

KvK Piping 2018-2019: toepassing ontwikkelde kennis

Overzicht kennisontwikkeling KvK 2018-2019 voor beheerders en ontwerpers



KvK Piping 2018-2019 Toepassing ontwikkelde kennis

Overzicht kennisontwikkeling KvK 2018-2019 voor beheerders en ontwerpers

Auteur(s)

Esther Rosenbrand

Han Knoeff

CONCEPT

KvK Piping 2018-2019 Toepassing ontwikkelde kennis

Overzicht kennisontwikkeling KvK 2018-2019 voor beheerders en ontwerpers

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	de heer H. van Hemert
Referenties	Referenties
Trefwoorden	Trefwoorden

Documentgegevens

Versie	0.1
Datum	21-07-2020
Projectnummer	11205262-022
Document ID	11205262-022-GEO-0001
Pagina's	62
Classificatie	
Status	concept Dit document is een concept en uitsluitend bedoeld voor discussiedoeleinden. Aan de inhoud van dit rapport kunnen noch door de opdrachtgever, noch door derden rechten worden ontleend.

Auteur(s)

	Esther Rosenbrand	
	Han Knoeff	

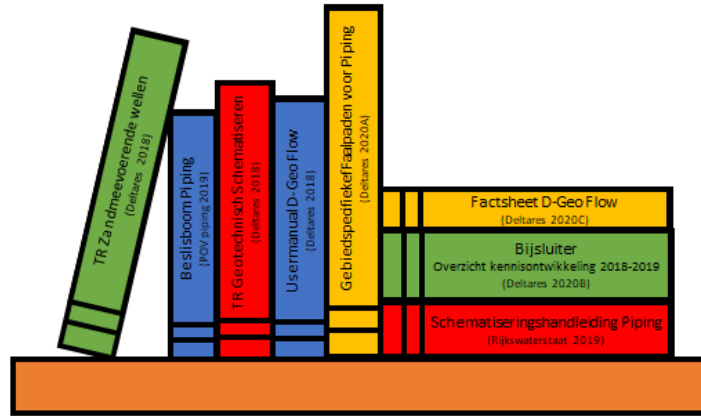
Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.1	Esther Rosenbrand	Vera van Beek	Leo Voogt	
	Han Knoeff			

Samenvatting

Uit de beoordeling volgt dat piping een grote bijdrage levert aan de overstromingskans van veel dijktrajecten. De hoge faalkansen die worden berekend sluiten in de praktijk echter vaak niet aan bij het gevoel van de beheerder. Een belangrijke oorzaak van deze discrepantie is dat in de beoordeling niet het gehele proces van initiatie tot een overstroming ten gevolge van piping wordt meegenomen en de faalkans wordt benadert met de gedetailleerde toets. In de gedetailleerde toets wordt alleen het deelmechanisme terugschrijdende erosie beschouwd. Dit deelmechanisme wordt geanalyseerd met de rekenregel van Sellmeijer, die is afgeleid onder geïdealiseerde omstandigheden. In de rekenregel kunnen verschillende aspecten die een groot effect kunnen hebben op de overstromingskans onvoldoende worden meegenomen.

In het programma Kennis voor Keringen (KvK) in 2018 en 2019 zijn verschillende factoren beschouwd waarmee een verfijndere pipinganalyse mogelijk is. Onderzoek is uitgevoerd 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. Deze effecten beïnvloeden verschillende knopen in het faalpad, met name het effect op terugschrijdende erosie, en in mindere mate opbarsten en heave. De optimalisaties kunnen zowel positieve als negatieve effecten hebben op de berekende overstromingskans. De mate waarin de effecten de beoordeling beïnvloeden is afhankelijk van lokale kenmerken die regionaal kunnen verschillen. In het Deltares Strategisch Onderzoek is op basis van gebiedsspecifieke kenmerken van de ondergrond en de hydraulische belastingen een grove indeling van Nederland gemaakt in vier gebieden. Per gebied is inzichtelijk gemaakt welke aspecten naar verwachting het meeste effect hebben, in het rapport Gebiedsspecifieke Faalpaden.

Dit concept rapport ontsluit het KvK Piping 2018 - 2019 onderzoek in de structuur van het faalpad voor piping. Het biedt beheerders handvatten om tot een realistischere bepaling van de kans op piping te komen, rekening houdend met de nieuwe inzichten. Aangezien veel van de kennis nog niet is gevalideerd wordt aangegeven hoe hier in gevoeligheidsanalyses mee omgegaan kan worden. Het doel is om de beheerder in staat te stellen een weloverwogen besluit te nemen over het toepassen van de ontwikkelde kennis die relevant is voor zijn gebied. Daarom is in de bijlage een samenvatting uit de gebiedsspecifieke faalpaden opgenomen.



Documenten die de beoordeling van piping ondersteunen

CONCEPT

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
1.1	Aanleiding en achtergrond	8
1.2	Doel	8
1.3	Doelgroep	9
1.4	Overkoepelend piping overzicht	9
1.5	Leeswijzer	9
2	Omgang nieuwe kennis piping bij beoordelen en versterken	11
2.1	Inleiding	11
2.2	Kaders vanuit wet en regelgeving rondom toepassen nieuwe kennis bij beoordelen en versterken	11
2.2.1	Algemeen	11
2.2.2	Beoordeling: Stabiele veiligheidsopgave	12
2.2.3	Ontwerpen: Stabiele versterkingsopgave	13
2.3	Omgang met KvK 2018-2019 Kennis	14
2.3.1	Integrale toepassing	14
3	Overzicht van het faalpad voor piping en nieuwe kennis	17
4	Toepassing ontwikkelde kennis	25
4.1	Doorlatendheid deklaag voorland	26
4.1.1	Wat is onderzocht	26
4.1.2	Wanneer relevant	26
4.1.3	Wijze van toepassen	26
4.1.4	Benodigde data	27
4.1.5	Overwegingen voor toepassing van dit aspect	27
4.1.6	Overweging voor integrale toepassing	27
4.1.7	Kennisleemtes en voorziene kennisontwikkeling	28
4.2	Doorlatendheid deklaag achterland	29
4.2.1	Wat is onderzocht	29
4.2.2	Wanneer relevant	29
4.2.3	Wijze van toepassen	29
4.2.4	Benodigde data	29
4.2.5	Overwegingen voor toepassing van dit aspect	29
4.2.6	Overweging voor integrale toepassing	30
4.2.7	Kennisleemtes en voorziene kennisontwikkeling	30
4.3	Anisotropie en Meerlaagsheid	31
4.3.1	Wat is onderzocht	31
4.3.2	Wanneer relevant	31
4.3.3	Wijze van toepassen	31
4.3.4	Benodigde data	32
4.3.5	Overwegingen voor toepassing van dit aspect	32

4.3.6	Overweging voor integrale toepassing	32
4.3.7	Kennisleemtes en voorziene kennisontwikkeling	33
4.4	Aanwezigheid van een fijne fractie (slibfractie)	34
4.4.1	Wat is onderzocht	34
4.4.2	Wanneer relevant	34
4.4.3	Wijze van toepassen	34
4.4.4	Benodigde data	34
4.4.5	Overwegingen voor toepassing van dit aspect	34
4.4.6	Overweging voor integrale toepassing	35
4.4.7	Kennisleemtes en voorziene kennisontwikkeling	35
4.5	0,3D regel (en heave)	36
4.5.1	Wat is onderzocht	36
4.5.2	Wanneer relevant	36
4.5.3	Wijze van toepassen	36
4.5.4	Benodigde data	36
4.5.5	Overwegingen voor toepassing van dit aspect	36
4.5.6	Overweging voor integrale toepassing	36
4.5.7	Kennisleemtes en voorziene kennisontwikkeling	37
4.6	3D effect bij piping	38
4.6.1	Wat is onderzocht	38
4.6.2	Wanneer relevant	38
4.6.3	Wijze van toepassen	38
4.6.4	Benodigde data	39
4.6.5	Overwegingen voor toepassing van dit aspect	39
4.6.6	Overweging voor integrale toepassing	39
4.6.7	Kennisleemtes en voorziene kennisontwikkeling	39
4.7	Nog geen handvatten beschikbaar	40
4.7.1	Meso- en micro-schaal heterogeniteit van de onderkant van de deklaag in de baan van de pipe	40
4.7.2	Micro- en meso-schaal variatie van korrelgrootte in de baan van de pipe	40
4.8	Observaties	41
4.8.1	Een review van case studies	41
4.8.2	Verklaring voor zandmeevoerende wellen in West Nederland	41
4.8.3	Uitgraven van wellen bij de Willemspolder	41
5	Referenties	43
	Bijlagen	46
A	Verwacht bereik anisotropie in bovenste zandlaag	47
B	Overzicht faalpaden en belangrijkste aspecten	48
B.1	Bovenrivierengebied Rijntakken	49
B.2	Limburg: het Maasdal	51
B.3	Getijdengebied	54
B.4	Benedenrivierengebied	58

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en achtergrond

Het faalmechanisme piping is in Nederland vaak een dominant mechanisme bij de overstromingskans van primaire waterkeringen. In de reguliere analyses van de overstromingskans worden drie aspecten van dit mechanisme beschouwd: opbarsten, heave en terugschrijdende erosie (berekend met de rekenregel van Sellmeijer). Voor deze mechanismen worden in het BOI rekenregels beschikbaar gesteld. Analyses met deze rekenregels leiden in de huidige praktijk tot hoge faalkansen die niet aansluiten bij het gevoel van de beheerder. Hiervoor zijn verschillende oorzaken. Een van de oorzaken bij terugschrijdende erosie is de vereenvoudigde schematisatie van de rekenregel van Sellmeijer. Het is de verwachting dat het beter meenemen van de daadwerkelijke situatie in het veld tot een verkleining van de faalkans zal leiden. Naar aanleiding hiervan heeft Deltares in opdracht van Rijkswaterstaat een visie opgesteld: '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.'

In 2018 en 2019 is invulling gegeven aan deze visie door verschillende aspecten te onderzoeken, die tot nu toe niet in analyses worden meegenomen en die invloed hebben op met name terugschrijdende erosie. Een overzicht hiervan en de synthese van welke aspecten waar in Nederland spelen is gepresenteerd in van Beek et al. (2020). De bevindingen van het pipingonderzoek kennen een verschillende mate van onzekerheid, bovendien kunnen de effecten op de pipingopgave zowel positief als negatief zijn. De grootte van de effecten is afhankelijk van lokale kenmerken. Voor een goede bepaling van de overstromingskans is het belangrijk dat de nieuwe inzichten in zijn totaliteit worden beschouwd. Ten behoeve van de kennisoverdracht van Kennis voor Keringen is daarom deze bijsluiter ontwikkeld waarin de ontwikkelde KvK kennis samengevat is en resterende kennisleemtes worden gepresenteerd. De bijsluiter is gericht op het toepassen van kennis die is ontwikkeld in KvK 2018-2019 en biedt handelingsperspectieven aan beheerders: welke resultaat kan bij welke condities of (lokale) kenmerken worden gebruikt voor een betere inschatting van de opgave.

Uiteraard blijft de kennisontwikkeling een lopend proces, zowel binnen Kennis voor Keringen Piping als in andere programma's en projecten van onder andere universiteiten en het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP). Dit houdt in dat inzichten gepresenteerd in het voorliggende overzicht onderhevig kunnen zijn aan voortschrijdend inzicht.

Dit document is een eerste concept versie die tevens dient als basis voor een tournee met als doel kennisdeling en interactie. Aan de hand van de kennisuitwisseling in het tournee kan per gebied de relevante kennisontwikkeling nader worden aangescherpt.

1.2 Doel

Het doel van deze bijsluiter is om de beheerder in staat te stellen een weloverwogen besluit te nemen over het toepassen van de ontwikkelde kennis die relevant is voor zijn gebied. Dit wordt beoogd door de nieuwe kennis en verwachte impact in een overzichtelijke tabel in de structuur van het faalpad voor piping te presenteren, aangevuld met toepassingsgerichte factsheets en een inzicht in belangrijke gebiedsspecifieke aspecten. Het is aan de beheerder om de keuze te maken welke kennis voor een wettelijke beoordeling (toets op maat) of dimensioneren van een versterkingsmaatregel wordt toegepast. Gevoeligheidsanalyses

kunnen worden gebruikt om na te gaan in welke mate nieuwe kennis de overstromingskans en/of het versterkingsontwerp beïnvloeden.

1.3 Doelgroep

De doelgroep voor dit overzicht zijn beheerders, beoordelaren en ontwerpers.

1.4 Overkoepelend piping overzicht

De fenomenologische beschrijvingen van de keten van gebeurtenissen die leiden tot overstroming door piping, het faalpad, vormt de basis voor een overzicht van de piping kennis in dit rapport. De nieuwe KvK kennis wordt gepresenteerd in een tabel die de gebeurtenissen (knopen) in het faalpad weergeeft. Hiermee is direct duidelijk op welke knoop de kennis van toepassing is, en daarmee hoe deze kennis bijdraagt aan het beter inschatten van de overstromingskans door piping.

Omdat de regionale verschillen in Nederland groot zijn, en locatie specifieke eigenschappen het optreden van piping bepalen, zijn per gebied andere knopen of aspecten van het faalpad belangrijk. Het effect van nieuwe kennis die in KvK is ontwikkeld is per locatie verschillend en wordt in sterke mate bepaald door gebiedsafhankelijke karakteristieken van de geologie, het waterstandsverloop en de hieruit volgende regionale geohydrologische situatie. In het kader van Deltares Strategisch Onderzoek, is Nederland onderverdeeld in vier gebieden op basis van karakteristieken van de ondergrond en de hydraulische belasting. Voor deze gebieden zijn fenomenologische beschrijvingen van de gebeurtenissen die leiden tot overstroming door piping opgesteld. Deze faalpaden zijn geanalyseerd om de belangrijke knopen per gebied te identificeren, en om te bepalen welke onderwerpen of parameters hier bepalend voor zijn in het rapport Gebiedsspecifieke Faalpaden (Rosenbrand et al. 2020). Een samenvatting van deze analyse is in een bijlage van dit rapport opgenomen. In deze bijlage wordt aangegeven welke kennis naar verwachting in welk gebied een groot effect heeft. De huidige versie van het rapport Gebiedsspecifieke Faalpaden betreft een concept dat aangescherpt kan worden naar aanleiding van ervaringen van beheerders die naar voren komen tijdens de tournee waarin de kennis gepresenteerd wordt.

Op termijn kan de tabel met kennis verder uitgebreid worden met kennisontwikkeling door derden om zo een overkoepelend overzicht van de piping kennis te bieden.

1.5 Leeswijzer

Voor beheerders is in Hoofdstuk 2 een algemene overweging met betrekking op de toepassing van nieuwe kennis in het licht van de mate van kennisrijpheid gegeven.

In hoofdstuk 3 is een overzicht van de KvK kennis in de structuur van het piping faalpad gepresenteerd.

Hoofdstuk 4 biedt per onderwerp een factsheet met nadere toelichting voor de onderwerpen die kunnen worden gebruikt in een analyse voor een beoordeling (toets op maat) of ontwerp. Onderwerpen die wel zijn onderzocht en die inzicht bieden in het piping proces maar waarvan nog geen concrete handvatten zijn om toe te passen, zoals bijvoorbeeld de verklaring voor zandmeevoerende wellen in West-Nederland, zijn wel opgenomen in de gebiedsspecifieke overzichten maar hiervoor zijn geen factsheets uitgewerkt.

Voor complete samenvatting van het piping onderzoek in KVK 2018-2019 wordt verwezen naar het Syntheserapport (Van Beek et al, 2020).

In Bijlage B is voor vier gebieden: het bovenrivierengebied, het benedenrivierengebied, Limburg en het getijdengebied aangegeven wat naar verwachting de belangrijkste kennisontwikkelingen voor dat gebied zijn, op basis van de regionale karakteristieken van dat gebied. Deze aanduiding is onderbouwd door de concept faalpadanalyse in Rosenbrand et al. (2020).

CONCEPT

2 Omgang nieuwe kennis piping bij beoordelen en versterken

2.1 Inleiding

Per 1 januari 2017 wordt een nieuwe veiligheidsbenadering met overstromingskansnormen gehanteerd. De nieuwe veiligheidsbenadering is fundamenteel anders. In het oude systeem wordt bij onzekerheden veilig gekozen en worden alleen bewezen technieken toegepast. De waterkering mag immers niet falen en een overstroming moet worden voorkomen. Voor het bepalen van een overstromingskans moeten in het nieuwe systeem onzekerheden worden meegenomen zodat een realistische overstromingskans wordt bepaald op basis waarvan de juiste (investerings)beslissing kan worden genomen.

Bij het bepalen van een realistische overstromingskans wordt rekening gehouden met nieuwe kennis en recente ervaringen. Aan elk project wordt gevraagd een afweging te maken voor de kennis die wordt meegenomen. Voor bepaling van de veiligheidsopgave in een beoordeling kan met gevoeligheidsanalyses worden nagegaan of toepassing van nieuwe kennis leidt tot een andere opgave. In een gevoeligheidsanalyse kan met een inschatting van bovengrens en ondergrens aangegeven worden wat het effect van nieuwe kennis is. Dit kan zowel kwantitatief (met berekeningen) als kwalitatief (op basis van expert schattingen). Het voorlopig oordeel (DGWB, 2019) kan dan worden ingezet en de beslisboom piping van de POV (Rivierenland 2017) geeft handvatten om nog niet tot versterking over te gaan. Bij een versterkingsontwerp kan met gevoeligheidsanalyses de meerwaarde van nieuwe kennis worden onderzocht en worden bepaald hoe met onzekerheden van nieuwe kennis kan worden omgegaan. Het kan dan soms, afhankelijk van het effect van de onzekerheden, verstandig zijn enige robuustheid aan te houden bij een versterking.

Afgelopen jaren is in Kennis voor Keringen veel nieuwe kennis ontwikkeld en ervaring opgebouwd met de overstromingskansbenadering, die kan worden gebruikt bij de uitvoering van beoordelingen en versterkingsprojecten. In dit rapport wordt een overzicht gegeven van nieuwe kennis die rondom piping in Kennis voor Keringen 2018-2019 is ontwikkeld en de toepasbaarheid daarvan voor beoordelingen en versterkingsprojecten.

In dit hoofdstuk wordt beschreven op welke manier nieuwe kennis en ervaringen rondom piping kan worden meegenomen in een pipinganalyse voor beoordeling en ontwerp. Daartoe wordt in paragraaf 2.2 de kaders vanuit wet en regelgeving gegeven. In paragraaf 2.3 wordt vervolgens een overzicht gegeven van de kennis die in Kennis voor Keringen is ontwikkeld.

2.2 Kaders vanuit wet en regelgeving rondom toepassen nieuwe kennis bij beoordelen en versterken

2.2.1 Algemeen

De tekst uit deze paragraaf is grotendeels overgenomen uit het advies van de Werkgroep Nieuwe kennis, WBI, OI, en HWBP projecten, die in 2019 advies heeft uitgebracht aan de stuurgroep HWBP over de wijze waarop met nieuwe kennis moet worden omgegaan.

