontwikkeling of onderzoek kan een plaats krijgen binnen KvK, BOI, de samenwerking met USACE, NWO en SO. Op deze manier kan de maximale impact bereikt worden en worden middelen doelmatig ingezet. Met deze strategie moet een duidelijke, continue lijn uitgezet worden, waardoor efficiënt en doelgericht gewerkt kan worden.

De aanpak voor het piping onderzoek beschreven in van Beek et al. (2016) vormt nog steeds een goede basis voor de verdere kennisontwikkeling, waarin de differentiatie naar deelgebieden een grote rol speelt. Inhoudelijk wordt dit ingevuld aan de hand van de drie kennisvelden die van belang zijn voor piping: ondergrondkarakterisatie, fysisch piping proces en observaties. De aanbevelingen met betrekking tot kennisvragen die volgen uit het voorliggende KvK onderzoek zijn ook in deze kennisvelden onderverdeeld. Een belangrijk onderdeel van de strategie zal ook moeten zijn naar welke type BOI we toe willen gaan werken. Belangrijke uitgangspunten hierbij zijn dat het BOI tot een realistische pipingopgave leidt, gevoed kan worden door lokaal-regionaal meetbare en verifieerbare inputparameters, maar ook recht kan doen aan niet meetbare heterogeniteit van de ondergrond. Hiertoe zal het nodig zijn om een discussie te starten over een gewenste type rekenregel: zoveel mogelijk gestoeld op het beschreven fysische pipingproces uit het laboratorium of meer empirisch, waarbij kennis vanuit het laboratorium en veldproeven gecombineerd wordt?

Deze aanpak zal per gebied verschillen. De faalpaden methode leent zich goed voor het identificeren van en het handvaten ontwikkelen voor de relevante deelmechanismen per gebied. Voor sommige gebieden zal daardoor een verschuiving ontstaan naar andere knopen, terwijl voor andere gebieden, waar veel zandmeevoerende wellen zijn, terugschrijdende erosie een belangrijke knoop blijft.



Figuur 4.1 Relevante kennisvelden voor piping

Observaties

- De faalpaden van bestaande piping cases uitwerken. Hiermee kan mogelijk invulling gegeven worden aan overige knopen in het faalpad waarover nog weinig kennis beschikbaar is (bijvoorbeeld bresgroei), en daarnaast draagt het bij aan de evaluatie van de geschiktheid van verschillende bestaande modellen (te denken aan: DgFlow/D-Geo Flow, het USACE model) en kan invulling gegeven worden aan nieuwe knopen.
- Forensisch onderzoek bij bestaande wellen, dit is eveneens opgenomen bij de veldproeven maar dient breder en voor meerdere geologische gebieden te worden uitgevoerd om zo inzicht te krijgen in de ontwikkeling van pipes en de mate waarin deze blijven bestaan tussen opeenvolgende hoogwaters. Dit bied ook perspectief voor het meenemen van de beperkte duur van de hoogwater belasting bij het bepalen van de overstromingskans voor met name getijdegebieden. Door de beperkte duur van de belasting in het faalpad mee te nemen zal de overstromingskans in getijdegebieden naar verwachting sterk afnemen.
- 0.3D regel door middel van veldmetingen en gevoeligheidsstudies een betere onderbouwing van de 0.3D regel ontwikkelen.
- Bewezen sterkte. Dit is de tegenhanger van smoking guns/cold cases en heeft veel potentie. Eerdere hoogwaters, die van 1995 is nu veel in het nieuws, geven veel inzicht in welke gebieden pipinggevoelig zijn en welke gebieden in mindere mate. Daarnaast kunnen eerdere hoogwaters probabilistisch meegenomen worden in het berekenen van de overstromingskans, maar ook een rol spelen in de faalpaden aanpak.

Ondergrondkarakterisatie

- Het ontwikkelen van een mobiele piping test waarmee in verschillende geologische gebieden in het veld het pipingproces onderzocht kan worden. Hierbij wordt gedacht aan een doorontwikkeling van de methode die wordt gebruikt voor de veldproef getijdenzanden in Friesland. Nader onderzoek naar wellen in Zeeland onderzoek, hiernaar kan ook al binnen HWBP projecten vallen.
- Het ontwikkelen van handvatten om een eenvoudige eerste inschatting van de intredeweerstand van het voorland te bepalen waarmee beheerders ook in afwezigheid van meetgegevens van de waterspanningen al (een deel van de) intredeweerstand van het voorland mee kunnen nemen. Dit heeft impact op verschillende knopen in het faalpad en is zo van groot belang voor een realistische overstromingskans.
- Het vaststellen van criteria waarbij het op basis van deklaag dikte en samenstelling verantwoord is om meer dan 2 maal de dijkbasis aan kwelweglengte mee te nemen in de berekening voor terugschrijdende erosie, bijvoorbeeld bij gebieden met deklagen met diktes in de orde van 4 meter of meer.

Fysisch pipingproces

- Modelering blijft een belangrijke manier om invulling aan verschillende knopen te geven. Voor terugschrijdende erosie is, om invulling te geven aan de schematisatie van 3D zandbanen en de geohydrologische situatie, nadere ontwikkeling van DgFlow als onderzoeksversie van belang. Hiermee kan door experts een onderbouwd handelingsperspectief voor de schematisatie van de ondergrond en de toepasbaarheid van de modellen voor terugschrijdende erosie in dergelijke situaties gegeven worden, waardoor de beheerder niet zelf dergelijke complexe modellen hoeft te gebruiken.