Voor het beoordelen en ontwerpen van primaire waterkeringen wordt een instrumentarium beschikbaar gesteld waarmee de beheerder de overstromingskans kan bepalen en vergelijken met de trajectnorm. De ministeriële regeling voor beoordelen schrijft voor op welke wijze de beheerder de kering *moet* beoordelen. De handreiking Ontwerpen met

Overstromingskansen (ter aanbeveling) betreft een instrument waarmee de beheerder *kan* verifiëren of een ontwerp aan de eisen vanuit de norm op trajectniveau voldoet. De beheerder is zelf verantwoordelijk voor het wel of niet meenemen van de laatste stand van kennis, techniek en wetenschap bij beoordeling en versterking van de waterkering.

Beoordelen

Bij beoordelen maakt de beheerder bij het filter op vakniveau en / of na uitvoering van de gedetailleerde toets de afweging of toepassen van nieuwe kennis in een Toets op Maat mogelijk leidt tot een ander veiligheidsoordeel. In de voorbereidingsfase van een project geeft de beheerder in de trajectaanpak en het plan van aanpak voor verkenning en planuitwerking aan welke (nieuwe) kennis en innovaties worden toegepast en hoe met nieuwe kennisontwikkeling wordt omgegaan.

Bij het toepassen van fundamenteel nieuwe kennis bij beoordelen die nog niet is opgenomen in technische leidraden moet de beheerder de kwaliteit en toepasbaarheid daarvan aantonen. Bij nieuwe inzichten die significante gevolgen hebben voor de *beoordeling* van de veiligheid van de primaire waterkeringen, kan de minister De Ministeriële Regeling wijzigen. Bij tussentijdse wijzigingen moet de beheerder, wanneer deze zijn beoordeling al heeft afgerond, binnen redelijke termijn opnieuw een beoordeling uitvoeren.

Ingangstoets

Door de programma directie HWBP wordt een ingangstoets ingericht waarin risico's voor stabiliteit van de projectscope worden geïdentificeerd. Daarbij worden ook de consequenties van nieuwe kennis en innovaties beschouwd.

Versterken

Wanneer nieuwe kennis in het ontwerpproces leidt tot aanpassing van projectplan en uitvoeringsbesluiten moet een afweging worden gemaakt of ontwerpbesluiten opnieuw ter inzage moeten worden gelegd. Jurisprudentie hierover is belangrijk. Daarbij geldt:

- Volgens de jurisprudentie moeten ontwerpbesluiten opnieuw ter inzage worden gelegd als de wijzigingen naar aard en omvang zodanig zijn dat zij leiden tot een wezenlijk ander plan.
- Het is aan het project om te beslissen om een ontwerpbesluit opnieuw ter inzage te leggen. Het risico van het niet opnieuw ter inzage leggen, is dat de rechter de besluiten gedeeltelijk vernietigt. Dit risico moet worden afgewogen tegen de extra tijd die het opnieuw ter inzage leggen kost en eventuele politiek bestuurlijke nadelen.

Voor besluiten op aanvraag (zoals de uitvoeringsbesluiten) geldt een strengere jurisprudentie. Het wijzigen van de aanvraag zonder terinzagelegging van een nieuw ontwerpbesluit is slechts toegestaan als aannemelijk is dat daardoor geen derden worden benadeeld.

2.2.2 Beoordeling: Stabiele veiligheidsopgave

Het resultaat van de beoordeling moet stabiel genoeg zijn om vervolprocessen, zoals het programmeren en realiseren van versterkingsmaatregelen, opstellen van een landelijk veiligheidsbeeld en uitvoeren van zorgplicht, in te richten. Dat betekent dat moet worden voorkomen dat op basis van het resultaat uit de beoordeling een verkeerde beslissing wordt genomen omdat blijkt dat de overstromingskans door toepassing van beschikbare nieuwe kennis in werkelijkheid veel groter of kleiner is. De stabiliteit van het eindoordeel kan worden onderzocht door de invloed van nieuwe kennis op het eindoordeel te onderzoeken. Gevoeligheidsanalyses (zie tekst box) kunnen worden uitgevoerd met zowel conservatieve als optimistische inschattingen van de onzekerheden rondom nieuwe kennis. Wanneer het oordeel niet wijzigt heeft de nieuwe kennis geen impact en is ook zonder toepassen van de nieuwe kennis sprake van een stabiel oordeel. Wanneer een oordeel wel

wijzig is het belangrijk de nieuwe kennis mee te nemen in de beoordeling. Wanneer de onzekerheid rondom de nieuwe kennis van invloed is op het eindoordeel kan:

- De meest realistische inschatting van de nieuwe kennis worden gebruikt voor het eindoordeel en in de rapportage aan te geven hoe met de onzekerheid wordt omgegaan in de zorgplicht bij het treffen van voorzieningen of voorbereiden van maatregelen in het HWBP.
- Nader onderzoek worden uitgevoerd naar de impact van de nieuwe kennis op het eindoordeel. Daarbij wordt opgemerkt dat extra onderzoek wel doelmatig moet zijn en de verwachte kosten op moeten wegen tegen het treffen van een maatregel. Zie voor meer informatie en handelingsperspectief de WBI factsheet *'Het gebruik van gevoeligheidsanalyses om te bepalen wanneer de beoordeling "goed genoeg" is voor het landelijk veiligheidsbeeld*.
- Een voorlopig oordeel worden gegeven en in afwachting van kennisontwikkeling later een definitief oordeel te rapporteren.

2.2.3 Ontwerpen: Stabiele versterkingsopgave

Bij versterkingsprojecten is het belangrijk om met voldoende zekerheid te weten dat er een veiligheidsopgave is. Wanneer in de loop van het project door toepassing van nieuwe kennis de veiligheidsopgave verdwijnt, geeft dat veel imagoschade waarbij afspraken met de omgeving (inclusief meekoppelkansen) onder druk komen te staan. Bovendien wordt de programmering van het HWBP instabiel. Het is dus belangrijk om aan het begin van het project zogenaamde 'false negatives', onterechte opgaves, te voorkomen. De kans op false negatives kan worden onderzocht door in gevoeligheidsanalyses uit te gaan van optimistische uitgangspunten rondom nieuwe kennis. Wanneer hieruit volgt dat de opgave hierbij verdwijnt kan worden overwogen de versterkingsmaatregel uit te stellen. De beslisboom piping (Waterschap Rivierenland, 2017) is een voorbeeld van een instrument waarmee deze keuze kan worden onderbouwd.

Wanneer een veiligheidsopgave stabiel is, wordt een ontwerp gemaakt met een bepaalde levensduur. Als in de loop van de tijd blijkt dat een uitgangspunt verkeerd is gekozen, heeft dat effect op de levensduur. Wanneer wordt gerekend met ongunstige uitgangspunt is de kans groter dat de levensduur in werkelijkheid langer is dan beoogd. De 'ideale' uitgangspunten zijn sterk afhankelijk van situatie en type maatregel. Bij hoge initiële projectkosten is het vaak handig om bij onzekerheden iets veiliger te kiezen rondom het toepassen van nieuwe kennis.

Gevoeligheidsanalyses

Gevoeligheidsanalyses zijn - gegeven alle onzekerheden - een onmisbaar onderdeel voor het verkrijgen van een stabiele veiligheids- en versterkingsopgaves en een scherp ontwerp en kunnen worden gebruikt om de invloed van nieuwe kennis vast te stellen. Een goede gevoeligheidsanalyse geeft inzicht in de veiligheids- of versterkingsopgave en kan helpen bij een goede projectbeheersing, met name kosten en planning. Gevoeligheidsanalyses helpen bij het transparant onderbouwen van de wijze waarop nieuwe kennis wordt meegenomen in beoordeling en ontwerp van waterkeringen.

Gevoeligheidsanalyses dienen te worden uitgevoerd met realistische waarden waarbij met een variabele (of gecorreleerde set variabelen) wordt gevarieerd en nagegaan of een ongunstige (ondergrens) of gunstige (bovengrens) tot een ander handelingsperspectief leidt. Voor de overige variabelen wordt dus gerekend met verwachtingen (realistische waarden). Het is immers niet aannemelijk dat alle variabelen in de praktijk tegelijk ongunstig of gunstiger zijn dan verwacht. Het geeft een verkeerd, te pessimistisch, beeld wanneer wordt uitgegaan van een set conservatieve uitgangspunten waarbij in de analyse elke keer een uitgangspunt minder conservatief wordt gekozen.

2.3 Omgang met KvK 2018-2019 Kennis

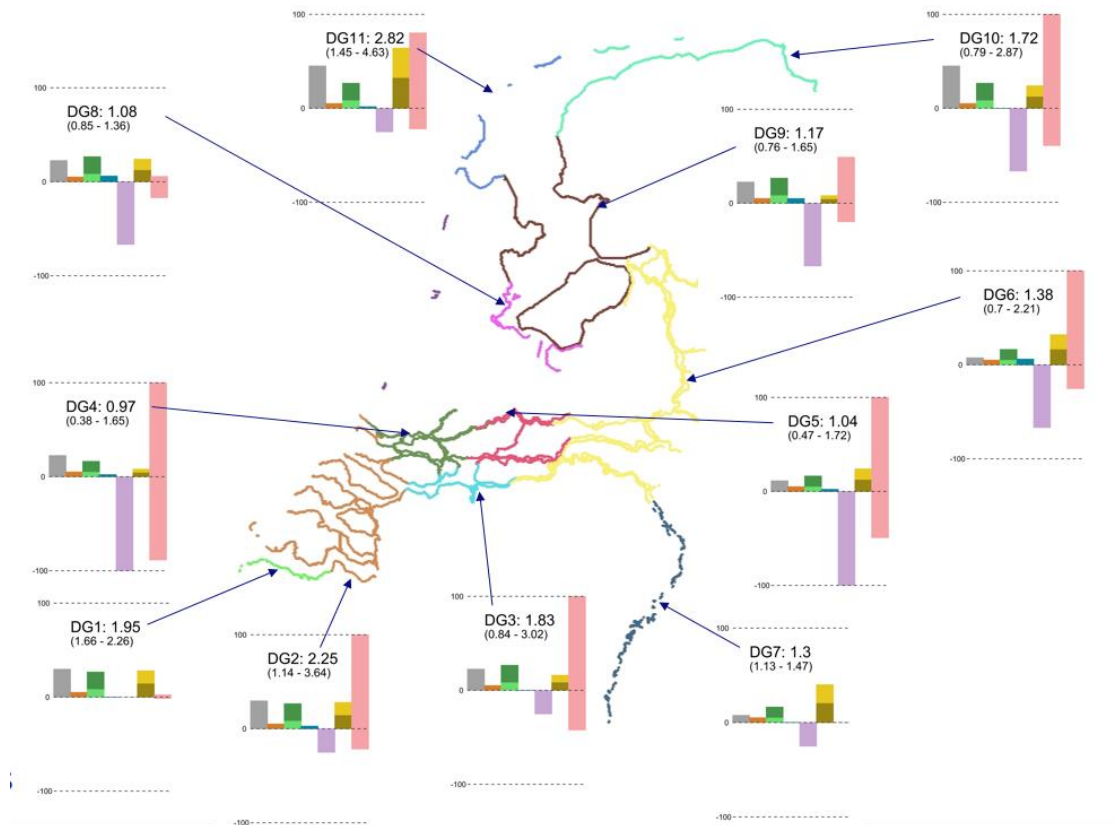
2.3.1 Integrale toepassing

In het KvK onderzoek 2018-2019 zijn verschillende aspecten beschouwd waarmee voor het proces van terugschrijdende erosie (het Sellmeijer model) een realistischere schematisatie gemaakt kan worden. Deze aspecten betreffen:

- Deklaag voorland
- Deklaag achterland
- Anisotropie & meerlaagsheid
- 0,3 D rekenregel
- 3D effect
- Extra sterkte door aanwezigheid van fijne fractie in getijdezanden
- Macro en meso heterogeniteit van de helling van de deklaag in de baan van de pipe
- Heterogeniteit van de korrelgrootte in de baan van de pipe

In de factsheets in hoofdstuk 4 wordt nader ingegaan op ontwikkelde kennis van de eerste zes van de bovengenoemde aspecten en de toepassingsvoorwaarden en kennisleemten (de helling in de baan van de pipe en heterogeniteit in de baan van de pipe kunnen vooralsnog niet goed worden meegenomen met de op de markt beschikbare modellen).

Sommige van deze aspecten hebben altijd een gunstig effect voor terugschrijdende erosie zoals anisotropie, het meenemen van de deklaag in het voorland, en de extra sterkte door aanwezigheid van een fijne fractie. Andere kunnen een gunstig of ongunstig effect hebben, zo is het voor de 0,3D regel onduidelijk of de weerstand in het opbarstgat daadwerkelijk hoger of lager dan 0,3D is. Het 3D effect, ten slotte, is altijd ongunstig, echter de mate waarin is situatie afhankelijk. In het Syntheserapport van het KvK 2018-2019 onderzoek (van Beek et al., 2020) is een eerste inschatting van mogelijke effecten gemaakt zoals te zien in onderstaande figuur.



Figuur 2.1 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. (uit van Beek et al., 2020)

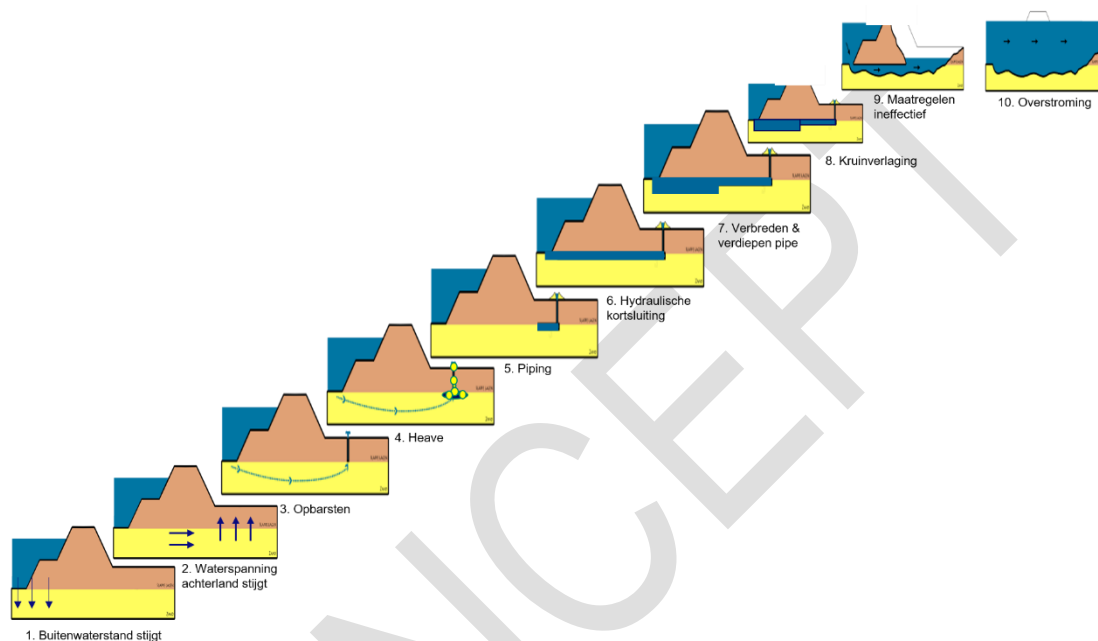
Het is van belang te realiseren dat voor de gebeurtenis opbarsten het 3D effect niet in dezelfde mate speelt als bij terugschrijdende erosie. Voordat opbarsten optreedt is uiteraard nog geen sprake van de 3D concentratie van stroming naar de wel/pipe, daarvoor zal het mogelijke 3D effect slechts afhangen van de ondergrondopbouw. Ook de onzekerheden betreffende het 0,3D effect (de weerstand in het opbarstkanaal) hebben geen effect op opbarsten. Het kan dus zijn dat een realistischere beschouwing van de ondergrond voor opbarsten netto meer effect op de opgave heeft dan bij terugschrijdende erosie. Daarom is het van belang het hele faalpad voor piping te overwegen bij bepaling van de kans op een overstrooming door piping. Ook latere knopen in het faalpad kunnen een belangrijke rol spelen. Hierbij kan worden gedacht aan het calamiteitenbeheersing en het nemen van (nood) maatregelen en aan de tijdsduur die benodigd is voor het terugschrijven en ruimen van een pipe. Deze zijn in het KvK 2018-2019 onderzoek niet beschouwd.

Voor een stabiele beoordeling of ontwerp is het van belang om rekening te houden met het geheel aan geohydrologische aspecten, en niet slechts uit te gaan van de factoren die het verst ontwikkeld zijn. Doordat de kennis nog in verschillende stadia van rijpheid is zal de onzekerheid voor bepaalde aspecten groter zijn dan voor anderen. Door middel van gevoeligheidsanalyses kan per gebied uitgezocht worden hoe belangrijk bepaalde aspecten zijn en wat een integrale beschouwing hiervan betekend voor de opgave.

CONCEPT

3 Overzicht van het faalpad voor piping en nieuwe kennis

Voor piping kunnen 10 gebeurtenissen worden onderscheiden die achtereenvolgens nodig zijn om een overstroming te veroorzaken. Deze zijn weergegeven in het generieke faalpad in Figuur 3-1. In dit hoofdstuk wordt aangegeven welke kennis per knoop ontwikkeld is in het KvK 2018-2019.



Figuur 3-1 Generiek faalpad voor piping

De waterspanningen in het watervoerende pakket (knoep 1 en 2) zijn de drijvende kracht, d.w.z. de relevante belasting voor de processen in knoep 3 tot en met 9. De waterspanningen worden bepaald door de buitenwaterstand en de invloed hiervan op het watervoerend pakket (WVP) in knoep 1 en de eigenschappen van het WVP en de deklaag in het achterland die de toename van de stijghoogte onder de deklaag beïnvloeden in knoep 2. Belangrijke aspecten¹ met betrekking op knoep 1 en 2 kunnen op verschillende manieren meegenomen worden voor de latere mechanismen. Bijvoorbeeld, het meenemen van de intredeweerstand van het voorland wordt voor terugschrijdende erosie (knoep 5) vaak gekoppeld aan eisen aan het voorland om kortsluiting van de pipe te voorkomen, iets wat voor opbarsten of heave (knoep 3 en 4) geen rol speelt.

In het KvK onderzoek 2018-2019 is de invloed van aspecten beschouwd direct in relatie tot opbarsten (knoep 3) (voor de doorlatendheid van de deklaag in het achterland) en voor terugschrijdende erosie (knoep 5) (voor andere aspecten). Daarom wordt de kennis bij die knoep getoond. Deze keuze is gemaakt voor dit rapport om de kennis zodanig te structureren en ontsluiten dat de toepassing duidelijk is. Voor andere toepassingen, zoals het doorrekenen van het gehele faalpad aan de hand van de (conditionele) kansen voor alle knoep kunnen andere overwegingen, zoals rekening houden met correlaties, spelen, wat kan leiden tot een andere indeling.

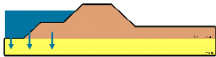
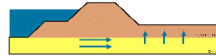
¹ Onder aspect worden zowel de in KvK onderzochte onderwerpen als andere aspecten (parameters/effecten) verstaan.


Tabel 3-1 geeft het generieke faalpad voor piping weer en knopen waar de in KvK 2018-2019 ontwikkelde kennis toegepast kan worden.