5 Referenties

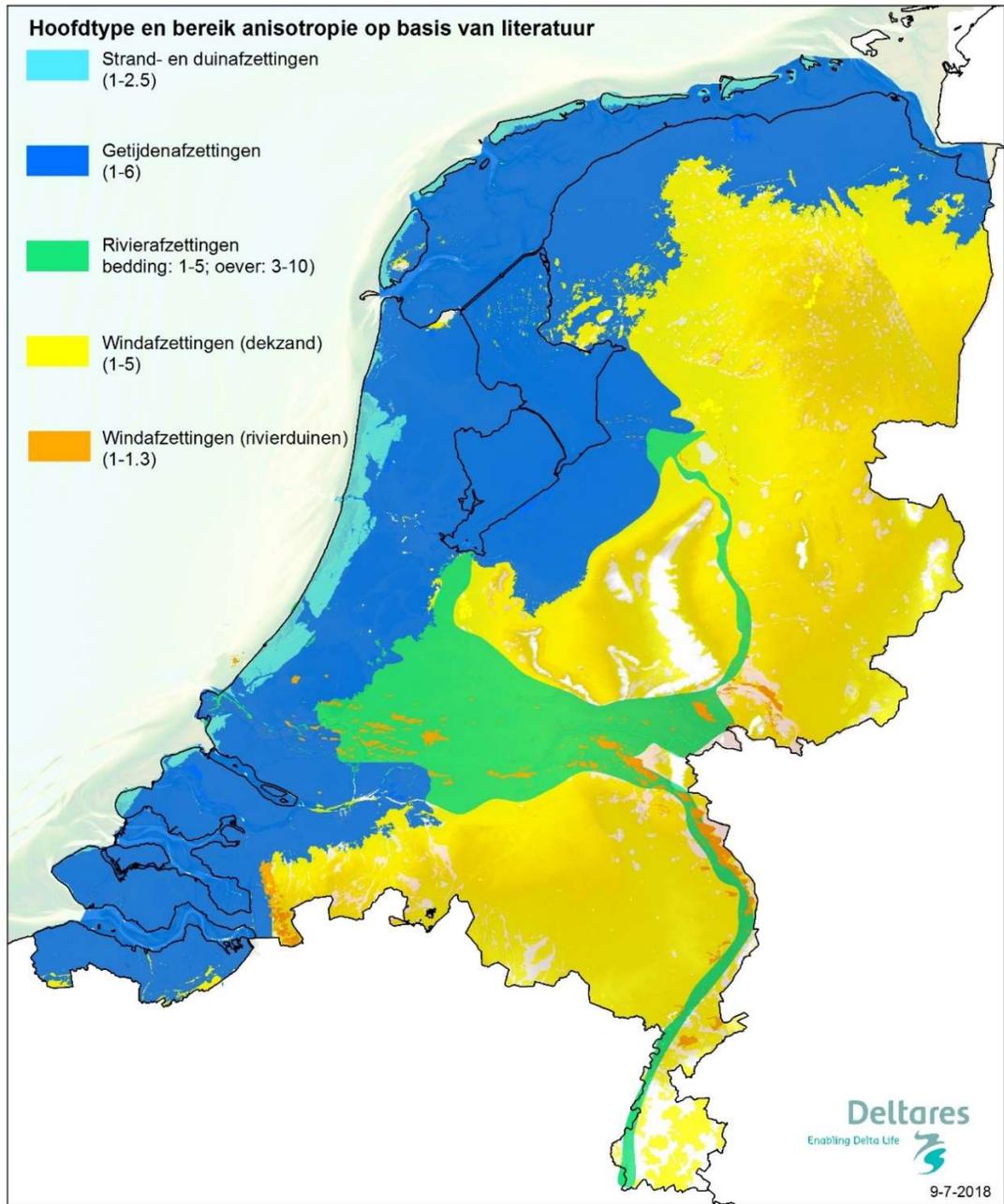
- Allan, R., 2018. Backward Erosion Piping (Doctoral Dissertation). University of New South Wales.
- Bezuijen, A., 2015. Critical vertical gradients in piping - A preliminary sensitivity study concerning the 0.3-D rule.
- Burger, S., De la Loma Gonzalez, B., Kruisdijk, E., Velstra, J., 2018. POV piping - wellen onderzoek: Monitoren en karakteriseren van wellen & piping bij waterkeringen.
- De Grave, P., 2017. Kosten innovatieve pipingmaatregelen voor MKBA-analyse rivieren. Deltares memo d.d. 7 september 2017.
- De la Loma, B., Burger, S., van Beek, V., Noordam, A., 2019. KvK Piping deelproject 016 - Geohydrologische situatie bij een 3D uitstroom.
- De Wit, J., 1984. Onderzoek zandmeevoerende wellen - rapportage modelproeven - CO-220887/10.
- Hijma, M., Oost, A., 2019. Waarom zijn er weinig zandmeevoerende wellen in West- Nederland? Concept Deltares rapport 11202560-015-GEO-0006.
- Hijma, M., 2019. KvK Piping deelproject 011: Getijdenafzettingen en piping (2) - Proeven, begrijpen, toepassen.
- Hijma, M., Oost, A., 2018a. Getijdenafzettingen en piping : een quickscan - Karakteristatie, inventarisatie en demonstratie.
- Hijma, M., Oost, A., 2018b. Getijdenafzettingen en piping : een quickscan. Concept Deltares rapport 11202560-012-GEO-0001.
- Hijma, M., van Beek, V.M., Wiersma, A.P., Kanning, W., 2018. Kennisagenda 2018 - Plan van Aanpak Piping.
- Kanning, W., Berbee, B., Horst, W., Van der Meer, A., Stoop, N., 2018a. KPP Piping - Anisotropie: Verkenning meenemen anisotropie in piping analyses.
- Kanning, W., Berbee, B., Horst, W., Van der Meer, A., Stoop, N., 2018b. KPP Piping - Anisotropie. Concept Deltares rapport 11202560-011-GEO-0003.
- Kanning, W., Hijma, M., van Meerten, H., 2019a. KVK Piping deelproject 014 : Anisotropie KVK Piping deelproject 014 : Anisotropie KVK Piping deelproject 014: Anisotropie - Methodiek voor afleiden rekenwaarde anisotropiefactor.
- Kanning, W., Martins Teixeira, A.C., van Beek, V.M., Robbins, B.A., 2019b. KvK Piping 017: Exploration heterogeneity - Variation of sand properties at micro and meso-scale.
- Koelewijn, A.R., 2009. SWB Hervalidatie piping - E. Evaluatie 0,3d rekenregel.
- Lam, K.S., 2020. KvK Piping deelproject 015: Meenemen van de geohydrologische effecten van het aanwezige voorland.

- Lam, K.S., 2019a. KvK Pping deelproject 015: Effect van een binnensloot op de stijghoogte t.p.v. de binnenteen.
- Lam, K.S., 2019b. KvK Piping deelproject 015: Oprekken van het mee te nemen voorland voor de kwelweglengte.
- Lam, K.S., 2019c. KvK Piping deelproject 015: Doorlatende deklagen in Nederland.
- Lam, K.S., 2018. KPP Piping - doorlatendheid deklaag: eindrapport.
- Navin, M.N., 2016. Kaskasia and Bois Brule levee breaches during the 1993 Mississippi river flood., in: USSD IE Salt Lake City Symposium 2016 - Final Abstract Handout.
- Rice, J.D., 2018. Deeper explanation of 3D aspects of piping initiation and progression.
- Richardson, J.F., Zaki, W.N., 1997. Sedimentation and fluidization: Part I. Process Saf. Environ. Prot. Trans. Inst. Chem. Eng. Part B 75, S82–S100. [https://doi.org/10.1016/s0263-8762\(97\)80006-8](https://doi.org/10.1016/s0263-8762(97)80006-8)
- Robbins, B.A., Griffiths, D.V., Fenton, G.A., 2019a. Influence of spatially variable soil permeability on backward erosion piping, in: 7th International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR 2019) Taipei, Taiwan.
- Robbins, B.A., Stephens, I.J., Van Beek, V.M., Koelewijn, A.R., Bezuijen, A., 2019b. Field measurements of sand boil hydraulics. Geotech. Lett.
- Robbins, Bryant A., Stephens, I.J., Van Beek, V.M., Koelewijn, A.R., Bezuijen, A., 2019. Field measurements of sand boil hydraulics. Géotechnique 1–8. <https://doi.org/10.1680/jgeot.18.p.151>
- Rosenbrand, E., 2020. Mogelijkheid van uitsluiten mechanisme piping door doorlatende deklaag in het achterland.
- Rosenbrand, E., Wiersma, A., 2019. KvK Piping 018: Optimalisaties gecombineerd beschouwen.
- Sellmeijer, J.B., 2006. Numerical computation of seepage erosion below dams (piping). Int. Conf. Scour Eros.
- Tóth, S., 2004. Case Study on Failure Mechanisms of Flood Embankments Due to Rapid Sand Boiling on Alluvial Flood Plains and the Identification of Vulnerable Levee Sections, in: Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering.
- U.S. Army Corps of Engineers, 2000. Engineer and Design - Design and Construction of Levees.
- Van Asselen, S., Hijma, M.P., Kanning, W., 2018. Anisotropie in doorlatendheid - Een literatuuronderzoek naar anisotropie in doorlatendheid en de effecten hiervan op piping.
- Van Beek, V., Onselen, E. van, Hijma, M., 2019. KvK Piping deelproject 017: Verkenning heterogeniteit - Variatie onderkant deklaag.
- Van Beek, V.M., Knoeff, H., Sellmeijer, H., 2011. Observations on the process of backward erosion piping in small-, medium- and full- scale experiments. Eur. J. Environ. Civ. Eng. 15, 1115–1137. <https://doi.org/10.3166/EJECE.15.1115-1137>