De eerste kolom beschrijft de knoop in het faalpad. De tweede kolom benoemt aspecten die veelal van belang zullen zijn voor deze knoop. De derde en vierde kolommen benoemen de ontwikkelde kennis (modellen en resultaten) die voor bepaalde aspecten onderzocht zijn in KvK, en de vijfde geeft een indicatie van het verwachte effect. Voor details betreffende de status van de kennis, en resterende kennisleemten wordt verwezen naar de factsheets in Hoofdstuk 4.

CONCEPT

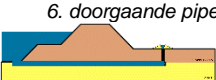

Tabel 3-1: Overzicht van het faalpad en de in KvK 2018-2019 ontwikkelde kennis




Faalpad	Aspect	Modellen	Ervaring/ observaties/ metingen	Indicatie effect
<p>1. buitenwaterstand stijgt en waterspanningen in het watervoerend pakket aan de rivierzijde van de kering stijgen</p> 	<p>Waterstandsverloop</p>	<p>Niet nader beschouwd in KvK 2018-2019</p>	<p><u>Geohydrologische situatie:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - netto intredeweerstand (deklaag voorland, inrichting voorland bijv. kleiwinputten) - bij kort of afwezig voorland anisotropie in bovenste WVP - Laagopbouw: <ul style="list-style-type: none"> - meerlaagsheid en kortsluiting tussen Holoceen en Pleistoceen WVP, - insnijden rivier in Pleistoceen en weerstand rivierbodem 	<p>De kennis is ontwikkeld met oog op toepassing voor specifieke knopen, zie voor omgang met individuele effecten de knopen 3 tot en met 5</p>
<p>2. waterspanning w.v.p. aan de polderzijde van de kering stijgt en er ontstaat verticale stroming</p> 	<p><u>Geohydrologische situatie:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - lek lengte en hydrologische randvoorwaarden achterland (bepaald door de lokale situatie, peilbeheer, grondwaterstand, stijghoogte WVP) - doorlatendheid WVP & anisotropie -preferente stroombanen, eventueel in combinatie met doodlopen van stroombaan op kleiplug 	<p>De kennis is ontwikkeld met oog op toepassing voor specifieke knopen, zie voor omgang met individuele effecten de knopen 3 tot en met 5</p>		

Faalpad	Aspect	Modellen	Ervaring/ observaties/ metingen	Indicatie effect
<p>3. opbarsten en geconcentreerde verticale stroming</p> 	<p><u>Geohydrologische situatie:</u></p>		<p>Case Studies: Verklaren wellen West NL Wellen treden op bij situaties met bijv.: - kleiplug in achterland - gefundeerd pakket Holoceen & Pleistoceen Bij een hoog percentage fijne fractie in het WVP is doorlatendheid lager en minder wellen.</p>	-
<p><u>Geohydrologische situatie:</u> anisotropie & meerlaagsheid</p>	<p>Anisotropie van het WVP meenemen voor bepaling stijghoogte middels geohydrologische modellen</p>	<p>Bepaling van anisotropie (bijvoorbeeld middels pompproef of HPT-AMPT sondering).</p>	<p>Effect van anisotropie op opbarsten is in KvK niet expliciet onderzocht. De verwachting is wel dat dit leidt tot lagere stijghoogten en een lagere kans op opbarsten, en dat schaaffecten m.b.t. factoren op vergelijkbare wijze spelen als bij terugschrijdende erosie.</p>	
<p><u>Geohydrologische situatie:</u> Doorlatendheid (en dikte) deklaag achterland zie ook knoop 5</p>	<p>Beter bepalen stijghoogte achterland rekening houdend met doorlatendheid deklaag achterland. Kan met dempingsfactor, andere analytische modellen (bijvoorbeeld blanket equations, USACE, 2000) en/of geohydrologische modellen. Geohydrologische modellen kunnen ook 3D effecten en effect sloten in achterland meenemen.</p>	<p>Modellen kalibreren met metingen</p>	<p>Bij een doorlatende deklaag in het achterland nemen waterspanningen minder toe en neemt de kans op opbarsten af.</p>	
<p><u>Geohydrologische situatie:</u> Doorlatendheid (en dikte) deklaag voorland: zie knoop 5</p>	<p>Beter bepalen stijghoogte achterland rekening houdend met doorlatendheid deklaag voorland. Kan met dempingsfactor, andere analytische modellen (blanket equations, USACE) en/of geohydrologische modellen</p>	<p>Modellen kalibreren met metingen</p>	<p>De introdeweerstand van het voorland kan een groot effect hebben op de stijghoogte in het achterland</p>	

Faalpad	Aspect	Modellen	Ervaring/ observaties/ metingen	Indicatie effect
 <p>4. heave</p>	De drukval in het opbarstgat	Huidige heave regel blijkt slecht onderbouwd zie aspect 0,3 D effect bij geohydrologie onder knoop 5.	Zie aspect "0,3 D effect" bij geohydrologie onder knoop 5	
 <p>5. horizontaal zandtransport en pipe vorming</p>	<u>Geohydrologische situatie:</u> anisotropie	Numeriek modelleren (D-Geo Flow)	Bepaling van anisotropie (bijvoorbeeld middels pompproef of HPT-AMPT sondering).	Anisotropie leidt altijd tot een toename van het berekende kritieke verval in D-Geo Flow en dus een afname in de faalkans. Het effect op het kritieke verval is in de ordegrootte 1-1.5, en het effect is groot voor dikke watervoerende pakketten (>15 m) en hoge anisotropie factoren (>5)
	<u>Geohydrologische situatie:</u> Meerlaagsheid	Numeriek modelleren (D-Geo Flow)		Het modelleren van 2 lagen in plaats van de equivalente gewogen doorlatendheid nemen in de rekenregel heeft vooral effect wanneer de verhouding tussen de doorlatendheden onder en boven hoger dan 5 is. Wanneer dit het geval is kan het tot een factor 1.1 tot 2 toename in het kritieke verval leiden afhankelijk van de lengte en diepte van het watervoerend pakket
	<u>Geohydrologische situatie:</u> doorlatendheid deklaag voorland	Reken met een groter deel van de fictieve kwelweglengte in de rekenregel (niet afgeknot op 2 maal dijkbasis). Onderbouwing in D-Geo Flow model. Of direct modelleren in D-Geo Flow.	Modellen (voor pipegroei) kalibreren met metingen	Afhankelijk van voorlandlengte en doorlatendheid kan dit effect zeer groot zijn, een factor 2 of meer op het kritieke verval. Het effect is groot bij een lang voorland met een ondoorlatende dikke deklaag, maar ook bij een dunnere doorlatendere deklaag kan winst behaald worden.

Faalpad	Aspect	Modellen	Ervaring/ observaties/ metingen	Indicatie effect
	<u>Geohydrologische situatie:</u> deklaag achterland	Numeriek modelleren (D-Geo Flow)	Modellen (voor pipegroei) kalibreren met metingen	Effect op piping in 2D model is klein, effect is wel van belang voor verschil tussen 2D en 3D stroming en voor pipe lengte
	<u>Geohydrologische situatie:</u> 3D stroming naar pipe	2D modellen (D-Geo Flow) bestaan maar onderschatten convergentie van stroming die in 3D optreedt. Op basis van de leklengte in het achterland kan een inschatting gemaakt worden van de mate van het 3D effect.	Laboratoriumproeven op kleine schaal tonen aan dat het 3D effect tot een lager kritiek verval (hogere faalkans) leidt. Er is geen ervaring op grotere schaal	Proeven geven aan dat het kritieke verval een factor 0.5 kan zijn van een 2D situatie bij heel ondoorlatend achterland. Bij doorlatend achterland/teensloot in het achterland is er geen 3D effect.
	0,3D regel (weerstand in het opbarstkanaal)	De 0,3D regel is niet goed onderbouwd, de weerstand in het opbarstkanaal kan theoretisch gezien variëren tussen 0 en 1 afhankelijk van de grootte van het kanaal, korreldiameter en debiet. Aangezien deze niet te bepalen zijn wordt aanbevolen het effect van 0,1D en 0,6D te beschouwen	Metingen van drukval in het opbarstkanaal bij wellen	Effect is groot bij dikke deklaag, en relatief effect hangt af van verhouding van 0,3D tot het kritieke verval omdat 0,3D bij verval opgeteld mag worden. Dus sterk effect bij klein kritiek verval en dikke deklaag.
	Aanwezigheid fijne fractie (slibfractie)	Hogere weerstand tegen terugschrijdende erosie als functie van slibgehalte, meenemen als factor op het kritieke verval in de rekenregel van Sellmeijer of in D-Geo Flow.	Momenteel is sterkte toename afgeleid op basis van kleine schaal proeven.	Vooralsnog een correlatie voorstel van 15% sterkte per % slib fractie. Leidt tot een toename van een factor 1-7 op het kritieke verval
	Variatie van korrelgrootte in de baan van de pipe	Dit kan nog niet worden meegenomen in op de markt beschikbare modellen. Analyses in EEM piping model van US Army Corps of Engineers (Robbins & Griffiths, 2018a, 2018b) zijn hiervoor gebruikt	-	Het effect kan positief en negatief zijn, en de mate hangt ook af van de standaardafwijking van de korrelgrootte en de correlatielengte

Faalpad	Aspect	Modellen	Ervaring/ observaties/ metingen	Indicatie effect
	Micro-schaal (ordegrootte centimeters) variatie in deklaag diepte	Dit kan nog niet worden meegenomen in op de markt beschikbare modellen. Analyses zijn gemaakt in onderzoeksversie DgFlow	Foto's in proefsleuven	Het effect van micro-schaalvariatie leidt tot een 7% hoger kritiek verval in de set testcases
	Meso-schaal (ordegrootte meters en tientallen meters) variatie in deklaag diepte (een hellende deklaag)	Dit kan nog niet worden meegenomen in op de markt beschikbare modellen. Analyses zijn gemaakt in onderzoeksversie DgFlow	Boringen en profielen waar dekzand aan het oppervlak komt.	Het effect van de helling van de deklaag op basis van verwachte hellingen voor dekzanden kan leiden tot een 6% hoger of lager kritiek verval
 <p>6. doorgaande pipe</p>	Effect van de deklaag eigenschappen op pipe vorming (locatie en stabiliteit van pipe)	-	Uitgravingen bij Willemspolder in situatie met een diffuse deklaag laten zien dat de pipe in de deklaag vormde en bleef bestaan. Mogelijk had de aanwezigheid van reeds aanwezige scheuren in de deklaag of de grofzand barrière (GZB) bovenstrooms van de pipe hier invloed op.	Het al dan niet blijven bestaan van een pipe is van belang indien tijdsafhankelijkheid en het doorgroeien van een pipe in de loop van meerdere hoogwater situaties beschouwd wordt. Door de invloed van de GZB bij deze locatie is niet duidelijk hoe deze observaties vertaald kunnen worden naar andere situaties.
 <p>7. ruimen, (verbreding en verdieping van de pipe)</p>	Pipegroeisnelheid: Case studies: gevallen van snelle piping	-	De snelheid van het gehele proces varieert tussen minuten en een aantal dagen of zelfs een maand. Zodra een fontein van modderig water wordt geobserveerd duurt het slechts enkele minuten tot falen.	De pipegroeisnelheid is van belang indien de (beperkte) duur van een hoogwater belasting in relatie tot het doorgroeien van de pipe meegenomen wordt bij de faalkans bepaling. De vertaling van de geobserveerde situaties andere gevallen vereist een nadere analyse.

Faalpad	Aspect	Modellen	Ervaring/ observaties/ metingen	Indicatie effect
<p>8. kruinverlaging</p> 	Geen onderzoek in KvK	-	-	-
<p>9. maatregelen ineffectief</p> 	Geen onderzoek in KvK	-	-	-
<p>10. bresgroei</p> 	Geen onderzoek in KvK	-	-	-

4 Toepassing ontwikkelde kennis

Dit hoofdstuk gaat in op de in KvK ontwikkelde kennis. Voor de aspecten die al inzetbaar zijn om de scope van de opgave te onderzoeken zijn aanbevelingen en voorwaarden voor de toepassing beschreven in zogenaamde Factsheets. Dit zijn:

- Doorlatendheid deklaag voorland
- Doorlatendheid deklaag achterland
- Anisotropie en meerlaagsheid
- Getijdenafzettingen/fijne fractie
- 0,3D regel (en heave)
- 3D effect bij piping

Aspecten die in KvK wel onderzocht zijn maar nog niet hebben geleid tot handvatten zijn:

- Macro en meso heterogeniteit van de helling van de deklaag in de baan van de pipe (van Beek, et al. 2019)
- Heterogeniteit van de korrelgrootte in de baan van de pipe (Kanning et al., 2019b)

Aspecten die leiden tot een beter begrip van de rol van de ondergrond voor het optreden van bepaalde fenomenen zijn tevens aangegeven in de tabellen in Hoofdstuk 3, maar omdat deze niet direct toepasbaar zijn in modelberekeningen is ook daarvoor geen factsheet opgenomen. Dit betreft de onderwerpen:

- Observaties
 - o Een review van case studies
 - o Verklaring voor zandmeevoerende wellen in West-Nederland
 - o Uitgraven van wellen bij de Willemspolder

Voor detail wordt de lezer verwezen naar van Beek et al (2020) en onderliggende rapporten.

4.1 Doorlatendheid deklaag voorland

4.1.1 Wat is onderzocht

De doorlatendheid (in combinatie met de dikte) van het voorland heeft een sterke invloed op de waterspanningen in de watervoerende pipinggevoelige zandlagen en is daarmee zowel van belang voor opbarsten en heave als voor terugschrijdende erosie. Het effect op terugschrijdende erosie wordt beschouwd in dit factsheet. Het meenemen van de doorlatendheid van de deklaag van het voor- en achterland voor opbarsten is in het Factsheet Doorlatendheid deklaag achterland opgenomen.

In de huidige aanpak wordt de doorlatendheid van het voorland deels meegenomen voor het deelmechanisme terugschrijdende erosie op basis van de fictieve kwelweglengte (Schematiseringshandleiding Piping). Deze is dan gemaximeerd tot $2 \times$ dijkbasis, omdat de afleiding van de rekenregel gebaseerd is op een pipe zonder toestromend water van bovenaf. Dit leidt met name bij smalle dijken met brede voorlanden tot het niet benutten van een groot deel van het aanwezige voorland.

In het KvK Piping onderzoek (Deltares, Fugro) is middels D-Geo Flow berekeningen beschouwd wanneer de pipe bij het kritieke verval onder de dijkbasis uit kwam waarbij het voorland stapsgewijs langer werd gemaakt (Lam, 2020, Vollering en Stoop, 2019). Hieruit bleek dat in veel gevallen de pipe niet onder de dijkbasis uit komt wanneer meer voorland aanwezig is, wat aangeeft dat dus meer voorland meegenomen zou kunnen worden bij het rekenen met de rekenregel van Sellmeijer.

In Rosenbrand & Knoeff (2020) is voor een typische geometrie voor het bovenrivierengebied middels D-Geo Flow berekeningen beschouwd in hoeverre de mee te nemen kwelweglengte opgerekt kon worden naar $3 \times$ dijkbasis, zonder dat de pipe bij het bijbehorende verval onder de dijkbasis uit kwam. Dit bleek voor veel gevallen mogelijk, met name wanneer de doorlatendheid van de deklaag in het achterland hoog is.

Het KvK onderzoek, en dit Factsheet, zijn gericht op het meenemen van meer voorland **zolang** de pipe niet onder de dijkbasis uit komt. Echter ook wanneer de pipe onder de dijkbasis uitkomt hoeft dit niet direct tot kortsluiting te leiden.

4.1.2 Wanneer relevant

Dit is altijd relevant wanneer het voorland significant breder is dan de dijkbasis, ook als er gaten (bijvoorbeeld nevengeulen of kleiwinputten) in het voorland aanwezig zijn. Ook deze zullen een intredeweerstand hebben.

Het meenemen van meer voorland leidt altijd tot een hoger kritiek verval, lagere faalkans. Het effect kan oplopen tot een factor > 2 op het kritieke verval (en ordegrrootte > 1000 op de faalkans (Rosenbrand en Knoeff, 2020).

Met name bij een doorlatende of afwezige deklaag in het achterland is het aannemelijk dat de pipe-lengte bij het kritieke verval kort is en dat daarom in een analyse met de rekenregel van Sellmeijer meer voorland meegenomen kan worden.

4.1.3 Wijze van toepassen

Om na te gaan of het meenemen van meer voorland, mits de pipe niet onder de dijkbasis uitkomt, leidt tot een wijziging in de opgave kunnen onderstaande stappen worden gevolgd.

1. Schematiseren van de situatie en inschatting van doorlatendheid watervoerend pakket, intredeweerstand voorland.
2. Berekening 'fictieve kwelweglengte'.
3. Sellmeijer (rekenregel) berekening met fictieve kwelweglengte gelijk aan $2 \times$ dijkbasis en met de gehele fictieve kwelweglengte. Indien het meenemen van de gehele fictieve kwelweglengte leidt tot significante wijziging worden D-Geo Flow berekeningen aanbevolen ter controle dat de pipe niet onder de dijkbasis uitkomt bij het kritieke verval. Een werkwijze hiervoor wordt voorgesteld in Bijlage 2 van het Factsheet D-Geo Flow Voor op maat piping analyse (Knoeff et al., 2020).

4.1.4 **Benodigde data**

Benodigd zijn de lengte, laagdikte en inrichting (aanwezigheid van bijvoorbeeld kleiputten of sloten) van het voorland. Voor het bepalen van de fictieve kwelwegelengte is de *bulkdoorlatendheid* (of intredeweerstand) van het voorland van belang, dat houdt in dat de effecten van gaten, bijvoorbeeld kleiwinputten (met hun eventuele intredeweerstand) verdisconteerd is. Ook de doorlatendheid van het achterland is van belang, aangezien dit invloed heeft op de lengte van de pipe.

Om de doorlatendheden te bepalen/onderbouwen zijn meten en monitoren van belang, Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken (TAW, 2004) geeft hiervoor handvatten. Hierbij dient ook rekening gehouden te worden met eventuele verschillen tussen dagelijkse situatie en hoogwater situaties (bijvoorbeeld met betrekking op het meestromen van nevengeulen, en het onder water staan van het voorland).

4.1.5 **Overwegingen voor toepassing van dit aspect**

Wanneer voorland aanwezig is kan dit worden meegenomen.

In principe kan het voorland worden meegenomen mits de pipe niet onder het voorland uitkomt. Hiervoor wordt maximaal 1 maal de dijkzate aan voorland meegenomen. Echter dit is een veilige keuze en mogelijk kan meer voorland meegenomen worden indien de fictieve lengte langer is dan 2x de dijkzate, door D-Geo Flow sommen uit te voeren.

Mocht het toch wenselijk zijn om het kritiek verval te berekenen in de situatie waarbij de pipe onder het voorland uitkomt, dan neemt D-Geo Flow de stroming van bovenaf ook mee, waardoor de berekening theoretisch gezien goed uitgevoerd kan worden. Dit kan wenselijk zijn wanneer de deklaag in het voorland zodanig is dat kortsluiting niet direct verwacht wordt, bijvoorbeeld bij een voorland versterking. Wel is er dan een risico op kortsluiting bij zwakke plekken. Ook hier kan een kans aan toegekend worden. Hierbij wordt opgemerkt dat voor een realistisch zicht op de opgave ook het gebied buiten de legger bijdraagt aan de intredeweerstand.