- Van Beek, V.M., Van Essen, H.M., Vandenboer, K., Bezuijen, A., 2015. Developments in modelling of backward erosion piping. *Geotechnique* 65, 740–754.
<https://doi.org/10.1680/geot.14.P.119>
- Van Beek, V.M., Wiersma, A.P., 2018. Visie piping en heterogeniteit.
- Vandenboer, K., Bezuijen, A., van Beek, V.M., 2015. 3D character of backward erosion piping: Small-scale experiments, in: *Scour and Erosion - Proceedings of the 7th International Conference on Scour and Erosion, ICSE 2014*.
- Van den Ham, G.A., 2019. IJzendoorn summer levee excavation November 2018.
<https://doi.org/10.7312/hall94068-002>
- Van den Ham, G.A., 2018. KPP Piping - Heave.
- Van der Meij, R., W. ter Horst, S. van Vuren, J. Pol, R. Koopmans, P. van der Scheer, O. Levelt, N. Asselman, P. de Grave & A. de Kruif, 2016. Uitwerking methode voor bepaling kostenreductie rivierverruiming, kostenreductie dijkverbeteringen door uitvoering rivierverruiming. Deltares, HKV lijn in water en Rijkswaterstaat WVL.
- Van Essen, H.M., Kanning, W., van Beek, V.M., 2014. Research and Development of Flood Defense Assessment Tools for Piping in WTI 2017 - Report 12. Heterogeneity. Deltares report 1207809-008-GEO-0003.
- Van Vuren, S., O. Levelt, J. Pol, R. van der Meij, P. de Grave, D. Nugroho, W. ter Horst, R. Koopmans, P. van der Scheer, N. Asselman en A. de Kruif, 2016. Beleidsstudie Kostenreductie Dijkversterking door Rivierverruiming: Toepassing op Rijntakken.
- Vollering, M.P.M., Stoop, N.M., 2019. Memo “Innovatie Voorland Piping – Deelvraag 1: Pipegroei.”
- Wiersma, A., 2018. A review of case histories of Backward Erosion Piping (BEP).

A Kaarten

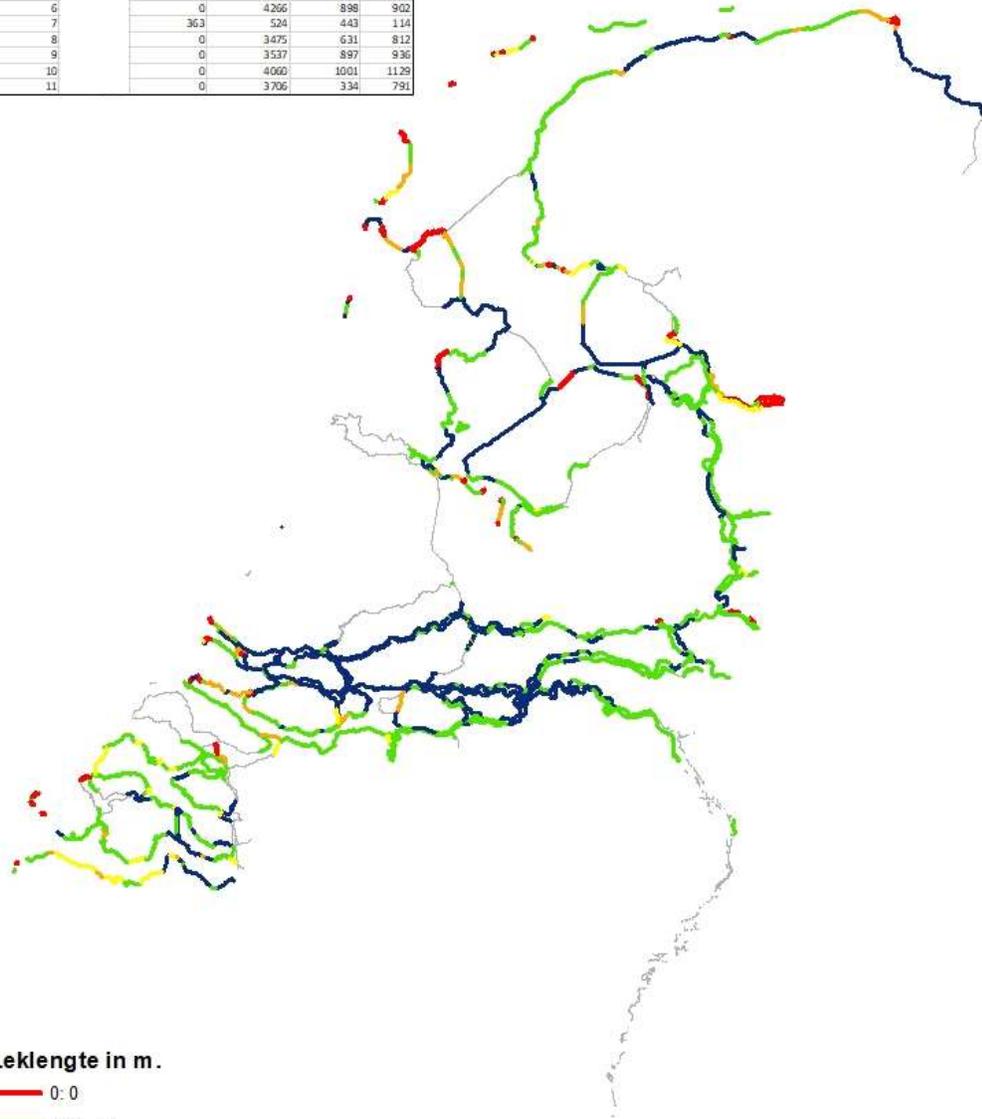
Verwacht bereik anisotropie per hoofdtype bovenste zandlaag



Figuur A.1. Verwacht bereik anisotropiefactor per hoofdtype bovenste zandlaag

Leklengte

DEELGEBIED	MIN	MAX	AVG	StdDEV
0	0	1408	768	670
1	0	927	178	260
2	0	2590	553	612
3	9	3138	527	655
4	0	4266	2025	1089
5	15	4302	1874	1182
6	0	4266	898	902
7	363	524	443	114
8	0	3475	631	812
9	0	3537	897	936
10	0	4060	1001	1129
11	0	3706	334	791



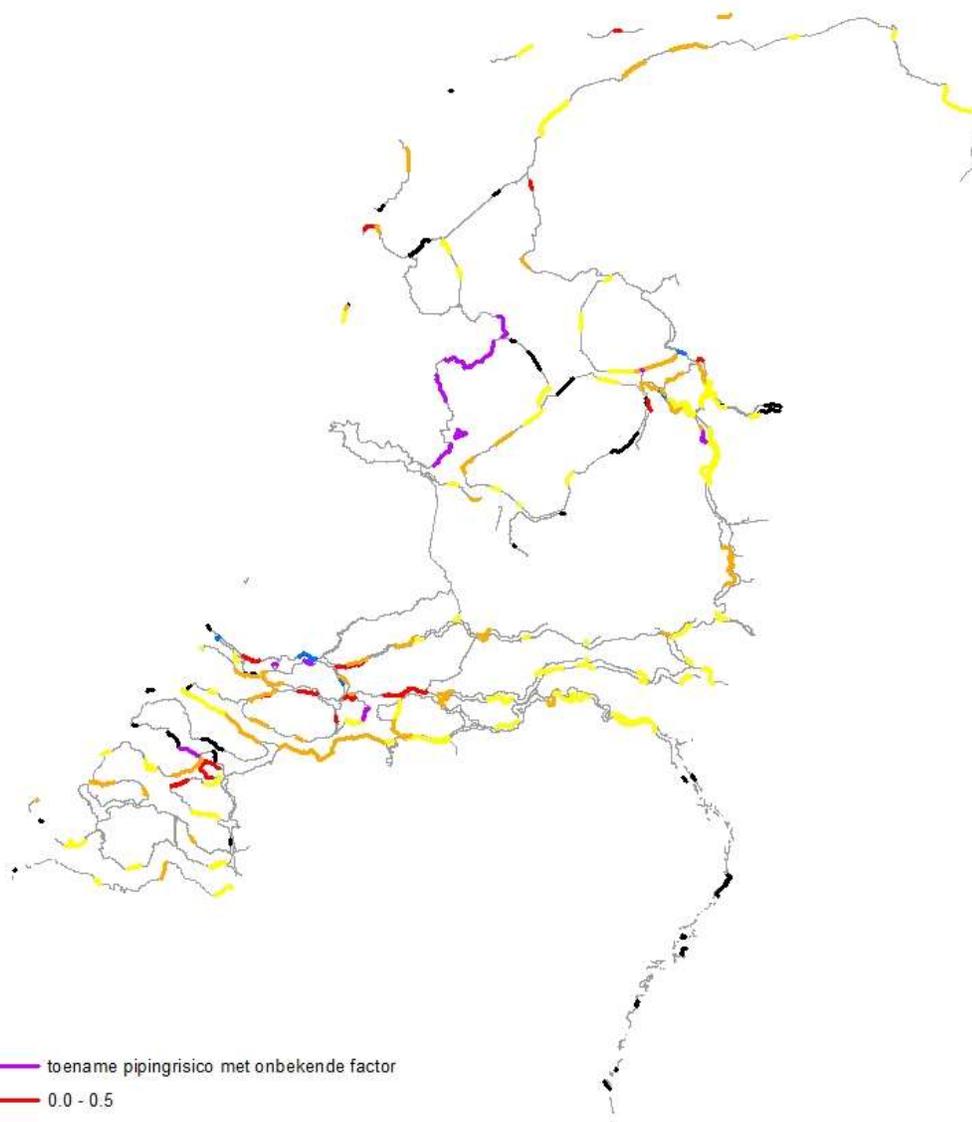
Leklengte in m.

- 0: 0
- 1: 0 - 50
- 2: 50 - 100
- 3: 100 - 1000
- 4: > 1000
- geen waarde

0 10 20 30 40 50 Km

Figuur A.2. Verdeling leklengtes per segment

Factor 01

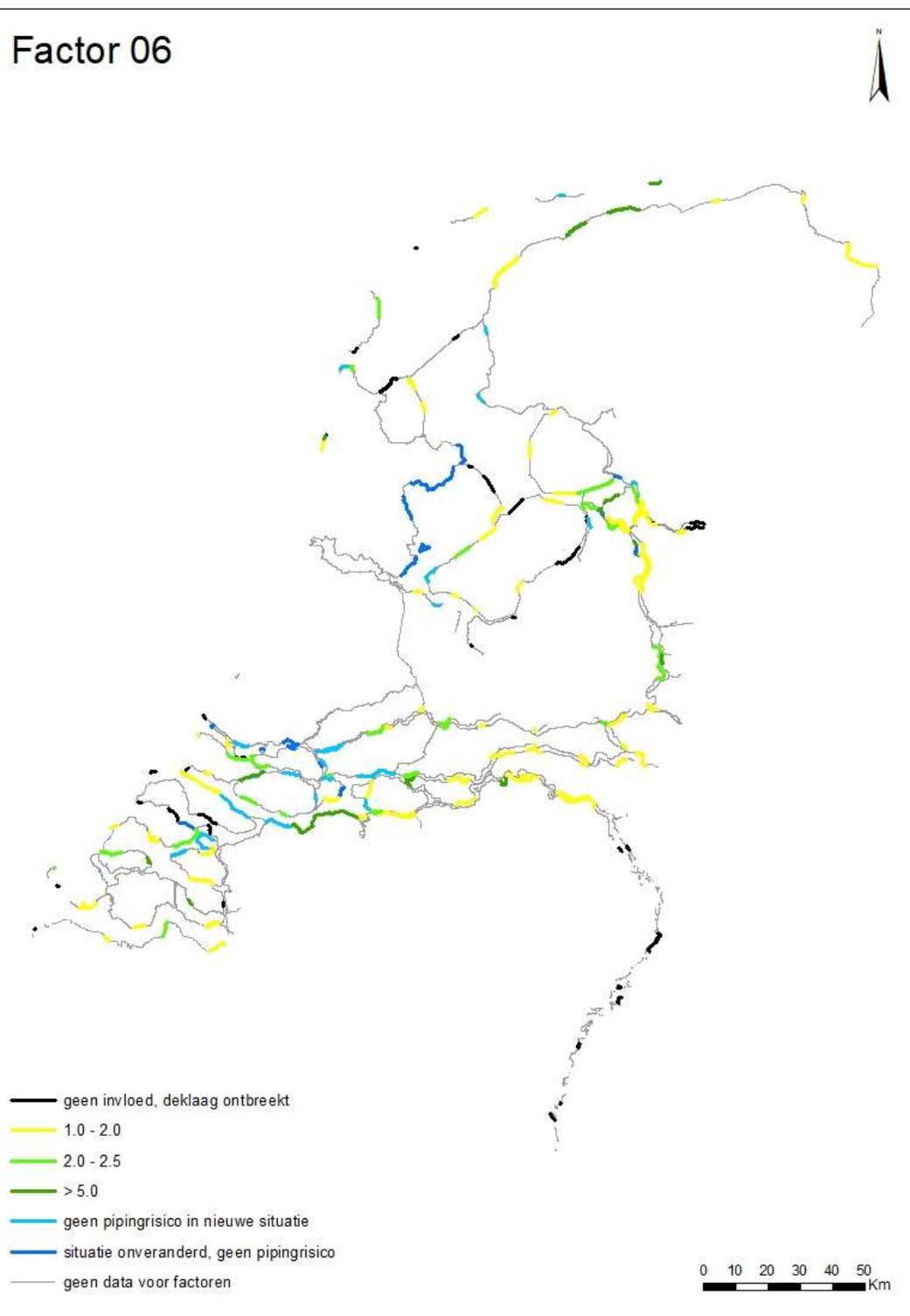


- toename pipingrisico met onbekende factor
- 0.0 - 0.5
- 0.5 - 0.75
- 0.75 - 1.0
- situatie onveranderd, geen pipingrisico
- geen invloed, deklaag ontbreekt
- geen data voor factoren

0 10 20 30 40 50 Km

Figuur A.3. Effect van wijziging 0.3D regel naar 0.1 regel

Factor 06



Figuur A.4. Effect van wijziging 0.3D regel naar 0.6 regel

B Bepaling gemiddelde SOS parameters per segment / scenario

Tabel B.1. Afgeleide parameters per scenario

Soilprofile_id	Segment_Scenario
probability_piping	Kans van voorkomen scenario
top_level	Maaiveldniveau volgens SOS (top level)
D_blanket	<p>Totale Dikte van de deklaag Als de bovenste laag de pipinggevoelige laag is: 0</p> <p>Welke lagen horen bij de deklaag: Alle lagen vanaf het maaiveld tot de pipinggevoelige zandlaag.</p> <p>Wat is de pipinggevoelige laag? - De bovenste zandlaag (sand of loam), tenzij de dikte van de zandlaag ≤ 1 m <i>en</i> de laag eronder is geen sand of loam (ingesloten door cohesief materiaal). In dat geval is de eerste zandlaag een tussenzandlaag, welke behoort tot de deklaag.</p>
No. Sand layers	Aantal zandlagen binnen het eerste watervoerend pakket inclusief de pipinggevoelige laag. De lagen binnen het eerste watervoerend pakket moeten aaneengesloten zijn (sand of loam).
D_WVP	Totale dikte watervoerend pakket. De lagen binnen het eerste watervoerend pakket moeten aaneengesloten zijn (sand of loam).
D_sand1	Dikte pipinggevoelige zandlaag (zandlaag 1)
D_sand2	Resterende dikte watervoerend pakket (D_WVP-D_sand1). Wanneer er geen tweede zandlaag is: 0
k_sand1	Doorlatendheid pipinggevoelige zandlaag
k_sand2	<p>Equivalentente doorlatendheid van zandlaag 2 t/m x binnen het eerste watervoerende pakket.</p> $k_{eq} = \frac{D_2 k_2 + D_3 k_3 + \dots D_x k_x}{\sum D}$ <p>Als er maar 1 zandlaag in het WVP is: 'na'</p>
k_eq	<p>Equivalentente doorlatendheid van zandlaag 1 t/m x binnen het eerste watervoerende pakket:</p> $k_{eq} = \frac{D_1 k_1 + D_2 k_2 + \dots D_x k_x}{\sum D}$

Tabel B.2. Afgeleide parameters per segment

Segment	Segment
D_blanketmean	Gewogen gemiddelde van D_blanket, uitgaande van de probability_piping per scenario.
D_WVPmean	Gewogen gemiddelde van D_WVP, uitgaande van de probability piping per scenario.
k_eqmean	Gewogen gemiddelde van k_eq, uitgaande van de probability piping per scenario.