Wanneer de impact op het kritiek verval zodanig is dat hierdoor het handelingsperspectief verandert voor beoordeling (andere beoordelingscategorie) of versterken (leidt tot andere maatregel of opgave verdwijnt) wordt aanbevolen expertadvies in te winnen. Het kan in dat geval verstandig zijn om een nadere analyse uit te voeren of de beoordeling of maatregel uit te stellen (bijvoorbeeld met respectievelijk voorlopig oordeel, en de beslisboom piping (Rivierenland 2017)).

4.1.6 **Overweging voor integrale toepassing**

Onder een integrale toepassing wordt verstaan integraal afwegen welke aspecten voor een gebied kunnen spelen en de onzekerheden met het belangrijkste effect op de opgave beschouwen.

Gebruik maken van de doorlatendheid van de deklaag van het voorland is onderdeel van een betere geohydrologische beschouwing. In het kader hiervan zijn ook het meenemen van andere geohydrologische aspecten van belang zoals aangegeven in onderstaande tabel. De mate van belang hangt af van de gebied specifieke kenmerken, daarvoor wordt verwezen naar de tabellen van het faalpad in Bijlage B.

Tabel 4-1: Aspecten die naast het voorland effect kunnen hebben op de geohydrologie

Aspect	Relevant voor het optreden van opbarsten	Relevant voor terugschrijdende erosie (Sellmeijer model)
Anisotropie en meerlaagsheid	ja	ja
Doorlatendheid deklaag achterland	ja	Minder relevant voor kritiek verval, maar wel van belang voor pipe lengte en dus voor meenemen voorland. Ook van belang voor 3D effect, en voor 0,3D regel.
3D effect bij piping	Voor opbarsten kan de continuïteit van het zandlichaam van belang zijn dit speelt zowel in 2D als in 3D	ja
0,3 D regel	Niet relevant	ja

Daarnaast heeft doorlatendheid een groot effect op het kritieke verval, en kan het aanscherpen van waardes ten opzichte van die in het SOS relevant zijn.

Metingen en monitoring wordt aanbevolen voor de kalibratie van numerieke modellen, hierbij kan gedacht worden aan peilbuismetingen om de intredeweerstand van het voorland tijdens hoogwater te kalibreren of valideren.

4.1.7 Kennisleemtes en voorziene kennisontwikkeling

De analyses in KvK zijn uitgevoerd met prototype software (D-Geo Flow), en deze tool ligt ook voor de hand als het gaat om de onderbouwing van het meenemen van meer voorland.

D-Geo Flow is een prototype, doordat het programma slechts beperkt is getest is. Daarom is de controle van de resultaten door experts wenselijk. Voor handvatten voor de toepassing van het prototype D-Geo Flow wordt verwezen naar de Factsheet D-Geo Flow Voor op maat piping analyses (Knoeff et al., 2020). D-Geo Flow is niet gekalibreerd voor de berekening van pipe lengte (wel voor kritiek verval) daarom is de onzekerheid voor dit resultaat groter dan voor D-Geo Flow berekeningen waarbij andere aspecten beschouwd worden.

4.2 Doorlatendheid deklaag achterland

4.2.1 Wat is onderzocht

De doorlatendheid (en dikte) van het achterland (in combinatie met het voorland) heeft een sterke invloed op de opbouw van waterspanningen in de watervoerende pipinggevoelige zandlagen in het achterland, en is daarmee van belang voor opbarsten, heave en terugschrijdende erosie. In het KvK onderzoek is het effect op alle drie mechanismen beschouwd (Lam, 2018, Lam, 2019a&b).

Het effect voor opbarsten en heave is het meest significant. De methoden benoemd in dit factsheet (analytisch en met numerieke modellen) hebben betrekking op het meenemen van de deklaag van het voor- en het achterland voor het bepalen van de stijghoogten voor opbarsten. Het effect voor terugschrijdende erosie is relatief klein (bij de huidige werkwijze van 2D beschouwing, voor effect op 3D zie factsheet 3D stroming naar een pipe; de doorlatendheid van de deklaag in het achterland heeft ook effect op de kritieke pipe-lengte die van belang is voor het meenemen van meer voorland, zie factsheet Doorlatendheid deklaag voorland). Voor terugschrijdende erosie moet de invloed van de doorlatendheid van het achterland in samenhang met 3D stroming worden beschouwd.

4.2.2 Wanneer relevant

De leklengte van het achterland is een maat voor de afstand waarover de stijghoogte richting het achterland afneemt als gevolg van kwel door de deklaag. Bij een korte leklengte is sprake van een snelle afname van de stijghoogte, wat leidt tot een hoger kritiek verval voor opbarsten en heave.

De dikte (D_{WVP}) en doorlatendheid (k_{WVP}) van het watervoerend pakket en de dikte ($D_{deklaag}$) en doorlatendheid ($D_{deklaag}$) van de deklaag bepalen de leklengte: $\frac{\sqrt{k_{deklaag}D_{deklaag}D_{WVP}}}{k_{WVP}}$.

Een hogere $k_{deklaag}$ of kleinere $D_{deklaag}$ leiden tot een kortere λ . Voor situaties met een leklengte van het achterland van 100 en 30 m leidt dit tot respectievelijk 10% en 50% verlaging van de stijghoogte ten opzichte van een ondoorlatende deklaag in het achterland.

Wanneer in het achterland sloten die insnijden in het WVP, of drainage aanwezig zijn leidt dit tot een sterkere afname van de stijghoogte dan met de leklengte alleen berekend zou worden.

4.2.3 Wijze van toepassen

Het is al mogelijk de stijghoogte bij het opbarstpunt te reduceren door de dempingsfactor aan te passen aan de hand van de leklengte. Tevens bestaan analytische modellen, zoals de 'blanket equations', beschreven in (U.S. Army Corps of Engineers, 2000) waarmee de stijghoogte in het achterland bepaald kan worden. Daarnaast kan met numerieke modellen de stijghoogte bepaald worden. Dit biedt te mogelijkheid om ook andere effecten, zoals meerlaagsheid en anisotropie mee te nemen, evenals het effect van bijvoorbeeld sloten in het achterland.

4.2.4 Benodigde data

Benodigd zijn de ondergrondschematisatie, en de doorlatendheden en dikten van de lagen. Kaarten die de aanwezigheid van doorlatende deklagen weergeven zijn opgesteld in Lam (2019a).

4.2.5 Overwegingen voor toepassing van dit aspect

De aanwezigheid van een teensloot in het achterland (die niet in analytische modellen maar wel in numerieke modellen kan worden meegenomen) leidt tot een lagere stijghoogte (= een lagere faalkans) (Lam 2019b). Dit aspect is met name van belang bij diepe sloten die een groot deel van de deklaag doorsnijden.

Ook het al dan niet doorlopen van het zandlichaam in het achterland is van belang voor de optredende stijghoogte. Een zandlaag die niet doorloopt in het achterland kan leiden tot

lokale concentratie van stroming waardoor opbarsten al bij een lager verval optreedt (Hijma en Oost, 2019).

4.2.6 Overweging voor integrale toepassing

Onder een integrale toepassing wordt verstaan integraal afwegen welke aspecten voor een gebied kunnen spelen en de onzekerheden met het belangrijkste effect op de opgave beschouwen.

Gebruik maken van de doorlatendheid van de deklaag van het achterland is onderdeel van een betere geohydrologische beschouwing. In het kader hiervan zijn ook het meenemen van andere geohydrologische aspecten van belang zoals aangegeven in onderstaande tabel. De mate van belang hangt af van de gebied specifieke kenmerken, daarvoor wordt verwezen naar de tabellen van het faalpad in Bijlage B.

Tabel 4-2: Aspecten die naast het achterland effect kunnen hebben op de geohydrologie

Aspect	Relevant voor het optreden van opbarsten	Relevant voor terugschrijdende erosie (Sellmeijer model)
Anisotropie en meerlaagsheid	ja	ja
Doorlatendheid deklaag voorland	ja	ja
3D effect bij piping	Voor opbarsten kan de continuïteit van het zandlichaam van belang zijn dit speelt zowel in 2D als in 3D	ja
0,3 D regel	Niet relevant	ja

Daarnaast heeft doorlatendheid een groot effect op het kritieke verval, en kan het aanscherpen van waardes ten opzichte van die in het SOS relevant zijn.

Metingen en monitoring wordt aanbevolen voor de kalibratie van numerieke modellen.

4.2.7 Kennisleemtes en voorziene kennisontwikkeling

In verschillende projecten, waaronder bijvoorbeeld Meanderende Maas en GoWa word gebruik gemaakt van numerieke modellen om de stijghoogte te bepalen voor opbarsten en heave.

4.3 Anisotropie en Meerlaagsheid

4.3.1 Wat is onderzocht

Anisotropie van het watervoerende pakket houdt in dat de horizontale doorlatendheid K_h hoger is dan de verticale doorlatendheid K_v . De anisotropie factor is hier de verhouding $A = K_h/K_v$. Meerlaagsheid betekent de aanwezigheid van meerdere lagen in het watervoerend pakket (WVP). Deze aspecten hebben effect op opbarsten en terugschrijdende erosie. Het KvK onderzoek en deze bijsluiters richten zich op terugschrijdende erosie, omdat de kennis voor het toepassen van anisotropie bij opbarsten en heave reeds voorhanden is, met uitzondering van de bepaling van anisotropiefactoren.

KvK onderzoek (Kanning et al., 2018, Kanning et al., 2019a, i.s.m. Fugro, HKV en Deltares) is gedaan gericht op het effect van anisotropie op terugschrijdende erosie, gebruik makend van D-Geo Flow. Daarnaast is een aanpassing op de rekenregel van Sellmeijer afgeleid door Nick Stoop van Fugro (zie van Beek et al, 2020), om een eerste inschatting te maken van het effect van anisotropie.

Voor het effect van meerlaagsheid alleen op terugschrijdende erosie is het VNK neuraal netwerk gebruikt om te kijken naar het verschil tussen het meenemen van twee lagen in het VNK netwerk ten opzichte van de gewogen gemiddelde doorlatendheid in de rekenregel (van Beek et al. 2020).

Beide aspecten leiden tot een toename in het kritieke verval en dus een lagere faalkans.

4.3.2 Wanneer relevant

Deze aspecten zijn met name relevant in situaties met:

Anisotropie:

- Een hoge A
- Een dik watervoerend pakket

Een 25% toename van het kritieke verval H_c kan al verwacht worden bij een WVP van >15 m dik en een A van > 5 op basis van berekeningen in Kanning et al. (2018). Op basis van Bijlage A zijn dergelijk waarden van A met name te verwachten in getijdenafzettingen en rivierbeddingafzettingen, echter kan er binnen afzettingen sprake zijn van veel variatie.

Meerlaagsheid

- Een verhouding $K_{\text{onderste laag}}/K_{\text{bovenste laag}} > 5$
- De verhouding tussen de kwelweglengte L en de dikte van het watervoerend pakket D , hier is echter geen consistente relatie.

4.3.3 Wijze van toepassen

Meerlaagsheid kan worden meegenomen in de VNK tool :

(<https://dserie.deltares.nl/DGWebPiping/default.aspx>). Het ligt echter meer voor de hand om anisotropie, al dan niet met meerlaagsheid, middels het programma D-Geo Flow in rekening te brengen. Hierbij wordt de ondergrond met meerlaagsheid en anisotropie geschematiseerd. Om na te gaan of het meenemen van anisotropie leidt tot een wijziging in de opgave worden volgende stappen aangeraden:

1. Schematiseren van de situatie en inschatting van doorlatendheid en anisotropie van het watervoerend pakket
 - 1.a. eventueel eerste inschatting effect van anisotropie middels rekenregel met aanpassing van Nick Stoop (van Beek et al, 2020)
2. Berekeningen middels D-Geo Flow.
3. Kwaliteitscontrole op resultaten uit D-Geo Flow

4.3.4 Benodigde data

Benodigd voor het meenemen van anisotropie in D-Geo Flow zijn de ondergrondschematisatie, geometrie, randvoorwaarden, eigenschappen van de deklaag, en de doorlatendheden van de lagen, en voor anisotropie is waarde van A van belang. HPT-AMPT metingen en/of pompproeven kunnen gebruikt worden om A lokaal te meten; metingen moeten dan naar representatieve waarden voor de schaal van het proces vertaald worden zie hiervoor ook (0).

In Kanning et al. (2018) is op basis van literatuuronderzoek een inschatting gemaakt van A voor veelvoorkomende afzettingen, in Van Beek et al (2020) zijn ruwweg verwachte A waarden in de bovenste zandlaag op kaart weergegeven, zie ook bijlage A

4.3.5 Overwegingen voor toepassing van dit aspect

Met name anisotropie aan de rivierzijde heeft een groot effect op het kritieke verval, hoge anisotropie factoren hier zorgen ervoor dat anisotropie relatief veel effect heeft. Indien op basis van de ondergrondschematisatie reden is om te verwachten dat onder het voorland een andere (lagere) anisotropie factor is dan onder het achterland is het van belang hier rekening mee te houden bij de schematisatie.

De literatuurstudie in Kanning et al. (2018) toonde grote variaties van de anisotropiefactor in afzettingen, waardoor geen nauwkeurige relatie tussen afzettingsschaal en anisotropie kon worden aangetoond. De waarden in Bijlage A vormen daarmee slechts een indicatie welke onderbouwde dienen te worden met aanvullende metingen voor gebieden waar nog geen gegevens van zijn.

Bij lokale bepaling van A met HPT-AMPT sonderingen dienen meerdere metingen vertaald te worden naar een rekenwaarde voor een veiligheidsanalyse op basis van het berekende kritiek verval. Hierbij speelt de correlatielengte een rol. Bij een relatief korte correlatielengte van A (10 m of minder) middelen variaties en kunnen de metingen gemiddeld worden, tenzij grotere zones met lage anisotropie in het zandpakket voor de dijk aanwezig zijn. Voor getijdenzanden is in samenwerking met Fugro een methode ontwikkeld om deze rekenwaarden te bepalen (Kanning et al. 2019a).

Wanneer de impact op het kritiek verval zodanig is dat hierdoor het handelingsperspectief verandert voor beoordeling (andere beoordelingscategorie) of versterken (leidt tot andere maatregel of opgave verdwijnt) wordt aanbevolen expertadvies in te winnen.

4.3.6 Overweging voor integrale toepassing

Onder een integrale toepassing wordt verstaan integraal afwegen welke aspecten voor een gebied kunnen spelen en de onzekerheden met het belangrijkste effect op de opgave beschouwen.

Gebruik maken van anisotropie en meerlaagsheid is onderdeel van een betere geohydrologische beschouwing. In het kader hiervan zijn ook het meenemen van andere geohydrologische aspecten van belang zoals aangegeven in onderstaande tabel. De mate van belang hangt af van de gebied specifieke kenmerken, daarvoor wordt verwezen naar de tabellen van het faalpad in Bijlage B.

Tabel 4-3: Aspecten die naast anisotropie effect kunnen hebben op de geohydrologie

Aspect	Relevant voor het optreden van opbarsten	Relevant voor terugschrijdende erosie (Sellmeijer model)
Doorlatendheid deklaag voorland	ja	ja
Doorlatendheid deklaag achterland	ja	Minder relevant voor kritiek verval, maar wel van belang voor pipe lengte en dus voor meenemen voorland. Ook van belang voor 3D effect, en voor 0,3D regel.
3D effect bij piping	Voor opbarsten kan de continuïteit van het zandlichaam van belang zijn dit speelt zowel in 2D als in 3D	ja
0,3 D regel	Niet relevant	ja

Daarnaast heeft doorlatendheid een groot effect op het kritieke verval, en kan het aanscherpen van waardes ten opzichte van die in het SOS relevant zijn. Metingen en monitoring wordt aanbevolen voor de kalibratie van numerieke modellen.

4.3.7 Kennisleemtes en voorziene kennisontwikkeling

De HPT-AMPT sondering voor bepaling van anisotropie is nog niet geheel gevalideerd. De bepaling van anisotropie factoren per afzettingsgebied, en het eventuele aanpassen voor andere afzettingen van de methode die voor getijdenzanden is ontwikkeld voor het bepalen van rekenwaarden, wordt aanbevolen (Kanning et al., 2019a; van Beek et al., 2020).

De metingen en methoden van rekenen met meerlaagsheid en anisotropie worden toegepast (en verder ontwikkeld) in verschillende projecten waaronder: Spui 20-3, de veldproef in de Hedwigepolder, de veldproef bij de Vijfhuisterdijk.

Met betrekking op het modelleren van meerlaagsheid spelen geen aanvullende kennisleemten.

D-Geo Flow is een prototype, doordat het programma slechts beperkt is getest is. Daarom is de controle van de resultaten door experts wenselijk. Voor handvatten voor de toepassing van het prototype D-Geo Flow wordt verwezen naar de Factsheet D-Geo Flow Voor op maat piping analyses (Knoeff et al., 2020).

4.4 Aanwezigheid van een fijne fractie (slibfractie)

4.4.1 Wat is onderzocht

De gevoeligheid van getijdenafzettingen voor terugschrijdende erosie is onderzocht in Hijma en Oost, (2018) en Hijma (2019). Deze factsheet betreft het onderzoek naar de fijne fractie. Anisotropie is bij getijdenafzettingen ook vaak van belang en dit is in een aparte factsheet behandeld. Het onderzoek heeft aangetoond dat de aanwezigheid van een fijne fractie ($<63 \mu\text{m}$) leidt tot een hoger kritieke verval, en dat de sterktoename vooral gecorreleerd is aan de aanwezigheid van de slibfractie ($<16 \mu\text{m}$). Een voorlopige correlatie is afgeleid voor het effect van de slib fractie voor zanden waar de slib fractie homogeen in het zand gemengd is. In de praktijk komt de slibfractie ook geconcentreerd voor in klei en/of siltlagen. Dit effect is nog beperkt onderzocht, maar uiteraard hebben deze lagen wel veel invloed op terugschrijdende erosie. Het effect van deze gelaagdheid is echter nog lastig te kwantificeren en te parametriseren.

4.4.2 Wanneer relevant

Dit effect is relevant bij afzettingen met een slibfractie waarbij de slibfractie door het zandpakket gemengd is. De toename in sterkte lijkt vooralsnog een lineair verband te hebben met een toename in de slibfractie ($<16 \mu\text{m}$), maar zelfs bij 1% slibfractie is een beduidende sterkte toename (van 15% op het kritieke verval) te verwachten.

4.4.3 Wijze van toepassen

Om het mogelijke effect van de slibfractie in te schatten worden volgende stappen aanbevolen:

1. bepalen % van de slibfractie (fractie $<16 \mu\text{m}$), %slib
2. bereken kritieke verval met Sellmeijer regenregel of met D-Geo Flow, H_c
3. verhogen kritieke verval volgens de voorlopige relatie:

$$H_{c, \text{met fijne fractie}} = H_c(100\% + \%slib \times 15\%)$$

Dus bij 2% slibfractie neemt het verval met 30% toe ($130\%H_c$)

4. gevoeligheidsanalyse voor het effect van de hoeveelheid slibfractie in het zandpakket (een parameteronzekerheid die middels veldonderzoek verkleind kan worden) en het effect van de hoogte van A (kennisleemte).

De maximale slibfractie in de laboratoriumproeven was 16%, dit wordt vooralsnog als maximum mee te nemen slibfractie aanbevolen.

4.4.4 Benodigde data

Naast de data voor de bepaling van het kritieke verval met de rekenregel is het percentage slibfractie benodigd. In zandige getijdenafzettingen komt meestal een aanzienlijk fijne en slibfractie voor. Lutumpercentage ($<2 \mu\text{m}$) variëren hierbij tussen 0-8%, maar schommelen meestal tussen de 1-3%. Percentages silt ($2-63 \mu\text{m}$) zijn hoger en variëren tussen enkele procenten tot wel 40%. In de meeste gevallen gaat het om circa 5-30%.

Voor het lokaal bepalen van de slibfractie zullen meerdere monsters nodig zijn om een representatieve indicatie te krijgen van de aanwezige slibfractie. Hiervoor zijn nog geen richtlijnen ontwikkeld, maar de verwachting is dat het benodigde aantal monsters ook gerelateerd zal zijn aan de variatie binnen een gebied.

4.4.5 Overwegingen voor toepassing van dit aspect

Voor het onderzoek zijn kleine schaal laboratorium proeven uitgevoerd. Deze proeven zijn vooral uitgevoerd met gehomogeniseerde monsters (waar de fijne fractie door het monster gemengd is). Ook zijn twee proeven met een verticale kleilaag gedaan. Het effect van horizontale (spekkoek) gelaagdheid is niet onderzocht. De invloed van de horizontale gelaagdheid op piping is eerder beschreven, en op basis daarvan zijn enkele WBI-SOS eenheden met veel gelaagdheid tot de deklaag gerekend. De proeven zijn vooral uitgevoerd op uit het veld gehaald getijdenzand. Er is nog geen rivierzand met een fijne fractie beproefd, maar wel zand met een toegevoegde fijne fractie. Het valt te verwachten dat de fijne fractie ook invloed heeft op terugschrijdende erosie in het rivierengebied. Onderzocht moet worden of de slibfractie ook voor het rivierengebied de meest

geschikte parameter is of dat de gehele fijne fractie een betere parameter is. Dit is relevant, omdat slibpercentages in het rivierengebied lager zijn dan in het getijdengebied en wellicht te laag om goed te kunnen meten.

Wanneer de impact op het kritiek verval zodanig is dat hierdoor het handelingsperspectief verandert voor beoordeling (andere beoordelingscategorie) of versterken (leidt tot andere maatregel of opgave verdwijnt) wordt aanbevolen expertadvies in te winnen.

4.4.6 Overweging voor integrale toepassing

Bij getijdenzanden kan veelal ook sprake zijn van anisotropie en meerlaagsheid, en daarmee is het relevant om de geohydrologische aspecten integraal te beschouwen. Zie hiervoor ook 4.3.6. Ook kan de fijne fractie leiden tot een lagere doorlatendheid in het watervoerend pakket wat een groot effect op de opgave kan hebben.

4.4.7 Kennisleemtes en voorziene kennisontwikkeling

Er kunnen meerdere oorzaken zijn van een hogere sterkte van getijdenzand waaronder:

- De aanwezigheid van dunne kleilaagjes (doolhofstructuur, de pipe die om blokkades heen moet groeien).
- Cohesie, zowel fysisch als biologisch
- De aanwezigheid van fijne fractie

De huidige resultaten tonen aan dat de aanwezigheid van fijne fractie alleen al een rol speelt (zelfs bij een niet cohesieve fijne fractie). Mogelijk is in het veld een hogere sterkte door aanvullende effecten van cohesie en kleilagen.

De verwachting is dat de sterkte toename niet afhankelijk is van schaalgrootte, echter dit dient nog onderzocht te worden.

Voor de validatie van dit onderzoek zijn veldproeven in Noord-Friesland (Vijfhuisterdijk, 2020), en Zeeland (Hedwigepolder, 2020-2022) 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.

Parallel zal worden gewerkt aan een veiligheidsfilosofie. Onderdeel hiervan is een methode voor het bepalen van een rekenwaarde van de slibfractie aan de hand van een verzameling monsters, en de toepassing op andere afzettingen onderzoeken. Daarnaast kan ook de voorlopige regel om het kritiek verval aan te passen voor de fijne fractie worden aangepast. De huidige versie is gebaseerd op een ondergrensbenadering van de beschikbare proeven.

4.5 0,3D regel (en heave)

4.5.1 Wat is onderzocht

Het deelmechanisme heave en de 0,3D-regel gaan beide uit van het transport van korrels door het opbarstkanaal. Er wordt verondersteld dat een drukval aanwezig moet zijn om korrels naar het oppervlak te brengen (heave) en deze drukval wordt in mindering gebracht op het aanwezige verval bij terugschrijdende erosie in de vorm van de 0,3D-regel (waar D de dikte van de deklaag is). Het onderzoek naar korreltransport wijst uit dat de benodigde drukval voor korreltransport theoretisch gezien kan variëren tussen vrijwel 0 en 1, afhankelijk van korreldiameter, de afmetingen van het opbarstkanaal en het debiet in het opbarstkanaal (van den Ham, 2018).

Dit factsheet gaat in op de toepassing van de 0,3D regel voor terugschrijdende erosie.

4.5.2 Wanneer relevant

Het effect is met name relevant bij een dikke deklaag.

4.5.3 Wijze van toepassen

Aangezien de waarde van de drukval onzeker is wordt aanbevolen om na te gaan wat het effect van 0,1 D en 0,6 D op het kritieke verval zou zijn en hoe dit de opgave beïnvloedt. Dit kan zowel bij het gebruik van de rekenregel als bij het gebruik van D-Geo Flow worden gedaan.

Wanneer de impact op het kritiek verval zodanig is dat hierdoor het handelingsperspectief voor beoordeling (andere beoordelingscategorie) of versterken (leidt tot andere maatregel of opgave verdwijnt) verandert, wordt aanbevolen expertadvies in te winnen. Het kan in dat geval verstandig zijn om een nadere analyse uit te voeren

4.5.4 Benodigde data

Dikte van de deklaag (ter plaatse van het uittredepunt).

4.5.5 Overwegingen voor toepassing van dit aspect

Hoewel er nog veel kennisleemten spelen rondom dit aspect is de verwachting wel dat de weerstand in het opbarstkanaal hoger is bij:

- een grotere korrel
- een grotere diameter van het opbarstkanaal
- een laag debiet (bijvoorbeeld door een lage doorlatendheid van het watervoerend pakket, een laag verval, veel afstroom naar het achterland, meerdere wellen in het gebied of een ondoorlatend lang voorland).

Wanneer de impact op het kritiek verval zodanig is dat hierdoor het handelingsperspectief verandert voor beoordeling (andere beoordelingscategorie) of versterken (leidt tot andere maatregel of opgave verdwijnt) wordt aanbevolen expertadvies in te winnen. Het kan in dat geval verstandig zijn om een nadere analyse uit te voeren of de beoordeling of maatregel uit te stellen (bijvoorbeeld met respectievelijk voorlopig oordeel, en de beslisboom piping (Rivierenland 2017)).

4.5.6 Overweging voor integrale toepassing

Onder een integrale toepassing wordt verstaan integraal afwegen welke aspecten voor een gebied kunnen spelen en de onzekerheden met het belangrijkste effect op de opgave beschouwen.

Het meenemen van de weerstand in het opbarstkanaal, middels de 0,3 D regel, maakt deel uit van de geohydrologische beschouwing. In het kader hiervan zijn ook het meenemen van andere geohydrologische aspecten van belang zoals aangegeven in onderstaande tabel. De

mate van belang hangt af van de gebied specifieke kenmerken, daarvoor wordt verwezen naar de tabellen van het faalpad in Bijlage B.

Tabel 4-4: Aspecten die naast de 0,3D regel effect kunnen hebben op de geohydrologie

Aspect	Relevant voor het optreden van opbarsten	Relevant voor terugschrijdende erosie (Sellmeijer model)
Doorlatendheid deklaag voorland	ja	ja
Doorlatendheid deklaag achterland	ja	Minder relevant voor kritiek verval, maar wel van belang voor pipe lengte en dus voor meenemen voorland. Ook van belang voor 3D effect, en voor 0,3D regel.
3D effect bij piping	Voor opbarsten kan de continuïteit van het zandlichaam van belang zijn dit speelt zowel in 2D als in 3D	ja
Anisotropie en meerlaagsheid	ja	ja

Daarnaast heeft doorlatendheid een groot effect op het kritieke verval, en kan het aanscherpen van waardes ten opzichte van die in het SOS relevant zijn. Metingen en monitoring wordt aanbevolen voor de kalibratie van numerieke modellen.

4.5.7 Kennisleemtes en voorziene kennisontwikkeling

Het beter bepalen van de druk van in het opbarstkanaal kan onderzocht worden door gebruik van numerieke modellen voor de grondwaterstroming in combinatie met een hindered settling model voor het opbarstgat, en metingen in het veld. Het lijkt niet praktisch om voor praktijktoepassingen per locatie te bepalen wat de drukval is, doordat parameters die dit beïnvloeden onzeker zijn (zoals bijvoorbeeld de doorsnede van het opbarstkanaal). Op basis van gevoeligheidsstudies waarin voor verschillende scenario's wordt nagegaan wat de weerstand is kan mogelijk een (gebiedsspecifieke) bandbreedte van de weerstand, of methode om die te bepalen worden opgesteld.

4.6 3D effect bij piping

4.6.1 Wat is onderzocht

Het 3D effect heeft betrekking op de concentratie van stroming in 3 dimensies, en kan spelen voor opbarsten, heave en terugschrijdende erosie. Voor opbarsten worden regionale (3D) modellen al gebruikt om lokale zwakke plekken te identificeren (bijvoorbeeld MeMa, GoWa, etc.). In het KvK onderzoek is middels numerieke berekening (Acacia Water & Deltares, in De la Loma et al. 2020) onderzocht wat het effect van concentratie van stroming naar een wel is op de erosielen ter plaatse van het opbarstpunt. Tevens is op basis van laboratoriumproeven een eerste analyse gemaakt van het effect van 3D stroming op het kritieke verval voor terugschrijdende erosie.

Deze factsheet gaat in op het effect van 3D stroming voor terugschrijdende erosie. De huidige 2D modellen (Sellmeijer rekenregel & D-Geo Flow) gaan in feite uit van een oneindig brede pipe, waardoor de concentratie van stroming onderschat wordt. Hoe meer de situatie 3D is, hoe groter de onzekerheid over het berekende kritieke verval met zowel de rekenregel van Sellmeijer als met D-Geo Flow. Hoewel de werkelijkheid altijd 3D is, is voor een situatie waarbij de grondwaterstroming 2D is, zoals bijvoorbeeld bij een doorsnijdende sloot, geen 3D effect.

Voor een sterk 3D situatie (alleen afstroming naar de wel) is een inschatting gemaakt van het 3D effect op basis van laboratorium proeven. Echter hoe zich dit naar de veldschaal vertaalt is een kennisleemte.

4.6.2 Wanneer relevant

De mate van 3D stroming hangt af van zowel lek lengte van het achterland als de breedte (loodrecht op het dwarsprofiel) van de piping gevoelige zandbaan.

Bij een grote lek lengte van het achterland ($\lambda_{AL} = \sqrt{\frac{KdD}{k}}$, waar K & D zijn doorlatendheid en dikte watervoerend pakket, en k & d zijn doorlatendheid en dikte deklaag in het achterland) zal stroming sterk naar de pipe concentreren en is het 3D effect groot.

Bij een brede zandbaan zal het 3D effect groter zijn dan wanneer het pipinggevoelige zandpakket een smallere zandbaan betreft.

Wanneer sprake is van een langssloot die insnijdt in het WVP is de situatie vrijwel 2D, en hoeft geen 3D effect meegenomen te worden.

4.6.3 Wijze van toepassen

Omdat er nog grote onzekerheid is over de relatie tussen λ_{AL} en het effect van 3D stroming op het kritieke verval voor terugschrijdende erosie wordt aangeraden om een middels de volgende stappen een eerste inschatting te maken voor situaties waar de pipinggevoelige zandbaan breed is:

1. bepalen lek lengte achterland.
2. bepalen factor waarmee kritiek verval H_c verandert ten opzichte van 2D berekening aan de hand van de indicatiewaarden uit van Beek et al (2020), $H_{c,3D} = \frac{H_c}{F_{3D}}$ zoals weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 4.1 indicatie voor 3D factor o.b.v. van Beek et al. (2020)

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

De waarden in deze tabel zijn slechts een interpolatie tussen een volledig ingesloten en volledig open aquifer, op basis van kleine schaal proeven. De extrapolatie naar veldomstandigheden is een kennisleemte.

4.6.4 Benodigde data

Berekening kritiek verval (rekenregel of D-Geo Flow). Ondergrondschematisatie met dikte en doorlatendheden, hierin zijn de geometrie van het achterland en de eventuele aanwezigheid van een teensloot (en of deze in het watervoerend pakket insnijdt) van belang.

4.6.5 Overwegingen voor toepassing van dit aspect

Opgemerkt wordt dat de aanwezigheid van een sloot of drainage in het achterland zal leiden tot een kortere lek lengte (en kleiner 3D effect) dan middels de analytische formule voor lek lengte wordt berekend. Bij een sloot die insnijdt in het watervoerend pakket zal dan ook geen 3D effect meegenomen hoeven worden. Bij drainage of een niet insnijdende sloot kan middels numerieke modellen en expert judgement een aangepaste inschatting worden gemaakt van het 3D effect.

Wanneer de impact op het kritiek verval zodanig is dat hierdoor het handelingsperspectief verandert voor beoordeling (andere beoordelingscategorie) of versterken (leidt tot andere maatregel of opgave verdwijnt) wordt aanbevolen expertadvies in te winnen.

4.6.6 Overweging voor integrale toepassing

Onder een integrale toepassing wordt verstaan integraal afwegen welke aspecten voor een gebied kunnen spelen en de onzekerheden met het belangrijkste effect op de opgave beschouwen.

Het meenemen van 3D effecten maakt deel uit van de geohydrologische beschouwing. In het kader hiervan zijn ook het meenemen van andere geohydrologische aspecten van belang zoals aangegeven in onderstaande tabel. De mate van belang hangt af van de gebied specifieke kenmerken, daarvoor wordt verwezen naar de tabellen van het faalpad in Bijlage B.

Tabel 4-5: Aspecten die naast het 3D effect, effect kunnen hebben op de geohydrologie

Aspect	Relevant voor het optreden van opbarsten	Relevant voor terugschrijdende erosie (Sellmeijer model)
Doorlatendheid deklaag voorland	ja	ja
Doorlatendheid deklaag achterland	ja	Minder relevant voor kritiek verval, maar wel van belang voor pipe lengte en dus voor meenemen voorland. Ook van belang voor 3D effect, en voor 0,3D regel.
Anisotropie en meerlaagsheid	ja	ja
0,3 D regel	Niet relevant	ja

Daarnaast heeft doorlatendheid een groot effect op het kritieke verval, en kan het aanscherpen van waardes ten opzichte van die in het SOS relevant zijn. Metingen en monitoring wordt aanbevolen voor de kalibratie van numerieke modellen.

4.6.7 Kennisleemtes en voorziene kennisontwikkeling

De eerste indicatie van het 3D effect is gebaseerd op kleine schaal laboratorium proeven, het is mogelijk dat schaaleffecten een rol spelen. Daarnaast zullen meerdere factoren de

concentratie van stroming naar een pipe in de praktijk beïnvloeden, waaronder naast 3D effecten ook heterogeniteit, anisotropie, doorlatendheden van de deklaag in het voor en achterland, en de regionale waterhuishouding in het achterland. Ook de aanwezigheid van meerdere wellen (en of pipes) kan een rol spelen.

Het rekenhart van D-Geo Flow, DgFlow, kan reeds in 3D benut worden, en wordt gebruikt om piping in 3D te onderzoeken. Bij een 3D piping berekening spelen echter nog meerdere kennisleemtes waaronder de afmetingen van de pipe, en de gecombineerde rol van primaire en secundaire erosie. Zowel ontwikkeling op gebied van (numerieke) modellering, als proeven op verschillende schalen zijn nodig om de onzekerheden te verkleinen.

4.7 Nog geen handvatten beschikbaar

4.7.1 Meso- en micro-schaal heterogeniteit van de onderkant van de deklaag in de baan van de pipe

Dit aspect is onderzocht in van Beek et al (2019). De meso-schaal (ordegrootte meters tot tientallen meters) en micro-schaal (ordegrootte centimeters) variatie van de onderkant van de deklaag is onderzocht voor dekzanden. Op basis van berekeningen in de onderzoeksversie DgFlow² is het effect hiervan op het kritieke verval berekend. Voor micro-schaal variatie (een zaagtand) van de onderkant van de deklaag leidt dit tot een toename in sterkte van ca. 7%. Voor macro-schaal variatie (een uniforme helling) hangt het effect af van de richting waarin de deklaag helt en kan dit leiden tot een sterkte toe of afname van ca. 6% voor de hellingen die in dekzanden zouden kunnen worden verwacht.

Om het effect voor een specifieke locatie te kunnen bepalen dienen aanpassingen in de software gemaakt te worden, en is data met betrekking op de aanwezige variatie van de onderkant van de deklaag van belang.

4.7.2 Micro- en meso-schaal variatie van korrelgrootte in de baan van de pipe

Dit aspect is onderzocht in Kanning et al. (2019b) door middel van probabilistische analyse van random field simulaties in het USACE model (beschreven in Robbins en Griffith (2018a, 2018b)). Doordat piping in het USACE model anders wordt gemodelleerd (met primaire en secundaire erosie) zijn resultaten van simulaties uit het USACE model vertaald naar effecten op de korrelgrootte. Daarvoor zijn vervolgens probabilistische analyses gedaan voor twee representatieve cases. Hieruit blijkt dat het effect van heterogeniteit van de korrelgrootte in de baan van de pipe gunstig of ongunstig kan zijn. Dit hangt af van de variatiecoëfficiënt van de korrelgrootte en van de correlatielengtes (een grotere correlatielengte kan gezien worden als meso-schaal variatie, een kleinere correlatielengte als micro-schaal variatie).

De resultaten geven 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. Een doorontwikkeling van D-Geo Flow (of onderzoeksversie DgFlow) zou nodig zijn om dit effect met dat programma nader te kunnen analyseren.

² Op de markt is de user interface D-Geo Flow beschikbaar die gebruik maakt van het rekenhart DgFlow. Een onderzoeksversie van dit rekenhart wordt om nieuwe functionaliteiten te testen en in te zetten voor onderzoek bij Deltares.

4.8 Observaties

4.8.1 Een review van case studies

Hierin is gekeken naar internationale case studies waar piping geleid heeft tot bezwijken, of bijna bezwijken, uit het recente verleden. Dit is gedaan door literatuurstudie en bezoeken aan de instituten AiPo (Italië) en USACE (Verenigde Staten van America). Een overzicht is gemaakt van cases die wellicht geschikt zijn voor het vergelijken en valideren van piping modellen in van Beek et al. (2020).