C Plan van aanpak bepaling drukval in het opbarstkanaal

Onderstaande tekst beschrijft een onderzoeksrichting voor de bepaling van de drukval in het opbarstkanaal, die effect heeft op het deelmechanisme heave en de 0.3D regel, die een belangrijke rol speelt in het deelmechanisme terugschrijdende erosie.

C.1 De 0.3D-regel

De drukval in de wel bij de kritieke situatie is in theorie goed begrepen: het water stroomt door het watervoerend pakket via de pipe en de erosielenen naar het opbarstkanaal. Dit zorgt voor een bepaalde stroomsnelheid in het opbarstkanaal. Bij deze snelheid kan een zekere concentratie van zandkorrels in suspensie worden gehouden. De dichtheid van de suspensie in het opbarstkanaal bepaalt het stijghoogteverschil. Op dit moment wordt verondersteld dat het stijghoogteverschil in het opbarstkanaal (veroorzaakt door de aanwezigheid van de suspensie) altijd $0.3 \cdot D$ is, m.a.w. een gradiënt van 0.3. Dit klopt niet: in theorie varieert de gradiënt van bijna 0 tot 1.

De parameters die op basis van de theorie het stijghoogteverschil bepalen zijn bekend: het verval, de eigenschappen van het watervoerend pakket, de korreldiameter, de lengte van een eventuele pipe, de diameter van het opbarstkanaal en de weerstand van de deklaag (leklengte). Er heeft slechts beperkte validatie van de theorie in de praktijk plaatsgevonden, hoewel er wel enkele metingen zijn. De wel bij de Willemspolder bevestigt dat een suspensie in het opbarstkanaal achter kan blijven en een drukval kan veroorzaken, zelfs hoger dan op basis van het uitgestroomde zand verwacht kan worden, omdat juist een grove fractie achterblijft in het opbarstkanaal en ook de krater die zich vormt boven het opbarstkanaal een bijdrage levert. Er zijn echter ook metingen die aangeven dat de gradient in het opbarstkanaal nabij 0 kan zijn. Ook zijn er metingen uitgevoerd die niet gelukt zijn, omdat het kanaal niet recht was en het niet mogelijk was de apparatuur in de wel te krijgen.

Het verzamelen van meer metingen zou het mogelijk maken om statistiek te bedrijven op de drukval. Uit de praktijk blijkt echter dat het verzamelen van grote hoeveelheden data vrijwel onmogelijk is. De data die door USACE is verzameld, waarbij de gradiënt over de deklaag is gerelateerd aan waarnemingen, kan ook niet benut worden, omdat de metingen in het watervoerend pakket altijd op enige afstand van het opbarstpunt zijn uitgevoerd.

Het locatie-specifiek voorspellen van het stijghoogteverschil in het opbarstkanaal is mogelijk, wanneer er voldoende gegevens zijn. De aanpak die hiervoor gevolgd wordt is als volgt (van den Ham, 2018):

- Uitvoeren van een 3D stromingsberekening (met of zonder pipe)
- Beschouwen debiet bij uitstroompunt
- Inschatten van het verhang in het opbarstkanaal op basis van het debiet en de doorlatendheid van het gefluïdiseerde zand (Richardson and Zaki, 1997)
- Nogmaals 3D gws berekening uitvoeren met berekend stijghoogteverschil, en opnieuw vaststellen stijghoogteverschil op basis van debiet en Richardson en Zaki.
- Iteratie totdat het berekende stijghoogteverschil op basis van grondwaterstroming overeenkomt met het stijghoogteverschil op basis van debiet en Richardson en Zaki.

Idealiter zijn de berekening van de grondwaterstroming en de berekening van het stijghoogteverschil met elkaar gekoppeld. Dit is voor numerieke 3D berekeningen nog niet het geval, waardoor de berekeningen iteratief en daarmee tijdrovend zijn. Een analytisch model, zoals dat van Bezuijen (2019) doet enkele aannames ten aanzien van het aanstroomgebied (bolvormig), maar biedt wel de mogelijkheid om snel veel variaties door te rekenen doordat het stijghoogteverschil in het opbarstkanaal en de grondwaterstroming gekoppeld zijn. Doordat de 0.3D regel wordt toegepast op het moment dat de pipe al zijn kritieke lengte heeft bereikt dient voor gebruik van het model van Bezuijen een inschatting gemaakt te worden van het aanstroomoppervlak. De vergelijking van resultaten op basis van 3D numerieke berekeningen en de analytische methode biedt de mogelijkheid om de invoer van het analytische model beter in te schatten.

Een belangrijke onbekende bij het inschatten van de stijghoogte in het opbarstkanaal is de diameter. Deze diameter kan met behulp van scenario's worden meegenomen. Door gevoeligheidsanalyses uit te voeren kan voor verschillende situaties ingeschat worden wat het stijghoogteverschil in het opbarstkanaal is. Zo kan er per gebied / per set parameters een verwachtingswaarde worden afgeleid voor de gradiënt in het opbarstkanaal.

De vraag rijst dan, gezien de onzekerheden, of het niet nuttiger is om zonder berekeningen een schatting te maken van de kritieke gradiënt, op basis van expert judgement. Dat zou een alternatief kunnen zijn, maar de consequentie is dan dat de gradiënt vermoedelijk aan de lage kant zal liggen, omdat de aanpak wel verantwoord moet zijn. Gezien de impact van de 0.3D regel lijkt een benadering op basis van de theorie beter aan te sluiten bij de praktijk.

Het handelingsperspectief voor het toewerken naar een verwachtingswaarde van de gradiënt in het opbarstkanaal in de praktijk is als volgt:

- Toepassen van de theorie in de praktijk door het narekenen van een praktijkcase (bijv. meting bij de Willemspolder, maar liever nog een case met meer kennis van de erosielens) met numerieke 3D berekeningen
- Vergelijken van enkele 3D numerieke berekeningen met het analytisch model (Bezuijen, 2019) om het aanstroomoppervlak in het analytisch model in te schatten.
- Uitvoeren van gevoeligheidsstudies, op basis van het analytische model, voor cases representatief voor gebieden in Nederland

Go- no go: Op basis van de gevoeligheidsstudies kan worden ingeschat of het zinvol is door te gaan met deze aanpak, of dat een expert judgement bepaling dezelfde mate van nauwkeurigheid geeft

- Inschatten van kansverdeling op scenario's in een expertsessie en afleiden verwachtingswaarden voor de gradient in het opbarstkanaal voor de gekozen cases.
- Afhankelijk van de resultaten: opleveren van waarden voor Nederland / opstellen methodiek voor de bepaling van de gradiënt in het opbarstkanaal.

C.2 Heave

Heave is een deelspoor in de beoordeling van piping, samen met opbarsten en terugschrijdende erosie. Deze 3 mechanismen moeten allemaal optreden om piping te veroorzaken. De gedachte achter het heave spoor is dat de korrels naar het oppervlak moeten worden afgevoerd, en dat dit een minimale gradiënt vereist: de kritieke waarde voor het optreden van heave is op 0.3 gezet, analoog aan de 0.3D regel. Opmerkelijk is dat de optredende gradiënt bepaald wordt aan de hand van de stijghoogte voorafgaand aan opbarsten, terwijl opbarsten eerst moet optreden voordat heave op kan treden. Dit is opmerkelijk omdat opbarsten de geohydrologische situatie verandert, en de gradiënt voor opbarsten dus niet representatief hoeft te zijn voor de situatie van heave.