Belangrijke bevindingen zijn:

- Er zijn ook internationaal relatief weinig gevallen van bewezen (bijna) dijkfalen door piping beschreven voor zo'n belangrijk faalmechanisme
- Forensisch onderzoek aan geobserveerde zandmeevoerende wellen wordt in het buitenland regelmatig uitgevoerd. In Nederland gebeurt dit minimaal: zo gauw een overstroming voorbij is stopt de urgentie. Dit is een gemiste kans omdat tijdens iedere overstroming dezelfde kennisvragen weer opkomen.
- Piping treedt op in verschillende settings, van delta's tot stroomvlaktes.
- Wellen ontstaan vaak waar een zandbaan doodloopt op een kleiplug (een snelle polderwaartse overgang van zand naar klei/veen) die ervoor zorgt dat het water naar boven stuwt.
- Het proces tot bezwijken kan van minuten tot ongeveer een maand in duren, in Hongarije wordt ook expliciet onderscheid gemaakt tussen snelle en langzame piping. Echter vanaf het moment dat een modderfontein wordt geobserveerd is het in alle cases een kwestie van minuten totdat bezwijken optreedt.

4.8.2 Verklaring voor zandmeevoerende wellen in West Nederland

In het benedenrivierengebied worden weinig zandmeevoerende wellen waargenomen.

Mogelijk spelen hierbij de volgende factoren een rol:

- Een dikkere deklaag, of de samenstelling van de deklaag (meer veen dan naar het oosten), die daardoor minder gevoelig is voor opbarsten.
- De dijk is gefundeerd op smallere zandige stroomgordels die zijn ingebed in dikke klei en veen pakketten, wat leidt tot minder stroming.
- Minder zandbanen die in contact staan met diepere zandlagen (gefundeerd zijn);
- De invloed van een andere korrelgrootteverdeling (fijner, meer silt, meer klei) ten opzichte van bovenstroomse gebieden (hierdoor ook meer intredeweerstand en een lagere doorlatendheid).

Door het onderzoeken van enkele wellen die wel opgetreden zijn, kwamen de volgende belangrijke aspecten naar voren:

- De aanwezigheid van een kleiplug (zoals ook bleek uit de review van case studies).
- Kortsluiting tussen het Holocene zand (bovenliggend) en het Pleistocene zand (onderliggend). Door de hogere doorlatendheid van het Pleistocene zand leidt dit tot een beduidend grotere belasting.
- Mogelijk spelen de eigenschappen van getijdenafzettingen ook een rol, zoals de invloed van fijne fractie op doorlatendheid en de anisotropie van deze afzettingen.

4.8.3 Uitgraven van wellen bij de Willemspolder

Voor dit aspect zijn eerder gevormde wellen bij laagwater uitgegraven in de Willemspolder (nabij IJzendoorn) in samenwerking met Waterschap Rivierenland. Op deze locatie is in 2016 een veldtest uitgevoerd om een verticaal zanddicht geotextiel (VZG) en een grofzandbarrière (GZB) te beproeven. De wellen die benedenstrooms van de GZB zijn gevormd zijn uitgegraven. Hierbij werd geconstateerd dat:

- De pipe zich in de overgangszone tussen zand en klei bevindt, en stond voor zover te zien was niet direct in contact met de top van het zand

- De loop van de pipe leek beïnvloed te zijn door scheuren in de deklaag. Dit laat zien dat pipes wel gedurende meerdere jaren blijven bestaan, het is echter ook mogelijk dat er tevens pipes zijn ontstaan die wel zijn verdwenen. Ook is het onduidelijk of het vormen van een pipe in de overgangszone vaker voorkomt of op deze locatie ook beïnvloed is door de invloed van de GZB op de grondwaterstroming.

CONCEPT

5 Referenties

- De la Loma, B., Burger, S., van Beek, V., Noordam, A., 2019. KvK Piping deelproject 016 - Geohydrologische situatie bij een 3D uitstroom
DGWB, 2019, Factsheet, zie <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/beoordelen/nieuwsbrieven/nieuwsbrief-landelijke-beoordeling/nieuwsbrief-boi-mei-2020/factsheets-beoordelen/>
- 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., 2019. Waarom zijn er weinig zandmeevoerende wellen in West-Nederland? Concept Deltares rapport 11202560-015-GEO-0006.
- Kanning, W., Berbee, B., Horst, W., Van der Meer, A., Stoop, N., 2018. KPP Piping - Anisotropie: Verkenning meenemen anisotropie in piping analyses.
- Kanning, W., Hijma, M., van Meerten, H., 2019. 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.
- Knoeff, H., Kanning, W., Rosenbrand, E., van Beek, V. 2020. Factsheet D-Geo Flow. Voor op maat piping analyses. Deltares memo: 11205758-GEO-0001.
- Kruse, G., Sellmeijer, H., van Esch, J., Calle, E. 2015. Optreden van piping in getijdenafzettingen. Deltares Memo
- Lam, K.S., 2018. KPP Piping - doorlatendheid deklaag: eindrapport.
- Lam, K.S., 2019a. KvK Piping deelproject 015: Doorlatende deklagen in Nederland.
- Lam, K.S., 2019b. KvK Piping deelproject 015: Effect van een binnensloot op de stijghoogte t.p.v. de binnenteen.
- Lam, K.S., 2020. KvK Piping deelproject 015: Oprekken van het mee te nemen voorland voor de kwelweglengte.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. 2017. Schematiseringshandleiding piping. Versie 2.2.
- Robbins, B.A., & Griffiths, D.V. (2018a). A simplified finite element implementation of the Sellmeijer model for backward erosion piping. In Proceedings of the 9th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering. Puerto, Portugal, June 25-27, 2018.
- Robbins B.A. & Griffiths, D.V. (2018b) Modelling of backward erosion piping in two and three dimensional domains. In Internal Erosion in Earthdams, Dikes and Levees - Proceedings of EWG-IE 26th Annual Meeting 2018. Ed. Bonelli, S., Jommi, C., Sterpi, D. Politecnico di Milano 10-13 Sept. 2018.
- 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.
- Rosenbrand, E., Knoeff, H., 2020. KvK 2019 onderzoek faalpaden en piping. Deltares rapport 11203719-028-GEO-0009.
- Rosenbrand, E., Knoeff, H., Hijma, M., van Onselen, E., 2020. Gebiedsspecifieke Faalpaden voor Piping. Deltares concept rapport 11205284-001-ZWS-0002
- TAW, 2004. Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken.
- U.S. Army Corps of Engineers, 2000. Engineer and Design - Design and Construction of Levees.

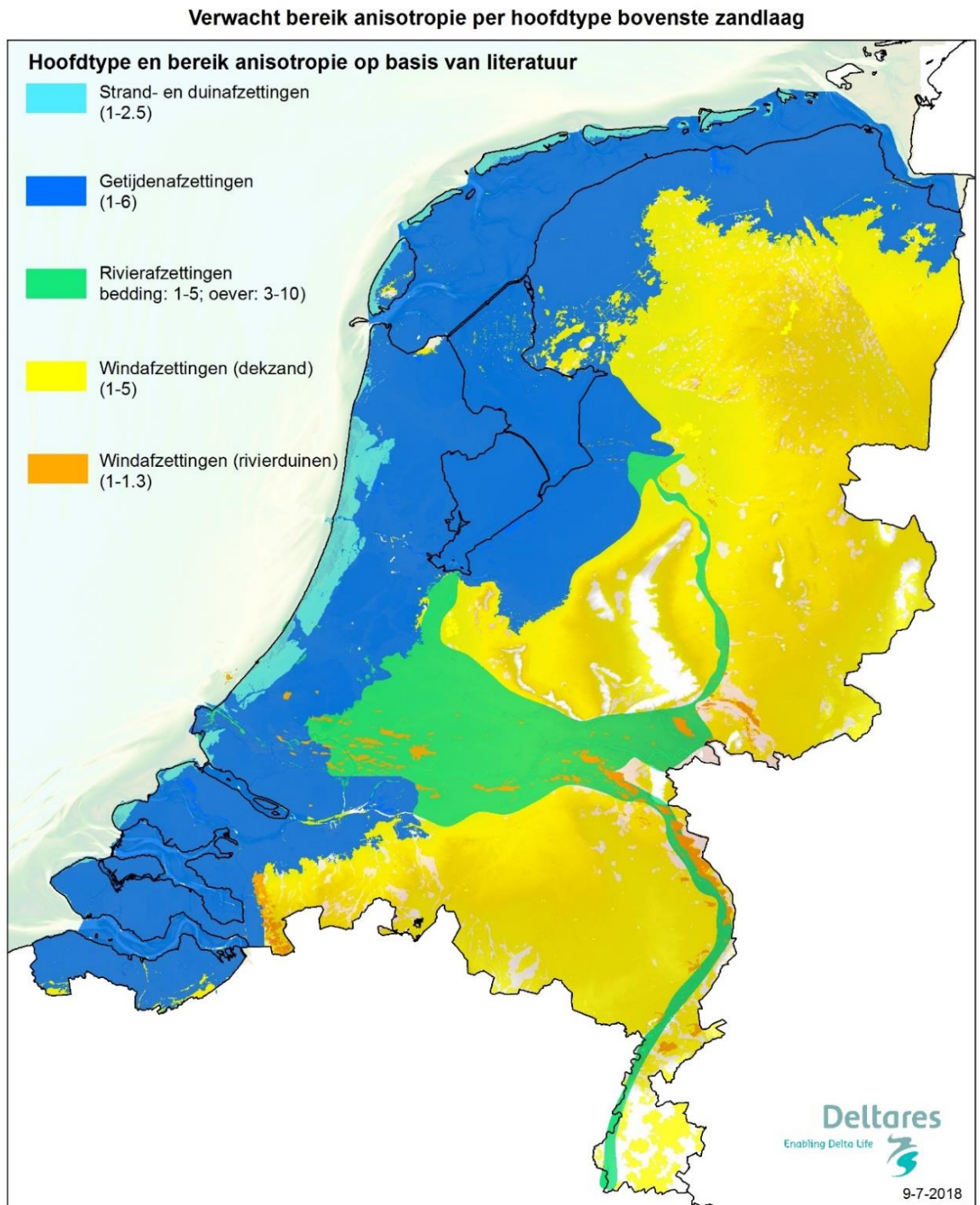
Van Beek, V.M., Hoogendoorn, R., Rosenbrand, E., Hijma, M., 2020. KvK Piping deelproject 019: Syntheserapport. Deltares Rapport 11203719-019-GEO-000311203719-019-GEO-0003.
Vollering, M.P.M., Stoop, N.M., 2019. Memo "Innovatie Voorland Piping – Deelvraag 1: Pipegroei."
Waterschap Rivierenland, 2019. 17-5553 Factsheet Beslisboom piping

CONCEPT

CONCEPT

CONCEPT

A Verwacht bereik anisotropie in bovenste zandlaag



Figuur A.1. Verwacht bereik anisotropiefactor per hoofdtype bovenste zandlaag (Van Beek et al., 2020).

B Overzicht faalpaden en belangrijkste aspecten

Op basis van lokale karakteristieken van de belasting en de geologie is voor vier gebieden een faalpadanalyse uitgevoerd om de meest belangrijke knopen in het faalpad, en de naar verwachting meest invloedrijke parameters die de faalkans beïnvloeden te identificeren in Rosenbrand et al. (2020). Een concept samenvatting hiervan is opgenomen in deze. Op basis hiervan wordt aangegeven welke kennis per gebied naar verwachting het meeste impact zal hebben. Doordat er ook binnen die gebieden veel variatie mogelijk is, kunnen ook andere effecten, en andere kennis van belang zijn. De voorliggende indicatie moet dan ook vooral gezien worden in het kader van 'van grof naar fijn' werken, en is gebaseerd op een generalisatie van karakteristieken van een gebied. De faalpadanalyse in dit rapport is uitgevoerd voor groene dijken, zonder kunstwerken zoals een heave scherm, verticaal zanddicht geotextiel, GZB, etc.

Deze bijlage bevat een conceptversie van de faalpaden voor de vier gebieden:

- Bovenrivierengebied Rijntakken
- Limburg: het Maasdal
- Getijdengebied
- Benedenrivierengebied

zoals deze is opgesteld in Hoofdstuk 2 van Rosenbrand et al. (2020). Dit betreft de samenvatting van de uitgebreidere faalpaden analyse voor piping op basis van de geologie en belasting karakteristieken voor die gebieden zoals die in dat rapport zijn gerapporteerd.

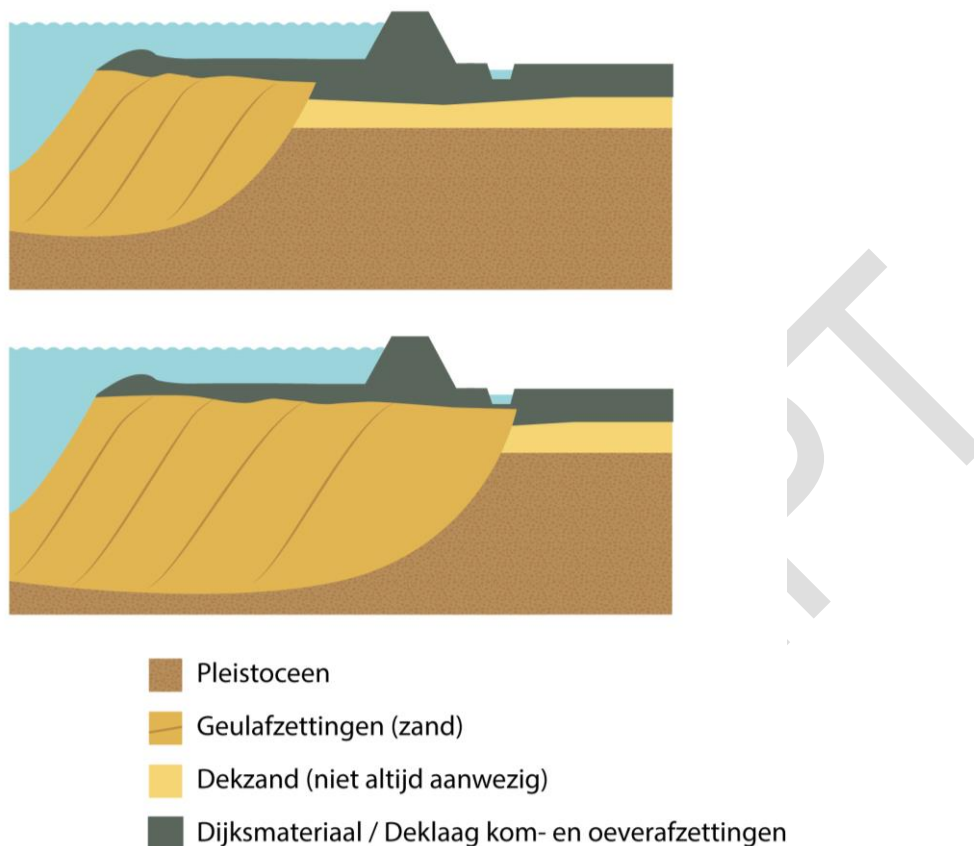
Dit concept is opgenomen ter ondersteuning van de keuze van de meest relevante kennis per gebied in Hoofdstuk 3 van dit rapport. Naar aanleiding van bevindingen van beheerders kan voorliggend overzicht nog aangepast worden.

De waterspanningen in het watervoerende pakket (knopen 1 en 2) zijn de drijvende kracht, d.w.z. de relevante belasting voor de processen in knopen 3 tot en met 9. De waterspanningen worden bepaald door de buitenwaterstand en de invloed hiervan op het watervoerend pakket (WVP) in knoop 1 en de eigenschappen van het WVP en de deklaag in het achterland die de toename van de stijghoogte onder de deklaag beïnvloeden in knoop 2. Belangrijke aspecten³ met betrekking op knopen 1 en 2 kunnen op verschillende manieren meegenomen worden voor de latere mechanismen. Bijvoorbeeld, het meenemen van de intredeweerstand van het voorland wordt voor terugschrijdende erosie (knoop 5) vaak gekoppeld aan eisen aan het voorland om kortsluiting van de pipe te voorkomen, iets wat voor opbarsten of heave (knoop 3 en 4) geen rol speelt. Daarom wordt de kennis bij die knopen getoond. Deze keuze is gemaakt voor dit rapport om de kennis zodanig te structureren en ontsluiten dat de toepassing duidelijk is. Voor andere toepassingen, zoals het doorrekenen van het gehele faalpad aan de hand van de (conditionele) kansen voor alle knopen kunnen andere overwegingen, zoals met betrekking op correlaties, spelen wat kan leiden tot een andere indeling.

³ Onder aspect worden zowel de in KvK onderzochte onderwerpen als andere aspecten (parameters/effecten) verstaan.

B.1 Bovenrivierengebied Rijntakken

In het bovenrivierengebied zijn de deklagen veelal dunner doordat het Pleistocene pakket relatief ondiep is. Voorbeelden van typische ondergrondkarakteristieken in het bovenrivierengebied zijn in onderstaande figuur getoond.



Figuur B1: Typische ondergrondopbouw in het bovenrivierengebied. Er kan een lang voorland aanwezig zijn, eventueel met een zomerkade. Het pleistocene watervoerend pakket kan vrij dicht onder de oppervlakte liggen, daardoor zijn de deklagen veelal relatief dun. Soms is er een laag dekzand aanwezig bovenop het watervoerend pakket. Holocene rivierafzettingen (geulafzettingen) kunnen ingesneden liggen in het pleistocene pakket. Deze holocene afzettingen lopen niet altijd door onder de dijk en in het achterland.

Zoals in alle gebieden zijn voor het optreden van piping de aspecten die de toename van de waterspanning in het watervoerende pakket (WVP) buitendijks en in het achterland (knoep 1 en 2) beïnvloeden van groot belang. Het gaat om eigenschappen van de deklaag en het WVP; door de lange duur van de hoogwaterbelasting speelt tijdsafhankelijke grondwaterstroming naar verwachting een onbelangrijke rol.

Opbarsten en heave (knoop 3 en 4) lijken wegens de veelal dunne deklagen (typisch orde 0,5 tot 3 m) vaak minder van belang, doordat de kans op opbarsten en heave bij een dunne deklaag hoger is. Echter, die dunne deklaag zal ook zorgen voor meer kwel naar het maaiveld, waardoor de waterspanningen onder de deklaag minder oplopen. Daardoor neemt de kans op opbarsten af, evenals de stroomsnelheid in het opbarstkanaal die van belang is voor heave.

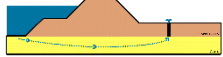
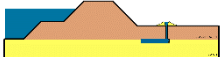

Gelet op de karakteristieken van het pipingproces in het bovenrivierengebied is de verwachting dat de **onzekerheden omtrent de geohydrologische aspecten die knoop 5,**

terugschrijdende erosie, beïnvloeden het grootste effect op de overstromingskans door piping in dit gebied hebben. Met name de invloed van de intredeweerstand in het voorland, heterogeniteit van het watervoerend pakket (preferente stroombanen en zwakke plekken, meerlaagsheid, anisotropie) en aspecten die concentratie van stroming naar de pipe beïnvloeden zijn daarom aandachtspunten voor het maken van een scherpe analyse van de faalkans.

Vanwege de relatief lange duur van het hoogwater zijn knopen 6 tot en met 10 minder belangrijk. Maatregelen (knoop 9), is een uitzondering aangezien maatregelen bij verschillende knopen genomen kunnen worden. Het meenemen van maatregelen uit het calamiteitenplan (knoop 9) heeft wel invloed op de overstromingskans, en zeker, wanneer dit in combinatie met tijdsafhankelijkheid wordt beschouwd (Rosenbrand en Knoeff, 2020).