Net zoals voor de 0.3D regel is er ook voor de gehanteerde kritieke heave gradiënt geen theoretische grond. De heave toets zou zich er op moeten richten om te bekijken of de snelheid in het opbarstkanaal na opbarsten groot genoeg is om een zand-watermengsel naar het oppervlak te brengen.

De grondwaterstromingssituatie is iets anders bij heave dan bij de kritieke situatie voor terugschrijdende erosie. Bij terugschrijdende erosie is de pipe al op de kritieke lengte en daardoor is het aanstroomoppervlak al vrij groot, waardoor ook het debiet naar het opbarstkanaal hoog is. Bij heave is er nog geen pipe waardoor het aanstroomoppervlak en ook het debiet nog beperkt zijn. Mogelijk is de snelheid op dat moment onvoldoende om de korrels naar het oppervlak te brengen. Daarom zou bij deze situatie geëvalueerd moeten worden wat de snelheid in het opbarstkanaal is. Dit is goed mogelijk met het analytische model van Bezuijen, omdat dit model een lens veronderstelt met in te geven afmeting, om vast te stellen wat het debiet is.

Het handelingsperspectief voor het toewerken naar een onderbouwde heave toets loopt parallel aan de activiteiten voor de 0.3D regel:

- Benutten gevoeligheidsstudie voor 0.3D regel met aangepaste lensdiameter, om vast te stellen of er transport kan zijn voor geleidelijk toenemende lensdiameter. Hierbij kan uitgegaan worden van een kanaal dat in eerste instantie leeg is, of al gevuld met een slurry van zand en water.

Go – no go: Op basis van deze gevoeligheidsstudie kan worden vastgesteld of het zinvol is door te gaan naar de volgende stappen, of dat de heave toets wordt afgeschaft.

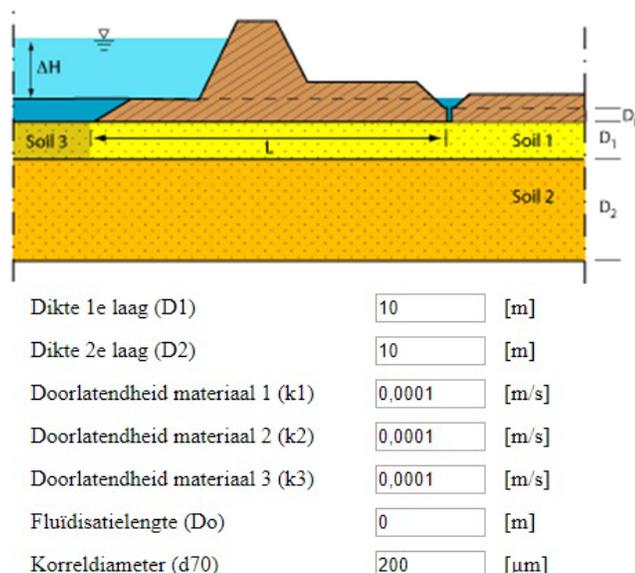
- Validatie van het verloop van heave in een situatie met een opbarstkanaal in proeven en 3D simulatie van deze proeven.
- Methodiek opstellen voor de heave toets. Hierbij moet een kansverdeling worden toegekend aan de diameter van het opbarstkanaal (zie ook expertsessie 0.3D-regel)

D Analyse meerlaagsheid

Hoewel er geen studie is uitgevoerd naar het effect van meerlaagsheid op het kritiek verval, is er in het kader van VNK wel onderzoek naar gedaan, wat geresulteerd heeft in een neurale netwerk (NN-VNK) voor het berekenen van het kritiek verval bij twee lagen (Sellmeijer, 2006). Met behulp van dit netwerk is bepaald welke parameters invloed hebben op de toename van het kritiek verval bij meerlaagsheid.

D.1 Aanpak

Het effect van meerlaagsheid op het kritieke verval is geanalyseerd door met behulp van het NN-VNK het kritieke verval te berekenen voor een meerlaagse situatie en voor de situatie waarbij beide lagen de equivalente doorlatendheid hebben.



Figuur D.1.1 Schematisatie van neurale netwerk en invoerparameters (<https://dserie.deltares.nl/DGWebPiping/VNK.aspx>)

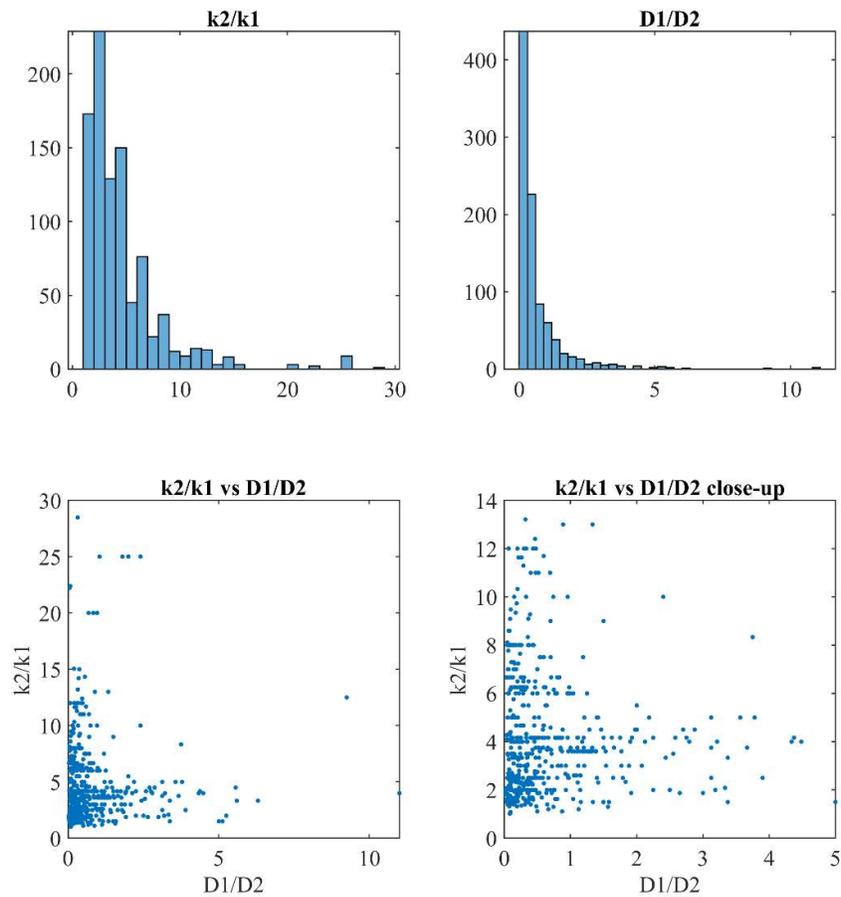
D.2 Overzicht van de analyse

Factoren die naar verwachting een belangrijk effect hebben zijn $D1/D2$, $k2/k1$, en L/D , waar $D = D1 + D2$. Hierdoor zijn veel combinaties mogelijk. Om de analyse uit te voeren met relevante parameters is op basis van gegevens uit het SOS gekeken naar welke combinaties daadwerkelijk voorkomen in de ondergrond scenario's.