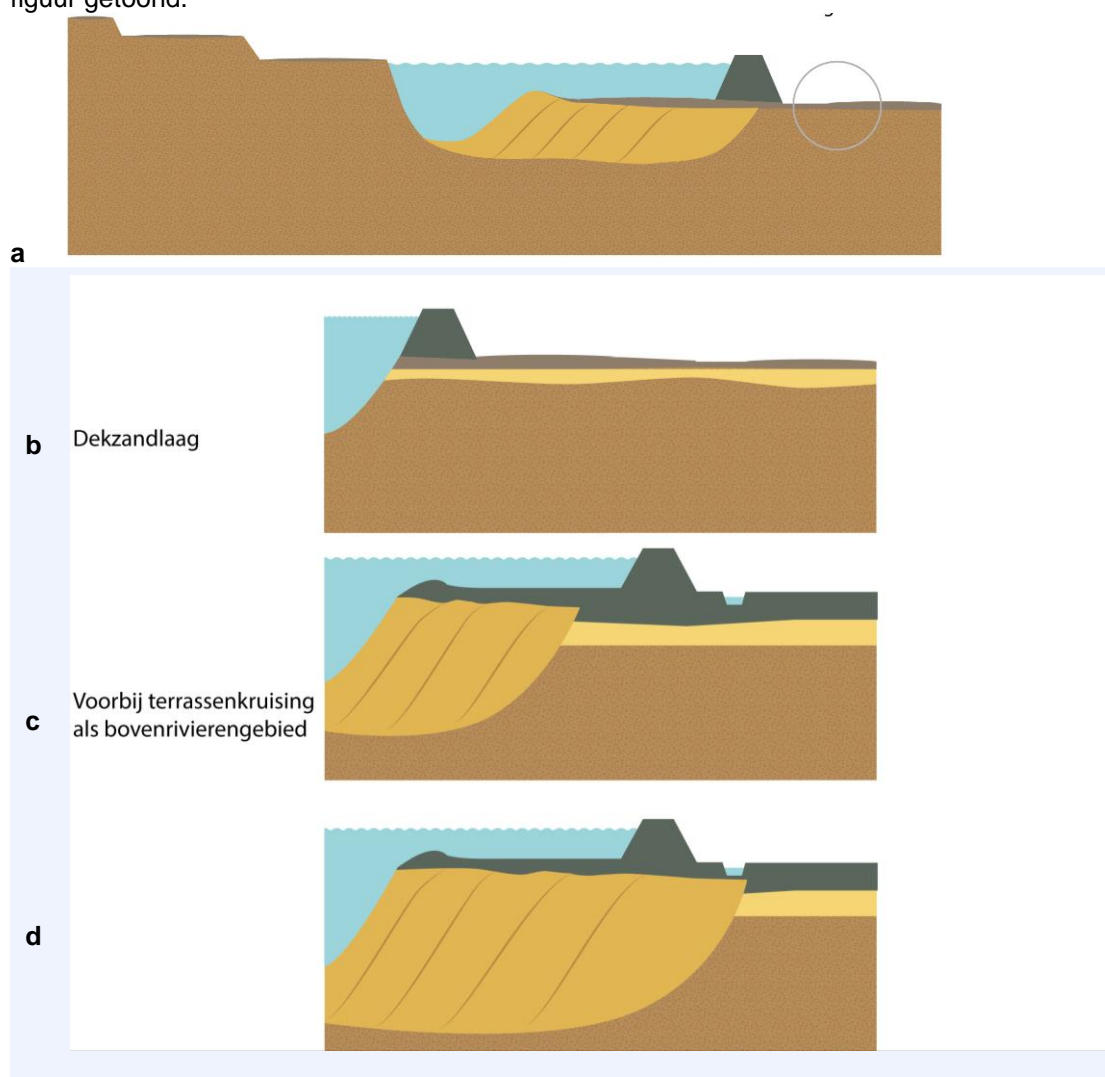
In onderstaande tabel worden de belangrijkste aspecten voor de meest belangrijke knopen genoemd. Aspecten die de geohydrologie in knopen 1 en 2 beïnvloeden zijn in verschillende mate van belang voor de verschillende processen. De naar verwachting meest belangrijke gebiedsspecifieke geohydrologische aspecten zijn daarom bij de vervolprocessen opgenomen, en knopen 1 en 2 zijn hieronder niet weergegeven.

Tabel 5-1 Faalpad en selectie van naar verwachting belangrijkste gebiedsspecifieke aspecten bovenrivierengebied)

Faalpadknopen	Narratief	Belangrijke aspecten gebied, bepalend voor optreden knoop
<p>3. opbarsten en geconcentreerde verticale stroming</p> 	<p>De stijghoogte aan de polderzijde is voldoende om de deklaag op te tillen en te scheuren, dit resulteert in een opbarstgat.</p>	<p><u>Geohydrologische situatie:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - doorlatendheid van de deklaag i.r.t. doorlatendheid van het watervoerend pakket: kunnen waterspanningen voldoende toenemen voor opbarsten? - aanwezigheid van lokaal zwakke plekken: dunne deklaag, preferente stroombanen of menselijke verstoringen, eventueel in combinatie met doodlopen van stroombaan op kleiplug - aanwezigheid en intredeweerstand voorland
<p>5. horizontaal zandtransport en pipe vorming</p> 	<p>Een of meerdere pipes ontstaan doordat de horizontale gradiënten hoog genoeg zijn om korrels te eroderen. Doordat de gradiënt vanuit de rivier zijde hoog is groeien pipes globaal richting de rivier.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - weerstand in het opbarstkanaal (0,3D regel) wanneer deklaag aanwezig is (in combinatie met maatregel opkisten) <p><u>Geohydrologische situatie</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - dikte en intredeweerstand (leklengte) deklaag voorland - dikte, doorlatendheid, en anisotropie en meerlaagsheid in WVP - Concentratie van stroming naar de pipe in 3D
<p>9. maatregelen ineffectief</p> 	<p>De mitigerende maatregelen zijn niet of niet tijdig getroffen, of de mitigerende maatregelen zijn niet effectief.</p>	<p>Calamiteitenplan</p> <ul style="list-style-type: none"> -Door bij pipingverschijnselen maatregelen te nemen wordt de overstromingskans sterk gereduceerd. Een voorbeeld is opkisten waardoor het optredende verval afneemt.

B.2 Limburg: het Maasdal

In het Maasdal zijn deklagen veelal nog dunner dan in de andere gebieden, met name in het zuidelijke deel van het gebied. Typische ondergrondkarakteristieken zijn in onderstaande figuur getoond.

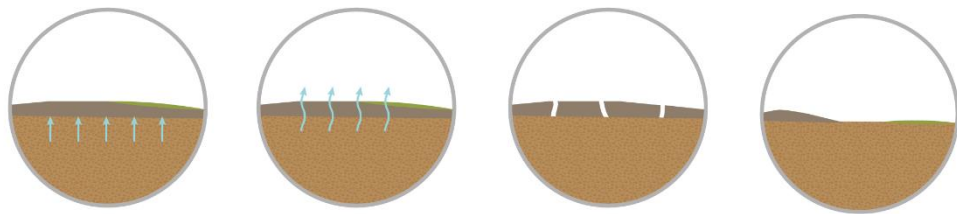


Figuur B2: Typische ondergrondopbouw in Limburg. Het bovenste figuur (a) toont de situatie in het zuidelijke deel van het gebied, daar is in de buitenbocht van de Maas soms geen dijk aanwezig en ligt de rivier direct tegen het hoger gelegen terras aan. De actieve rivierbedding snijdt zich in de onderliggende afzettingen. In minder hooggelegen gebied kan de buitenbocht ook insnijden in de afzettingen, waardoor er geen Holocene geulafzettingen onder de dijk aanwezig zijn (b). Ten noorden van de terrassenkruising (c,d) is de situatie meer vergelijkbaar met het Bovenrivierengebied, waar de actieve rivier zich in holocene geulafzettingen beweegt. De holocene geulafzettingen lopen niet of beperkt onder de dijk door. Er is veelal een dekzandlaag aanwezig op de Pleistocene rivierafzettingen.

Evenals in het bovenrivierengebied van de Rijntakken zijn eigenschappen van de deklaag en het WVP, die de toename van de waterspanningen buitendijks en binnendijks beïnvloeden (knopen 1 en 2), van groot belang. Door de lange duur van de hoogwaterbelasting speelt tijdsafhankelijke grondwaterstroming naar verwachting een onbelangrijke rol.

Kenmerkend aan Limburg is de veelal dunne doorlatende deklaag waardoor wel veel kwel ontstaat, maar weinig individuele zandmeevoerende wellen waargenomen worden. Dit beïnvloedt de processen opbarsten (knoop 3) en heave (knoop 4). Wanneer geen deklaag aanwezig is, of bij een onderbroken deklaag zijn deze processen niet nodig voor het verloop van het pipingproces en wordt de overstromingskans door piping bepaald door terugschrijdende erosie (knoop 5). Richting het noordelijke deel van het Maasdal kan de deklaag wel dikker, en minder doorlatend worden, vergelijkbaar met het bovenrivierengebied. Zo kunnen 4 situaties worden onderscheiden op basis van de deklaag:

1. **Intacte minder doorlatende deklaag:** door opbouw van de waterspanning onder de deklaag kan opbarsten optreden (knoop 3) zowel opbarsten als de daaropvolgende processen zijn van belang. Het goed meenemen van de geohydrologie is van belang voor het scherp bepalen van de waterspanningen, hierbij speelt de doorlatende deklaag een belangrijke rol, maar ook toestroom van hoge gronden is van belang.
2. **Intacte doorlatende deklaag: lek door de deklaag kan de opbouw van waterspanningen verhinderen waarmee het proces mogelijk stopt bij opbarsten (knoop 3).** Het goed meenemen van de geohydrologie is van belang voor het scherp bepalen van de waterspanningen, zoals ook bij situatie 1.
3. **Deklaag met scheuren: lek door de deklaag en de scheuren kan de opbouw van waterspanningen verhinderen waarmee het proces mogelijk stopt bij heave (knoop 4).** De geohydrologie is hier evenzeer van belang als bij een intacte deklaag.
4. **Afwezige deklaag (kleidijk op zand) of deklaag doorsneden door sloot:** hier zijn opbarsten en heave niet nodig, het zand kan horizontaal afgevoerd worden, en terugschrijdende erosie is van belang.



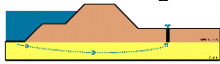
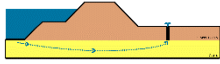
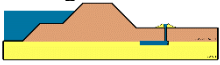

Figuur B3: Illustratie van 4 situaties voor de deklaag, van links naar rechts, intact minder doorlatend, intact doorlatender, deklaag met scheuren, afwezige deklaag. Zie tekst voor details.

Over terugschrijdende erosie (knoop 5) is veel onzekerheid omtrent de erosiegevoeligheid van de grove zand- en grindpakketten in Limburg, omdat het huidige erosiemodel niet is gevalideerd voor dit type sediment. De grotere korrels, de hoge uniformiteitscoëfficiënt en mogelijk verkitting dragen naar verwachting bij aan een hogere erosieweerstand.

Het nemen van maatregelen bij knoop 9 kan effectief zijn, echter gezien de hoge mate van kwel is het de vraag in hoeverre dit mogelijk is.

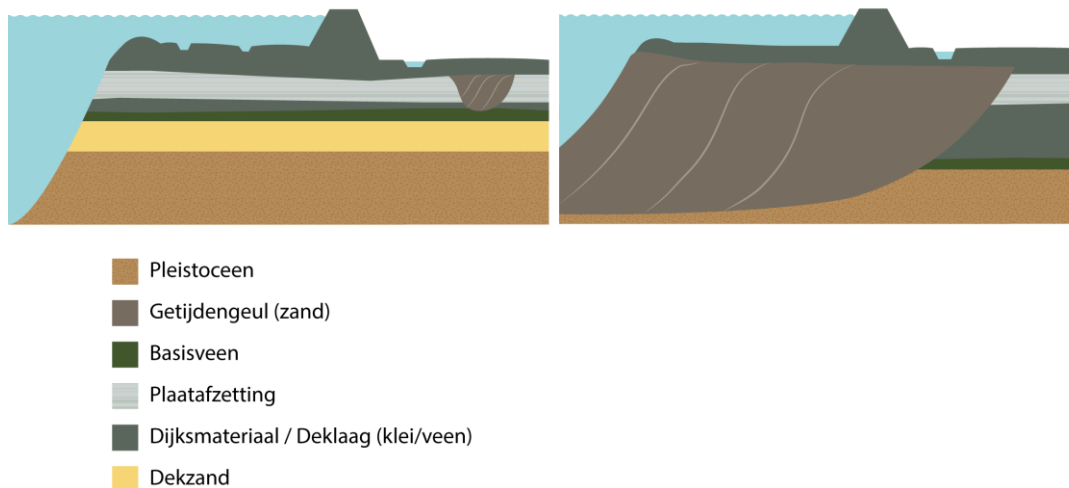
In onderstaande tabel worden de belangrijkste aspecten voor de meest belangrijke knopen genoemd. Aspecten die de geohydrologie in knopen 1 en 2 beïnvloeden zijn in verschillende mate van belang hebben voor de verschillende processen. De naar verwachting meest belangrijke gebiedsspecifieke geohydrologische aspecten zijn daarom bij de vervolprocessen opgenomen, en knopen 1 en 2 zijn hieronder niet weergegeven. Deze knopen zijn wel opgenomen in Rosenbrand et al. (2020) waarin alle aspecten in meer detail zijn uitgewerkt.

Tabel 5-2 Faalpad en selectie van naar verwachting belangrijkste gebiedsspecifieke aspecten voor Limburg

Faalpad	Narratief	Belangrijkste aspecten
<p>3. opbarsten en geconcentreerde verticale stroming</p> 	<p>De stijghoogte aan de polderzijde is voldoende om de deklaag op te tillen en te scheuren, dit resulteert in een opbarstgat.</p>	<p><u>Geohydrologische situatie</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - aanwezigheid en doorlatendheid van de deklaag i.r.t. doorlatendheid van het watervoerend pakket: kunnen waterspanningen voldoende toenemen voor opbarsten? - toestroom vanuit hoge gronden - mogelijk vollopen en onderwater staan achterland
<p>4. Heave</p> 	<p>Door concentratie van stroming naar het uitrededepunt worden zandkorrels gefluïdiseerd; door hoge verticale stroomsnelheden worden korrels opgetild in het verticale kanaal.</p>	<p>Korrelgrootte beïnvloedt weerstand in het opbarstkanaal relatie aan 0,3D regel</p> <p><u>Geohydrologische situatie</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - mate van concentratie van stroming naar uitrededepunt (in 3D): kunnen waterspanningen voldoende toenemen voor heave? - toestroom vanuit hoge gronden - mogelijk vollopen en onderwater staan achterland
<p>5. horizontaal zandtransport en pipe vorming</p> 	<p>Een of meerdere pipes ontstaan doordat de horizontale gradiënten hoog genoeg zijn om korrels te eroderen. Doordat de gradiënt vanuit de rivier zijde hoog is groeien pipes globaal richting de rivier.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - mogelijk extra weerstand tegen erosie als gevolg van brede korrelgrootteverdeling en grotere korrelgrootte bij grind (mogelijk groter belang van primaire erosie) - mogelijk extra weerstand tegen erosie door verkitting in oudere Maasafzettingen. - drukval in opbarstkanaal (0,3D regel) wanneer deklaag aanwezig is (in combinatie met maatregel opkisten) <p><u>Geohydrologische situatie</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - dikte, doorlatendheid, en anisotropie en meerlaagsheid in WVP - concentratie van stroming naar de pipe in 3D
<p>9. maatregelen ineffectief</p> 	<p>De mitigerende maatregelen zijn niet of niet tijdig getroffen, of de mitigerende maatregelen zijn niet effectief.</p>	<p>Calamiteitenplan</p> <ul style="list-style-type: none"> -Door bij pipingverschijnselen maatregelen te nemen wordt de overstromingskans sterk gereduceerd. Een voorbeeld is opkisten waardoor het optredende verval afneemt.

B.3 Getijdengebied

Getijdenzanden kunnen onderscheiden worden in getijdenplaatafzettingen en getijdengeulafzettingen. Deze zijn veelal ingebed in organischere of kleiigere getijdenafzettingen zoals getoond in onderstaande figuur. Getijdengeulafzettingen zijn dikker en zandiger, en kunnen insnijden in het Pleistocene pakket. Er is veel variatie in de bodemopbouw in getijdenafzettingen.



Figuur B4: Typische bodemopbouw in het getijdengebied. Links deklaag met getijdenplaat afzettingen met een kleinere getijdengeul binnendijs. In het voorland kunnen kwelders aanwezig zijn. Rechts een grotere getijdengeul onder het voorland en de dijk, die zeer diep kunnen zijn: de geul snijdt in het Pleistocene zand in. Het Pleistocene zand kan diep of ondiep liggen, afhankelijk van de locatie.

Voor het getijdengebied speelt de belasting in knoop 1 een belangrijke rol, vanwege de relatief korte duur. Voor met name Friesland en Groningen is daarnaast de aanwezigheid van kwelders van belang, aangezien deze de toename van de waterspanningen buitenwaarts remmen. Maar ook in deze gebieden komen schaaldijken voor en in Zeeland liggen ook gebieden met kwelders (daar vooral schor genoemd).

Evenals in andere gebieden is de geohydrologische situatie voor knoop 2 belangrijk. Hierbij is het van belang om rekening te houden met de verschillende typen getijdenafzetting. Getijdenzanden kunnen onderscheiden worden in getijdenplaatafzettingen en getijdengeulafzettingen. Deze zijn veelal ingebed in organischere of kleiigere getijdenafzettingen. De opeenvolging van lagen, en doorlatendheidseigenschappen daarvan bepalen de geohydrologische situatie, en daarmee de vervolgstappen. Net als voor de afzettingen in Limburg, geldt dat het huidige erosiemodel niet is afgeleid en gevalideerd voor dit type sediment.

Getijdenplaatafzettingen zijn veelal slechts enkele meters dik en bevatten een opeenvolging van zandige en siltigere kleiigere laagjes op mm schaal. **De lage doorlatendheid, anisotropie en de relatief dunne pakketten leiden tot minder toename van de waterspanning onder de deklaag** in het achterland (knoop 2), zeker als het doorlatendheidscontrast met de deklaag klein is. In combinatie met de veelal **dikke deklagen** leidt dit tot **een kleinere kans op opbarsten en heave** (knoop 3&4). Wat betreft terugschrijdende erosie (knoop 5) is het de vraag **hoe het piping proces in dergelijke afzettingen verloopt** wanneer er sprake is van een **hoge concentratie kleilaagjes in de baan van de pipe**. De **erosiegevoeligheid van het zand is waarschijnlijk ook laag** door

invloed van biologische en fysische cohesie en de aanwezigheid van fines. Voor het optreden van zowel deze initiële als de vervolprocessen in knopen 6 t/m 10 is de duur van de belasting van belang.