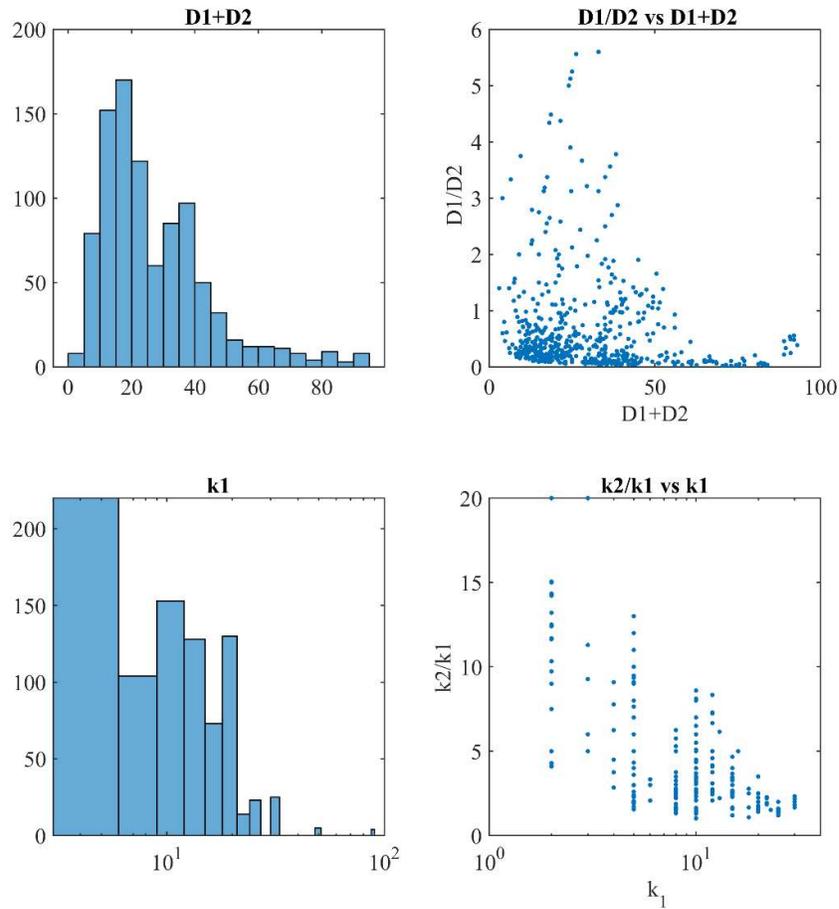
Voor alle scenario's is een overzicht gemaakt van de dikte en doorlatendheid van de aaneengesloten (niet door cohesieve lagen onderbroken) lagen in het watervoerend pakket. Indien er meer dan 2 lagen aanwezig zijn, zijn de 2^{de} en volgende lagen gebundeld en is hiervoor de equivalente doorlatendheid genomen.

Scenario's met minder dan 2 lagen zijn niet beschouwd. Vervolgens zijn ook lagen waar $k_2 < k_1$ verwijderd. Deze kunnen wel voorkomen maar dan is de aanpak met een gewogen gemiddelde doorlatendheid niet conservatief.

Een overzicht van de frequentie van voorkomen van $D1/D2$, $k2/k1$ is in onderstaande figuren gegeven. Bemerkt wordt dat dit geen inzicht geeft in de kans van voorkomen, of in de lengte van de trajecten waarvoor deze scenario's zijn opgesteld. De scenario's bieden ook geen inzicht in de waarde van L .



Figuur D.2.1 Overzicht van frequentie van voorkomen van combinaties in SOS scenario's.



Figuur D.2.2 Overzicht van frequentie van voorkomen van combinaties in SOS scenario's.

Een samenvatting van de gegevens is in onderstaande tabel opgenomen.

	Gemiddelde	Mediaan	Mode	Minimum	Maximum	Standaardafwijking
$D1 + D2$ m	27.0	15.0	22.0	3.0	93.0	17.1
$D1$ m	7.3	4.0	4.4	1.3	33.0	6.9
$D2$ m	19.7	8.0	14.7	1.0	81.0	15.6
$k1$ m/dag	11.7	5.0	10.0	1.0	90.0	8.8
$k2$ m/dag	38.3	50.0	40.0	7.8	100.0	19.8
k_{eq} m/dag	30.6	42.0	30.6	4.2	96.7	17.5
$k2/k1$	4.4	4.2	3.5	1.0	28.5	3.7
$D1/D2$	0.7	0.3	0.3	0.02	11.0	1.0

Op basis van deze gegevens is een eerste analyse gemaakt met de volgende combinaties:

$$\begin{aligned}
 L &= 35 \text{ m} \\
 D1 + D2 &= 22 \text{ m} \\
 K1 &= 10 \text{ m/d} \\
 \frac{D1}{D2} &= 0.05; 0.1; 0.2; 0.4; 0.8; 1; 2; 5 \\
 \frac{k2}{k1} &= 1.5; 2; 4; 8; 16; 25
 \end{aligned}$$

Om het effect van L/D te beschouwen zijn aanvullend analyses gedaan met $\frac{k2}{k1} = 16$ (gekozen is een contrast waarbij het effect relatief groot is).

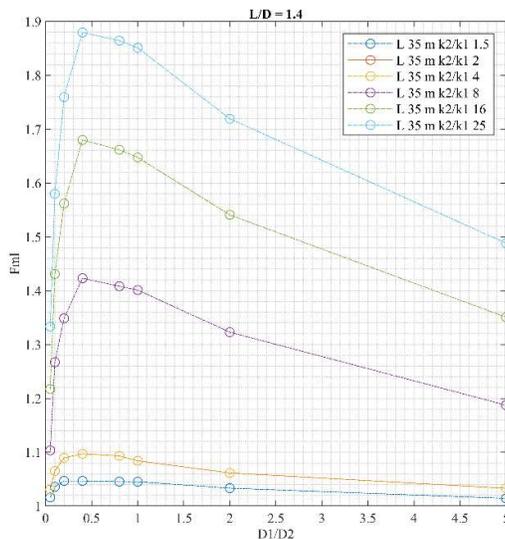
$$\begin{aligned}
 L &= 15; 50; 125 \text{ m} \left(\frac{L}{D} = 0.6; 50; 125 \right) \\
 D1 + D2 &= 22 \text{ m} \\
 K1 &= 10 \text{ m/d} \\
 \frac{D1}{D2} &= 0.05; 0.1; 0.2; 0.4; 0.8; 1; 2; 5 \\
 \frac{k2}{k1} &= 16
 \end{aligned}$$

D.3 Resultaten en analyse

De resultaten zijn in onderstaande figuren getoond. Hierbij worden de effecten getoond in termen van een meerlaagsheidsfactor F_{ml} die de verhouding tussen het kritiek verval voor een meerlaagse situatie gedeeld door het kritiek verval voor een situatie met een equivalente doorlatendheid:

$$F_{ml} = \frac{Hc1laag}{Hcmeerlaags}$$

Figuur D.4 toont het effect van $k2/k1$, en $D1/D2$ voor de eerste serie berekeningen waar de lengte constant is gehouden ($L/D = 1.4$, $L = 35 \text{ m}$, $D = 22 \text{ m}$).



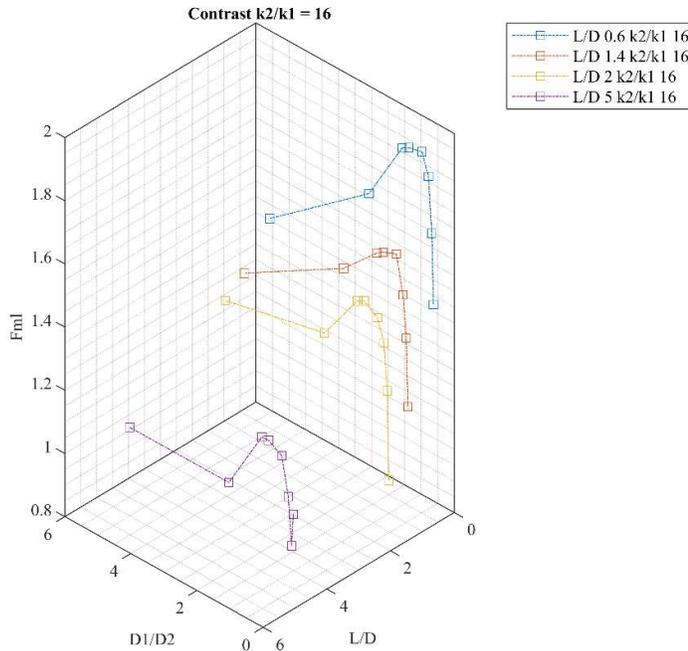
Figuur D.3.1 Effect van $D1/D2$ op het effect van meerlaagsheid voor een L/D verhouding van 1.4 ($L = 35 \text{ m}$, $D = 22 \text{ m}$) voor verschillende $k2/k1$.

Voor contrasten kleiner dan 5 is het effect voor alle $D1/D2$ minder dan 1.1. Dit betreft 73% van de SOS scenario's.

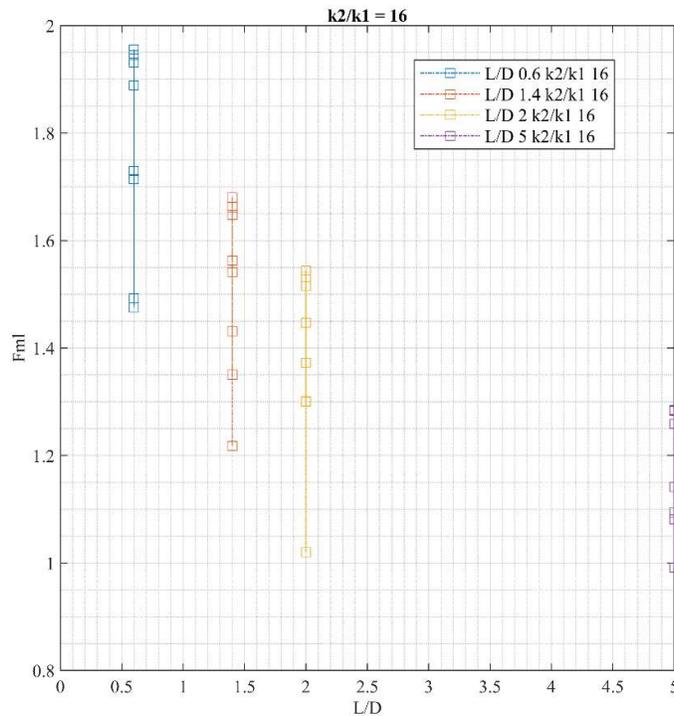
Voor hogere contrasten neemt het effect van meerlaagsheid toe afhankelijk van $D1/D2$.

- Voor hele lage $D1/D2$ (tussen en 0.25) neemt het effect sterk toe met toenemende $D1/D2$. Hier is de bovenste laag erg dun ten opzichte van de onderste laag waardoor de grondwaterstroming sterk gedomineerd wordt door de onderste laag. Daardoor lijkt deze situatie meer op een 1-laagse situatie.
 - o Deze situatie betreft 11% van de SOS scenario's.
- Voor $D1/D2$ tussen ca. 0.25 en 2 wordt een maximum bereikt. Dit is het gebied waar daadwerkelijk twee langens gezamenlijk de waterspanningen beïnvloeden, en hier is het effect van meerlaagsheid significant. Voor hoge contrasten $k2/k1$ kan dit tot een factor 2 toenemen.
 - o Deze situatie betreft 14% van de SOS scenario's.
- Het effect neemt af voor $D1/D2 > 2$, hierbij wordt de invloed van de onderliggende laag minder.
 - o Deze situatie betreft 2% van de SOS scenario's.

Het effect van L/D is in Figuur D5 en Figuur D6 getoond. Een grotere L/D leidt tot een kleiner effect van meerlaagsheid. Dit heeft naar verwachting te maken met het effect van de kwelweglengte op de stijghoogte contouren onder de dijk. Bij een kleinere L/D is de kromming hiervan sterker waardoor het effect van meerlaagsheid ook groter is.



Figuur D.3.2 Effect van $D1/D2$ en L/D op het effect van meerlaagsheid op het kritiek verval voor contrast $k2/k1=16$



Figuur D.3.3 Effect van L/D op het effect van meerlaagsheid op het kritiek verval voor contrast $k_2/k_1=16$

D.4 Conclusies

Voor contrasten kleiner dan 5 is het effect van meerlaagsheid minder dan 1.1 voor alle hier beschouwde D_1/D_2 verhoudingen. Dat betreft 73% van de SOS scenario's. De aanname is hier dat het SOS een goed beeld geeft van het voorkomen van gelaagdheid in de ondergrond. In de praktijk zal altijd de lokale situatie beschouwd moeten worden.

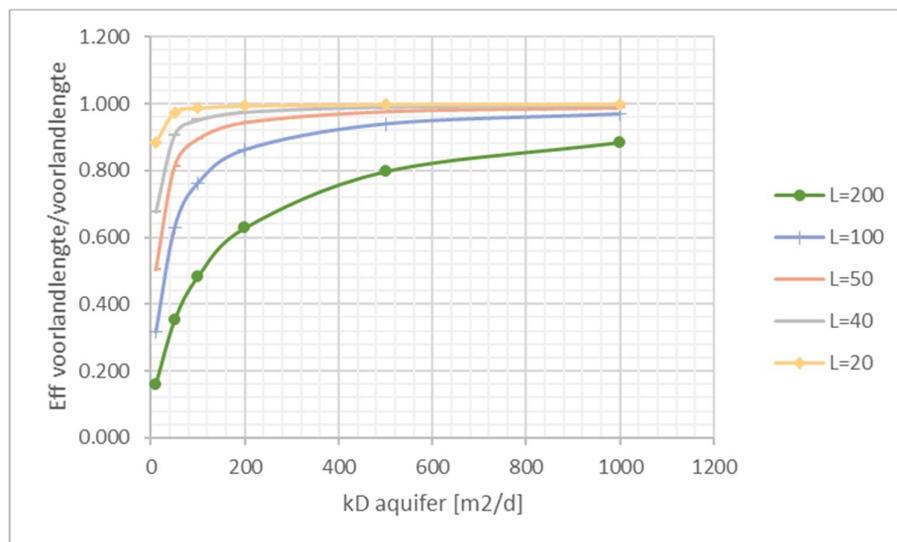
Wanneer het contrast groter is (27% van de scenario's) is er een grote variatie in het effect van meerlaagsheid, tussen een factor 1.1 en 2 afhankelijk van L/D , D_1/D_2 en van k_2/k_1 .

Hier is dus mogelijk een aanscherping te behalen mits $\frac{k_2}{k_1} > 5$. Het effect van meerlaagsheid is dan het grootste bij een lage L/D , dit zijn juist die situaties die gevoelig zijn voor piping door een korte kwelweglengte in combinatie met een dik watervoerend pakket.

Om het potentieel van meerlaagsheid weer te geven aan de hand van de SOS data kan geen gebruik gemaakt worden van L/D aangezien L afhankelijk is van de lokale geometrie. Wel kan gesteld worden dat op locaties waar $\frac{k_2}{k_1} < 5$ er relatief weinig aanscherping te behalen valt. Aangezien er meerdere scenario's per vak mogelijk zijn, per vak bepaald of de kans van scenario's met $\frac{k_2}{k_1} > 5$ groter is dan 50%. Voor deze vakken is mogelijk winst te behalen door meerlaagsheid mee te nemen.

E Effectieve voorlandlengte

De effectieve voorlandlengte is afhankelijk van de leklengte van het voorland en van de voorlandlengte. In onderstaande figuren is weergegeven hoe de verhouding is tussen effectieve voorlandlengte en totale voorlandlengte voor verschillende voorlandlengtes en kD waarden van het watervoerend pakket. Hierbij is uitgegaan van een voorland met weerstand van 100 dagen (dikte 1 m en doorlatendheid 0.01 m/d). Uit de figuur blijkt dat de ratio tussen effectieve voorlandlengte en totale voorlandlengte snel toeneemt bij toename van de aanwezige voorlandlengte en de kD-waarde. Voor gevallen in de praktijk waarbij de voorlandlengte groter is dan 100 m, kan meestal het gehele voorland worden meegenomen.



Figuur D.4.1 Effect van kD en voorlandlengte op ratio effectieve voorlandlengte en totale voorlandlengte

KvK Piping deelproject 019: Syntheserapport