Getijdengeulafzettingen zijn dikker, veelal zandiger, en kunnen relatief weinig kleilaagjes bevatten, waardoor de bulkdoorlatendheid hoger en bulkanisotropie lager is ten opzichte van getijdenplaatafzettingen. Ook kan de deklaag boven recent actieve geulen lokaal dunner zijn. **Hierdoor is het waarschijnlijker dat het pipingproces in getijdengeulafzettingen kan plaatsvinden.** De afmetingen van de geul, en het al dan niet kortsluiting maken met het Pleistocene watervoerende pakket, zijn dan van groot belang om te bepalen of de waterspanning en concentratie van stroming voldoende zijn voor alle processen in het faalpad. Bij kleinere geulen is het minder waarschijnlijk dat er voldoende debiet is om een doorgaande pipe te vormen. Ook bij getijdengeulafzettingen speelt de hogere weerstand tegen erosie ten gevolge van de invloed van biologische en fysische cohesie en de aanwezigheid van fines, evenals de duur van de belasting.

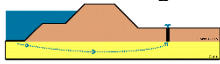
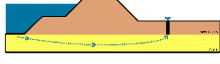
Doordat er in het getijdengebied weinig wellen voorkomen is de kans op het succesvol nemen van maatregelen hoog (knoop 9). Zeker als de kans op piping voor grote delen van het gebied verwaarloosd (bijvoorbeeld voor kleiigere getijdenplaatafzettingen en/of voor kleinere getijdengeulafzettingen) of in zijn algemeen sterk verkleind kan worden, is het vooral nodig om enkele bekende zwakke plekken te monitoren en maatregelen voor te bereiden.




Indien de faalkans middels aanscherping in knopen 3 en 5, al dan niet in combinatie met noodmaatregelen, niet voldoende klein blijkt, ligt het voor de hand dat de beperkte duur van de belasting ook bijdraagt aan een faalkansreductie. Hieromtrent spelen echter wel aandachtspunten rondom de kans dat oudere pipes in stand blijven, en de kennisleemten omtrent de pipegroeisnelheid een rol.

Gelet op de bovengenoemde karakteristieken van het pipingproces in het getijdengebied **is de verwachting dat het risico op piping feitelijk verwaarloosbaar klein is voor grote delen van het gebied.** Het is hierbij **belang om de geohydrologische situatie** van de ondergrond in kaart te brengen, en het **onderscheid tussen getijdengeul-, getijdenplaat- en de kleiige organische getijdenafzettingen** te maken. Onderzoek naar de pipinggevoeligheid van getijdenafzettingen is momenteel in volle gang, inclusief grootschalige veldproeven, met als doel om het verwachte verwaarloosbare risico te onderbouwen en te valideren. Het onderzoek zal ook leiden tot specifieke aanbevelingen voor het omgaan met piping in het getijdengebied.

In onderstaande tabel worden de belangrijkste aspecten voor de meest belangrijke knopen genoemd. Aspecten die de geohydrologie in knopen 1 en 2 beïnvloeden zijn in verschillende mate van belang hebben voor de verschillende processen. De naar verwachting meest belangrijke gebiedsspecifieke geohydrologische aspecten zijn daarom bij de vervolprocessen opgenomen, en knopen 1 en 2 zijn hieronder niet weergegeven.

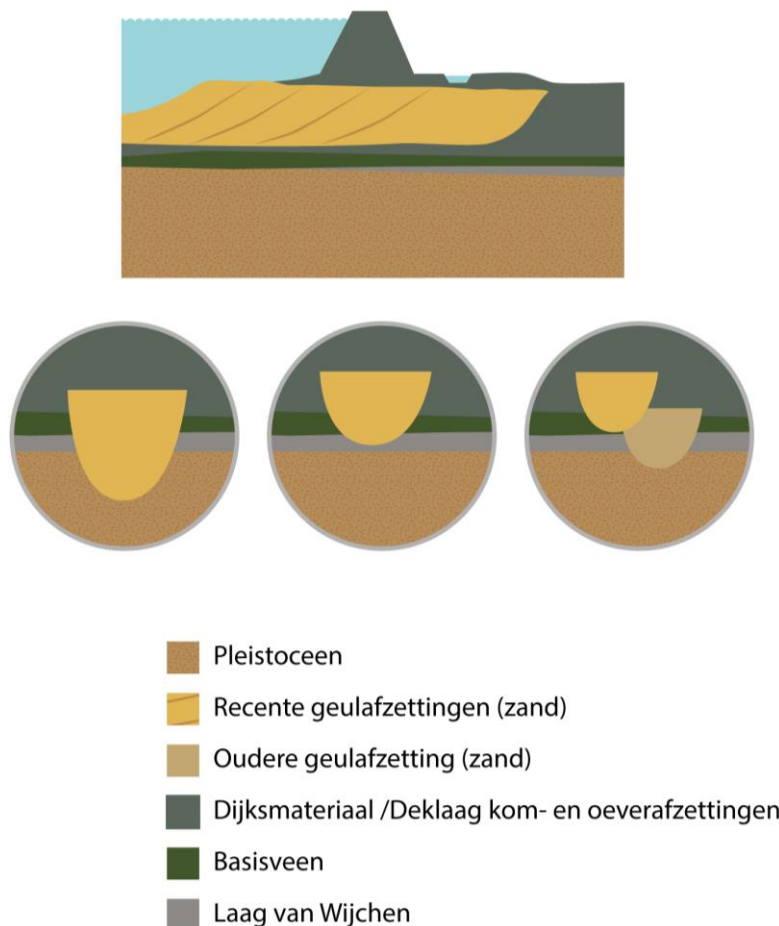
Tabel 5-3 Faalpad en selectie van naar verwachting belangrijkste gebiedsspecifieke aspecten voor het getijdengebied

Faalpad	Narratief	Belangrijkste aspecten
<p>3. opbarsten en geconcentreerde verticale stroming</p> 	<p>De stijghoogte aan de polderzijde is voldoende om de deklaag op te tillen en te scheuren, dit resulteert in een opbarstgat.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - dikte & samenstelling (sterkte eigenschappen) deklaag <p><u>Geohydrologie:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - opbouw waterspanning onder deklaag achterland <p><i>Getijdenplatafzetting:</i> contrast tussen doorlatendheid WVP en deklaag, aanwezigheid dunne kleilaagjes in WVP en dunne siltlaagjes in deklaag</p> <p><i>Getijdengeulafzetting:</i> contrast tussen doorlatendheid WVP en deklaag, kortsluiting met Pleistocene zand, afmetingen geul, en eventueel polderwaartse overgang naar deklaag, siltige deklaag</p> <ul style="list-style-type: none"> - Meerlaagsheid, anisotropie - Doorlatendheid deklaag voorland
<p>4. Heave</p> 	<p>Door concentratie van stroming naar het uittrededepunt worden zandkorrels gefluidiseerd; door hoge verticale stroomsnelheden worden korrels opgetild in het verticale kanaal.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - korrelgrootte en debiet in wel beïnvloeden weerstand in het opbarstkanaal relatie aan 0,3 regel - dikte deklaag <p><u>Geohydrologie:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - concentratie van stroming in 3D naar wel <p><i>Getijdenplatafzetting:</i> contrast tussen doorlatendheid WVP en deklaag, aanwezigheid dunne kleilaagjes in WVP en dunne siltlaagjes in deklaag, dikte WVP anisotropie en meerlaagsheid</p> <p><i>Getijdengeulafzetting:</i> contrast tussen doorlatendheid WVP en deklaag kortsluiting met Pleistocene zand, afmetingen geul, en eventueel polderwaartse overgang naar deklaag, siltige deklaag</p> <ul style="list-style-type: none"> - Meerlaagsheid, anisotropie - Doorlatendheid deklaag voorland

Faalpad	Narratief	Belangrijkste aspecten
<p>5. horizontaal zandtransport en pipe vorming</p> 	<p>Een of meerdere pipes ontstaan doordat de horizontale gradiënten hoog genoeg zijn om korrels te eroderen. Doordat de gradiënt vanuit de rivier zijde hoog is groeien pipes globaal stroomopwaarts.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - effect horizontale afwisseling zand en kleilaagjes in het WVP op pipegroei - extra weerstand tegen erosie door fijne fractie en cohesie - weerstand in het opbarstkanaal (0,3D regel) (en dikte deklaag, en eventueel opkisten) <p><u>Geohydrologie:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - concentratie van stroming in 3D naar pipe <p><i>Getijdenplatafzetting:</i> contrast tussen doorlatendheid WVP en deklaag, aanwezigheid dunne kleilaagjes in WVP en dunne siltlaagjes in deklaag, dikte WVP, anisotropie en meerlaagsheid</p> <p><i>Getijdengeulafzetting:</i> contrast tussen doorlatendheid WVP en deklaag kortsluiting met Pleistocene zand, afmetingen geul, en eventueel polderwaartse overgang naar deklaag, siltige deklaag</p> <ul style="list-style-type: none"> - Meerlaagsheid, anisotropie - Doorlatendheid deklaag voorland
<p>7. ruimen, (verbreding en verdieping van de pipe)</p> 	<p>Vanaf bovenstrooms begint de pipe te verbreden, en dit proces propageert zich terug naar het uittredepunt.</p>	<p>Waterstandsverloop en duur belasting (knoop 1) in relatie tot duur vorming pipe en ruimen.</p>
<p>9. maatregelen ineffectief</p> 	<p>De mitigerende maatregelen zijn niet of niet tijdig getroffen, of de mitigerende maatregelen zijn niet effectief.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - het aantal wellen, bij weinig wellen is de kans op succesvolle maatregelen zoals opkisten groter, zeker als bij monitoring

B.4 Benedenrivierengebied

Voor het benedenrivierengebied geldt zowel op basis van de geologie als op basis van de hydraulische belasting dat er in het westelijke deel, het primariene gebied, een grote mate van overeenkomst is met het getijdengebied, en voor het oostelijke deel, het fluviatiele gebied, meer overeenkomst is met het bovenrivierengebied. Typisch voorkomende bodem opbouwen in het benedenrivierengebied zijn in Figuur B5 weergegeven.



Figuur B5: Kenmerkend voor het benedenrivierengebied zijn de relatief dikke komafzettingen die doorsneden worden door zandige geulafzettingen. Deze geulafzettingen kunnen tot het Pleistocene zand reiken (gefundeerd), zoals in de linker cirkel, of juist niet (ongefundeerd) zoals in de middelste cirkel. Ook komt het voor dat geulen in oudere geulen insnijden en op die manier ook in contact staan met het Pleistocene zand zoals in de rechter cirkel.

Gezien de aanwezigheid van getijdengeulen en -platen kan gesteld worden dat richting het westen de afzettingen in toenemende mate lijken op die in het getijdengebied, met een verminderde gevoeligheid voor piping als gevolg. Deze verminderde gevoeligheid kan met huidige erosiemodel nog niet gekwantificeerd worden (zie ook §B.3).

Voor beide delen van het gebied zijn **geohydrologische aspecten die de toename van waterspanning buiten- en binnendijs beïnvloeden (knopen 1 & 2) van groot belang voor de faalkans. In beide gebieden is het van belang of het Holocene WVP kortsluiting maakt met het Pleistocene WVP.** Ook de dynamiek van de grondwaterstand en de oppervlaktewaterstand hebben een belangrijke invloed op de toename van waterspanningen aan de polderzijde, hierbij spelen zowel peilbeheer als tijdsafhankelijke berging een rol.

Voor het perimariene gebied is het onderscheid tussen zandige afzettingen, en kleiigere organischere afzettingen van belang, en binnen de zandige afzettingen het onderscheid tussen getijdengeul en getijdenplaatafzettingen (zie ook paragraaf B.3). Bij **getijdenplaatafzettingen is het de vraag of de waterspanning onder de deklaag voldoende op kan lopen voor opbarsten en heave** (knoop 3 & 4). Voor **getijdengeulafzettingen** geldt in het westelijke deel van het benedenrivierengebied dat de kans op kortsluiting met het Pleistocene zand kleiner is dan in het oostelijke deel van het benedenrivierengebied en in het getijdengebied. Kortsluiting maakt de kans op opbarsten en heave, evenals terugschrijdende erosie groter. Hier zijn de onzekerheden omtrent de **weerstand tegen terugschrijdende erosie (knoop 5) evenals de geohydrologische aspecten die concentratie van stroming naar de pipe bepalen van belang voor de faalkans.**

Voor het fluviatiele gebied kan de waterspanning in het achterland sterk toenemen door **relatief abrupte overgangen van zand naar klei in het achterland**, zoals bijvoorbeeld langs de rivier de Lek. Ook de aanwezigheid van crevassegeulen, of rivierduinen (donken) die relatief grofkorreliger en doorlatender zijn, kan leiden tot lokaal hoge waterspanningen. Dit kan leiden tot concentratie van stroming en hoge waterspanning onder de deklaag en **lokaal een grotere kans op opbarsten en heave.**

Naast de geohydrologie beïnvloeden de **deklaag dikte en sterkte eigenschappen de kans op opbarsten en heave.** Wanneer de deklaag dikker dan 5 m is, is de vraag of opbarsten op kan treden. Als er geen uittredepunt is kan de rest van de knopen ook niet optreden. Boven recent actieve geulafzettingen (zowel in perimariën als in fluviatiel gebied), kan de deklaag lokaal dunner zijn, waardoor dit zwakke plekken zijn, met name wanneer er ook een abrupte overgang van zand naar klei is in het achterland.

Wanneer de deklaag veel veen bevat is ook de vraag hoe dit het opbarsten beïnvloedt. Er zijn weinig voorbeelden bekend van zandmeevoerende wellen bij een venige deklaag.

Voor **terugschrijdende erosie** (knoop 5) gelden voor het perimariene gebied vergelijkbare overwegingen als voor het getijdengebied. **Het is de vraag of terugschrijdende erosie optreedt in getijdenplaatafzettingen door de hogere weerstand tegen erosie** door cohesie en de concentratie van dunne laagjes in de zandige getijdenplaatafzettingen in combinatie met de lage doorlatendheid van deze afzettingen. In getijdengeulafzettingen is de kans op terugschrijdende erosie groter en spelen geohydrologische aspecten die de concentratie van stroming naar de pipe beïnvloeden, evenals de hogere sterkte in getijdenafzettingen.

Voor het fluviatiele gebied zijn met name de geohydrologische factoren die de concentratie van stroming naar de pipe bepalen van belang voor terugschrijdende erosie. De afmetingen van geulen, de doorlatendheid en anisotropie daarvan, en het in contact staan met het Pleistoceen, beïnvloedt of er wel voldoende debiet is voor pipevorming. Daarnaast kan de aanwezigheid van fines ook leiden tot een hogere weerstand tegen terugschrijdende erosie, evenals heterogeniteit in de baan van de pipe. Opgemerkt wordt dat bij het bepalen van benodigde berm lengtes het ook van belang is na te gaan hoever de pipinggevoelige zandlichamen in het achterland doorlopen, aangezien deze overgang relatief abrupt kan zijn bijvoorbeeld langs de Lek.

Gezien de verwachting dat opbarsten slechts op weinig plekken optreedt is de kans om effectieve maatregelen te kunnen nemen bij zandmeevoerende wellen relatief groot, zeker als deze plekken in het calamiteitenplan zijn opgenomen.

Indien de faalkans middels aanscherping in knopen 3 en 5, al dan niet in combinatie met noodmaatregelen, niet voldoende klein blijkt, ligt het voor de hand dat de beperkte duur van

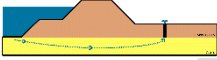
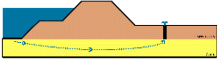
de belasting in het westelijke deel van het benedenrivierengebied ook bijdraagt aan een faalkansreductie. Hieromtrent spelen echter wel aandachtspunten rondom de kans dat oudere pipes in stand blijven, en de kennisleemten omtrent de pipegroeisnelheid.



Gelet op de verschillende karakteristieken in het primariene en in het fluviatiele deel van het gebied ligt het voor de hand om dit onderscheid te maken bij de pipinganalyse. Bij het primariene gebied speelt dan ook het verschil tussen de getijdengeulafzettingen die pipinggevoeliger zijn dan de getijdenplatafzettingen.

In onderstaande tabel worden de belangrijkste aspecten voor de meest belangrijke knopen genoemd. Aspecten die de geohydrologie in knopen 1 en 2 beïnvloeden zijn in verschillende mate van belang voor de verschillende processen. De naar verwachting meest belangrijke gebiedsspecifieke geohydrologische aspecten zijn daarom bij de vervolprocessen opgenomen, en knopen 1 en 2 zijn hieronder niet weergegeven

Aangezien de belangrijkste eigenschappen voor het primariene gebied sterk overeenkomen met die van en de getijdenafzettingen wordt verwezen naar paragraaf B3 voor een beknopt overzicht van die aspecten.

Tabel 5-4 Faalpad en selectie van naar verwachting belangrijkste gebiedsspecifieke aspecten voor het fluviatiele deel van het benedenrivierengebied (voor het primariene deel wordt verwezen naar paragraaf B3)

Faalpad	Narratief	Belangrijkste aspecten
<p>3. opbarsten en geconcentreerde verticale stroming</p> 	<p>De stijghoogte aan de polderzijde is voldoende om de deklaag op te tillen en te scheuren, dit resulteert in een opbarstgat.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - dikte & samenstelling (sterkte eigenschappen) deklaag (eigenschappen van veen m.b.t. opbarsten) <p><u>Geohydrologische situatie:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - aanwezigheid van lokaal zwakke plekken: <ul style="list-style-type: none"> dunne deklaag boven crevassegeulen of donken, eventueel in combinatie met snelle polderwaartse overgang naar deklaag - meerlaagsheid (kortsluiting met het Pleistocene watervoerende pakket), anisotropie. - doorlatendheid voorland
<p>4. Heave</p> 	<p>Door concentratie van stroming naar het uittrededepunt worden zandkorrels gefluidiseerd; door hoge verticale stroomsnelheden worden korrels opgetild in het verticale kanaal.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - korrelgrootte en debiet in wel beïnvloeden weerstand in het opbarstkanaal relatie aan 0,3D regel - dikte deklaag <p><u>Geohydrologie:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - concentratie van stroming in 3D naar wel (preferente stroming in crevassegeulen of donken, snelle polderwaartse overgang naar deklaag, afmetingen watervoerende zandlaag, kortsluiting met het Pleistocene watervoerende pakket.) - meerlaagsheid (kortsluiting met het Pleistocene watervoerende pakket), anisotropie - doorlatendheid deklaag voorland

Faalpad	Narratief	Belangrijkste aspecten
<p>5. horizontaal zandtransport en pipe vorming</p> 	<p>Een of meerdere pipes ontstaan doordat de horizontale gradiënten hoog genoeg zijn om korrels te eroderen. Doordat de gradiënt vanuit de rivier zijde hoog is groeien pipes globaal stroomopwaarts.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - extra weerstand tegen erosie door fijne fractie en cohesie - weerstand in het opbarstkanaal (0,3D regel) (en dikte deklaag, en eventueel opkisten) <p><u>Geohydrologie:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - concentratie van stroming in 3D naar wel (preferente stroming in crevassegeulen of donken, snelle polderwaartse overgang naar deklaag, afmetingen watervoerende zandlaag, kortsluiting met het Pleistocene watervoerende pakket.) - meerlaagsheid (kortsluiting met het Pleistocene watervoerende pakket), anisotropie - doorlatendheid deklaag voorland
<p>9. maatregelen ineffectief</p> 	<p>De mitigerende maatregelen zijn niet tijdig getroffen, of de mitigerende maatregelen zijn niet effectief.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - het aantal wellen, bij weinig wellen is de kans op succesvolle maatregelen zoals opkisten groter, zeker als bij monitoring

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl