

# Consequentieanalyse POV Piping

drs. ing. H. Weijers, ir. A. Wiggers,  
drs. B.M. Berbee, ir. G.R.P. van Goor



Project: POVP  
Document: Consequentieanalyse  
Status: Definitief  
Datum: 15 september 2020  
Referentie: Verseon @

Opdrachtgever: ir. J. v.d. Veen (Zuiderzeeland)

Auteurs):  
drs. ing. H. Weijers PMSE (Rijnland)  
drs. B.M. Berbee (Fugro)  
ir. G.R.P. van Goor (Fugro)  
ir. A. Wiggers (RHDHV)

Adres: Waterschap Rivierenland  
De Blomboogerd 1  
4003 BX TIEL

Contact: +31 (0) 344 649 090  
[www.POVPIping.nl](http://www.POVPIping.nl)

## Voorwoord

In de wereld van de waterkeringen leren wij steeds meer en beter te denken in termen van overstromingsrisico's in plaats van overschrijdingskansen, wat lange tijd de kern van de benadering is geweest. Met deze omslag in denken is een breedte van mogelijke faalmechanismen in beeld gekomen, waar wij tot voor kort nog niet zoveel van wisten. Eén van die mechanismen is piping: een belangrijk faalmechanisme dat wij nog slechts heel globaal en dus beperkt in modellen kunnen vatten. Daarom was er alle reden om dit faalmechanisme onder de loupe te nemen in een Projectoverstijgende Verkenning (POV) binnen het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP).

De Projectoverstijgende Verkenning Piping (POV-piping) heeft -zo blijkt uit deze consequentieanalyse- bijzonder belangrijke en waardevolle resultaten opgeleverd. Resultaten waar ik, samen met het projectteam trots op ben en die wij in de waterkeringenwereld moeten koesteren, doorontwikkelen en toepassen.

Zo blijkt overduidelijk dat het inzetten op onderzoek en het goed de tijd nemen om concrete situaties te doorgronden de moeite meer dan waard is en al snel loont. Piping is typisch zo'n verschijnsel waarbij veelal sprake is van vermoedens, maar waarbij om echt te weten wat er aan de hand is er meer moet gebeuren. Dit rechtvaardigt al snel een passend programma van meten en monitoren. En ook het bij analyses betrekken van kennis uit de zgn. "geodriehoek" (geohydrologie / geologie / geotechniek). Werkvormen als werkplaatsen en beslisbomen helpen om met deze informatie en kennis de complexiteit van het vraagstuk terug te brengen naar praktische en bij de concrete situatie passende aanpakken en oplossingen. Deze consequentieanalyse geeft een overzicht van de opgebouwde kennis en hoe die is vastgelegd.

Naast manieren om het piping-vraagstuk te doorgronden (en veelal te verkleinen!) geeft deze consequentieanalyse een overzicht van zgn. oplossingsfamilies van maatregelen om het risico van piping aan te pakken in concrete situaties. Er is een aantal innovatieve maatregelen ontwikkeld en getest in de praktijk, bijvoorbeeld maatregelen die de benodigde ruimte sterk kunnen beperken.

De consequentieanalyse laat zien dat toepassing van de ontwikkelde kennis en werkmethoden zal leiden tot belangrijke besparingen ten opzichte van de aanvankelijke ramingen in het HWBP. Zo is gedurende de looptijd van deze POV al voor zo'n € 32 miljoen aan besparingen gerealiseerd in concrete lopende projecten. En een globale berekening laat zien dat in het programma dat voor ons ligt in het rivierengebied een besparing met een orde van € 2 miljard zich laat denken.

Dus: de opgebouwde kennis en de aangereikte methoden en werkwijzen zijn niet alleen inhoudelijk indrukwekkend; ze zijn dat ook als we kijken naar de kansen om het Hoogwaterbeschermingsprogramma zo doelmatig mogelijk te realiseren! Een aanzienlijke inhoudelijke verrijking voor de waterkeringenwereld gekoppeld aan prachtige mogelijkheden om professioneel en doelmatig waterveiligheidsopgaven van een antwoord te voorzien! Daarom onderstreep ik graag het grote belang deze resultaten te koesteren, door te ontwikkelen en toe te passen.

Jaap van der Veen (waterschap Zuiderzeeland / waterschap Rivierenland)  
Ambtelijk opdrachtgever POV-Piping

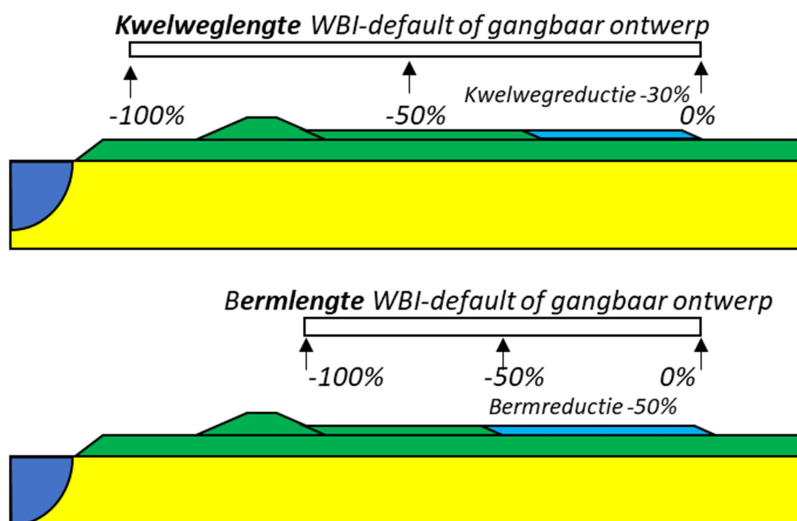
## Samenvatting

In dit rapport worden de inzichten van de Projectoverstijgende verkenning Piping (POVP) samengevat en de consequenties van deze inzichten voor het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) inzichtelijk gemaakt.

### Innovaties m.b.t. het beter in beeld brengen van de pipingopgave

Met name het meenemen van de intredeweerstand bij aanwezigheid van voorland heeft een positief effect op het reduceren van de pipingopgave. Daarnaast zijn er positieve effecten te verwachten wanneer er rekening wordt gehouden met meerlaagsheid en/of anisotropie in doorlatendheid van het watervoerend zandpakket en de heterogeniteit van de korrelafmeting D70 binnen de pipinggevoelige laag. Dit kan worden gerealiseerd als de doorlatendheid van het watervoerend pakket beter wordt gemeten en in de analyse worden betrokken. Hiervoor zijn nieuwe meetmethodes ontwikkeld, zoals HPT/(A)MPT en geofysische karteringstechnieken; zie synthesesdocument "Handreiking Grondonderzoek". Bovendien wordt dit beter mogelijk door het installeren van meetnetten en door verbeterde pipinganalyses zoals beschreven in de "Handreiking meetnetten en grondwatermonitoring".

Al met al zijn aanzienlijke besparingen op de pipingopgave te realiseren. Dit is weergegeven in



*Figuur 1: reductie pipingopgave, uitgedrukt in totale kwelweglengte of berm breedte*

onderstaande tabel en toelichtende figuur.

Reductie pipingopgave	gemiddelde reductie	Bandbreedte	
		max.	min.
Reductie kwelweglengte:			
Heterogeniteit D70	25%	35%	15%
Meerlaagsheid watervoerend pakket	30%	50%	0%
Anisotropie watervoerend pakket	15%	30%	0%
Reductie berm lengte: voorland meenemen	50%		

*Tabel 1: samenvatting reductie pipingopgave door extra onderzoek*

In veel gevallen zal de reductie van benodigde kwelweglengte leiden tot het verdampen van het kwelwegtekort en daarmee van de volledige pipingopgave op de betreffende dijkstrekking.

Deze reductie kan alleen goed worden vastgesteld bij gebruik van een grondwaterstromingsmodel waarin bovengenoemde geohydrologische kenmerken kunnen worden meegenomen en waarin de groeiende pipe wordt gesimuleerd. Daarom wordt aanbevolen om het model D-Geo Flow verder te ontwikkelen.

Bovendien zou een veiligheidsfilosofie moeten worden uitgewerkt waarbij de geohydrologische belasting op de pipe los wordt beschouwd van de sterkte bij terugschrijdende erosie en die past bij gebruikte rekenmodel.

Het kalibreren van het geohydrologisch model waarmee de belasting (grondwaterstroming) wordt vastgesteld is afhankelijk van het meten van stijghoogtes bij hoogwater op de rivier. Met de huidige inzichten is het goed kunnen ontwerpen (en beoordelen) van pipingmaatregelen afhankelijk van kennis van de kering door deze meerjarige stijghoogtemetingen. Beheerders worden opgeroepen zo snel mogelijk verantwoordelijkheid te nemen om te komen tot monitoring van stijghoogtes bij hoogwaterpassages.

Voor wat betreft het kunnen vaststellen van gereduceerde pipingopgave op basis van verbeterde inzichten in de grondeigenschappen is als "voorkeursrichting" voor verdere ontwikkeling benoemd:

1. Een goede werkbeschrijving opstellen voor het afleiden van doorlatendheid en D70 voor de pipinganalyse. Hierbij aandacht voor heterogeniteit en eventuele uitmiddelingseffecten. Momenteel maken adviseurs hier soms principieel verschillende keuzen.
2. Het uitwerken van de formule van Sellmeijer tot een formule waarin de anisotropiefactor kan worden ingevoerd. Het SOS aanvullen met verwachtingen van de anisotropie in doorlatendheid van de verschillende grondkarakteristieken. En het verder valideren van een meettechniek (zoals de huidig in ontwikkeling zijnde HPT/AMPT sondeertechniek) voor meting van de anisotropie
3. Een verdere uitwerking van de gevoeligheidsanalyse over het effect van karakteristieke tot gemiddelde waarden van grondparameters. Daarbij vaststellen welke waarde uiteindelijk van toepassing zou moeten zijn in het model van Sellmeijer, waarbij onderscheid kan worden gemaakt in geohydrologische belastingparameters en sterkteparameters.
4. Onderzoek naar geldigheid van Sellmeijer bij zandfracties buiten de geldigheidsrange van de validatie van Sellmeijer en zonodig aanpassing van de aanpak/analyse.

Bij het vaststellen van de pipingopgave blijkt het van groot belang om de geohydrologische randvoorwaarden van het pipingmodel op de juiste wijze vast te stellen. Daarom wordt geadviseerd:

1. Het opstellen van een uitgebreidere schematiseringshandleiding of werkwijzer voor het schematiseren van de geohydrologische situatie ten behoeve van piping analyses.
2. Verspreiding en verder uitwerken van recent opgedane inzichten uit KvK-onderzoeken en verankering in leidraden. Bijvoorbeeld rond het vaststellen van de reductiefactor op de stijghoogte bij uittredepunt, verschillen in deklagen van voor- en achterland en variaties in de pipinggevoelige zandgronden van het watervoerend pakket.
3. Het samenbrengen van inzichten die nu in projecten worden opgedaan rond het gebruik van regionale geohydrologische modellen in een pipinganalyse.

#### Innovatieve pipingmaatregelen

POVP heeft de ontwikkeling van vernieuwende maatregelen tegen piping gestimuleerd. Inmiddels worden de volgende oplossingsfamilies onderscheiden:

1. (Nieuwe materialen en technieken voor) kwelwegverlengende maatregelen
2. Heaveschermen
3. Peilstijging binnendijks
4. Filterschermen
5. Drainagetechnieken

De consequenties van de verschillende innovatieve technieken voor ruimtegebruik en omgeving zijn in dit document beschreven en er is benoemd dat het wenselijk is om de verschillende technieken in Ontwerpen Beoordelingsrichtlijnen (OBR's) te gaan beschrijven, zodat beheerders een eenduidig instrumentarium

krijgen om deze nieuwe technieken te beoordelen en ontwerpen. Door het verder faciliteren van beheerders met OBR's kunnen diverse technieken verder worden ontwikkeld van "technical readiness level" (TRL) 7 naar TRL 9: van "De technologie is geïntegreerd in de uiteindelijke operationele omgeving" naar "De technologie is technisch en commercieel gereed".

We onderscheiden daarin OBR (in volgorde van huidige ontwikkelstatus):

- Drainagetechnieken
- Filterschermen
- Afdichtingstechnieken
- Heaveschermen
- Binnendijkse peilstijging

#### Borging kennisdoorwerking

N.a.v. de inzichten van POVP wordt geadviseerd van de volgende onderwerpen de kennisdoorwerking te borgen, bijvoorbeeld door het op te nemen in de "Comply or Explain" tool, de begeleidingsagenda, in handreiking verkenning- of planuitwerking-fase of in het toetsproces van het HWBP en/of via het adviesteam dijkontwerp:

1. Beheerder heeft meetnetten geïnstalleerd om na meting van hoogwater het model en de te gebruiken parameters voor pipinganalyse te kalibreren. Eerder geconstateerde zandmeevoerende wellen zijn in beeld, geregistreerd en logisch verklaard.
2. Beheerder heeft het effect van meerlaagsheid van het watervoerend pakket en anisotropie in doorlatendheid afgewogen en indien relevant voldoende grondonderzoek gedaan (volgens handreiking grondonderzoek) en resultaten verwerkt in de pipinganalyse om tot een betrouwbaar ontwerp/beoordeling te komen. Daarbij is de inzet van zowel geologen, geohydrologen als geotechnici (de geodriehoek) voldoende geborgd.
3. Het effect van aanwezig voorland wordt geschematiseerd volgens de schematiseringshandleiding piping van het WBI en/of de methode "gereduceerde stijghoogte buitenteen" zoals beschreven in de handreiking meetnetten en grondwaterstroming.
4. Indien wordt getwijfeld aan de uitkomsten van de pipinganalyse is overwogen om een "werkplaats" te organiseren en/of is een beslisboom opgesteld om de pipingopgave te nuanceren, twijfelachtige opgave uit te stellen en bijbehorende langere termijn onderzoek in gang te zetten.
5. POVP stelt voor om in de handreiking verkenning-fase voor projecten met een pipingopgave op te nemen:
  - Een beschrijving van de oplossingsfamilies en deze allemaal in de verkenning-fase ten opzichte van elkaar af te wegen,
  - In de verkenning-fase moet worden vastgesteld hoeveel drainagedebiet extra ten opzichte van het oorspronkelijk kweldebiet naar het achterliggende watersysteem kan worden afgevoerd.
6. In de eindverantwoording van de verkenning-fase dient te worden gecontroleerd of de afweging tussen alle genoemde oplossingsfamilies en het vaststellen van het maximale drainagedebiet daadwerkelijk heeft plaatsgevonden.

#### Kostenconsequenties

Tot slot wordt in dit document de besparing als resultaat van de investering van € 10.8 miljoen in POVP ingeschat. Deze is tenminste ca. € 32 miljoen op twee al gestarte projecten en kan oplopen tot potentieel € 2,3 miljard in het hele rivierengebied. Daarbij is nu nog onduidelijk welk budget tot 2050 moet worden gereserveerd voor de pipingopgave op basis van de nieuwe norm en het nieuwe instrumentarium. Er wordt geadviseerd deze opgave beter in beeld te brengen zodat verantwoorde keuzes gemaakt kunnen worden in verdere kennisontwikkeling op het vlak van het vaststellen en oplossen van de pipingopgave.

# Inhoudsopgave

Samenvatting.....	3
1. Inleiding.....	10
1.1. Aanleiding.....	10
1.2. Doelstelling.....	10
1.3. Scope en afbakening.....	10
1.4. Leeswijzer.....	11
2. Consequenties vernieuwde metingen en analyses.....	12
2.1. Te behalen scopereducties.....	12
2.1.1. Definitie scopereducties.....	12
2.1.2. Scopereducties in kilometer dijkversterking over alle analyses.....	13
2.1.3. Scopereducties in meter bermlengte / kwelwegtekort.....	13
2.2. Inzichten POVP.....	14
2.3. Voorlanden.....	15
2.3.1. Intredeweerstand (belasting) – dikte en weerstand voorland.....	15
2.3.2. Intredeweerstand (belasting) – lengte van het voorland >1x dijkzate.....	16
2.3.3. Intredeweerstand (sterkte) – pijpgroei onder het voorland.....	17
2.4. Eigenschappen ondergrond.....	17
2.4.1. Meerlaagsheid.....	17
2.4.2. Anisotropie in doorlatendheid.....	19
2.4.3. D70 – karakteristiek of gemiddeld.....	22
2.4.4. Horizontale doorlatendheid Kh – karakteristiek of gemiddeld.....	22
2.5. Invloed achterland.....	23
2.5.1. Weerstand achterland: bewust gebruik van metingen en modellen.....	24
2.5.2. Regionaal systeem: ontlastende werking verzilveren.....	24
2.5.3. Lokaal systeem: gedrag bij hoogwater in beeld.....	25
2.6. Rekenmethodieken.....	25
2.6.1. Numerieke modellen: sprong voorwaarts.....	25
2.6.2. D-Geo Flow.....	26
2.6.3. Probabilistische pipinganalyses: een doorblik naar de toekomst.....	26
2.6.4. Instationaire pipinganalyses.....	27
2.7. Projectspectifieke meerwaarde detailonderzoek.....	27
2.7.1. Reductie totaal benodigde kwelweglengte per parameter.....	28
2.7.2. Illustratie meerwaarde detailonderzoek projectspectiefiek bepalen.....	29
2.8. Voorkeursrichting vervolgonderzoek.....	31
2.8.1. Voorlanden / intredeweerstand.....	32

2.8.2.	Geotechnische parameters.....	34
2.8.3.	Geohydrologische randvoorwaarden .....	35
2.9.	Voorstel borging kennisdoorwerking .....	35
3.	Consequenties nieuwe technieken .....	37
3.1.	Oplossingsfamilies .....	37
3.2.	Traditionele technieken .....	38
3.2.1.	Kwelwegverlenging.....	38
3.2.2.	Heaveschermen.....	39
3.2.3.	Peilstijging achterland .....	39
3.2.4.	Nieuwe materialen .....	40
3.3.	Drainagetechnieken .....	41
3.3.1.	Ligging .....	42
3.3.2.	Beheersbaarheid.....	42
3.3.3.	Betrouwbaarheid.....	43
3.3.4.	Waterbezwaar / LCA.....	43
3.3.5.	Ruimtegebruik.....	44
3.3.6.	Trechteringsproces keuze drainagetechniek .....	44
3.3.7.	Aanbeveling verdere ontwikkeling.....	45
3.4.	Filterschermen .....	46
3.4.1.	Vormen .....	46
3.4.2.	Ruimtegebruik.....	47
3.4.3.	Status Ontwikkeling .....	47
3.4.4.	Geperforeerde kunststof kokerscherm gevuld met grof zand .....	50
3.4.5.	Belemmeringen toepassing filterschermen .....	50
3.4.6.	Aanbevelingen verdere ontwikkeling.....	50
3.5.	Voorkeursrichting vervolgactiviteiten.....	51
3.6.	Kennisdoorwerking.....	52
4.	Kostenconsequenties .....	53
4.1.	Effectiviteit toepassing POVP innovaties meten/analyses.....	53
4.2.	Kosten pipingmaatregelen.....	54
4.2.1.	Vergelijking kosten oplossingsfamilies.....	54
4.2.2.	Nauwkeurigheid kostenanalyse .....	55
4.3.	Pipingopgave areaal HWBP 2015.....	56
4.3.1.	Directe besparingen referentieprojecten .....	56
4.3.2.	Programmaraming 2015 .....	56
4.4.	Pipingopgave 2050 .....	58



4.4.1. Raming huidig areaal .....	58
4.4.2. Herziening raming rivierengebied .....	58
4.4.3. Raming landelijk.....	59
Bibliografie.....	60

# 1. Inleiding

## 1.1. Aanleiding

De manier waarop we naar Piping kijken, is echt veranderd. Er is veel geleerd uit de verkenningen van de projectoverstijgende verkenning naar piping (POVP). In het thema “meten is weten” zijn vernieuwende meettechnieken zoals doorlatendheidssonderingen en vlakdekkende metingen ontwikkeld. Het installeren en beheren van meetnetten om de gebruikte modellen te kunnen valideren is gestimuleerd. Voor het bijeenbrengen van “theorie en praktijk” is ingezet op de ontwikkeling van procesverbeteringen ter vaststelling van een gedragen beheerdersoordeel, maar is ook gezocht hoe de gebruikte modellen en uitgangspunten kunnen worden aangepast naar het huidig kennisniveau, zodat de modellen de werkelijkheid betere benaderen. Tot slot zijn “nieuwe technieken” ontwikkeld waarmee de (rest)opgave op het gebied van piping op een goedkopere manier en/of met minder impact op de omgeving kan worden opgelost.

De waardevolle inzet van meerdere disciplines blijkt onmisbaar: de ‘geodriehoek’ moet worden ingevuld. De kennisbundeling van zowel geotechnici, als ook geohydrologen en fysisch geografen of geologen geven zoveel meer inzicht in Piping.

Er is behoefte aan een overzicht en inzicht in consequenties van al deze nieuwe inzichten. In dit rapport worden de nieuwe inzichten samengevat en vertaald naar consequenties waar projecten en programma mee te maken krijgen.

## 1.2. Doelstelling

De doelstelling van POVP is als volgt geformuleerd in het Plan van Aanpak <sup>1</sup>:

1. Het - op basis van verkenningen - nauwkeuriger in beeld brengen van het areaal (op het faalmechanisme piping) te verbeteren waterkeringen, door:
  - a. de toepassing van de rekenregels te verbeteren én de toepasbaarheid ervan te vergroten;
  - b. de theorie (rekenregels) en de praktijk (werkelijkheid buiten) dichter bij elkaar te brengen.
2. Het ontwikkelen van nieuwe geaccepteerde maatregelen om het piping probleem op te lossen. In verkenningen wordt onderzocht of de innovatieve maatregel werkt, haalbaar en efficiënt is.

In deze consequentie analyse worden de resultaten van POVP samengevat: wat is er nieuw ten opzichte van de consequentie analyse uit 2012. Het doel van dit document is om inzicht te geven over:

- de voorkeursrichting van doorontwikkeling van kennis over piping,
- de gewenste doorontwikkeling van verbetermaatregelen tegen piping,
- de onderwerpen waar beheerders mee aan de slag kunnen,
- gerealiseerde en potentiële besparingen met de resultaten van POVP.

## 1.3. Scope en afbakening

Bij het opstellen van het Plan van Aanpak was de verwachting dat met het nauwkeuriger in beeld brengen van het areal een reductie van 20-40% van het areaal te verbeteren waterkeringen kan worden bereikt ten opzichte van eerdere schattingen. De verwachting was bovendien dat met nieuwe verbeter technieken de maatregelen minder (10-20%) geld kosten en sneller uit te voeren zullen zijn. In deze rapportage wordt een poging gedaan aan te tonen dat ruim aan deze verwachting wordt voldaan. Daarbij is een probleem dat er niet is vastgelegd ten opzichte van welke opgave de genoemde besparingspercentages kunnen worden geïnventariseerd. Daarom wordt zo goed mogelijk inzicht gegeven in de gerealiseerde en potentiële besparingen door nieuwe kennis van POVP ten opzichte van de situatie ten tijde van de start van de POV (op basis van het oude instrumentarium en de oude norm, LRT3), maar ook ten opzichte van de huidige inzichten (Okader obv. VNK2, nieuwe norm en concept instrumentarium WBI / OI2014).

Inzichten uit het Kennis voor Kering (KvK) programma overlappen deels de bevindingen van POVP. De afstemming hiervan werd geborgd doordat de trekker van dit programma (RWS WV) deelnam aan de projectgroep van POVP. Kennis uit POVP is daarom meegenomen in KvK, maar de (meer fundamentele) kennisontwikkeling van KvK is nog niet afgestemd en opgenomen in dit rapport.

## 1.4. Leeswijzer

In hoofdstuk 2 worden de consequenties van het nauwkeuriger in beeld brengen van het areaal met pipingopgave uit POVP beschreven. Daarmee wordt in beeld gebracht wat de veranderingen zijn in het areaal door de toepassing en toepasbaarheid van de rekenregels te verbeteren en door de theorie en praktijk dichter bij elkaar te brengen.

In hoofdstuk 3 worden de inzichten over nieuwe technieken (verbetermaatregelen) beschreven. Daarbij wordt duidelijk dat de innovatieve maatregelen haalbaar en efficiënt zijn, maar ook om gedragen keuzes vragen bij toepassing.

In hoofdstuk 4 wordt een poging gedaan om de kostenbesparingen voor het programma in beeld te brengen, zowel:

- een aantal concrete besparingen die gerealiseerd zijn met behulp van adviezen aan lopende projecten,
- een analyse waaruit blijkt dat meer onderzoek in beoordeling en de (voor)verkenning- en planuitwerkingfase kosten efficiënt is.
- besparingen die zouden zijn gerealiseerd op het beoogde programma uit 2015 (start POVP), op basis van de KosWat-raming die was gebaseerd op resultaten LRT3 en de eerste versie van de regel van Sellmeijer,
- als de besparingen die gerealiseerd kunnen worden ten opzichte van de opgave in het rivierengebied, op basis van de hoogwaterbescherming-verbeteropgave in OKADER die zijn gebaseerd op VNK-resultaten en de nieuwe regel van Sellmeijer uit het WBI2017.

In hoofdstuk 5 vermelden we een discussie over enkele bevindingen bij het opstellen van deze rapportage, komen we tot conclusies en aanbevelingen voor het vervolg.

In dit rapport wordt een indicatie gegeven van de mate van ontwikkeling van verschillende nieuwe inzichten. We gebruiken daarvoor het "technical readiness level" (TRL), zoals ontwikkeld bij ruimteorganisatie NASA. We hanteren in de vertaling naar onze situatie daarbij de volgende definities:

TRL	NASA	Definitie POVP
1	Basic principles observed and reported	Geobserveerd gedrag vastgelegd
2	Technology concept and/or application formulated	Hypothese vorming/formulering
3	Proof of concept	1 <sup>e</sup> bewijs van functioneren vastgelegd, beschreven in business case
4	Validation in laboratory environment	Prototype laboratoriumschaal
5	Validation in relevant environment	Validatie-onderzoek, maakbaarheidsproef/grote schaalproef
6	Model or prototype demonstration in a relevant environment	Pilot full scale
7	Prototype demonstration in real environment	1e full scale toepassing in project
8	System completed and "qualified" through test and demonstration	Geaccepteerde techniek, werking monitoren, opname in instrumentarium
9	System proven through successful operations	Bewezen techniek, gereed voor productie en toepassing

## 2. Consequenties vernieuwde metingen en analyses

De POVP heeft nieuwe inzichten opgeleverd op het vlak van de pipinganalyse, mede mogelijk gemaakt door nieuwe meettechnieken zoals doorlatendheidsonderingen (HPT/MPT) en geofysische kartingstechnieken (GFKT), waardoor de ruimtelijke impact van de opgave veelal kan worden beperkt ten opzichte van de traditionele aanpak. In een aantal situaties kan de verbeteropgave zelfs geheel vervallen; in andere situaties wordt de benodigde maatregel in omvang gereduceerd.

Dit hoofdstuk beschrijft de nieuwe inzichten. Hierin wordt aangevangen met een toelichting op de te behalen scopereducties als gevolg van het toepassen van de POVP aanpak. Vervolgens wordt een indeling per onderdeel (voorland, achterland, ondergrond) van de kering gehanteerd. De keuze voor deze indeling wordt toegelicht. Hierna wordt per onderdeel beschreven welke rol deze vervult, wat het referentie-schematiseringsniveau is, welke mogelijkheden vanuit de POVP worden aangereikt om de sterkte ervan zo realistisch mogelijk te schematiseren en wat dit kan opleveren in de vorm van een scopereductie. Het hoofdstuk wordt afgesloten met een toelichting welke kansen kunnen worden verzilverd door de inzet van nieuwe rekenmethodieken.

### 2.1. Te behalen scopereducties

Ter ondersteuning van dit hoofdstuk zijn voor 9 dijkvakken gevoeligheidsanalyses binnen de POVP uitgevoerd, verspreid over het boven- en benedenrivierengebied:

- Waterschap Rijn en IJssel: Gevoeligheidsanalyse Genne-Streukel en Hasselt-Zwartsluis.<sup>ii</sup>
- Waterschap Drents-Overijsselse Delta: Gevoeligheidsanalyse Pannerden-Kandia en 's-Gravenwaard<sup>iii</sup>
- Waterschap Rivierenland: Gevoeligheidsanalyse Nijmegen en Zaltbommel<sup>iv</sup>
- Waterschap Rivierenland: Wolferen-Sprok<sup>v</sup>
- Waterschap Rijn en IJssel: Leuvenheim<sup>vi</sup>
- Waterschap Hollandse Delta: Spui-West<sup>vii</sup>
- Waterschap Aa en Maas: Cuijk-Ravenstein<sup>viii</sup>

De te behalen scopereductie is afgeleid uit bovenstaande projecten<sup>ix</sup>. Aangezien het doel is een landsbrede indruk te geven wordt niet per situatie op de verschillende lokale resultaten ingegaan of hiernaar verwezen.

Op basis hiervan is een beeld verkregen van de te verwachten scopereductie. Vanzelfsprekend is het voor Nederland van belang wat voor reductie in totaal te verwachten is, immers, onze veiligheidsbegroting hangt hiermee samen.

#### 2.1.1. Definitie scopereducties

In dit hoofdstuk wordt veelvuldig ingezoomd op de scopereductie die bepaalde POVP aanpakken kunnen opleveren. Scopereducties kunnen worden uitgedrukt als

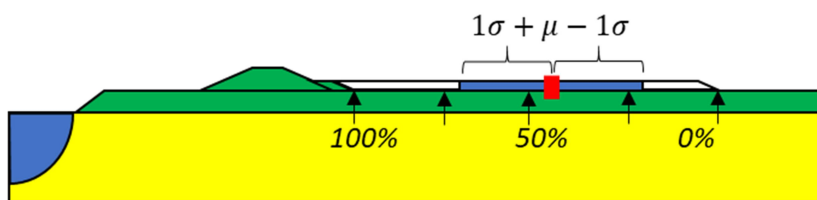
- A) Percentage scopereductie in kilometer dijkversterking
- B) Percentage scopereductie in omvang van de maatregelen (minder meter pipingberm of minder diepe schermen)

In definitie A draait het om een afname van het aantal kilometer dijk met een versterkingsopgave ten aanzien van piping. De dijk voldoet in dat geval op dat traject qua piping aan de ontwerp- of beoordelings-eisen. Dit is gunstig voor wat betreft versterkingskosten, niet alleen qua besparing op directe bouwkosten van een maatregel, maar ook op bijvoorbeeld het project- en omgevingsproces.

In geval B draait het om minder omvangrijke, dure of ingrijpende oplossingen. Vanuit oogpunt van vergelijkbaarheid is ervoor gekozen dit uit te drukken als meter reductie van een pipingberm. Aangezien pipingbermen van >25 m veelal niet haalbaar zijn kan hier echter net zo goed reductie van scherm lengten worden gezien, kortere bermen door minder belasting betekent ook kortere schermen door minder belasting. Filterschermen en drainageconstructies fungeren op een andere wijze, en daar zullen de percentages minder hard in doortikken in de omvang van de maatregelen, zie hfst. 3.

De scopereducties gaan vanzelfsprekend uit van een referentiesituatie: als referentiesituatie is de pipinganalyse gekozen met een diepgang en detailniveau zoals deze voorafgaand aan de POVP gangbaar was (pré-WBI). Meestal beruiste deze op (beperkt) lokaal onderzoek op basis van handboringen en zevingen, conservatieve inschatting van de parameters en intredepunten bij de eerste waterpartij voor de dijk. Als alternatief kan hier een beoordeling op basis van SOS en WBI Default waarden worden gelezen, maar uit de gevoeligheidsanalyses bleek dat deze veelal grotere afwijkingen opleverden van een beoordeling middels inzichten uit de POVP dan een traditionele beoordeling middels lokaal onderzoek: WBI-methodiek leidt tot ongunstiger resultaten dan pré-WBI methodiek. Dit past overigens in het beeld waarin analyses van grof, met minimaal onderzoek/default waarden, naar fijn met lokaal onderzoek en nieuwe kennis worden uitgevoerd.

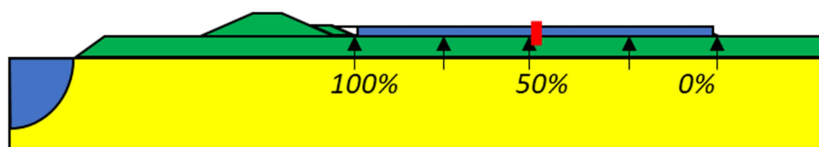
De scopereducties worden in dit hoofdstuk aangeduid als de gemiddelde scopereductie die is aangetroffen in de gevoeligheidsanalyses, met daarbij aangegeven de standaarddeviatie die is aangetroffen. Dit is weergegeven in figuur 2.



*Figuur 2: Voorbeeld scopereductie: Rode middenstreep geeft gemiddelde scopereductie ( $\mu$ ), de blauwe balken geeft de standaarddeviatie ( $1\sigma$ ) weer. In dit voorbeeld wordt bijvoorbeeld het kwelweglengte tekort met gemiddeld ca. 50% gereduceerd, en bedraagt de standaarddeviatie ca. 25%.*

### 2.1.2. Scopereducties in kilometer dijkversterking over alle analyses

De nieuwe inzichten van de POVP leiden in de gevoeligheidsanalyses tot scopereducties in de orde van 45% +/- 45% van de dijkversterking. Gezien de grote bandbreedte kan geconcludeerd worden dat nader onderzoek meestal een halvering van de pipingopgave op projectniveau oplevert, maar dat op projectniveau niet op voorhand een halvering ingecalculeerd kan worden. Nederland-breed is dit wel opportuun.

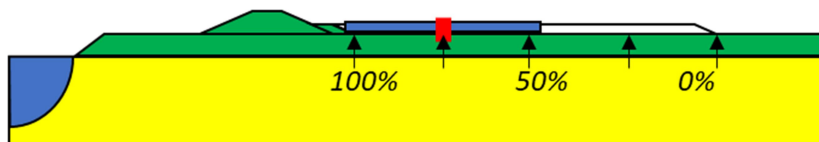


*Figuur 3: Scopereductie als percentage van de dijlengte. Gemiddeld 45% +/- 45%*

### 2.1.3. Scopereducties in meter berm lengte / kwelwegtekort

De nieuwe inzichten uit de POVP leiden in de gevoeligheidsanalyses tot scopereducties in de orde van 74% +/- 30% van het aantal meter kwelweglengtetekort (figuur 4). De gemiddelde benodigde 'traditionele' berm lengte (kwelweglengtetekort) in de gevoeligheidsanalyses bedroeg ca. 85 m. Gezien de bandbreedte houdt dit in dat nader onderzoek, gebruikmakend van de inzichten van de POVP, de omvang van de

maatregelen significant kan reduceren, maar dat op projectbasis niet op voorhand ingecaluleerd kan worden dat overal met een pipingberm van bijvoorbeeld 5 m uitgekomen kan worden. Gemiddeld genomen varieert de resterende berm lengte dus tussen 0 m (opgave verdwenen) en 50 m wanneer de inzichten vanuit de POVP worden meegenomen.



Figuur 4: Scopereductie als percentage van de berm lengte. Gemiddeld 75% +/- 30%

## 2.2. Inzichten POVP

Hierboven is steeds gesproken over de inzichten vanuit de POVP. Wat zijn deze inzichten?

Dit betreffen veelal gedetailleerdere en realistischere schematiseringen en berekeningen. Deze inzichten zijn in dit hoofdstuk verder uiteengezet en er is aangegeven wat deze inzichten kunnen opleveren. Het faalmechanisme piping bestaat achtereenvolgens uit de mechanismen opbarsten, heave, terugschrijdende erosie, kortsluiting, ruiming van de pijp en bezwijken van de kering. Het overzicht van ruimtelijke consequenties heeft met name betrekking op het onderdeel 'terugschrijdende erosie' – het kernmechanisme van het piping proces; de mechanismen heave en opbarsten zijn in de onderzoeksprogramma's minder aan bod geweest. De processen die na terugschrijdende erosie in de faalkansbenadering ook een rol spelen: kortsluiting, ruimen en bezwijken van de kering, zijn slechts beperkt aan bod geweest. Kortsluiting is onderdeel van nog lopend onderzoek binnen Waterschap Rivierenland: hier zijn wel reeds enkele eerste resultaten van beschikbaar die verderop behandeld worden.

Er is onderscheid in de ontwikkelstatus van diverse (schematiserings)aspecten. Om een indruk te geven van deze status is dit per aspect aangegeven middels een inschatting van de huidige TRL (Technology Readiness Level). Deze schaal loopt van TRL=1 (geobserveerd gedrag en hypothese vorming), via TRL=3 (beschreven in business case), TRL=4 (prototype laboratoriumschaal), TRL=5 (validatie-onderzoek, maakbaarheidsproef/grote schaalproef), TRL=7 (pilot full scale) en TRL=8 (opname in instrumentarium) naar TRL=9 (gereed voor productie en toepassing).

Bij het deelmechanisme terugschrijdende erosie zijn de schematisering van **voorland**, **ondergrond** en van **achterland** belang, alsmede de modelkeuze voor de analyse. In de volgende alinea's worden de verschillende onderdelen besproken, waarbij wordt aangegeven hoe ze invloed uitoefenen in het pipingmechanisme, op welke wijze ze bepaald kunnen worden en wat de verwachte scopereductie in percentage van het kwelweglengtetekort is. Hierbij wordt opgemerkt dat piping zich niet-lineair gedraagt, wat in de praktijk inhoudt dat de percentages zich niet direct laten optellen. Voor een grove vergelijking is optellen wel mogelijk.

Er zijn diverse onderwerpen die binnen de POV Piping aan de orde zijn geweest, maar nog niet (volledig tot wasdom gekomen zijn. De belangrijkste zijn hieronder, met ontwikkelstatus, weergegeven. Doorontwikkeling hiervan wordt waar mogelijk opgepakt binnen de Kennis- en Innovatie Agenda van het HWBP.

- D-Geo Flow, zie paragraaf 2.3.2: doorontwikkeling van veiligheidsfilosofie & tijdsafhankelijkheid.
- Pipegroei onder voorland, zie paragraaf 2.3.3: doorontwikkeling van veiligheidsfilosofie.

- Anisotropie, zie paragraaf 2.4.2: recent afgerond, rekenmethodiek dient nog aan ENW voorgelegd te worden.
- Statistische omgang rekenwaarden, zie paragraaf 2.4.3: moet nog worden opgesteld a.d.v. bevindingen POV Piping.
- Werkwijzer randvoorwaarden pipingmodellering, zie paragraaf 2.5.2: nog niet beschikbaar.
- Toepasbaarheid methodieken in getijdenzanden, zie paragraaf 2.6.4: nog niet beschikbaar.

## 2.3. Voorlanden

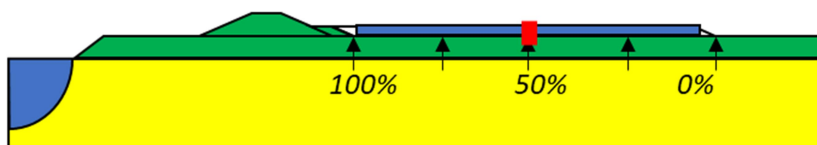
Het voorland speelt een belangrijke rol binnen het piping proces. Enig aanwezig voorland voorzien van een significante weerstand biedende deklaag kan bij wijze van spreken de opgave doen verdampen. Binnen de gevoeligheidsanalyses bleek dat het meenemen van de weerstand van het voorland veelal de bepalende factor is voor de pipingopgave. Goed inzicht in het voorland is dus bepalend.

Onderstaand worden enkele aspecten van voorland beschreven die bij piping van belang zijn. Hierbij wordt onderscheid gemaakt in de rol die het voorland speelt in de belasting op de kering en de pijp, maar ook in de sterkte die het voorland heeft.

### 2.3.1. Intredeweerstand (belasting) – dikte en weerstand voorland

Piping en het geohydrologisch systeem zijn niet los van elkaar te zien. Het voorland speelt, samen met de waterbodem, in het geohydrologisch systeem de rol van afsluiter: veel weerstand in dit deel van het systeem leidt ertoe dat er weinig water bij een pijp komt, en de pijp dan ook niet veel verder groeit. Uit de gevoeligheidsanalyses kwam naar voren dat, in de meeste gevallen, de locaties waar het voorland was meegenomen, meestal ook de locaties waren waar meer dan een halvering te behalen was in de totale scope in meter kwelweglengtetekort (definitie B, zie § 2.1.1). Dit waren vaak ook de locaties waar, in combinatie met een nadere analyse van andere parameters, vaak een halvering te halen was in het aantal kilometer dijkversterking met een pipingopgave (definitie A, zie § 2.1.1). De spreiding blijkt wel fors, wat met name samenhangt met het per gevoeligheidsanalyse wel of niet aanwezig zijn van meer of minder voorland.

Er is bewust voor gekozen niet verder op te splitsen naar locaties met en zonder veel voorland aangezien deze consequentieanalyse een beeld van de implicaties van de POVP voor geheel Nederland beoogd te geven.



*Figuur 5: Scopereductie voorland als percentage van de bermlengte. Gemiddeld 50% +/- 45%*

#### **Bepaling voorlandweerstand: besef noodzaak harde data neemt toe**

Het meenemen van voorland kan alleen onder bepaalde voorwaarden, waarbij de belangrijkste wel een relatief lage doorlatendheid (geohydrologie: hoge weerstand) van de deklaag, voorop staat. Om deze reden is er vanuit de POVP bij waterschappen reeds vanaf het begin er op aangedrongen om peilbuismeetnetten in te richten. Uit een meetnet kan namelijk de weerstand van het voorland direct afgeleid worden. Het is goed te zien dat dit besef steeds meer in het vakgebied landt. Er zijn nu meerdere meetnetten in Nederland aanwezig en voorlanden worden vaker gedetailleerd onderzocht.

Toch zijn meetnetten regelmatig afwezig, ontbreekt data of zijn de reeksen te kort waardoor bv. een hoogwatermeting mist. Immers, niet alle voorlanden in Nederland liggen op een dusdanige hoogte dat ze met regelmaat onder water staan, en pas dan leveren meetnetten daadwerkelijk bruikbare data op. Het bundelen van gevonden weerstanden en daarmee deklaagdoorlatendheden zou voor de versterkingsopgave in Nederland dan ook een grote stap vooruit zijn.

Ook zonder meetnetten kan informatie over het voorland worden ingewonnen. De tools die de beheerder tot zijn beschikking heeft zijn in dat geval boringen voor het exacte inzicht, geofysische onderzoek, met name EM-metingen, voor het vertalen van de boringen naar vlakdekkend inzicht, en (grootschalige) infiltratieproeven voor het bepalen van de deklaagweerstand. In de Handreiking Grondonderzoek voor Piping zijn deze methoden door de POVP uitvoerig toegelicht.

#### ***Buitendijkse waterpartijen: regelmatig juist niet het intredepunt***

Een belangrijk punt in het voorlandonderzoek zijn buitendijkse waterpartijen. In de traditionele aanpak betekent een waterpartij een potentieel intredepunt. De POVP methodiek omvat het nauwkeuriger bekijken van deze punten. Soms, ingeval van een grote enkele tientallen jaren oude zandwinput met een open verbinding naar het buitenwater, waar het zand tastbaar en zichtbaar aan de oever ligt, is het terecht te veronderstellen dat het intredepunt ter plaatse van deze put ligt. Echter, oudere kolkgraten en strangen zijn de ideale slibvangen van de voorlanden. Decennia tot soms eeuwen slibopbouw kan ertoe leiden dat de weerstand hier significant kan zijn. Kenmerkend voor dit soort situaties zijn meestal het ontbreken van een (brede) open verbinding met het buitenwater en de aanwezigheid van dikke sliklagen langs de kanten die zichtbaar worden wanneer in hoog zomer deze plassen droogvallen. Een weerstand van enkele tientallen dagen is in deze situaties te verwachten.

Dit kan eenvoudig aangetoond worden door lokaal metingen van waterpeilen en stijghoogten uit te voeren waaruit een weerstand kan worden afgeleid, door gutsboringen uit te voeren in geval van ondiepe wateren en door EM-metingen of boringen uit te voeren in geval van diepere wateren.

Voor smalle parallelsloten geldt dat met name bij dikke goed doorlatende watervoerende pakketten, zoals in het bovenrivierengebied gangbaar, een enkele parallelsloot die insnijdt in het watervoerend pakket, een verwaarloosbaar effect heeft op de totale weerstand van een voorland. Numerieke grondwaterberekeningen kunnen gebruikt worden om dit vertalen naar input voor een pipinganalyse. Ook in dat geval hoeft het intredepunt dus niet bij de sloot gekozen te worden.

De methode bevindt zich op TRL=9 (productiegereed). Over het meten en toepassen van voorlandweerstand is reeds veel bekend en wordt al sinds de jaren '80 toegepast.

#### **2.3.2. Intredeweerstand (belasting) – lengte van het voorland > 1x dijkzate**

Hierboven is reeds aangegeven dat voorland een bepalende factor is in het bepalen van de pipingopgave. Binnen de huidige richtlijnen, op basis van de vereenvoudigde rekenregel van Sellmeijer, wordt het meenemen van voorland ter breedte van maximaal 1x dijkzate (teen tot uittredepunt) toegestaan. De achtergrond is dat er bij het meenemen van meer voorland een verhoogde kans is dat de pipegroei tot onder het voorland kan plaatsvinden met een risico op kortsluiting tussen buitenwater en pipe. Deze kansen zijn echter niet in huidige richtlijnen uitgewerkt en vastgelegd. In veel situaties komen voorlanden voor die aanzienlijk groter zijn dan de dijkzate. In dat geval zou het "1x de dijkzate" - criterium maatgevend worden en zou het deel van het voorland dat groter is dan de dijkzate niet meegenomen kunnen worden in de pipinganalyse. Dit is natuurlijk zonde als later uit nadere analyse zou blijken dat de "1x de dijkzate"-regel voor die situatie erg conservatief is.



Door nieuwe software (D-Geo Flow) kan locatie specifiek bepaald worden hoever de pijp groeit. Hier is, onder begeleiding van de POVP, onderzoek naar uitgevoerd bij de dijkversterking Wolferen-Sprok (WOS), waaruit bleek dat in sommige gevallen, met name bij relatief dunne watervoerende pakketten met een voorlandweerstand van 20 dagen of meer, meer voorland kan worden meegenomen dan de dijkzate, alvorens de pijp onder de buitenteen uit komt. In sommige situaties ging het om wel 5x meer voorland. Dit biedt een gunstige perspectief voor komende versterkingen. Probleem hierbij is dat D-Geo Flow nog niet is gevalideerd voor het berekenen van de lengte van de pipe. In WOS is geadviseerd om een veiligheidsfactor van 1,5 aan te nemen op de berekende pipe-lengte. Daarmee wordt het mogelijk om concrete situaties per project te analyseren.

Ook onderzoek vanuit het Kennis voor Keringen programma en de projectgebonden innovatie "naar een geohydrologischer aanpak voor piping" van project Meanderende Maas geven aan dat aanzienlijke winsten zijn te boeken wanneer het voorland in een numerieke berekening wordt meegenomen.

Ook moet worden opgemerkt dat enkele berekeningen uit het WOS onderzoek hebben laten zien dat er situaties mogelijk zijn waarbij de vereenvoudigde analytische rekenregel om een effectieve voorlandlengte te bepalen onveilig zou zijn. Dit gaat om situaties met een dunne deklaag met een weerstand van minder dan 10 dagen, wat zeer beperkt voorkomt.

Het algemene beeld, uit beide onderzoeken, is echter dat de versterkingsscope in kilometers dijkversterking aanzienlijk kan afnemen wanneer voorland wordt meegenomen.

De methode bevindt zich op TRL=7 (certificering nog noodzakelijk). Dit heeft met name betrekking op detailvalidaties van het model D-Geo Flow.

### 2.3.3. Intredeweerstand (sterkte) – pijpgroei onder het voorland

Zoals aangegeven wordt in de huidige methodieken gerekend met een pijpgroei tot maximaal de buitenteen van een dijk. Bij actief beheer van het voorland en afdoende dikte en sterkte van de deklaag is het mogelijk pijpgroei tot onder het voorland toe te staan. Feitelijk kan met orde 1 m cohesieve klei dit effect al bereikt worden, maar rekening dient te worden gehouden met een reservering voor medegebruik. Dit nieuwe inzicht kan de bruikbare lengte van het voorland nog verder vergroten, maar is een afweging die hoge eisen stelt aan onder meer data en beheer. Bij metingen gaat het hierbij om vlakdekkend inzicht in de minimale deklaagdikte en sterkte in de zone waar pijpgroei wordt verwacht. Bij beheer om een verzwaaring van het beheer van het voorland en juridische zeggenschap. Voor details over dit laatste wordt verwezen naar de Handreiking Voorland<sup>xi</sup> van de POV Voorlanden.

De methode bevindt zich op TRL=4 (validatie in model/lab omgeving). De grote stap die hier gemaakt moet worden is testen op feitelijke kleilagen en betere uitwerking van de veiligheidsbenadering.

## 2.4. Eigenschappen ondergrond

In onderstaande paragrafen is nader ingegaan op een aantal belangrijke eigenschappen van het watervoerend pakket relevant voor piping. Er is sprake van een effect van de ondergrond op de belasting (doorlatendheid: met vanuit de POVP ontwikkelingen in meerlaagsheid en anisotropie) en sterkte (D70).

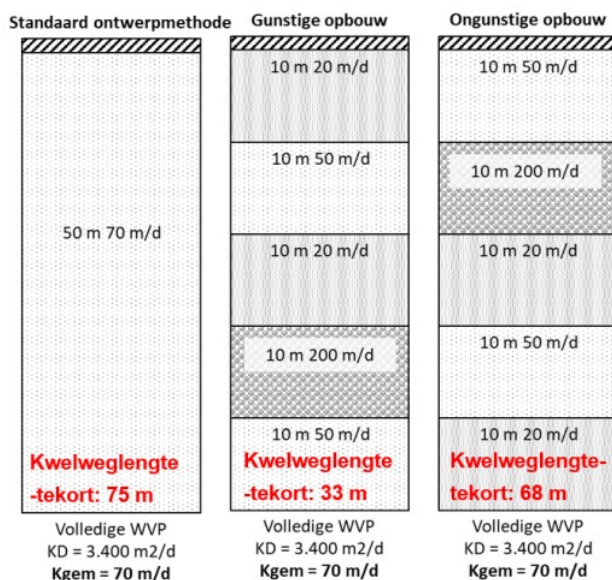
### 2.4.1. Meerlaagsheid

Piping kan en mag niet los worden gezien van het geohydrologische systeem, grondwaterstroming is immers de motor achter het pipingproces. Naast de weerstand van het voor- en achterland bepaalt het doorlaatvermogen (KD) van het watervoerend zandpakket de grondwaterstroming en daarmee het risico op piping. Dit doorlaatvermogen wordt naast de dikte mede bepaald door de doorlatendheidskarakteristieken binnen het pakket. In de huidige rekenregel van Sellmeijer voor

terugschrijdende erosie is het complexe karakter van het watervoerend pakket versimpeld naar één homogeen en isotroop pakket. Rekent makkelijk, maar sluit minder aan bij de werkelijkheid en draagt zodoende bij aan het vaak onrealistische beeld van de pipingopgave.

Vanwege het variërende afzettingsmilieu is er in veel gevallen sprake van verschillende zandlagen met een verschillende doorlatendheid die samen het watervoerend pakket vormen. Meestal zijn deze afzonderlijke lagen enkele tot tientallen meters dik. Binnen het WBI wordt dit deels ondervangen doordat met een gewogen gemiddelde doorlatendheid van het watervoerend pakket kan worden gerekend. Deze aanpak houdt er echter geen rekening mee waar onder de dijk de beter of minder goed doorlatende pakketten voorkomen. De doorlatendheidsvariatie over de diepte is relevant omdat de zandlagen dicht onder de deklaag een grotere bijdrage leveren aan het pipingproces dan zandlagen die zich op een grotere diepte bevinden.

Dit is geïllustreerd aan de hand van het voorbeeld in figuur 6 bij een 50 m dik watervoerend pakket o.b.v. de standaardaanpak en het meenemen van meerlaagsheid. Merk op dat alle configuraties uitkomen op hetzelfde doorlaatvermogen of gewogen gemiddelde doorlatendheid van 70 m/dag. De WBI aanpak zal in het geval van een gunstige bodemopbouw met meerlaagsheid leiden tot een te conservatieve inschatting van het pipingrisico, terwijl bij een ongunstige bodemopbouw de standaard aanpak kan leiden tot een onderschatting van dit risico.



*Figuur 6: Ondergrondscenario's met doorlatendheidsvariatie over de diepte / meerlaagsheid*

Voor een voorbeeldcase<sup>xii</sup> in het bovenriviergebied met de bodemscenario's uit figuur 6 is het kwelweglengtetekort berekend middels numerieke analyses in een stromingsmodel. Het kwelweglengtetekort was ca. 75 m volgens de standaardaanpak met één zandlaag met een gewogen gemiddelde doorlatendheid, 33 m (-56%) voor de gunstige bodemopbouw en 68 m (-9%) met de ongunstige bodemopbouw. Merk op dat in dit voorbeeld ook de relatief ongunstige bodemopbouw tot een optimalisatie leiden.

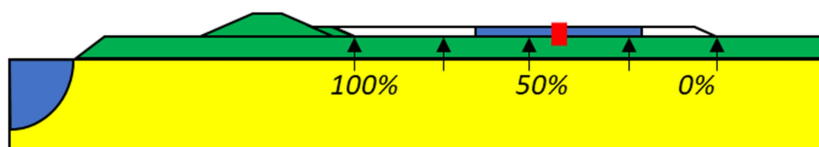
De waterstroming relevant voor het pipingproces zal zich met name in het bovenste deel van het watervoerend pakket instellen waarbij de eerste laag ook weerstand kan bieden voor toestroming naar het diepere, beter doorlatende pakket. Het meenemen van meerlaagsheid zal bijdragen aan een beter begrip

van de grondwaterstroming onder de dijk en daarmee het pipingproces, maar vereist wel een schematisatie van zandlagen met een wat hogere resolutie.

In de meeste gevallen liggen de beter doorlatende lagen op enige afstand onder de deklaag, waardoor er veelal een optimalisatie is te behalen. In een minderheid van de situaties kan de beter doorlatende laag juist bovenin liggen waardoor een optimalisatie niet vanzelfsprekend is, dit hangt mede af van de doorlatendheidseigenschappen dieper in de laag zoals in het voorbeeld bij de ongunstige bodemopbouw. De winst zit hem in dit geval in het beter begrijpen van de ondergrond en een reëlere inschatting van het pipingrisico om de kans op overstroming te verkleinen.

### **Gevonden scopereducties**

Binnen de gevoeligheidsanalyses en verschillende projecten waarin daadwerkelijk is gemeten en gerekend aan meerlaagsheid volgen besparingen variërend van 20% tot 60% van het kwelweglengtetekort. Dit is weergegeven in figuur 7. Het omgekeerde kan ook het geval zijn wanneer fijn zand op grovere zand- en grindafzettingen liggen, in dit geval is kan meerlaagsheid tot een geringe vergroting van de scope leiden. De grootste besparing is behaald in het getijdengebied met een relatief slecht doorlatend wadzandpakket bovenop het pleistocene zandpakket.



*Figuur 7: Scopereductie meerlaagsheid als percentage van de bermlengte. Gemiddeld 38% +/- 20%*

De methode bevindt zich op ca. TRL=8 (presteert naar behoren, productieproblemen opgelost). Er zijn nog wat kleine vraagstukken. Zo wordt meerlaagsheid op dit moment via vergelijking middels (numerieke) modellen in rekening gebracht. Hier zijn (kleine) kanttekeningen bij te plaatsen. Validatie van het model D-Geo Flow zou helpen om dit definitief op te lossen.

### **2.4.2. Anisotropie in doorlatendheid**

Indien de variatie in doorlatendheid in alle richtingen gelijk is, wordt de afzetting isotroop genoemd. Dit is een standaard aanname in veel grondwateranalyses, maar een waarvan bekend is dat deze pertinent onjuist is. Nagenoeg alle natuurlijke zanden hebben namelijk in verticale richting een andere doorlatendheid dan in horizontale richting, waarbij in de meeste gevallen de verticale doorlatendheid ( $K_v$ ) kleiner is dan de horizontale doorlatendheid ( $K_h$ ). Deze afzettingen worden anisotroop genoemd.

In de huidige beoordelingsmethodiek voor piping wordt vaak de horizontale doorlatendheid gebruikt. De grootte daarvan wordt veelal afgeleid uit een beperkt aantal doorlatendheidsbepalingen waarvan de uitkomst afhankelijk is van de grootte van het monster (zie verderop). In veel gevallen wordt de horizontale (bulk)doorlatendheid isotroop toegepast bij de berekening van de grondwaterstroming richting het opbarstkanaal en de pijp en niet de verticale doorlatendheid. Daardoor wordt de kans op piping structureel overschat.

### **Schaaleffect in doorlatendheidsmetingen**

De horizontale en verticale doorlatendheid wordt meestal lokaal gemeten, ofwel met proeven in situ ofwel met lab experimenten op grondmonsters van enkele cm in diameter. Daarbij is er onder ander binnen de

POVP en internationale literatuur een positieve relatie aangetoond tussen de doorlatendheid en de grootte van een monster. Indien resultaten van metingen op relatief kleine monsters worden gebruikt kan dit leiden tot een onderschatting van de (bulk)doorlatendheid van een zandlaag. Zeker met het oog op piping in de gelaagde zandlagen onder dijken is het daarom van belang om puntmetingen op te schalen of een meting met voldoende omvang te gebruiken. Het opschalen van doorlatendheden vereist inzicht in de verhouding in resultaten van klein- en grootschalige testen en de variatie hierin. Daarom wordt aanbevolen een test te kiezen die aansluit bij de processchaal van het te onderzoeken vraagstuk. In het geval van doorlatendheid bij piping is aangetoond dat peilbuisanalyses, pompproeven en HPT-(A)MPT (mini-)pompproeven qua schaalgrootte goed aansluiten.

### Waarden van anisotropie in Nederland

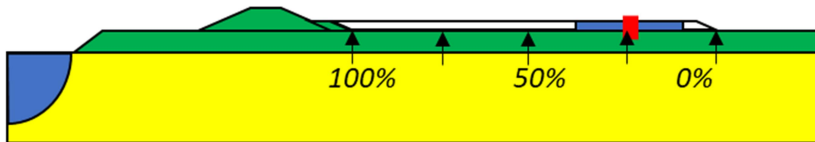
Anisotropie in doorlatendheid is een relatief nieuwe parameter die kan worden ingezet in pipinganalyses. In een onderzoeksproject van het HWBP en waterschap Hollandse Delta (WSHD) zijn diverse meettechnieken om de mate van anisotropie van zandlagen te bepalen onderling vergeleken en is een beoordelings- en ontwerpmethodiek voor piping met anisotropie opgesteld. Deze wordt nog voorgelegd aan ENW> Ontwikkelingen rondom de HPT-AMPT<sup>®</sup>, een sondeertechniek waarmee op basis van pompproeven zowel de horizontale als verticale doorlatendheid kan worden bepaald, en de vertaling van deze informatie naar een pipinganalyse in D-Geo Flow dragen bij aan het op een efficiënte en nauwkeurige wijze kunnen meten en rekenen aan anisotropie. Binnen het anisotropieonderzoek is een kansrijke kaart opgesteld waarin voor verschillende typen afzettingen een range aan gevonden anisotropiewaarden<sup>xiii</sup> is gegeven (zie figuur 8). Hierbij zijn er verschillen zichtbaar zijn tussen afzettingen met een range met relatief lage waarden (bijv. windafzettingen) en afzettingen met een range met relatief hoge waarden (bijv. sommige getijden- en rivierafzettingen). In gebieden waar afzettingen voorkomen die op basis van het literatuuronderzoek waarschijnlijk relatief hoge anisotropiewaarden hebben is de kans groter dat het meenemen van anisotropie bij de beoordeling op piping leidt tot lagere faalkansen. Hierbij wordt opgemerkt dat een anisotropie van een factor 2 a 3 al een reductie van enkele tientallen procenten



kan opleveren.

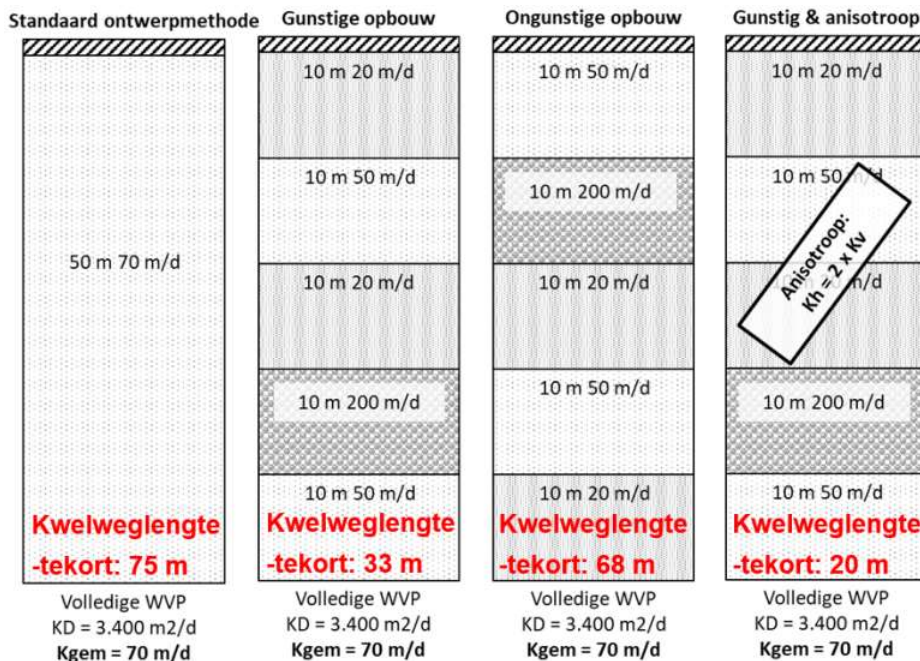
Hoofdtype afzetting	Omschrijving	Verwachte (bandbreedte) anisotropiefactor	Verwachte (gemiddelde) anisotropiefactor
Strand/vooroever-afzettingen	Kustnabij afgezet zand, horizontaal gelaagd /cross-bedding, goed tot slecht gesorteerd, matig fijn tot uiterst grof zand, mogelijk ijzeroxide laagjes.	1.0 – 2.5	1.5
Getijdenafzettingen	Gelaagde wadafzettingen	1.0 – 6.0	3.5
Windafzettingen	Kustduin, cross-bedding	1.3	1.5
	Eolisch, fijn tot matig grof	1.9	
	Eolisch matig grof tot grof zand (rivierduinafzettingen; opgeschaald)	1.03	1.1
	Fijn (lemig) zand (meest: dekzand, crevasse-afzettingen) opgeschaald	3.7	3.5
Rivierafzettingen	Rivierbedding (fijn tot matig grof)	1 – 5	3
	Rivierbedding met organische laag/materiaal	40 - 60	
	Fluviaal matig grof tot grof zand (vlechtende rivierafzettingen en verticale accretie geulafzettingen; opgeschaald)	1.1	
	Laterale accretievlakken (opgeschaald)	4	4
	Zand tot siltige klei (oeverafzettingen, crevasse-afzettingen; opgeschaald)	10.4	10

Binnen projecten waarmee is gerekend met anisotropie en de gevoeligheidsanalyses vanuit de POVP volgt een besparing van ca. 5% tot 35% op het berekende kwelweglengtetekort, zie figuur 9.



Figuur 9: Scopereductie anisotropie als percentage van de bermlengte. Gemiddeld 22% +/- 14%

In het voorbeeld uit de voorgaande paragraaf leidt het meenemen van meerlaagsheid en een anisotropiefactor van 2 (zie figuur 10) tot een kwelweglengtetekort van nog maar 20 m. Dat is een optimalisatie van 73% t.o.v. de standaardaanpak met een homogeen en isotroop watervoerend pakket. Ten opzichte van het meerlaagse gunstige scenario is de besparing respectievelijk 13 m (-39%).



Figuur 10: Ondergrondscenario's WVP met meerlaagsheid en anisotropie

De daadwerkelijk besparing is sterk afhankelijk van de bodemopbouw en de eigenschappen van met name de ondiepe zandlagen. Het effect van anisotropie is het grootst als de anisotrope lagen zich bovenin het watervoerend pakket bevinden. Om deze reden wordt de versterkingsopgave het meest gereduceerd indien de bodemopbouw bestaat uit de ondiepe anisotrope lagen met relatief lage doorlatendheden. In dergelijke situaties zal de versterkingsopgave op piping fors reduceren of zelfs vervallen.

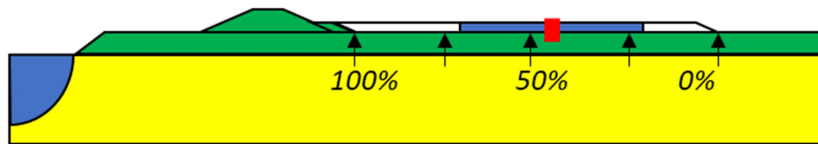
De methode bevindt zich op TRL=8 (presteert naar behoren, productieproblemen opgelost). Er is een gevalideerde meettechniek beschikbaar. Er zijn nog wat kleine vraagstukken. Zo wordt anisotropie op dit moment via vergelijking middels (numerieke) modellen in rekening gebracht. Hier zijn (kleine) kanttekeningen bij te plaatsen. Validatie van het model D-Geo Flow zou helpen om dit definitief op te lossen.

### 2.4.3. D70 – karakteristiek of gemiddeld

De beoordeling of het ontwerp van een dijk op basis van de rekenregel van Sellmeijer vereist de invoer van karakteristieke waarden, zo ook voor de korreldiameter  $d_{70}$ . De  $d_{70}$  van de top van het zandpakket bepaald de weerstand van de korrels tegen het optreden van een doorgaand erosieproces en daarom dient de karakteristieke 5% ondergrens bepaald te worden. In het WBI zijn per laag default waarden gegeven waarover een variatiecoëfficiënt wordt toegepast om de karakteristieke ondergrens te bepalen. Op basis van lokaal onderzoek kan de spreiding in de korrelverdelingsresultaten worden bepaald en kan de karakteristieke ondergrens worden bepaald via statistiek.

In de gevoeligheidsanalyses is de parameter  $d_{70}$  gevarieerd waarbij in plaats van met een karakteristieke puntwaarde (95% kans van voorkomen bij kleine monstervolumes) met gemiddelden waarden is gerekend. Dit aangezien uit onderzoek door de POVP geconcludeerd is dat een correlatielengte van de  $D_{70}$  relatief kort is (orde meters tot maximaal een tiental meters) en daarmee de gemiddelde  $D_{70}$  waarschijnlijk een realistischer beeld geeft van de korrels die een pijp op zijn pad tegen komt.

Op basis van de gevoeligheidsanalyses is een reductie in extra benodigde kwelweglengte tussen ca. 20% en 70% bepaald, zie figuur 11. Hiermee is het belang onderstreept van het doen van lokaal onderzoek naar deze parameter.



Figuur 11: Scopereductie anisotropie als percentage van de berm lengte. Gemiddeld 44% +/- 25%

Opgemerkt wordt dat in veel oudere literatuur (bv TR-Zandmeevoerende Wellen, TR-Piping bij Rivierdijken) uitmiddeling al wordt meegenomen, al dan niet met een reservering voor regionale variatie. Het WBI/OI zijn in deze zin conservatiever dan eerdere regelgeving. Mogelijk is dit om te compenseren voor het gebruik van default waarden, maar echt overeenstemming is er niet.

Daarnaast is er met de komst van de WBI default waarde enige verwarring ontstaan: vaak wordt weinig lokaal onderzoek meer uitgevoerd, omdat het naar verluid niet te meten is. Dit terwijl die locaties waar wel gemeten wordt (Wolferen-Sprok, Leuvenheim, Ooijen-Wanssum) uitwijzen dat er op zich duidelijke trends zichtbaar zijn in een gebied.

De methode bevindt zich voor wat betreft uitmiddeling op ca. TRL=7 (focus op certificering). Er zijn afdoende aanwijzingen en onderzoeken die wijzen op (een bepaalde mate van) uitmiddeling. Er is behoefte aan een heldere en slechts voor één uitleg vatbare aanpak, welke bereikt kan worden door het samenbrengen van experts. Van belang is hierbij dat deze experts inzicht hebben in type metingen, correlatielengten en hoe die ingrijpen op de (semi)probabilistische benadering.

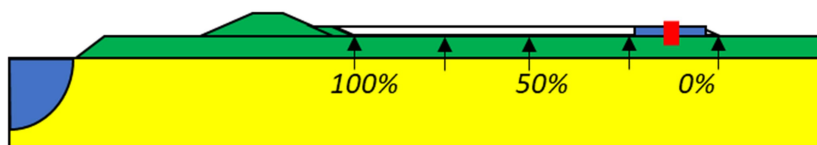
### 2.4.4. Horizontale doorlatendheid $K_h$ – karakteristiek of gemiddeld

In de beoordeling of het ontwerp van een dijk op basis van de rekenregel van Sellmeijer is de invoer van karakteristieke waarden geeist, zo ook voor de doorlatendheid. In de praktijk wordt veelal de horizontale doorlatendheid toegepast in pipinganalyses (zie ook §2.4.2). De doorlatendheid bepaald de belasting op de kop van de pijp en moet met een veilige 5% bovengrens worden opgegeven. In het WBI zijn per laag default waarden gegeven waarover een eveneens default variatiecoëfficiënt wordt toegepast om de karakteristieke bovengrens te bepalen. Op basis van lokaal onderzoek kan de spreiding in de

doorlatendheid in de verticaal en langs het dijktraject worden bepaald en kan dus de karakteristieke waarde lokaal bepaald worden via statistiek.

In de gevoeligheidsanalyses is zowel gerekend met een karakteristieke inschatting van de doorlatendheid als met gemiddelde waarden. Deze berekeningen zijn uitgevoerd om een indicatie te krijgen van het effect wanneer met gemiddelde waarden wordt gerekend. Gedachte hierbij is dat de grondwaterstroming betrokken bij het pipingproces wordt bepaald door de gemiddelde bulkdoorlatendheid van het pakket. Hier is wat voor te zeggen omdat variaties van punt tot punt worden uitgemiddeld bij grondwaterstroming. Hier kan in de huidige statistiek echter al voor gecorrigeerd worden door geen karakteristieke puntwaarde te berekenen maar een karakteristieke schatting van de laaggemiddelde waarde te bepalen. Er wordt dan dus gerekend met een karakteristieke schatting van het gemiddelde van de verdeling in plaats van de staart van de verdeling. Er wordt dus niet gerekend met een absolute gemiddelde waarde, maar een veilige schatting hiervan. Hier dient ook bij gebruik van regionale modellen rekening mee gehouden te worden.

Op basis van de gevoeligheidsanalyses is een reductie van het kwelweglengtetekort van circa 0% tot 20% bepaald. Hierbij wordt opgemerkt dat slechts een beperkt aantal gevoeligheidsanalyses (3) specifiek hebben gekeken naar uitsluitend een verschil in doorlatendheid, en deze gevoeligheidsanalyses gebruikten allemaal niet het WBI als basis, maar bevindingen uit lokale geohydrologische modellen. In veel gevallen is nader onderzoek naar de doorlatendheid gecombineerd met het effect van meerlaagsheid en anisotropie, wat reeds in eerdere paragrafen is beschreven.



Figuur 12: Scopereductie doorlatendheidsonderzoek als percentage van de berm lengte. Gemiddeld 10% +/- 10%

Een bepaalde mate van uitmiddeling wordt in bijvoorbeeld Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen meegenomen, al dan niet met een reservering voor regionale variatie. Het WBI/OI zijn in deze zin conservatiever dan eerdere regelgeving en houdt niet afdoende rekening met bijvoorbeeld achterliggende type meetschaal/correlatielengte.

De methode bevindt zich voor wat betreft uitmiddeling op ca. TRL=8. Hier geldt feitelijk het zelfde als bij D70. Er zijn afdoende aanwijzingen en onderzoeken die wijzen op (een bepaalde mate van) uitmiddeling, sterker nog, het is al wel eens opgeschreven. Er is dus ook hier behoefte aan een heldere en slechts voor een uitleg vatbare aanpak, welke bereikt kan worden door het samenbrengen van de juiste experts. Van belang is hierbij dat deze experts inzicht hebben in type metingen, correlatielengten en hoe die ingrijpen op de (semi)probabilistische benadering.

## 2.5. Invloed achterland

Het achterland vormt het sluitstuk in het geohydrologische systeem dat de grondwaterstroming en daarmee de faalkans op piping voor een groot deel bepaald. Gezamenlijk bepaald de weerstand op het voor- en achterland, het doorlaatvermogen van het watervoerend pakket en het verval over de dijk de daadwerkelijke grondwaterstroming en waterdrukken onder de dijk. In een voor piping gunstige situatie heeft het voorland en het watervoerend pakket een zo groot mogelijke weerstand, en het achterland een zo laag mogelijke weerstand, zodat waterdrukken snel afbouwen: het achterland werkt als een ventiel. In dat geval stroomt veel water naar het (verre) achterland, en daarmee minder naar de pipe.

Het meenemen van achterland bevindt zich op ca. TRL=8, de kennis is reeds jaren aanwezig en kan gewoon worden toegepast. Enige aandacht bevindt zich mogelijk nog op het vlak van de veiligheidsbenadering. De actie die er ligt is dat de juiste kennishouders betrokken moeten worden. De ervaring van de POV Piping is dat hierbij de geodriehoek (geoloog-geohydroloog-geotechnicus) van groot belang is, aangezien binnen dit vraagstuk verschillende meetschalen spelen die (uitgezonderd geotechnisch onderlegde geohydrologen) veelal in het vakgebied onvoldoende interactie hebben. Belangrijker nog dan de specialist is hier wel diegene die de specialisten bij elkaar brengt.

### **2.5.1. Weerstand achterland: bewust gebruik van metingen en modellen**

Net als bij het voorland is het voor maatwerk analyses van belang om de dikte en doorlatendheid van de deklaag op het achterland te kennen. Om deze parameters te achterhalen kunnen dezelfde technieken worden gehanteerd als op het voorland: handboringen gecombineerd met EM-onderzoek i.c.m. met (grootschalige) infiltratiemetingen. Ook peilbuis meetnetten zijn geschikt waarbij, net als bij het voorland, geldt dat bij voorkeur een relatief eenvormig dijktraject gekozen dient te worden met minstens 3 peilbuizen in het achterland, afgestemd op de lokale spreidingslengte.

Kleinschalige doorlatendheidstesten zijn minder geschikt vanwege het eerdergenoemde schaafeffect in doorlatendheidsmetingen. Daarom dient ook hier bij voorkeur een medium- tot grote schaalproef gekozen te worden om de (bulk)doorlatendheid mee te kunnen schatten. Het overnemen van doorlatendheidswaarden uit bijvoorbeeld zakboekjes kan een risico met zich meebrengen omdat de doorlatendheid sterk locatie, tijd en context afhankelijk is. Zaken als een droogte, scheuren, bioturbatie, specifieke grondsamenstelling en mate van verdichting zijn van invloed op de doorlatendheid.

Bij het gebruik van regionale numerieke modellen, zoals op iMod gebaseerde modellen waarvan binnen verschillende waterschappen varianten in gebruik zijn, geldt als belangrijke kanttekening dat de schaal van een typisch piping vraagstuk, tientallen tot maximaal enkele honderden meters rondom een dijk, aanzienlijk kleiner is dan de schaal van de regionale modellen. Regionale modellen zijn opgezet om regionaal uitspraken te doen over waterstanden en stijghoogten, maar zijn juist in de variabele zone rond een dijk, met lokale strangen, wielen, lokale doorlatendheidsverschillen en overgangen veelal minder nauwkeurig. Deze modellen zijn wel bruikbaar voor een pipinganalyse wanneer de modellen zijn gekalibreerd met lokale peilbuis meetnetten rondom de dijk. Dit vereist een uitgebreid peilbuis meetnet. Na aanpassing van het model ontstaat er de mogelijkheid om de vlakdekkende modeluitvoer te combineren met andere vlakdekkende geo-informatie waardoor een pipinganalyse per uitredepunt kan worden uitgevoerd. Dit biedt interessante perspectieven voor toekomstige ontwikkelingen in het beoordelen van de pipingveiligheid waarbij correlaties en lengte-effecten kunnen worden aangescherpt,

### **2.5.2. Regionaal systeem: ontlastende werking verzilveren**

Een specifieke situatie ontstaat bij diepe en grote waterpartijen in het achterland. Deze kunnen de stijghoogte in het achterland sterk beïnvloeden doordat het grondwater afstroomt richting deze plassen of polders in plaats van zich te verzamelen onder de deklaag in het achterland en zich via kwel en wellen een weg te zoeken naar het maaiveld. Hierbij dient gedacht te worden aan diepe (zand)winputten, maar ook aan verder weg gelegen polders. Het is van belang om hierbij ook te kijken naar het 3D gedrag: de put die dit effect uitoefent hoeft niet noodzakelijkerwijs loodrecht achter de waterkering gelegen te zijn. Dit is bij uitstek een aspect wat met de bij waterschappen in gebruik zijnde regionale grondwatermodellen wel erg goed in beeld kan worden gebracht. Een specifieke situatie doet zich bijvoorbeeld voor bij de randmeren, waar uit onderzoek is gebleken dat bij hoog water weinig drukopbouw onder de deklaag plaats vindt, doordat veel grondwater afstroomt naar de Flevopolders.



### 2.5.3. Lokaal systeem: gedrag bij hoogwater in beeld

Het opkisten van een zandmeevoerende wel komt veelal neer op een kleine verhoging van de waterstand rond de betreffende wel. Een grootschaliger variant hiervan is het opzetten van waterpeilen. Dit kan bewust gebeuren, waarbij het van belang is dit af te stemmen met de beheerder en op te nemen in het draaiboek voor de hoogwatersituatie. Gesprekken met de dagelijks beheerder en inspectie van het achterliggende watersysteem tijdens hoog water kunnen hier ook van groot belang zijn.

Met name in het bovenrivierengebied is de dichtheid van watergangen en de omvang hiervan veelal gering. Bij geringe hoogwaters staan deze agrarische ontwateringssloten vaak al vol. Indien dit frequent wordt geobserveerd kan dit in een beoordeling of ontwerp ook meegenomen worden. Bij watergangen in bebouwd gebied dient hier omzichtiger mee omgegaan te worden. De mate van acceptatie van overlast is hier immers geringer, waardoor eerder maatregelen worden getroffen om peilstijgingen binnen de perken te houden.

In de gevoeligheidsanalyses is niet over meerdere projecten gekeken naar het effect van peilopzet. Om deze reden is geen gemiddelde en spreiding bepaald van wat dit voor projecten oplevert. Echter, aangezien een gemiddeld peilopzet kan leiden tot een verhoging van het verval met 0,5 a 1,0 m kan deze maatregel als snel enkele tientallen procenten in verval en totale kwelweglengte schelen.

## 2.6. Rekenmethodieken

De POVP heeft, samen met het beschikbaar komen van nieuwe meettechnieken, ertoe bijgedragen dat een ontwikkeling heeft plaatsgevonden in het modelinstrumentarium waarin pipingvraagstukken worden geanalyseerd. Waar de vigerende richtlijnen nog altijd gebruik maken van vereenvoudigde eenlaags 2D modellen, heeft dit er in het werkveld toe geleid dat binnen projecten meer en meer wordt overgestapt op numerieke modellen en probabilistische analyses, aansluitend op de nieuwe normen en faalkansbenaderingen.

### 2.6.1. Numerieke modellen: sprong voorwaarts

Op het vlak van numerieke modellen is een duidelijk sprong voorwaarts gemaakt sinds de aanvang van de POVP. De omvangrijke versterkingsscope die ontstond binnen projecten was de drijfveer om te zoeken naar een realistischer aanpak. Gecombineerd met nauwkeuriger doorlatendheidsinformatie uit bijvoorbeeld HPT-(A)MPT<sup>®</sup> sonderingen of gedetailleerde data over deklaagdikten uit geofysisch onderzoek is deze mogelijkheid nu beschikbaar voor het werkveld. Er zijn in het numeriek rekenen aan piping feitelijk 2 hoofdgroepen te onderscheiden:

- A. Traditionele numerieke grondwatermodellen (ModFlow, Plaxis, MicroFem, FeFlow, MSeep etc.) als basis voor het verkrijgen van invoerdata voor de vereenvoudigde 1-laags analytische rekenregel. Hierbij wordt dus nog wel met de analytische rekenregel van Sellmeijer gerekend waarin zowel de belasting- als sterktekant in één formule zijn gevat.
- B. Numerieke model D-Geo Flow, waarin de grondwaterstromingsbelasting numeriek wordt bepaald en waarin het sterktemodel (erosiemodel en dichtheidsstroom in de pipe) van Sellmeijer is opgenomen. D-Geo Flow is in de praktijk wat bewerkelijker dan traditionele modellen.

Bij de inzet van numerieke modellen is in de betreffende gevoeligheidsanalyses een gunstigere situatie berekend dan in geval van de éénlaags analytische rekenregel: In één gevoeligheidsanalyse kon worden aangetoond dat het kwelwegtekort met 45% afneemt. In een ander geval levert het een verdubbeling van het kritieke verval op, wat in hoofdlijn op een totale kwelweglengte reductie van (orde) 50% neerkomt (en een dus grotere reductie van het kwelweglengte tekort). Hierbij wordt opgemerkt dat deze wijzigingen

veelal ook samenhangen met het meenemen van gelaagdheid in het watervoerend pakket. Dit kan immers alleen maar goed gebeuren indien numerieke modellen worden ingezet.

Het meenemen van traditionele numerieke modellen bevindt zich op ca. TRL=8. De kennis is al sinds de jaren '90 beschikbaar (TR Piping bij rivierdijken), maar niet breed in het werkveld. Discussie is er met name op (kleine) vraagstukken ten aanzien van de vertaling richting het piping mechanisme in relatie tot de Sellmeijer methodiek.

### 2.6.2. D-Geo Flow

Dit betreft feitelijk een traditioneel numeriek grondwatermodel met als aanvulling een pipingmodule die het kritiek verval  $H_c$  en de bijbehorende kritieke pijplengte  $L_c$  bepaald. Deze module is nog niet gevalideerd. Gebruik van deze module leidt binnen de meeste projecten tot een gunstiger kritiek verval  $H_c$  van ca. 10% ten opzichte van de modellen uit hoofdgroep A.

Aangezien het model nog niet gevalideerd is, is er nog geen passende veiligheidsfilosofie beschikbaar. Op projectbasis kan door Deltares een correctiefactor voor de vigerende OI2014v4 veiligheidsfactor worden bepaald. Door gebrek aan validatie is het mogelijk dat deze incidenteel hoger is dan 10% waardoor het kritiek verval netto hoger uit kan komen dan het geval is met de benadering uit hoofdgroep A: traditionele numerieke grondwatermodellen.

Bij combinatie met de kritieke pijplengte  $L_c$  en de verwachte modelfactor hierbij kan bij voorland  $>1x$  dijkzate bij met name dunne watervoerende pakketten ondanks de robuuste veiligheidstoelagen alsnog tot een gunstiger kritiek verval worden gekomen. Hiervoor wordt verwezen naar § 2.3.2. Bij voorlanden met weinig weerstand en/of voorlanden kleiner  $1x$  dijkzate heeft het gebruik van traditionele numerieke modellen de voorkeur indien de correctiefactor groter wordt dan 1,10.

Het meenemen van D-Geo Flow bevindt zich op ca. TRL=7. De vraagstukken bevinden zich op het vlak van validatie van dit model.

### 2.6.3. Probabilistische pipinganalyses: een doorblik naar de toekomst

In Nederland hanteren we faalkansen. Probabilistische analyses voor waterkeringen zijn, met de toename van de rekencapaciteiten, de toekomst. Recent zijn enkele cases uitgevoerd waarin is gekeken naar de impact van een probabilistische analyse ten opzichte van conventionele semi-probabilistische analyses:

- gevoeligheidsanalyse voor 2 dijkvakken waarin het effect is bekeken van probabilistisch rekenen in plaats van semi-probabilistisch binnen Riskeer. Samen met andere vernieuwingen die vanuit de POVP zijn geïntroduceerd, zoals meerlaagsheid en anisotropie, leidde dit ertoe dat de betreffende dijkvakken voor wat betreft piping opschoven van categorie **Vv** (voldoet niet aan ondergrens) naar **IV** (voldoet aan signaleringswaarde) en respectievelijk **IVv** (voldoet mogelijk aan ondergrens) naar **IV** (voldoet ruim aan signaleringswaarde). De overstap van semi-probabilistisch naar probabilistisch rekenen leverde hierin circa een factor 100 verlaging van de faalkans op.
- Een analyse voor een geheel traject waarin gekeken is naar het effect van probabilistische analyse. Uitsluitend de overstap naar probabilistische analyses leverde hierbij op dat het oordeel over het dijktraject van  $<10%$  in categorie **IIIv** (voldoet aan ondergrens en mogelijk aan signaleringswaarde) naar ca. 50% in categorie **IIIV** verschoof.

Het meenemen van probabilistische analyses bevindt zich op ca. TRL=8 (focus op productie). De aanpak van dit type analyses is reeds jaren bekend. Vraagstukken bevinden zich met name op parametervlak (bv uitmiddeling-puntwaarde voor bepaalde parameters) en productie omgeving (numeriek v. analytisch), niet specifiek op de rekenkundige aanpak zelf.

#### 2.6.4. Instationaire pipinganalyses

Pipes ontwikkelen zich met een bepaalde snelheid: al het zand moet immers ook afgevoerd worden. Bovendien is tijd nodig om tot stationaire grondwaterstroming te komen. De pipegroeisnelheid wordt op dit moment op wetenschappelijk niveau onderzocht, maar de relaties zijn nog niet dusdanig eenduidig in beeld dat deze op dit moment toepasbaar zijn voor beoordelingen en ontwerpen van waterkeringen. Gezien de piekduur van een hoog water, is het echter mogelijk dat de ontwikkeling van een doorgaande pipe, zeker in storm-gedomineerde omstandigheden, niet mogelijk is. Doorontwikkeling van onder meer D-Geo Flow kan hier in te toekomst een antwoord op geven, en hiermee de versterkingsscope in onder meer het kust- en IJsselmeergebied wezenlijk kleiner doen uitvallen.

Het meenemen van tijdsafhankelijkheid bevindt zich op ca. TRL=4 (proof of concept in lab). Doorvertaling is nodig richting grotere schaal. Proeven zoals voorzien in de Hedwigepolder kunnen hier een bijdrage aan leveren.

#### 2.7. Projectspectifieke meerwaarde detailonderzoek

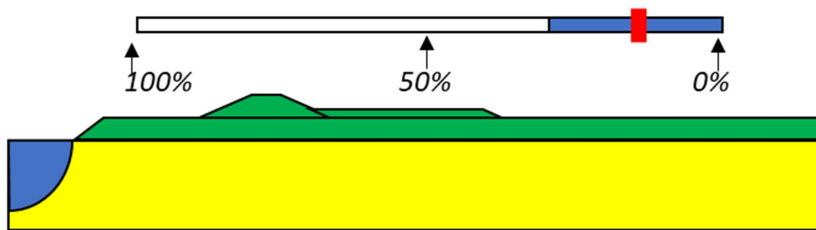
Bovenstaand zijn scopereducties beschreven: kleinere omvang van maatregelen of minder kilometer dijkversterking. Van belang voor Nederland is immers hoeveel dijkversterking noodzakelijk is; dit bepaald kosten en doorlooptijd. De reducties die zijn aangegeven betreffen een landsbreed beeld; lokaal kan e.e.a. sterk verschillen, met name door verschillen in bijvoorbeeld geometrie (aanwezige voorlandlengte, breedte dijkbasis) en ondergrond (geohydrologische en geotechnische eigenschappen, geologische variatie).

Op projectspectifieke basis zijn bovenstaande getallen daarom niet goed toepasbaar. Om deze reden bepalen we hoeveel verschil nader onderzoek kan opleveren als percentage van de *totaal benodigde kwelweglengte*. De totaal benodigde kwelweglengte is namelijk onafhankelijk van de lokaal aanwezige geometrie, maar wordt bepaald door grondeigenschappen en hoogwaterstanden.

### 2.7.1. Reductie totaal benodigde kwelweglengte per parameter

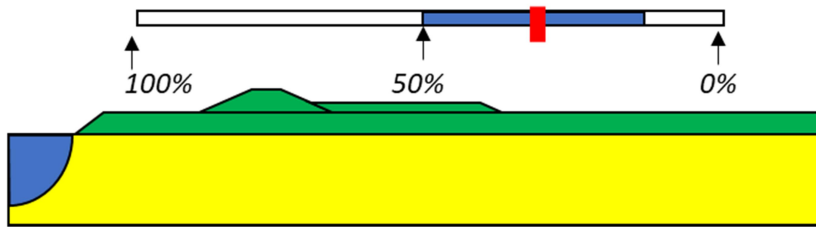
Onderstaande zijn de percentages weergegeven. Dit betreft een globale indicatie van gemiddelde reducties ten opzichte van een analyse vergelijkbaar met gedetailleerd WBI niveau, zonder lokaal detailonderzoek.

Voorland is logischerwijs niet weergegeven. Dit is immers geen onderdeel van de totaal benodigde kwelweglengte, maar van de lokaal aanwezige kwelweglengte.



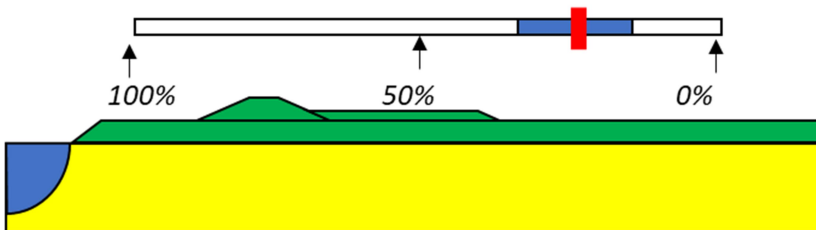
*Figuur 13: Scopereductie detailonderzoek **anisotropie** als percentage van totale kwelweglengte.*

*Gemiddeld 15% +/- 15%*



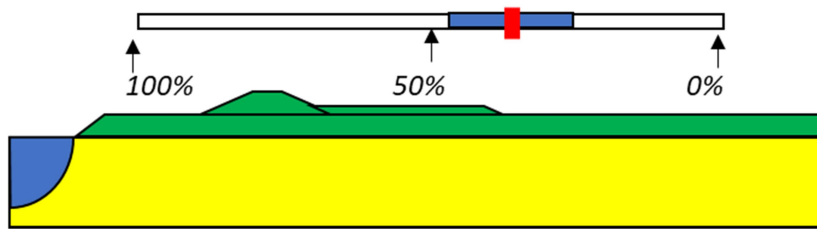
*Figuur 15: Scopereductie detailonderzoek **meerlaagsheid** als percentage van totale kwelweglengte.*

*Gemiddeld 30% +/- 0%*



*Figuur 14: Scopereductie uitmiddelingseffect **D70** als percentage van totale kwelweglengte.*

*Gemiddeld 25% +/- 10%*



*Figuur 16: Scopereductie detailonderzoek **combi K & D70** als percentage van totale kwelweglengte. Opgemerkt wordt dat de horizontale doorlatendheid  $K_h$  vanuit de proefvoetsingen niet direct kon worden geïsoleerd, maar aangezien uit gevoeligheidsanalyses kan worden opgemaakt dat het optellen van de percentages voor een globale inschatting mogelijk is, is de verwacht dat onderzoek gericht op de bijdrage van  $K_h$  ca. 10% bedraagt.*

*Gemiddeld 35% +/- 10%*

### 2.7.2. Illustratie meerwaarde detailonderzoek projectspecifiek bepalen

De bovenstaande percentages kunnen gebruikt worden om projectspecifiek te bepalen of het doen van detailonderzoek meerwaarde biedt. Hiervoor dient bepaald te worden of en hoe de percentages onderling vergeleken kunnen worden. Uit gevoeligheidsanalyses is naar voren gekomen dat de percentages zich globaal laten optellen. Dit klopt niet volledig, immers, in dat geval zou het mogelijk zijn dat incidenteel tot negatieve kwelweglengtes gekomen kan worden, maar als eenvoudige benadering om op projectbasis een inschatting te doen of gedetailleerd onderzoek tot bijvoorbeeld goedkeuring kan leiden, is deze benadering bruikbaar.

In Figuur 17 is aangegeven hoe voor een specifieke dwarsprofiel van een waterkering tot een inschatting kan worden gekomen. Door dit voor een aantal profielen langs een dijktraject op deze wijze uit te voeren kan in beeld worden gebracht wat detailonderzoek voor meerwaarde zou kunnen opleveren in de vorm van kortere pipingbermen of het wegvallen van een eventuele versterkingsopgave.

Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de startwaarde van de totaal benodigde kwelweglengte vanuit de diverse parameters gebaseerd is op een analyse vergelijkbaar met gedetailleerd WBI niveau, zonder lokaal detailonderzoek. Indien voor een parameter al wel detailonderzoek is uitgevoerd kan deze vanzelfsprekend niet verder geoptimaliseerd worden.

1. Bepaal initieel benodigde kwelweglengte (WBI gedetailleerd niveau)
2. Bepaal lengte aan dijkzate en effectief voorland
3. Bepaal benodigde pipingberm

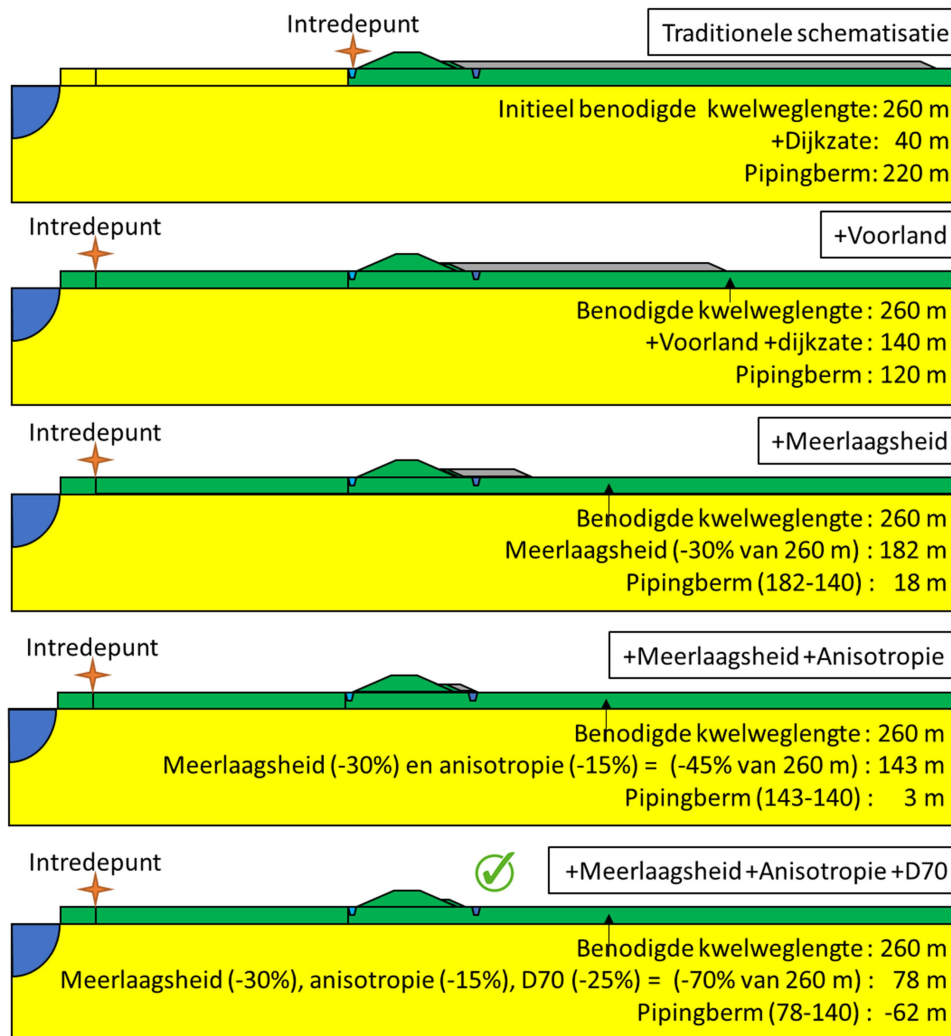
Bovenstaande stappen zijn meestal reeds in het kader van een WBI of veiligheidsbeoordeling doorlopen.

4. Bepaal welke parameters nog niet met lokaal detailonderzoek bepaald zijn.  
Bepaal bijbehorende gemiddelde percentages (paragraaf

5. Reductie totaal benodigde kwelweglengte per parameter0) en tel deze op.
6. Bereken gereduceerde benodigde kwelweglengte
  - a. [initiële kwelweglengte – verwachte reductie x initiële kwelweglengte]
7. Bereken geoptimaliseerde pipingberm
  - a. [geoptimaliseerde kwelweglengte – lengte dijkzate - effectief voorland]
8. Repeteer bovenstaande voor enkele representatieve profielen en schat totale optimalisatiemogelijkheid in.
9. Beoordeel wenselijkheid aanvullend onderzoek.

Ten aanzien van stap 9 geldt dat de wenselijkheid sterk afhankelijk is van de projectfase en tevens afhankelijk is van de interactie met andere versterkingsopgaven. Bijvoorbeeld; een dijk die uitsluitend een pipingopgave heeft, zal eerder detailonderzoek vereisen, dan een dijk die toch al op de schop moet. Daarnaast is de mate van optimalisatie van belang. Wanneer de verwachting is dat een pipingberm van 200 m naar 50 m afneemt, zal nader onderzoek minder snel gewenst zijn, dan wanneer deze van 150 naar 5 m zakt. Bedacht dient echter te worden, dat nader onderzoek veelal ook wenselijk is voor het (optimaliseren van) het ontwerpmaatregelen, zoals heaveschermen of innovatieve technieken die in het volgende hoofdstuk beschreven zijn.

Een betere inschatting of onderzoek meerwaarde heeft, kan worden verkregen door enkele gevoeligheidsanalyses uit te voeren met verwachtingswaarden en boven- en ondergrens waarden die nader onderzoek zou kunnen opleveren. Deze waarden kunnen worden afgeleid uit projecten die in de omgeving zijn uitgevoerd. Indien dit niet mogelijk is kunnen deskundigen worden geraadpleegd.



Figuur 17: Illustratie inschatting meerwaarde detailonderzoek. In bovenstaand voorbeeld is met gemiddelde reducties uit dit hoofdstuk gerekend, maar om een boven- of ondergrens vast te stellen kan tevens met de boven- of ondergrenzen worden gerekend.

## 2.8. Voorkeursrichting vervolgonderzoek

POVP heeft eind 2018 / begin 2019 de balans opgemaakt n.a.v. bovenstaande inzichten en daaruit een voorkeursrichting benoemd voor vervolgonderzoek.

Samenvattend zijn bovenstaande inzichten als volgt te scoren qua TRL:

Verbeterde analysemethode	TRL	Verklaring
Voorland meenemen volgens SH piping	9	Over het meten en toepassen van voorlandweerstand is reeds veel bekend en wordt al sinds de jaren '80 toegepast.
Voorland, >1x dijkzate	7	Dit heeft met name betrekking op detailvalidaties van/met het model D-Geo Flow.
Voorland, o.b.v. analyse pipegroei	4	De grote stap die hier gemaakt moet worden is testen op feitelijke kleilagen en betere uitwerking van de veiligheidsbenadering.
Meerlaagsheid	8	Er zijn nog wat kleine vraagstukken. Zo wordt meerlaagsheid op dit moment via vergelijking middels (numerieke) modellen in

		rekening gebracht. Hier zijn (kleine) kanttekeningen bij te plaatsen. Validatie van het model D-Geo Flow zou helpen om dit definitief op te lossen.
Anisotropie	8	Er is een gevalideerde meettechniek beschikbaar. Er zijn nog wat kleine vraagstukken. Zo wordt anisotropie op dit moment via vergelijking middels (numerieke) modellen in rekening gebracht. Hier zijn (kleine) kanttekeningen bij te plaatsen. Validatie van het model D-Geo Flow zou helpen om dit definitief op te lossen.
D70 gemiddeld	7	Er zijn afdoende aanwijzingen en onderzoeken die wijzen op (een bepaalde mate van) uitmiddeling. Er is behoefte aan een heldere en slechts voor één uitleg vatbare aanpak, welke bereikt kan worden door het samenbrengen van experts.
Kh gemiddeld	8	Hier geldt feitelijk het zelfde als bij D70. Er zijn afdoende aanwijzingen en onderzoeken die wijzen op (een bepaalde mate van) uitmiddeling, sterker nog, het is al wel eens opgeschreven. Er is dus ook hier behoefte aan een heldere en slechts voor een uitleg vatbare aanpak, welke bereikt kan worden door het samenbrengen van de juiste experts..
Invloed achterland	8	De kennis is reeds jaren aanwezig en kan gewoon worden toegepast. Enige aandacht bevindt zich mogelijk nog op het vlak van de veiligheidsbenadering
Numeriek modelleren	8	De kennis is al sinds de jaren '90 beschikbaar (TR Piping bij rivierdijken), maar niet breed in het werkveld. Discussie is er met name op (kleine) vraagstukken ten aanzien van de vertaling richting het piping mechanisme in relatie tot de Sellmeijer methodiek.
D-Geo Flow berekeningen	7	De vraagstukken bevinden zich op het vlak van validatie van dit model
Probabilistisch rekenen	8	De aanpak van dit type analyses is reeds jaren bekend. Vraagstukken bevinden zich met name op parametervlak (bv uitmiddeling-puntwaarde voor bepaalde parameters) en productie omgeving (numeriek v. analytisch), niet specifiek op de rekenkundige aanpak zelf.
Instationair rekenen	4	Doorvertaling is nodig richting grotere schaal. Proeven zoals voorzien in de Hedwigepolder kunnen hier een bijdrage aan leveren.

*Tabel 2: TRL nieuwe inzichten metingen en analyses piping*

### 2.8.1. Voorlanden / intredeweerstand

Voorlanden blijken volgens par. 2.3 en 2.7 een zeer gunstig effect te hebben tegen het faalmechanisme. In de schematiseringshandleiding bij het WBI is een recept gegeven hoe met voorlanden kan worden gerekend. Daarbij is een voorwaarde beschreven waarbij het uitgangspunt is dat de pipe niet onder het voorland mag doorgroeien. Er is onduidelijk hoe beheerders kunnen aantonen dat afgeweken mag worden van dit uitgangspunt.

Er zijn beheerders die met behulp van grondwatermonitoring van hoog water aantonen wat de “lump sum” weerstand van voorland is, maar dit vergt langdurige meting die afhankelijk is van het voorkomen van een hoogwatergolf. Er is onduidelijk in hoeverre beheerders hier een inspannings- of resultaatsverplichting hebben in het kader van beoordeling en/of zorgplicht.



Met D-Geo Flow (DGF) kan pipegroei goed worden geanalyseerd, inclusief een redelijk realistische geohydrologische situatie. Daarmee wordt duidelijk hoe de voorwaarde zou kunnen worden geïnterpreteerd en uitgewerkt, maar een veiligheidsfilosofie ontbreekt voor grondbreuk boven de pipe waardoor kortsluiting ontstaat. Bovendien is DGF alleen beschikbaar in beta-versie, er is nog onvoldoende gevalideerd dat het model de pipegroei (pipelengte) goed beschrijft.

POVP wilde als voorkeursrichting benoemen dat:

1. DGF verder moet worden ontwikkeld tot een gevalideerd beoordelings én ontwerpinstrument.
2. Bovendien zou een veiligheidsfilosofie moeten worden uitgewerkt waarbij de geohydrologische belasting op de pipe los wordt beschouwd van de sterkte bij terugschrijdende erosie.
3. De discussie over verantwoordelijkheden om te komen tot monitoring van stijghoogtes bij hoogwaterpassages zo snel mogelijk moet worden beslecht.

Inmiddels (mei 2020) zijn alweer een aantal stappen gezet:

Ad 1.: Na enige vertraging vanwege het verwerven van rijkstoestemming voor het verder ontwikkelen van de software is inmiddels duidelijk dat D-Geo Flow verder zal worden ontwikkeld en gevalideerd als onderdeel van het wettelijk beoordelings- en ontwerpinstrumentarium (BOI). De verwachting is dat de ontwikkeltijd nog aanzienlijk is (ca. anderhalf jaar). In de tussentijd zal er een workaround worden gecreëerd voor de huidige versie van DGF: o.a. een methode om een faalkans te kunnen berekenen op basis van het kritisch verval.

Ad 2.: In het project Wolferen-Sprok is onderzoek gedaan naar de relatieve lengte van de pipe t.o.v. de totale kwelweglengte. Er is een voorstel gedaan om op de met DGF berekende kritische pipelengte een veiligheidsfactor van 1.5 toe te passen, zolang het model nog niet is gevalideerd voor de berekende pipegroei. Bovendien is een voorstel gedaan onder welke voorwaarden (dikte klei deklaag >2m, etc.) voorland mag worden meegerekend als dijkbasis/kwelweglengte.

Ad 3.: Tijdens het afscheidsymposium van Patrick Poelman, dijkgraaf van HDSR en lid van de stuurgroep POVP, werd veel aandacht besteed aan nut en noodzaak van het installeren van meetnetten. Daarbij werd gesteld dat de financieringsregeling duidelijk is: beheerders zijn via de zorgplicht zelf verantwoordelijk voor kennis van hun kering. Het meerjarig meten van stijghoogtes van hoogwater is dus een zaak waar beheerders zelf voor aan de lat staan. Als de kennis van de kering wordt vergroot hoeven minder marges voor onzekerheden te worden aangehouden en zal de versterkingsopgave verminderen, zowel vanuit beoordeling als bij het ontwerp. De individuele beheerder wordt hiertoe financieel gestimuleerd via o.a. de 10% doelmatigheidsbijdrage in de financieringsregeling, maar heeft hier ook een eigen verantwoordelijkheid voor.

Inmiddels is ook de handreiking meetnetten en grondwatermonitoring voor piping voorzien van commentaar van ENW gepubliceerd.<sup>1</sup> De handreiking is gepresenteerd in het KKP-monitoring overleg op 10 maart 2020. Deze handreiking zou ook worden gepresenteerd op de kennisdag van het Platform Inspectie Waterkeringen, maar dat is vanwege Corona restricties uitgesteld tot 9 september a.s. Steeds meer beheerders herkennen dat het van belang is om meetnetten in te zetten voor het meten van hoogwater om modellen te valideren. Dit geldt zowel voor regionale (vlakdekkende) geohydrologische modellen (zie o.a. par. 2.3 en 2.5.2), DGF-modellering als simpeler Sellmeijer-berekeningen.

---

<sup>1</sup> [www.POVPPiping.nl/pdf/19-5854%20Handreiking%20Meetnetten%20en%20Grondwatermonitoring%20voor%20Piping.pdf](http://www.POVPPiping.nl/pdf/19-5854%20Handreiking%20Meetnetten%20en%20Grondwatermonitoring%20voor%20Piping.pdf)

## 2.8.2. Geotechnische parameters

In par. 2.4 en 2.7 is aangetoond dat het vaststellen van de geotechnische parameters van grote invloed is op de opgave. In het WBI is vastgelegd welke geotechnische parameters moeten worden gebruikt in de gedetailleerde beoordeling van piping met de formule van Sellmeijer. Maar er blijken veel discussies te zijn over de toe te passen waarden van grondparameters waarbij het model van Sellmeijer van toepassing is, voor de toets op maat en ontwerp. Daarbij zijn “nieuwe” inzichten aan de orde zoals het effect van anisotropie in doorlatendheid, maar ook is er discussie over het moeten toepassen van karakteristieke waarden of andere aannames zoals (laag) gemiddelden, scenario waarden, etc.

In de bovenstroomse delen van het land lijken veel dijkstrekkings te worden afgekeurd zonder dat ooit zandvoerende wellen zijn geconstateerd. Er is twijfel of Sellmeijer van toepassing is op de daar voorkomende grovere zand/grindfracties. Idem voor situaties langs de kust waar in getijdezanden juist een fijnere fractie aanwezig is dan waarvoor het model van Sellmeijer is gevalideerd.

Daarom willen we als “voorkeursrichting” benoemen:

1. Een goede werkbeschrijving opstellen voor het afleiden van doorlatendheid en D70 voor de pipinganalyse. Hierbij aandacht voor heterogeniteit en eventuele uitmiddelingseffecten. Momenteel maken adviseurs hier soms principiële verschillende keuzen.
2. Het uitwerken van de formule van Sellmeijer tot een formule waarin de anisotropiefactor kan worden ingevoerd. Het SOS aanvullen met verwachtingen van de anisotropie in doorlatendheid van de verschillende grondkarakteristieken. En het verder valideren van een meettechniek (zoals de huidige in ontwikkeling zijnde HPT/AMPT sondeertechniek) voor meting van de anisotropie
3. Een verdere uitwerking van de gevoeligheidsanalyse over het effect van karakteristieke tot gemiddelde waarden van grondparameters. Daarbij vaststellen welke waarde uiteindelijk van toepassing zou moeten zijn in het model van Sellmeijer, waarbij onderscheid kan worden gemaakt in geohydrologische belastingparameters en sterkteparameters.
4. Onderzoek naar geldigheid van Sellmeijer bij zandfracties buiten de geldigheidsrange van de validatie van Sellmeijer en zonodig aanpassing van de aanpak/analyse.

Ook hier zijn sinds de formulering van de voorkeursrichting in februari 2019 al stappen gezet:

Ad 2.: Zoals beschreven in par. 2.4.2 is in een innovatief deelproject van project 20-3 van WSHD onderzoek gedaan naar anisotropie in doorlatendheid. Er is literatuuronderzoek gedaan waarin is geconstateerd dat in vrijwel alle afzettingen (uitzondering: eolische ofwel windafzettingen) waar piping relevant is er een anisotropiefactor  $K_h/K_v$  van tenminste 3,0 te verwachten is. Er zijn proeven gedaan met de HPT-AMPT doorlatendheidsonderingen en de resultaten zijn gevalideerd door middel van een pompproef. In dit project zijn in de getijdezanden een aanzienlijke anisotropie in doorlatendheid aangetoond. Daarmee zijn zeer aanzienlijke besparingen op de piping opgave vastgesteld. In het Kennis van Keringen programma is ook onderzoek gedaan naar anisotropie. Er is nog geen actie ondernomen op het implementeren van een anisotropiefactor in de formule van Sellmeijer of het uitbreiden van de parameters in het SOS met te verwachten anisotropie.

Ad. 3.: Er is overwogen om een addendum te schrijven bij de handreiking grondonderzoek<sup>2</sup> waarin duidelijk zou kunnen worden gemaakt hoe gemeten waarden kunnen worden omgewerkt tot waarden waarmee het Sellmeijer-model kan worden berekend. Door gebrek aan budget en tijd is dit nog niet tot stand gekomen.

Ad. 4.: Wetterskyp Fryslan en WSHD hebben het initiatief genomen om onderzoek te doen naar sterkte van getijdenzand tegen piping. Er zijn o.a. initiatieven om in de Hedwigepolder full scale proeven te doen.

---

<sup>2</sup> [www.POVpiping.nl/pdf/18-5830%20Rapportage%20Handreiking%20Grondonderzoek\\_POV%20Piping\\_spreads\\_small.pdf](http://www.POVpiping.nl/pdf/18-5830%20Rapportage%20Handreiking%20Grondonderzoek_POV%20Piping_spreads_small.pdf)

### 2.8.3. Geohydrologische randvoorwaarden

Er blijken aanzienlijke verschillen op te treden bij het aanpassen van geohydrologische randvoorwaarden, zowel aan de aanstroomzijde (intredepunt/rand) als aan de uitstroomzijde. Hierbij kan worden gedacht aan bijvoorbeeld het opzetten van slootpeil (en/of opkisten van wellen), verticale dan wel horizontale instroom in het watervoerend pakket, etc. De effecten van randvoorwaarden zijn sterk afhankelijk van bodemkenmerken zoals anisotropie en meerlaagsheid. In het KvK onderzoek is gekeken naar gecombineerde effecten maar deze kennis is nog niet doorgesijpeld naar de werkvloer. Zo fungeert de handleiding van DGF in de praktijk nog wel eens als schematiseringsleidraad bij 2D-berekeningen, terwijl dit niet zo bedoeld is. Ook is duidelijk dat in 3D de geohydrologische situatie veel kan afwijken van de "standaard" 2D schematisatie. De uitstroomrandvoorwaarde wordt nu bepaald met een simpele regel waarbij de stijghoogte wordt gecorrigeerd met een factor (0,3) over de dikte van de deklaag. Er zijn twijfels of dit voldoende is onderbouwd en het faalmechanisme piping hierbij juist wordt vastgesteld. Zeker bij dikke dekklagen lijken hier hiaten te ontstaan. Als voorkeursalternatief voor uitwerking willen we dan ook benoemen:

1. Het opstellen van een uitgebreidere schematiseringshandleiding of werkwijzer voor het schematiseren van de geohydrologische situatie ten behoeve van piping analyses.
2. Verspreiding van inzichten die zijn opgedaan bij KvK onderzoeken en verankering in leidraden. Bijvoorbeeld rond het vaststellen van de correctie op de stijghoogte bij uittredepunt, verschillen in dekklagen van voor- en achterland en variaties in de pipinggevoelige zandgronden van het watervoerend pakket.
3. Het samenbrengen van inzichten die nu in projecten worden opgedaan rond het gebruik van regionale geohydrologische modellen in een pipinganalyse. In projecten zoals dijkversterkingsprojecten Ravenstein-Lith (Meanderende Maas) en Gorinchem Waardenburg zijn regionale modellen succesvol gecombineerd met de pipinganalyse waarbij bijzondere aandacht was voor geohydrologische randvoorwaarden, ruimtelijke grondwaterstroming en het kalibreren van het model met peilbuismetingen en observaties. Dit heeft geleid tot het verkleinen van onzekerheden en een beter en meer herkenbaar vlakdekkend resultaat. Dat laatste is uitgewerkt in de vorm van faalkansen per uittredepunt. Deze werkwijze heeft grote potentie en maakt verfijning mogelijk waardoor correlaties en lengte-effecten in de toekomst lokaal kunnen worden gemaakt waardoor de beoordeling kan worden aangescherpt. Door deze werkwijze is de pipinganalyse lokaler en juister.

### 2.9. Voorstel borging kennisdoorwerking

N.a.v. de inzichten van POVP wordt geadviseerd van de volgende onderwerpen de kennisdoorwerking te borgen, bijvoorbeeld door het op te nemen in de "Comply or Explain" tool, de begeleidingsagenda, in de handreikingen verkenning- of planuitwerking-fase, het toetsproces van het HWBP en/of via het adviesteam dijkontwerp. Daarmee wordt geborgd dat ontwikkelde inzichten ook werkelijk in projecten (en beoordeling) worden gebruikt:

1. Beheerder heeft meetnetten geïnstalleerd om na meting van hoogwater het model en de te gebruiken parameters voor piping analyse te kalibreren. Eerder geconstateerde zandmeevoerende wellen zijn in beeld, geregistreerd en logisch verklaard.
2. Beheerder heeft het effect van meerlaagsheid van het watervoerend pakket en anisotropie in doorlatendheid afgewogen en indien relevant voldoende grondonderzoek gedaan (volgens handreiking grondonderzoek) en resultaten verwerkt in de piping analyse om tot een betrouwbaar ontwerp/beoordeling te komen. Daarbij is de inzet van zowel geologen, geohydrologen als geotechnici (de geodriehoek) voldoende geborgd.
3. Het effect van aanwezig voorland wordt geschematiseerd volgens de schematiseringshandleiding piping van het WBI en/of de methode "gereduceerde stijghoogte buitenteen" zoals beschreven in de handreiking meetnetten en grondwaterstroming.

4. Indien wordt getwijfeld aan de uitkomsten van de piping analyse is overwogen om een “werkplaats” te organiseren en/of is een beslisboom opgesteld om de piping opgave te nuanceren.









### 3. Consequenties nieuwe technieken

Traditioneel wordt een pipingopgave opgelost door het aanleggen van een binnendijkse pipingberm of het ingraven van klei in het voorland. Als daar geen ruimte voor is werden traditionele heave-schermen geplaatst. Met het nieuwe instrumentarium om piping te analyseren werden zeer grote berm- en/of schermengtes nodig en daarom zijn in POVP nieuwe technieken ontwikkeld om de primaire keringen te verbeteren op het faalmechanisme piping. Ook na pipinganalyses waarin de laatste inzichten (zie hfst. 2) van POVP zijn verwerkt kan natuurlijk nog een (vaak kleinere) versterking tegen piping nodig zijn. In dit hoofdstuk wordt beschreven wat er veranderd aan de impact van een maatregel als nieuwe technieken worden toegepast.

#### 3.1. Oplossingsfamilies

POVP heeft een aantal “oplossingsfamilies” gedefinieerd: technieken die functioneel en qua ruimtelijke impact vrijwel gelijk zijn kunnen als oplossingsfamilie worden gebruikt in het vaststellen van het voorkeursalternatief, projectplan of oplossingsvrije specificatie in een contractuele uitvraag. We onderscheiden daarbij:

- Kwelwegverlenging,
- Heaveschermen,
- Peilstijging achterland,
- Drainagetechnieken,
- Filterschermen.

Filterschermen	Drainagetechnieken	Kwelwegverlenging	Heavescherm / peilstijging
 <p>bv. verticaal zanddicht geotextiel</p>	 <p>bv. verticale bronnen</p>	 <p>bv. voorlandverbetering</p>	 <p>bv. Mixed in Place</p>
 <p>bv. grofzand barrière</p>	 <p>bv. grindkoffer</p>	 <p>bv. verticaal kwelscherm</p>	 <p>bv. kwelkade</p>

Binnen de oplossingsfamilie kan de techniek nog wel in verschillende vormen worden uitgewerkt. In onderstaande paragrafen wordt beschreven wat de verschillen zijn ten opzichte van traditionele piping maatregelen.

Aangezien er aanzienlijke verschillen zitten in kosten en specificaties tussen de oplossingsfamilies, is POVP van mening dat het voor een stabiele programmering noodzakelijk is om aan het einde van een verkenningsfase tenminste te hebben vastgesteld:

- Welke oplossingsfamilie per dijkstrekking als voorkeursalternatief wordt gekozen;
- Bij drainages: wat het realistisch toelaatbare extra drainagegebied is wat kan worden geloosd op het achterliggende watersysteem.

## 3.2. Traditionele technieken

### 3.2.1. Kwelwegverlenging

De kenmerkende eigenschap van deze oplossingsfamilie is het creëren van extra weerstand tegen grondwaterstroming waardoor er voldoende sterkte is om de afgenomen belasting te keren.

Door de extra weerstand zal er na aanleg van de verbetermaatregel minder kwelwater door het watersysteem te hoeven worden afgevoerd.

Kwelwegverlenging reduceert de belasting (stijghoogteverschil), waarna de sterkte tegen piping kan worden bepaald op basis van de faalmechanismes opbarsten, heave en/of terugschrijdende erosie. Een (binnendijks) heavescherm beïnvloedt zowel de belasting (kwelwegverlenging) als de sterkte (heavemechanisme).

We onderscheiden twee vormen van kwelwegverlenging:

- Verticaal: door middel van het aanbrengen van een verticaal scherm
- Horizontaal: door middel van het aanbrengen van een pipingberm of door met een voorlandverbetering een strook van het voorland waterdicht te maken.

#### Horizontale kwelwegverlenging

Uiteraard is het nog steeds mogelijk om “traditionele” binnendijkse pipingbermen als versterkingsmaatregel toe te passen. Zeker als er ook stabiliteitsopgave kan worden opgelost met dezelfde berm kan dit nog steeds een aantrekkelijk alternatief zijn. Uiteraard wordt de toepasbaarheid van een traditionele pipingberm vooral ook bepaald door de waarde van het terrein waar de berm moet worden aangelegd. Het is zelfs mogelijk dat de waarde van het oppervlak waar de berm wordt geplaatst toeneemt omdat een nat terrein wordt opgehoogd, waardoor de agrarische productie kan toenemen. Ook kan een verhoogd bermterrein wellicht voor bebouwing of andere functies worden gebruikt. Over het algemeen echter vergen brede bermen kostbare investeringen, mede omdat beheerders de bermen vaak in eigendom willen verkrijgen.

Als alternatief voor een binnendijkse pipingberm wordt buitendijks voorland verbeterd door een waterremmende deklaag in het voorland aan te brengen. Hierbij wordt de deklaag afgegraven, een kleilaag aangebracht en vervolgens de leeflaag weer teruggebracht. Door de hoeveelheid grondverzet om een voldoende dikke kleilaag aan te brengen kan traditionele voorlandverbetering ook een kostbare oplossing zijn. Een nieuw inzicht dat de laatste jaren binnen de POVP is ontstaan is dat voorlandverbetering ook effectief kan worden toegepast in een smallere strook direct aansluitend aan de dijk om de zate van de dijk te verlengen. Deze maatregel is zinvol wanneer het dijkzate-criterium maatgevend is, zie par. 2.3.2 en 2.8.1.

Er is in de praktijk enige weerstand tegen het willen toepassen van buitendijkse kwelwegverlenging door voorlandverbetering<sup>iii</sup>. Daarbij moet namelijk worden voorkomen (geborgd) dat er geen ontgravingen in het voorland plaatsvinden, waardoor kortsluiting met het watervoerend pakket tot stand kan komen. Deze beheerinspanning moet plaatsvinden vóórdat het voorland onder water komt bij hoog water. Bij binnendijkse pipingbermen kan ook na het onderlopen van voorland nog worden gecontroleerd of er geen ontgravingen plaatsvinden waardoor opbarsten kan worden veroorzaakt. Voor goed georganiseerde waterschappen zou het echter geen probleem moeten zijn om de beheerinspanning in het voorland ook voorafgaand aan een voorspelde hoogwater te realiseren. Zie verder de handreiking Voorland van POV Voorlanden.

#### Verticale schermen

POVP heeft onderzoek naar de anisotropie in doorlatendheid geïnitieerd. De verticale doorlatendheid blijkt in vrijwel alle pipinggevoelige zandsoorten kleiner te zijn dan de horizontale weerstand<sup>iv</sup>. Verticale

kwelschermen zijn daarmee wellicht effectiever dan we tot nu toe dachten. Ook als dat buitendijks zou plaatsvinden. Er zijn echter nog geen analyses gemaakt waarmee dat is aangetoond.

### 3.2.2. Heaveschermen

Heaveschermen worden binnendijks toegepast in de teen van de dijk of onder een korte berm, meestal als er geen ruimte is voor een pipingberm. Verticale binnendijkse schermen kunnen een oplossing zijn voor zowel macrostabiliteit als piping, dus heaveschermen worden vaak toegepast in combinatie met een macrostabiliteitsopgave. Dit lijkt een logische combinatie, maar daarbij moet wel in de stabiliteitsopgave rekening worden gehouden met een verlaging van de passieve korreldruk tegen het verticale scherm door verhoogde waterspanning in de heave-situatie. Het berekenen/ontwerpen van een heave/stabiliteitsscherm is daarom niet zo gemakkelijk als in oudere documentatie wordt gepresenteerd. Als heaveschermen alleen tegen piping worden ingezet kunnen ze goedkoper zijn omdat voor een heavescherm alleen de zanddichtheid van belang is, de sterkte niet. Bij een heavescherm is de diepte waarover de stroming zand moet meevoeren de belangrijkste ontwerpparameter. Het scherm moet dan zanddicht zijn, met als nadeel dat dit na aanleg ondergronds moeilijk aantoonbaar is.

Het ontwerp van heaveschermen gaat er van uit dat er nog wellen kunnen ontstaan, omdat in de initiëeringsfase de wel zand moet ruimen om te kunnen ontwikkelen. Na verloop van tijd zal de wel echter geen zand meer voeren omdat de afmeting van het verticale opbarstkanaal zo is toegenomen dat de afgenomen stijgsnelheid van het water over de hoogte waar heave over moet plaatsvinden er voor zorgt dat het zandtransport wordt gestopt en er geen voortschrijdende piping achter het scherm kan ontstaan. Als het scherm echter een zodanig lek heeft dat daar zand doorheen kan, dan kan piping makkelijk door zo'n lekkage verder gaan. Tijdens hoogwater kan desgewenst met peilbuizen nagegaan worden of het uittreeverhang voldoende klein blijft, maar dit is niet gebruikelijk. Het betrouwbaar ondergronds vaststellen van afwezigheid van zandvoerende lekkage is erg lastig. Daarom moet veel aandacht worden besteed aan water- en zanddichtheid van heaveschermen tijdens de uitvoering

POVP heeft onderzoek geïnitieerd naar anisotropie in verticale en horizontale doorlatendheid. Daarmee is duidelijk geworden dat de grondwaterstroming onder langs een heavescherm anders is dan tot nu toe werd aangenomen. Doordat bij een heavescherm de grondwaterstroming verticaal (naar beneden) wordt gedwongen en de verticale doorlatendheid vrijwel altijd een factor kleiner is dan de horizontale weerstand (<sup>xiv</sup>), zal de dempingsfactor over de afstand intredepunt-uitredepunt groter zijn dan tot nu toe werd aangenomen. Door dit met lokaal grondonderzoek in kaart te brengen en in grondwatermodellering uit te werken is het wellicht mogelijk om heaveschermen in de toekomst korter uit te voeren. Er is nog geen ontwerp- en beoordelingsrichtlijn voor heaveschermen beschikbaar.

### 3.2.3. Peilstijging achterland

Traditioneel werd ook een peilstijging in het achterland als oplossing tegen piping toegepast. Het komt frequent voor dat in de beheerplannen is geregeld dat het peil in watergangen wordt verhoogd door middel van tijdelijke stuwing bij hoog water op de rivier. Door de verhoogde tegendruk ( $h_{\text{exit}}$ ) wordt piping voorkomen.

Vroeger werden ook wel kwelkades toegepast, waarbij het water tussen de dijk en de kwelkade tot boven het maaiveld kon worden opgezet. Oude kwelkades zijn vaak onvoldoende bekend in het beheer waardoor de maatregel tegenwoordig minder bekend is als oplossingsrichting. Daar waar voldoende ruimte is kan een kwelkade als pipingmaatregel toch worden toegepast. Het lijkt nodig om de kwelkade een status te geven als regionale kering en/of in de legger en het beheerregister van de primaire keringen op te nemen.

Als het effect alleen vertaald wordt in  $H_{exit}$  is er een lineair verband met peilstijging buitendijks. Bij zandvoerende wellen denken we echter te zien dat opkisten beter dan lineair helpt om waterstand te verhogen.

Is de (extra) reductiefactor 0,3D van toepassing met  $D$ = hoogte van waterstand voor de kwelkade tot o.k. deklaag? Dit vraagt om verdere onderbouwing van het vermoeden dat hier sprake is van aanvullende weerstand (t.o.v. lineair). En van het getal  $R_c=0,3$ . Hier loopt onderzoek naar bij KvK, maar er is nog niet duidelijk of/hoe dit tot resultaten leidt.

### 3.2.4. Nieuwe materialen

Bij POVP zijn diverse voorstellen gedaan om nieuw ontwikkelde materialen toe te passen in horizontale kwelwegverlenging. Hieronder volgt een samenvatting. Over het algemeen kan gesteld worden dat nieuwe materialen voor afdichting kunnen worden toegepast als er met voldoende betrouwbaarheid kan worden vastgesteld dat de materialen voldoende afdichting zorgen gedurende de beoogde levensduur.

#### Materiaal voor verticale kwelwegverlenging of heaveschermen:

- Mixed in place: op basis van cement: is al vaker toegepast, o.a. in de Pleijdijk en ook als oplossing voor macrostabiliteit in Gouda. Bij dijkversterking Gorinchem-Waardenburg zijn er ideeën om een pilot uit te voeren waarbij bentoniet wordt gemixt met grond om een waterdicht scherm te maken. Het bentoniet/zand mengsel is zachter dan verharde cement en daarmee beter in staat om verplaatsingen van de ondergrond te volgen.
- Prolock Delta Dichtscherm: kunststof damwandscherm, zie <https://prolock.nl/producten/delta-dichtscherm/>. Er is een succesvolle pilot gerealiseerd omtrent maakbaarheid (inbrengtechniek) van het scherm in zandgronden.
- SOil Sealing by Enhanced Aluminum and DOM Leaching (SoSEAL): door het injecteren of mixen van een mengsel van aluminium en organisch materiaal kan een waterremmend scherm worden gecreëerd. Naar deze techniek wordt nog fundamenteel wetenschappelijk (NWO) onderzoek gedaan. Na een eerste pilot in de Gijster is men op zoek naar verdere toepassings- en ontwikkelingsmogelijkheden. Momenteel zijn er ideeën om bij dijkversterking Gorinchem-Waardenburg een pilot met Soseal uit te voeren.
- Trisoplast is een mix van een speciale klei-polymercomponent met zand en water en wordt gebruikt als afdichtend materiaal voor stortplaatsen, vijvers, basins, etc. Er zijn nog geen toepassingen bekend als verticaal ondergronds scherm, maar dit is niet ondenkbaar in combinatie met een kettinggraver of boorpaalwand.
- Fixum is een mengsel van waterglas met cement of trass waarbij het materiaal door middel van een mixed-in-place of injectietechniek in de grond kan worden gebracht.

#### Materiaal voor horizontale kwelwegverlenging:

- Trisoplast is vooral bekend als afdichtingsmateriaal wat in een horizontale laag kan worden toegepast.
- HDPE-folieconstructies worden toegepast in de wegenbouw, o.a. om toeritten naar tunnels aan te leggen
- In Duitsland worden Geo clay linings in dijkenbouw toegepast. Dit is een dubbel geotextiel waartussen een bentonietmengsel wordt toegepast. Voor dit type lining is een Ontwerp- en Beoordelingsrichtlijn in ontwikkeling bij Waterschap Limburg met een financiële bijdrage van POV DGG.





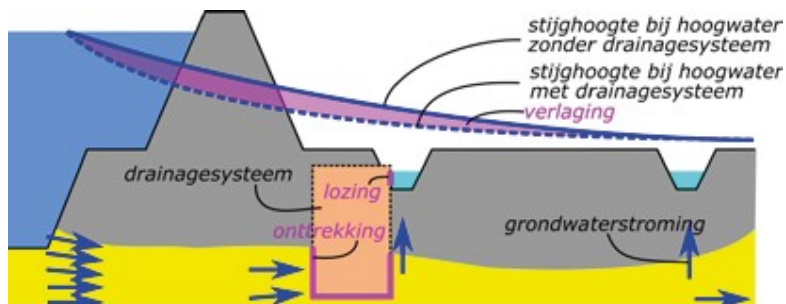
Figuur 18: Pilot: kuip van Fixum<sup>xv</sup>



Figuur 19: pilot de Gijster met SoSeal<sup>xvi</sup>

### 3.3. Drainagetechnieken

De kenmerkende eigenschap van een drainagetechniek is het verlagen van de stijghoogte in het watervoerende zandpakket. Daarbij zorgt het drainagefilter ervoor dat er geen zand uit kan spoelen. Voor een uitgebreide beschrijving van drainagetechnieken wordt verwezen naar de POVPublicatie drainagetechnieken<sup>xvii</sup>.



Figuur 20: Schematische doorsnede drainagesysteem tijdens hoogwater

De belangrijkste gewijzigde ruimtelijke impact van een drainagetechniek is het **waterbezwaar**: het achterliggende watersysteem (watergangen, polder/boezemgemaal, etc.) zal het drainagewater moeten afvoeren. Maar het drainagesysteem kan wateroverlast door kwel op ongewenste locaties juist verminderen. Drainagetechnieken moeten dicht bij de binnenteen worden aangelegd. Hoe verder daarvan wordt afgeweken, hoe meer drainagedebiet nodig is.

In theorie is het mogelijk dat een drainage vrijwel altijd piping kan voorkomen (zie "snelle analyse benodigde reductie waterspanning bij afgekeurde dijken", opgesteld door Deltares in opdracht van het Corporate Innovation Programm (CIP) van Rijkswaterstaat<sup>xviii</sup>), maar dit kan leiden tot zeer grote hoeveelheden af te voeren drainagewater. En tijdens hoog water in de rivier is de kwel naar het achterland al hoger dan normaal, dus er moet een voldoende robuust watersysteem achter de waterkering aanwezig zijn om drainages te kunnen toepassen. Over het algemeen lijkt het niet effectief om een separaat bemalen afvoerstelsel voor de drainage te installeren: de lage frequentie en korte periode waarin dit

systeem gebruikt zal worden leidt tot hoge kosten en/of lage betrouwbaarheid. Bij voorkeur wordt de afvoer van het water onder vrij verval gerealiseerd. De betrouwbaarheid van het systeem is dan niet afhankelijk van eventuele pompen.

De kans op voorkomen van maatgevend hoogwater is relatief onafhankelijk met de kans op maatgevende neerslag in het achterliggende gebied, hoewel hoogwater langs rivieren vaak in de winter plaatsvindt en in die periode ook een wat hogere kans is op neerslag. Daarom moet goed beoordeeld worden of het drainagewater en “reguliere” kwel bij hoogwater bij “momentane” neerslag in het achterland met acceptabele wateroverlast kan worden afgevoerd. In POV publicatie drainagetechniek wordt voorgesteld uit te gaan van kwel en drainageafvoer bij maatgevend hoogwater in combinatie met een neerslagoverschot in het achterland van  $2\text{mm/dag} + 50\% = 3\text{mm/dag}$ .

Een ander ruimtelijk gevolg van het toepassen van een drainagetechniek kan zijn dat de techniek invloed heeft op de **waterkwaliteit**. Aan de kust biedt een drainagetechniek de mogelijkheid om zoute kwel separaat af te vangen en af te voeren. In het riviereengebied kan het schone drainagedebiet bruikbaar zijn om bijvoorbeeld het met fosfaten of andere stoffen overbelaste watersysteem door te spoelen. Uiteraard kan dit ook als nadeel worden beoordeeld: als het zoute / gebiedsvreemde drainagewater niet goed wordt afgevoerd kan dit tot een verslechtering van de bestaande situatie leiden.

Van belang hierbij is de vraag of alleen tijdens extreem hoogwater (kwel/drainage) water afgevoerd wordt, of dat ook bij dagelijkse of vaker voorkomende omstandigheden water wordt afgevoerd. Hier kan tot op zekere hoogte in het ontwerp rekening mee worden gehouden, bijvoorbeeld door de hoogte van overstorten goed te bepalen.

### 3.3.1. Ligging

We onderscheiden drie types drainagetechnieken:

- Grindkoffers
- Horizontale drains
- Verticale bronnen

Goed ontworpen grindkoffers met een overlaat die pas gaat werken als de stijghoogte tot een bepaalde hoogte is gestegen geven in vergelijking met horizontale drains en verticale bronnen het minste waterbezwaar bij gelijke verlaging van stijghoogte om opbarsten/piping te voorkomen. De grindkoffer wordt tot onder de deklaag aangebracht, precies op de diepte waar piping moet worden voorkomen.

Horizontale drains moeten dieper onder de deklaag worden aangebracht om toestroming naar de drain te creëren. Dit betekent dat er een groter verval over het drainagesysteem moet worden aangebracht en er dus een groter drainagedebiet ontstaat (bij gelijke verlaging van de stijghoogte).

Verticale drains hebben het voordeel dat de locaties waar bronnen worden aangebracht enigszins flexibel zijn te kiezen. Op locaties met bebouwing en/of bestaande infrastructuur kan dat erg handig zijn. Maar omdat er dan zowel in dwarsdoorsnede als in langsricting ten opzichte van de dijk er toestroming naar de bron moet plaatsvinden zal verticale drainage een nog groter verval over het systeem nodig hebben, met de daarbij horende nog grotere drainagedebieten.

### 3.3.2. Beheersbaarheid

Reactieve drainage:

Drainages kunnen zo worden ontworpen dat ze door middel van het **instellen** van overlaten of stuwpen op het juiste moment bij het stijgen van het rivierwaterpeil en in de juiste mate de stijghoogte in het watervoerend pakket verlagen om opbarsten en daarmee piping te voorkomen. Het “met de hand” moeten verlagen van een stuw bij stijgend rivierpeil heeft natuurlijk wel invloed op de betrouwbaarheid van het systeem en er dient rekening te worden gehouden met **voldoende kennis en menskracht** om het

systeem te bedienen. Het systeem kan worden verbeterd door het toepassen van een vlotterstuw waarvan het niveau van de overlaat automatisch wordt verlaagd bij stijgend rivierpeil.

Om falen van het instellen van een stuw te voorkomen kan ook vanwege de betrouwbaarheid van de oplossing een **vaste overlaat** worden gekozen, maar dit heeft als nadeel dat er bij lagere rivierwaterstanden iets meer drainagedebit moet worden afgevoerd.

#### Actieve drainage:

Als er onvoldoende vrij verval beschikbaar is om het benodigde drainagedebit te creëren kan **bemaling** worden ingezet. Het voordeel van vast opgestelde drainagepompen is dat het systeem ook bij laag water kan worden benut om te checken of de drainage goed functioneert. Het nadeel is echter dat de frequentie en periode waarmee installatie wordt benut bij maatgevend hoog water slechts zeer beperkt is. Dit betekent dat er relatief hoge **beheer- en onderhoudskosten** moeten worden gereserveerd. Als de actieve drainage ook nodig is om piping te voorkomen, heeft dat bovendien een negatieve invloed op de betrouwbaarheid van het systeem.

### 3.3.3. Betrouwbaarheid

De nauwkeurigheid van de vast te stellen betrouwbaarheid van drainages kan worden vergroot door het toepassen van **monitoring** (peilbuizen) rond het systeem. Daarbij onderscheiden we systemen mét en zónder de mogelijkheid om ook bij laag rivierpeil de werking te monitoren. Het DMC-systeem wordt voorzien van een **bemalingspomp** zodat er kunstmatig een verval kan worden opgewekt, ook in laagwatersituatie. DMC is ontwikkeld als sleufloze techniek, maar de bemalen monitoring kan worden toegepast bij horizontale drains die traditioneel zijn ingegraven.

Ook in verticale bronnen kunnen (al dan niet tijdelijke, mobiele) filterpompen worden geplaatst om het functioneren van de bronnen tijdens laagwatersituatie te kunnen vaststellen.

Het moge duidelijk zijn dat de mogelijkheid om bemalen monitoring toe te passen ook vraagt om bewuste inzet van en budgettering bij de **beheer- en/of onderhoud**-afdeling van de beheerder.

Bij grindkoffers is het echter niet mogelijk om bij laagwatersituaties de werking vast te stellen. Dit drainagetype wordt echter vanwege de robuustheid voldoende betrouwbaar geacht om in een waterkering te functioneren. Het verdient aanbeveling om door middel van peilbuizen tijdens hoogwater de werking te monitoren. Bij toepassing van grindkoffers wordt aanbevolen te voorkomen dat deze aan de bovenzijde kan verstopten door wortelgroei van beplanting (of door een laag bagger bij toepassing in een slootbodem).

### 3.3.4. Waterbezuur / LCA

POVP heeft een instrument laten ontwikkelen waarmee in de verkenningsfase van een project kan worden ingeschat of een drainagetechniek een oplossing kan zijn voor de piping opgave:

[www.drainagequicksan.nl](http://www.drainagequicksan.nl). Hoewel enige kennis van geohydrologie, geometrie en ondergrond noodzakelijk is kan gemakkelijk een doorsnede van een primaire kering worden geanalyseerd. Met de quickscantool wordt ingeschat wat de extra hoeveelheid drainagewater is ten opzichte van de oorspronkelijke situatie waarin ook al kwel optrad. Als een drainagesysteem haalbaar lijkt te zijn, is in de ontwerpfase nader onderzoek en detaillering nodig.

Om het drainagewater te kunnen verwerken dient het achterliggende watersysteem voldoende capaciteit te hebben of te krijgen. Hierbij moet worden uitgegaan van de combinatie (kans op) maatgevend hoogwater (hoogte bij norm) op de rivier en (kans op) niet-maatgevend (reguliere) bui volgens NBW-norm.

Met de analyse kan de hoeveelheid extra drainagewater gedurende maatgevend hoog water worden vastgesteld, maar dat is slechts voor een beperkte duur. Voor een life-cycle-analyse dient ook een analyse te worden uitgevoerd om het debiet bij gemiddeld hoog water vast te stellen, dus over langere periode.

Aangezien er bekend is bij welke waterhoogte op de rivier en dus bij welk verval ( $m^1$ ) t.o.v. polderpeil de hoeveelheid ( $m^3$ ) drainagewater moet worden verwerkt ontstaat inzicht in de beheerkosten van het systeem.

POVP heeft een analyse uitgevoerd bij hoogheemraadschap van Rijnland om te bepalen wat gemiddeld de kosten zijn van het verwerken van  $1 m^3$  water met een opvoerhoogte van  $1 m^1$ .

Gegevens Rijnland:

- Gemiddeld energieverbruik van 5 gemalen:  $0,006 kWh/m^3 \cdot m$
- Totaal energieverbruik van het gehele watersysteem: 23.400.000 kWh/jaar
- Oppervlakte beheergebied:  $1.088 km^2$
- Gemiddelde hoeveelheid neerslag+inlaatwater: ca. 900 miljoen  $m^3$ /jaar
- Diepte maaiveld t.o.v. buitenwater: 1,2 tot 4,0m; gemiddeld 2,4m.
- Totaal te verpompen hoeveelheid: ca. 2.300 miljoen  $m^3 \cdot m$ /jaar
- Totale kosten watersysteem: € 64,6 miljoen/jaar
- **Gemiddelde kosten watersysteem: € 0,03 /  $m^3 \cdot m$  (+/- 50%)**

Deze kosten betreffen niet alleen de energiekosten, maar ook kosten van onderhoud (baggerwerk, beschoeiingen, etc.) van watergangen, afschrijving, bediening en onderhoud van gemalen, stuwen, etc. Beheerders in het rivierengebied worden uitgedaagd eenzelfde eenheidsprijs in hun gebied vast te stellen om LCA mogelijk te maken.

Naast de operationele beheerkosten van de drainagetechniek spelen ook:

- Monitoringskosten ter bevestiging/beoordeling van de betrouwbaarheid (zorgplicht),
- Onderhoudskosten zoals doorspuiten, vrij houden van begroeiing, etc.

Deze zijn afhankelijk van het type drainagetechniek; zie de opmerkingen in bovenstaande paragrafen.

Naast het vaststellen van de kosten van het waterbezwaar gedurende de analyseperiode, rekening houdend met levensduur van het drainagesysteem, kan ook een maximaal toelaatbaar kweldebiet worden vastgesteld op basis van dezelfde principes waarbij het maximale overslagdebiet wordt vastgesteld. Voor bepaling van deze grenswaarde wordt verwezen naar factsheet "omgang met waterbezwaar" van het kennisplatform risicobenadering (KPR), 15 oktober 2018.

### 3.3.5. Ruimtegebruik

Tot slot wordt in deze paragraaf over drainagetechnieken de consequenties voor het ruimtegebruik van de verschillende drainagetechnieken beschreven.

Algemeen kan worden gesteld dat een strook van beperkte breedte beschikbaar moet zijn voor installatie van een drainagesysteem, waarbij falen door opbarsten tussen de binnenteen van de dijk en de drainagestrook moet worden voorkomen.

Voor verticale bronnen is het vinden van een locatie in situaties met bebouwing natuurlijk gemakkelijker dan bij grindkoffers of horizontale drains die doorgaand achter de dijk moeten worden aangebracht. DMC heeft een sleufloze techniek ontwikkeld die met een horizontale boring wordt aangebracht. Deze techniek is ook zeer geschikt om bij bebouwde situaties toe te passen.

Voor alle technieken dient rekening te worden gehouden met onderhoudbaarheid: punten waar doorspoelen kan plaatsvinden en/of het verwijderen van vegetatie.

### 3.3.6. Trechteringsproces keuze drainagetechniek

Zoals eerder aangegeven dient in de verkenningsfase te worden vastgesteld of een drainagetechniek of een andere "oplossingsfamilie" wordt gekozen als voorkeursalternatief. Als wordt gekozen voor een drainagetechniek moet in de verkenningsfase al duidelijk zijn of het waterbezwaar ten gevolge van extra drainagewater in het achterliggende watersysteem acceptabel is. Bij voorkeur wordt daar een functionele

bovengrens aan gesteld (bijvoorbeeld m<sup>3</sup>/s per km dijktraject bij verschillende terugkeertijden en -periodes), zodat er nog oplossingsvrijheid is in de planuitwerkingsfase om te kiezen tussen de genoemde drainagetypes. Eigenlijk speelt hier dezelfde discussie als over het voor het achterliggende watersysteem toelaatbare overslagdebiet: wanneer is dit zo fors dat er alsnog sprake is van overstroming zonder dat de dijk bezwijkt? Functionele eisen aan waterbezwaar door drainagedebiet kunnen op eenzelfde manier worden vastgesteld als bij overslagdebiet. "Regulier" kweldebiet, overslagdebiet en debiet uit drainagesystemen zullen gelijktijdig optreden bij maatgevend hoog water, maar slechts met een beperkte afhankelijkheid in de kans op voorkomen van een maatgevende bui in het achterland.

Ten behoeve van de conditionering in de planuitwerkingsfase kan een strook worden vastgesteld waarin de drainage dient te worden aangebracht. Van deze strook dient duidelijk te zijn hoe grondverwerving of zakelijk recht kan worden gevestigd, kabels en leidingen kunnen worden verlegd en of er rekening moet worden gehouden met overige zaken zoals Niet-Gesprongen Explosieven, beschermde flora en fauna, milieukundige bodemverontreiniging, etc.

In de planuitwerkingsfase kan een beheerder zelf het drainagetype vaststellen of het in de realisatiefase aan de markt overlaten om het meest concurrerende type aan te bieden.

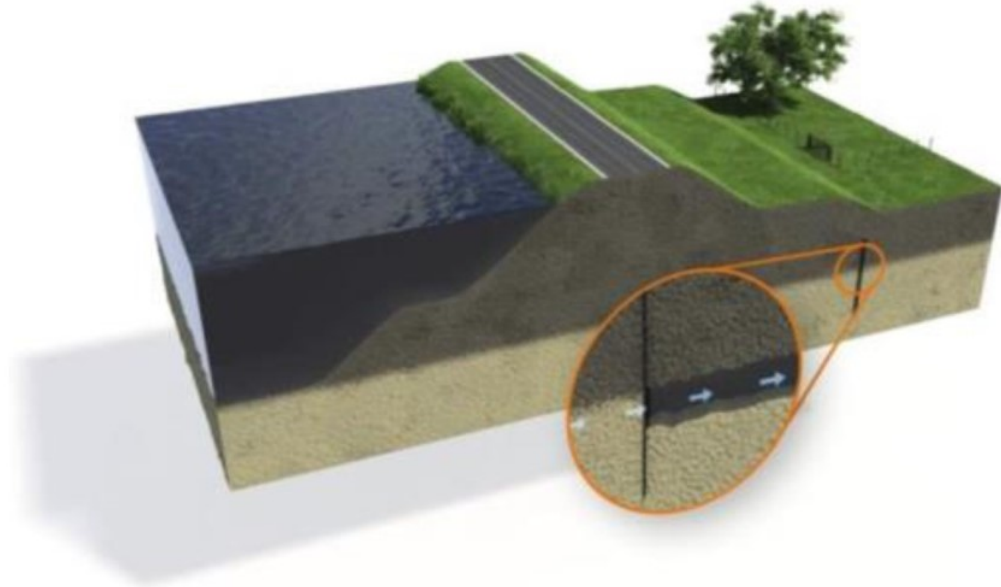
### **3.3.7. Aanbeveling verdere ontwikkeling**

Zoals hierboven vermeld is POVP van mening dat in de verkenningsfase drainagetechnieken altijd als serieus alternatief moet worden meegewogen bij de vaststelling van het VKA. Dit kan worden geborgd via de "comply or explain" tool, de begeleidingsagenda en/of in het toetsproces bij eindverantwoording van de verkenningsfase: controleren of is vastgesteld welk extra kweldebiet in het achterliggende watersysteem kan worden geaccepteerd bij hoogwater.

Daarnaast wordt aanbevolen de ontwerp- en beoordelingsrichtlijn zo snel mogelijk op te stellen en beschikbaar te maken voor beheerders die drainagetechnieken verder willen uitwerken in planuitwerking- en realisatiefase.

### 3.4. Filterschermen

De kenmerkende eigenschap van een filterscherm is het tegenhouden van zand, waardoor een eventuele pipe stopt bij het filterscherm, terwijl de grondwaterstroming ongewijzigd blijft ten opzichte van de oorspronkelijke situatie. Voor een beschrijving van een filterscherm wordt verwezen naar de Ontwerp- en Beoordelingsrichtlijn van verticaal zanddicht geotextiel (VZG), groene versie <sup>xix</sup>.

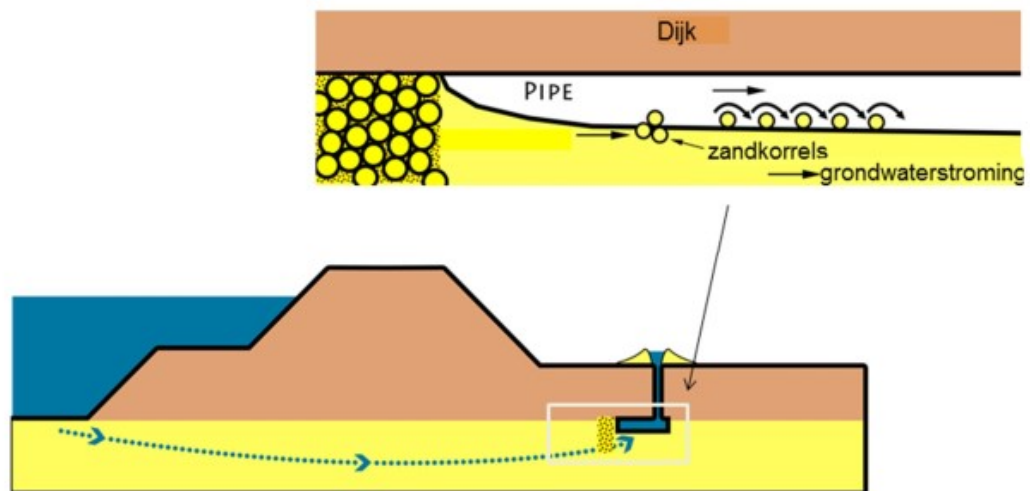


Figuur 21: filterscherm VZG stopt verdere pipegroei

#### 3.4.1. Vormen

De volgende uitvoeringstypes zijn in beeld:

- Verticaal Zanddicht Geotextiel (VZG)
- Grofzand barrière(GZB)
- Geperforeerde kunststof kokerscherm gevuld met grof zand (bv. Delta Filterscherm van Prolock).



Figuur 22: Granulair filterscherm GZB stopt verdere pipegroei<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Bron: eindrapport haalbaarheidsonderzoek grofzandbarriere, Deltares, januari 2019

Er zijn ook pipingbermen in de vorm van horizontale filterconstructies mogelijk: een binnendijkse zandberm, waarbij aan de onderzijde een zanddicht horizontaal geotextiel wordt aangebracht. Dit type filterconstructie is echter niet aan de orde geweest gedurende de looptijd van POVP. Filterconstructies op de bodem van een binnendijkse teensloot verlagen de stijghoogte in het watervoerend pakket en worden ingedeeld bij drainagetechnieken (grindkoffers).

### 3.4.2. Ruimtegebruik

Filterschermen moeten binnendijks worden toegepast: onder de binnenteen, of onder een berm die het gevaar van opbarsten in de zone voorkomt tussen binnenteen (begin berm) en filterscherm.

Er zijn voor VZG twee inbrengmethoden ontwikkeld:

1. Horizontaal; met een kettinggraver wordt een sleuf gegraven waarin het geotextiel wordt uitgevouwen, omstort met zand. De sleuf wordt door de afdekkende kleilaag gegraven en het bovenste deel van de sleuf, door de aanwezige kleilaag, wordtaangevuld met zwelklei.

Dit is een grondvergravende techniek tot een diepte van ca. 8-9m t.o.v. maaiveld die geen zijdelingse verplaatsingen geeft. De benodigde werkbreedte bedraagt tenminste ca. 5m en de lengte van een werkgang (doeklengte) kan oplopen tot zo'n 300m. Kettinggravers kunnen slechts flauwe bochten maken. In project Twentekanaal is aangetoond dat het mogelijk is om aansluitingen te maken, maar dat zijn over het algemeen vrij kostbare methodes.

2. Verticaal; met een casing wordt een doek aangebracht, waarna bij het terugtrekken van de casing aanvulzand en zwelklei wordt aangebracht.

Deze techniek is grond verdringend. De casing wordt trillend en dmv. spuiten in het zandpakket ingebracht. Hierdoor moet er aandacht zijn voor zijdelingse verplaatsingen, wat o.a. schade aan kabels en leidingen kan veroorzaken. Doordat geotextiel-panelen met een breedte van ca. 1,5m worden ingebracht is het mogelijk om bochten te maken. De verticale methode van inbrengen is langzamer en dus duurder dan de horizontale. Bij verticaal inbrengen kunnen grotere dieptes worden bereikt dan met de horizontale methode. De methode is dan ook geschikt voor situaties waar al eerder een piping- of stabiliteits berm is aangebracht en/of een relatief dikke afdekkende laag aanwezig is. De methode is ook geschikt voor complexere situaties, waar de horizontale techniek niet toegepast kan worden.

Zie verder de OBR-VZG voor een beschrijving van de inbrengmethodes.

Het nadeel van de horizontale inbrengmethode is de eigenschap dat er alleen heel grote boogstralen kunnen worden gemaakt met de grote kettinggraafmachines. Met de horizontale inbrengmethode van de grofzandbarrière kan een nieuwe start worden gemaakt, door de al aangebrachte barrière graven en zo een knik realiseren om toeritten en bebouwing te omzeilen. In project Twentekanaal is de markt uitgedaagd om ook voor de horizontale inbrengmethode van VZG aansluittechnieken te ontwikkelen. Bij de toegepaste technieken zijn nog een aantal kinderziekten geconstateerd.

Met de duurdere verticale inbrengmethode kunnen overigens wél knikken worden gemaakt.

Voor de grofzand barrière zijn meer inbrengmethodes in beeld dan voor VZG. Naast een horizontale inbrengtechniek met een sleuvengraver ook andere verticale technieken zoals o.a. boorpalenwand en een installatie in sleufbekisting. Deze worden uitgewerkt in het project Gameren, waar maakbaarheidsonderzoek van verschillende technieken wordt uitgevoerd.

### 3.4.3. Status Ontwikkeling

Verticaal zanddicht geotextiel:

VZG is na laboratoriumproeven op (bijna) fullscale beproeft in de IJkdijk en inmiddels in meerdere pilots toegepast (Willemspolder, project HOP).



*Figuur 23: Beproeving VZG in IJkdijk (2008-2012) <sup>4</sup>*

Er is een (groene versie) Ontwerp- en Beoordelingsrichtlijn (OBR) voor VZG beschikbaar. Deze OBR is ontwikkeld door waterschap Rivierenland (WSRL), na uitvoeren van pilots waarin twee partijen hebben aangetoond VZG met een verticale of de horizontale inbrengtechniek te kunnen aanbrengen.

Er is gewerkt aan verbreding van het aantal marktpartijen die in staat zijn de techniek succesvol te installeren. In project Twentekanaal (WRIJ) hebben twee partijen aangetoond VZG met een horizontale inbrengmethode te kunnen aanbrengen. In dit zelfde project is maakbaarheidsonderzoek gedaan naar aansluiting van VZG op verticale elementen (zoals kunstwerken).

Het ENW heeft geadviseerd VZG in de praktijk te gaan uitvoeren en daarbij met praktijkervaring de richtlijn concreter en kwantitatiever te maken zodat deze uiteindelijk als definitieve richtlijn voor ontwerp en beoordelen kan worden vastgesteld. ENW adviseert verder om:

- bij de eerste toepassingen te kiezen voor een goed beheersbare locatie,
- daarbij een adequaat monitorings- en inspectieprogramma in te richten om de effectiviteit van de maatregel te kunnen vaststellen, en
- de beheerorganisatie vanaf het begin nadrukkelijk te betrekken bij voorbereiding en uitvoering.

Voor VZG richt monitoring zich op het dominantie faalmechanisme “verstopping” (van het geotextiel). Er wordt gemonitord of er een verschil ontstaat tussen de stijghoogte beneden- en bovenstrooms van het doek. Als verstopping/dichtslibbing van het geotextiel gaat plaatsvinden ontstaat een grondwaterstroming

---

<sup>4</sup> foto: M.J. de Jong, Deltares



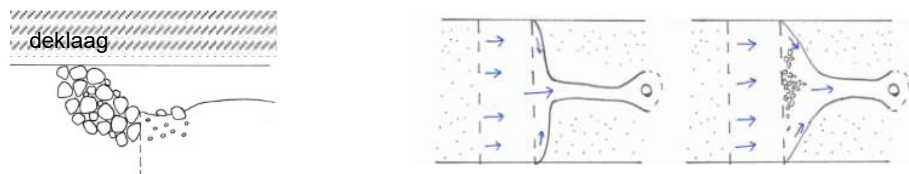
onderlangs, waarbij de lengte van het scherm onvoldoende is om als heavescherm voldoende sterkte tegen piping te geven.

In de praktijk blijken beheerders moeite te hebben om monitoring in te richten en in de beheer- en onderhoudsfase in stand te houden. Er is onduidelijk in welke mate monitoring in de beheer- en onderhoudsfase subsidiabel is bij het HWBP. Zolang monitoring slechts over beperkte lengtes VZG in stand moet worden gehouden is het relatief duur.

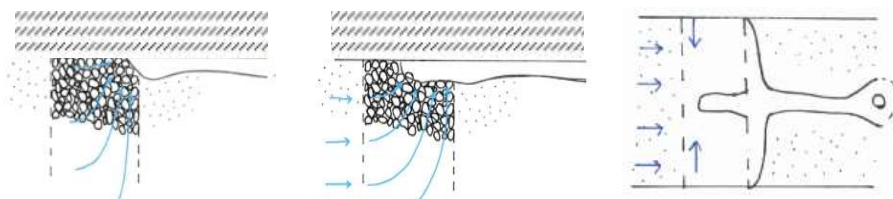
#### De grofzand barrière

GZB is beproeft in het laboratorium, zowel op kleine en medium schaal als op (bijna) full scale in de Deltagoot. GZB is op het moment van schrijven van deze rapportage volop in ontwikkeling in het kader van project Gameren. Tot nu toe (december 2019) is vooral onderzocht hoe groot de sterkte van GZB t.o.v. de situatie zonder scherm zal zijn.

Daarvoor is onderzocht of/hoe erosie van de GZB kan optreden, waardoor er een gat in het scherm kan ontstaan en het faalmechanisme doorloopsheid kan optreden.

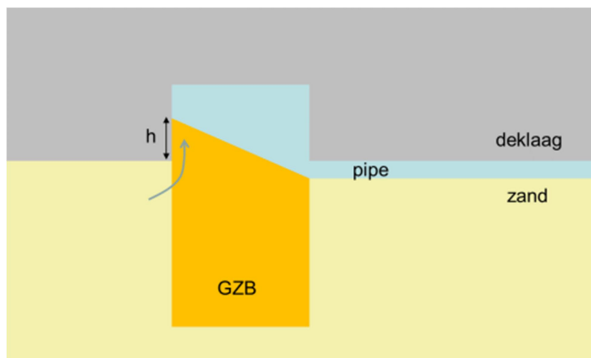


Figuur 24: afbrokkeling van de GZB (dwarsdoorsnede) en verbreding van de pipe (bovenaanzicht) <sup>5</sup>



Figuur 25: ingroei en verdere ingroei in de GZB

Nadat bleek dat er met onvoldoende zekerheid veiligheid tegen dit faalmechanisme kon worden vastgesteld voor de situatie in Gameren is er voorgesteld het ontwerp van de GZB aan te passen en een inkassing van de GZB in de deklaag voor te schrijven.



Figuur 26: aangepast ontwerp GZB met inkassing in deklaag <sup>6</sup>

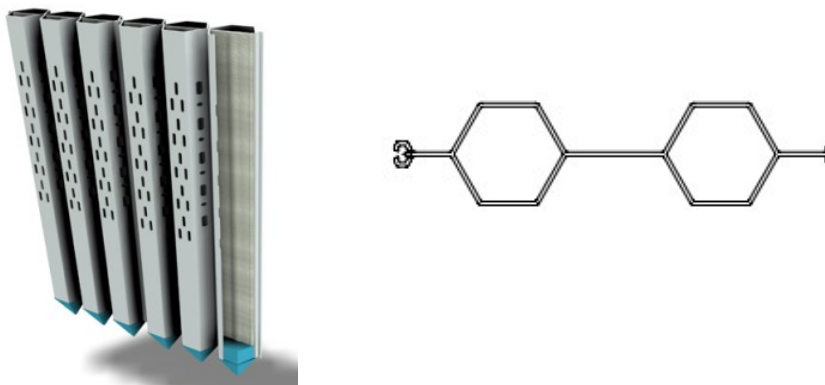
<sup>5</sup> Bron: Eindrapportage haalbaarheid grofzand barrière, Deltares, januari 2019

<sup>6</sup> Bron: notitie "resterend onderzoek HBO2", Deltares, september 2019

Doordat de GZB uit losse grove zandkorrels bestaat wordt aangenomen dat een erosie-gat in het scherm door zwaartekracht met GZB-materiaal van bovenaf wordt gevuld en er nazakking plaatsvindt. In dat geval wordt het faalmechanisme bovenloopsheid dominant. In de “denktank GZB” wordt nagedacht hoe monitoring van het dominante faalmechanisme kan worden vormgegeven. Het lijkt er momenteel op dat zal worden ingezet op stijghoogte metingen in en bovenstrooms van de GZB, plus continue zakkingsmetingen in de benedenstroomse bovenhoek van de inkassing.

#### 3.4.4. Geperforeerde kunststof kokerschermbekleding gevuld met grof zand

Naast VZG en GZB is het mogelijk een filterscherm te maken met een kokerschermbekleding.



Figuur 27: Prolock Delta Filterscherm (<https://prolock.nl/producten/delta-filterscherm/>)

Er is nog geen wetenschappelijk onderzoek beschikbaar over de werking van dit scherm. Met name de invloed van de beperkte toestroming door het achtergrondmateriaal naar de perforatieopeningen zou onderzoek nodig maken. Ook het idee dat deze schermen grondverdringend worden ingebracht waardoor de doorlatendheid van het achtergrondmateriaal rond het scherm wordt beïnvloed zal onderzocht moeten worden.

Er is wel maakbaarheidsonderzoek gerealiseerd, op initiatief van de leverancier. Daarbij is aangetoond dat de schermen op diepte kunnen worden gebracht, ook in zandlagen.

#### 3.4.5. Belemmeringen toepassing filterschermen

Filterschermen worden nog niet grootschalig in een voorkeursalternatief of in de planuitwerking toegepast. POV piping heeft beelden opgehaald waarom er weerstand is om filterschermen toe te passen.

1. Kosten monitoring: als boven beschreven. Er is onduidelijk of monitoring van deze niet-bewezen technieken wordt gesubsidieerd door het HWBP.
2. Daarnaast is er weerstand bij beheerders om deze techniek te accepteren vanwege de zandvoerende wellen die blijven ontstaan achter het scherm. Voorlopig (zolang de betrouwbare werking van het filterscherm niet is vastgesteld) zullen deze zandvoerende wellen op eenzelfde manier worden beheerd als in de huidige situatie. Dit betekent dat zandvoerende wellen zullen worden gemonitord, opgekist, etc.

#### 3.4.6. Aanbevelingen verdere ontwikkeling

POVP geeft de aanbeveling om monitoring (en evaluatie van monitoringsresultaten) van innovatieve filterschermen gedurende 10 jaar (tot 2029) als demonstratieprojecten subsidiabel te maken via het HWBP. Het via de zorgplicht financieel moeten borgen van monitoring werkt namelijk belemmerend voor de toepassing van deze efficiënte techniek.

Daarnaast geeft POVP de aanbeveling om op enkele representatieve proeflocaties een demonstratieproject te realiseren waarbij een GZB tot monitorbare werking wordt gebracht, bijvoorbeeld door bij hoogwater extra verval te creëren door het achterland te bemalen.

In 2029 zal moeten worden vastgesteld of er op voldoende locaties en bij voldoende voorgekomen hoogwaterperiodes voldoende vertrouwen is ontstaan in de werking van filterschermen om deze als “bewezen techniek” in het vervolg zonder monitoring te kunnen inzetten. Om voldoende locaties en situaties van een filterscherm te voorzien wordt aanbevolen om filterschermen tot 2029 als demonstratieprojecten te subsidiëren.

### 3.5. Voorkeursrichting vervolgactiviteiten

Veel van bovengenoemde technieken zijn relatief nieuw, hoewel veel zaken al in andere vakgebieden worden toegepast.

Ter indicatie wordt hier een inschatting gegeven van het TRL van de verschillende technieken, inclusief een beschrijving van de argumentatie:

Verbetermaatregel	TRL	Verklaring
Horizontaal: voorlandverbetering	8	Eerder toegepast, o.a. in Neer en in SLA. OBR geoclaylining is in ontwikkeling (WL).
Verticaal: buitendijks kwelscherm met innovatieve technieken/materialen	2	Theoretisch concept is duidelijk. Kan verder worden gebracht door een aantal voorbeelden te modelleren.
Heaveschermen	7	Eerder toegepast, o.a. Pleijdijk. OBR moet nog worden opgesteld.
Peilstijging achterland	2	Effect zichtbaar bij opkisten van zandvoerende wellen. Moet verder worden onderzocht en onderbouwd.
Nieuwe materialen, m.u.v. Soseal	7/8	Ervaringen o.a. bij vuilstortplaatsen en wegebouw.
Soseal	5	Maakbaarheidsproef buiten dijkprofiel toegepast
Drainagetechnieken	8	OBR drainages in ontwikkeling. Toegepast o.a. in Jaarsveld, SLA, Spijkse Dijk, ZZL, WSS.
Filterschermen: VZG	8	OBR VZG beschikbaar. Toegepast in KISS en Twentekanaal, monitoring hoogwater zal plaatsvinden
Filterschermen: GZB	6	1 <sup>e</sup> full scale toepassing is voorzien in Gameren

Om ze toepasbaar te maken in dijkversterkingsprojecten is het van belang dat beheerders voldoende worden gefaciliteerd. Daarom is het zeer gewenst om ontwerp- en beoordelingsrichtlijnen (OBR's) te ontwikkelen, in aansluiting op (of nadere invulling van) het beoordelings- en ontwerpinstrumentarium.

POVP stelt voor om de volgende OBR's te ontwikkelen:

- Drainagetechnieken: inmiddels gestart bij waterschap Aa en Maas (deelproject Cuijck-Ravenstein)
- Filterschermen: de laatste inzichten van de toepassing VZG in project Twentekanaal moeten worden verwerkt in de OBR VZG. Bovendien kunnen de inzichten uit de ontwikkeling van de grofzand barriere (GZB) in project Gameren aan deze OBR worden toegevoegd zodat er een meer algemeen toepasbare OBR filterschermen wordt gemaakt.
- Linings (afdichtingen) tbv. kwelwegverlenging. Bij waterschap Limburg is een OBR geoclaylining in ontwikkeling, met een bijdrage van POV DGG. Het is wenselijk om deze uit te breiden tot een minder

product-specifieke OBR waarin alle traditionele en bovenstaand genoemde materialen/producten aan de orde komen.

- Heaveschermen: er is door waterschap Aa en Maas i.s.m. Fugro en Deltares een voorstel ingediend om te onderzoeken of een klei-inkassing achter een kleidijk op zand door heave-werking tot een verbetermaatregelen kan leiden. In aansluiting hierop zou een meer algemene OBR voor heaveschermen kunnen worden ontwikkeld. Zeker als zo'n scherm ook een macrostabiliteitsopgave moet oplossen is het goed om duidelijk te geven hoe de beoordeling en het ontwerp van zo'n combi-oplossing tot stand kan komen.

### **3.6. Kennisdoorwerking**

POVP stelt voor om in de handreiking verkenningfase voor projecten met een pipingopgave op te nemen:

- Een beschrijving van de oplossingsfamilies en deze allemaal in de verkenningfase ten opzichte van elkaar af te wegen,
- In de verkenningfase moet voor deze afweging voor drainages worden vastgesteld hoeveel drainagedebiet extra ten opzichte van het oorspronkelijk kweldebiet naar het achterliggende watersysteem kan worden afgevoerd.

In de eindverantwoording van de verkenningfase dient te worden gecontroleerd of de afweging tussen oplossingsfamilies en vaststellen van het maximale drainagedebiet daadwerkelijk heeft plaatsgevonden.

## 4. Kostenconsequenties

In dit hoofdstuk wordt inzichtelijk gemaakt wat de consequenties zijn voor de te verwachten kosten van de pipingopgave in Nederland. We hebben daarbij gezocht naar een “baseline” om de besparingen op vast te stellen. Door veranderende norm en instrumentarium gedurende de looptijd van POVP kunnen daar immers verschillende uitgangspunten voor worden gehanteerd.

### 4.1. Effectiviteit toepassing POVP innovaties meten/analyses

Er zijn de afgelopen jaren in samenhang met de POVP grote stappen voorwaarts gezet ten aanzien van het realistisch benadering van pipingvraagstukken. Piping is tegenwoordig geen eenvoudige invuloefening in een rekenregel op basis van kentallen en default waarden meer, maar omvat het zo realistisch mogelijk schematiseren van de werkelijkheid. Dit vertaalt zich in de gevoeligheidsanalyses en betaalt zich onderhand ook binnen projecten uit in significante besparingen in scope en maatregel. De grote vraag is echter altijd: hoeveel inspanning, wat altijd gepaard gaat met tijd en kosten, is de moeite waard in verhouding tot de scopereductie die kan worden behaald. In andere woorden: wat kost het onderzoek en wat levert het op in scopereductie en/of directe en ook indirecte projectkosten.

Vanzelfsprekend is dit een lastige vraag, die in principe alleen locatie specifiek te beantwoorden is. Desondanks is deze roep er wel, immers, een beheerder wil een inschatting kunnen maken van de effectiviteit. Om deze reden is op basis van enkele recente projecten, waar veel nieuwe inzichten vanuit de POVP zijn toegepast, een overzicht gemaakt van de investeringen in onderzoek in verhouding tot de opbrengsten indien de betreffende kering versterkt zou worden.

#### Uitgangspunten investeringsvraagstuk

De investering is uitgezet naar 10 kilometer op piping afgekeurde waterkering in het bovenrivierengebied waar wisselend wel en geen voorland aanwezig is. In de kosten voor voorlandonderzoek is een numerieke pipinganalyse opgenomen: deze is bij de overige onderdelen niet opgenomen.

De opbrengsten zijn hier gebaseerd op directe bouwkosten in relatie tot kentallen voor een versterking met een pipingberm van 20 m of een kort kwelscherm. De resulterende getallen gelden voor peildatum en stand der techniek op 1 januari 2019. De getallen zullen per project zeker variëren, maar zijn ten minste onderling goed te vergelijken.

De kosten en opbrengsten zijn vergeleken voor 2 situaties:

- A. Opeenvolgend op een afgekeurd traject toepassingen van inzichten;
- B. Separaat op een afgekeurd traject toepassingen van inzichten.

Er is gekozen voor deze indeling aangezien wijzigingen in een piping schematisatie niet-lineair doorwerken: Indien 2 wijzigingen separaat gezien ieder 20% bijdragen, zullen deze gezamenlijk geen 40% bijdragen. Om dit effect enigszins te ondervangen zijn de gemiddelde besparingen uit de gevoeligheidsanalyses overgenomen, maar is de gemiddelde scopereductie bij het opeenvolgend toepassen (situatie A) steeds met een factor 1,5 verlaagd.

De volgende wijzigingen in de piping schematisatie zijn doorgevoerd:

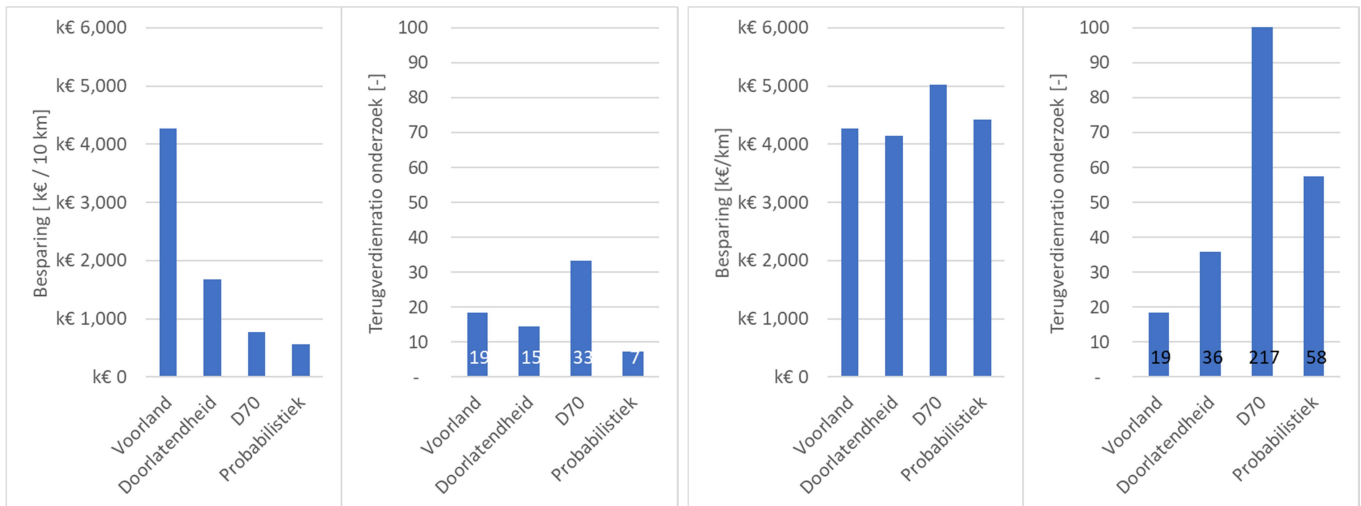
- voorland (deklaagdikte, peilbuismeetnet, detailonderzoek wielen en numerieke analyse); €20k-30k /km
- doorlatendheid (doorlatendheidsonderzoek incl. meerlaagsheid en anisotropie); €10k-20k /km
- D70 (dataverzameling en analyse); €2k-5k /km
- Probabilistisch rekenen; €5k-10k /km

Ten aanzien van probabilistisch is nu 50% scopereductie aangenomen. Hierbij wordt echter opgemerkt dat relatief weinig data beschikbaar is om hier een goed beeld van te krijgen: daarnaast is dit nog niet in een versterkings situatie toegepast.

Er is bij A (opeenvolgend doorvoeren van wijzigingen) ervoor gekozen te starten met het voorland. Het is namelijk veelal zo dat het zonder het voorland mee te nemen doorvoeren van maatregelen onvoldoende 'zoden' aan de dijk zet om netto een significante scopereductie te vinden.

De besparingen (opbrengst-investering) en terugverdienratio (besparing/investering) van de directe realisatiekosten zijn weergegeven in Figuur 29. De directe realisatiekosten bestaan uit een berm van 2 m hoog en 20 m breed incl. grondverwerving of een compacte oplossing. Er is geen rekening gehouden met maatwerk, combinatie met andere mechanismen of gebruik van bestaande constructies. De getallen dienen voor de beeldvorming.

Uit deze figuren kan geconcludeerd worden dat (generiek gezien) onderzoek zich eigenlijk in alle gevallen wel terugverdient. Lokaal kan dit natuurlijk verschillen, al naar gelang de lokale situatie, waardoor per locatie het nut en noodzaak van onderzoek bepaald dient te worden.



Figuur 29a: Indicatieve besparing (opbrengst-investering) en terugverdiensite (besparing/investering) directe realisatiekosten bij opeenvolgend toepassen van POVP inzichten in schematisering.

Figuur 29b: Indicatieve besparing (opbrengst-investering) en terugverdiensite (besparing/investering) directe realisatiekosten bij separaat toepassen van POVP inzichten in schematisering.

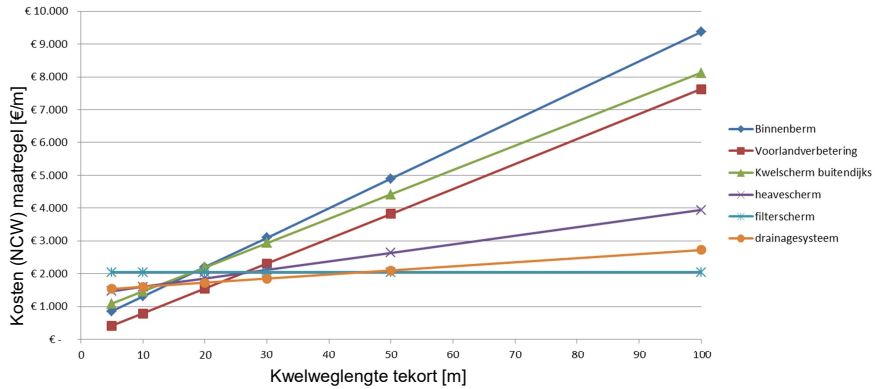
## 4.2. Kosten pipingmaatregelen

Om vast te kunnen stellen wat de kosten zijn van de nieuw ontwikkelde oplossingen is een kostenanalyse opgesteld op basis van Life Cycle Costing.<sup>xx</sup>

Bovendien is een rekenblad opgesteld waarmee op basis van het kwelweglengtetekort een inschatting gemaakt kan worden van de kosten van de pipingmaatregel per kilometer.

### 4.2.1. Vergelijking kosten oplossingsfamilies

Uit de kostenanalyse volgt een netto contante waarde (NCW) van de verschillende oplossingen zoals weergegeven in onderstaande Figuur 30. Het kwelweglengtetekort in deze figuur is te bepalen na invoering van verbeterde onderzoeksmethodes en pipinganalyses volgens hoofdstuk 2.



Figuur 30: kostenvergelijking pipingmaatregelen

Hierbij wordt opgemerkt dat natuurlijk niet alle oplossingen overal toepasbaar zijn:

- Bij een schaaldijk is er geen voorland, dus is voorlandverbetering ook geen optie.
- Bij een drainagesysteem met veel extra kweldebiet en een krap bemeten achterliggend watersysteem zouden grote kosten (gemaaluitbreiding, watergangen) moeten worden gemaakt die niet in bovenstaande analyse zijn meegenomen.
- Etc.

Naast kosten zijn er dus altijd ook andere aspecten waar rekening mee moet worden gehouden in de keuze van een voorkeursalternatief.

Geconcludeerd kan worden dat op basis van een LCC afweging er een voorkeur in de keuze gemaakt kan worden op basis van kwelweglengtetekort van:

- 0-15m: voorlandverbetering, buitendijks kwelscherm of traditionele binnenberm
- 15-25m: geen voorkeur vanuit kosten; VKA o.b.v. andere overwegingen (duurzaamheid, inpassing, etc.)
- >25m: filterscherm, drainagesysteem of heavescherm

#### 4.2.2. Nauwkeurigheid kostenanalyse

De in de vorige paragraaf vermelde vergelijking is opgesteld met behulp van een SSK-achtig rekenblad, welke beschikbaar is voor verdere analyses van het programma. In het rekenblad zijn per oplossingsfamilie aannames gedaan voor dimensies en kostenkentalen. Bovendien zijn per oplossingsfamilie verschillende materialen geraamd. Deze ramingen hebben een bandbreedte die in onderstaande figuren is weergegeven.



Figuur 31: bandbreedte LCC analyse pipingmaatregelen

Samenvattend kan gesteld worden dat de bandbreedte +/- 25 tot 30 % bedraagt, afhankelijk van onzekerheden rond de maatregel.

### 4.3. Pipingopgave areaal HWBP 2015

Bij start van POVP (en het nieuwe Hoogwaterbeschermingsprogramma) in 2013 was de “oude” norm nog van toepassing. In het beoordelingsinstrumentarium werd de oude formule van Sellmeijer genoemd. Het beeld was dat de pipingopgave nog beperkt was, maar dat er wel nieuwe verbetermaatregelen konden worden bedacht die goedkoper zijn en minder impact hebben op de ruimtelijke inpassing.

#### 4.3.1. Directe besparingen referentieprojecten

Het budget van POVP is na uitbreidingen in de loop der jaren beschikt op totaal € 10.8 miljoen. Voor een eerste indruk of de “business case” van deze activiteit positief was worden een aantal referentieprojecten genoemd die oorspronkelijk op het HWBP zijn opgevoerd, maar die door advisering van POVP in kosten zijn gereduceerd:

##### **Werkplaats Zwarte Water:**

Van 10 km naar 200m pipingopgave: 9,8 km x € 2 miljoen/km (innovatieve verbetermaatregel; filterscherm of drainage) = € 19,6 miljoen besparing.

Zie verder presentatie op <https://www.POVPPiping.nl/content/presentatie-workshop-werkplaatsen-het-in-het-spel-brengen-van-ervaringskennis.html>

##### **Noordelijke Randmeerdijken:**

6 km “oude veiligheidsopgave” x € 2 miljoen/km = € 12 miljoen besparing.

Zie verder <https://www.toets-online.nl/vroeg-scope-onderzoek-loont#.XVWoLkZ3E8A.linkedin>

Er zijn meer projecten te noemen waarvan de scope na advisering door POVP fors is gereduceerd, maar we houden het even bij deze twee meest duidelijke voorbeelden. Er kan worden geconcludeerd dat de business case van POVP al op basis van deze twee referentieprojecten positief is. Door een investering van € 10,8 miljoen is tenminste € 31,6 miljoen bespaard.

#### 4.3.2. Programmaraming 2015

Bij de start van het nieuwe hoogwaterbeschermingsprogramma was een raming beschikbaar o.b.v. de KosWat (Kosten Waterkeringen) analyse.

In deze raming (versie 2015) is geanalyseerd wat de kosten van de pipingopgave waren.<sup>xxi</sup>

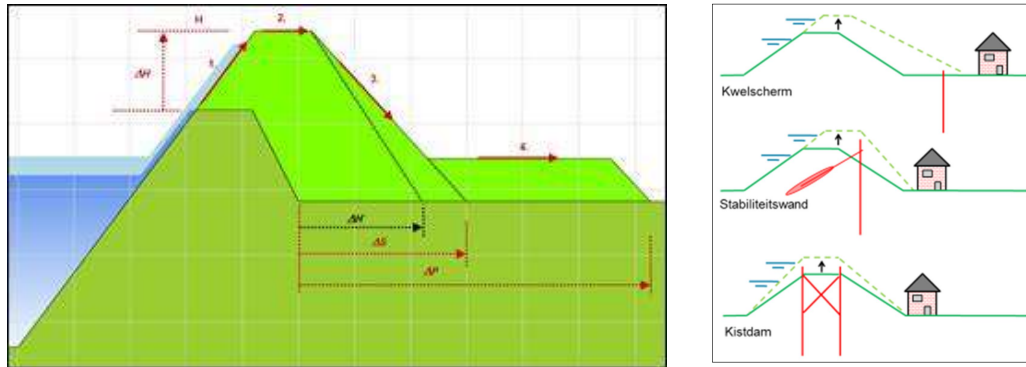
In de analyse is uitgegaan van pipingmaatregelen die extra nodig zijn ná verbetering op macrostabiliteit.

KosWat gaat uit van een verdringingreeks:

- Toepassen pipingberm als daar voldoende ruimte voor is
- Toepassen heavescherm binnendijks als onvoldoende ruimte voor pipingberm is



- Toepassen van een verlenging van een kistdam als er onvoldoende ruimte is voor heavescherm



Figuur 32: verdringingsreeks pipingmaatregelen grond resp. constructief KosWat

Beheerder	Dijksecties (km)	Grondmaatregel (km)	Pipingmaatregel (km)	Overige constructies (km)	Totaalkosten (M€)	Grondmaatregel (M€)	Pipingmaatregel (M€)	Overig constructief (M€)	Infrastructuur (M€)
HHRS Hollands Noorderkwartier	16,62	11,87	1,62	3,14	77,2	6,1	6,1	49,1	15,9
HHRS van Rijnland	0,50	0,46	0,00	0,04	2,0	0,3	0,0	0,8	0,8
RWS Midden-Nederland	20,71	9,83	0,06	10,82	164,7	23,2	0,4	119,4	21,7
RWS Zuid-Nederland	4,66	4,05	0,00	0,61	10,6	3,0	0,0	3,5	4,1
Waterschap Aa en Maas	1,78	1,78	0,00	0,00	1,4	1,0	0,0	0,0	0,4
Waterschap Brabantse Delta	7,10	4,68	0,19	2,24	41,9	12,5	0,6	20,6	8,2
Waterschap Groot Salland	67,75	50,81	2,21	14,74	291,4	62,5	6,1	141,7	81,1
Waterschap Hollandse Delta	4,21	3,56	0,50	0,15	10,7	2,9	1,3	3,9	2,5
Waterschap Hunze en Aa's	4,31	2,95	0,63	0,74	24,4	4,8	1,7	14,7	3,3
Waterschap Peel en Maasvallei	33,60	31,83	0,44	1,33	86,7	36,2	1,6	17,1	31,7
Waterschap Rijn en IJssel	6,61	2,65	0,23	3,74	44,2	4,0	0,6	36,6	2,9
Waterschap Rivierenland	52,97	38,85	1,47	12,66	327,6	56,9	6,6	202,0	62,1
Waterschap Scheldestromen	6,05	4,86	0,62	0,57	19,1	4,9	1,3	8,1	4,8
Waterschap Vallei en Veluwe	12,20	10,05	0,37	1,79	58,4	10,7	1,8	20,4	25,6
Waterschap Zuiderzeeland	6,48	6,32	0,10	0,06	22,0	9,2	0,2	0,6	12,0
Waterschap Fryslan	6,96	6,10	0,39	0,47	20,5	8,9	1,1	4,0	6,5
<b>Grand Total</b>	<b>252,50</b>	<b>190,62</b>	<b>8,81</b>	<b>53,11</b>	<b>1202,8</b>	<b>247,2</b>	<b>29,5</b>	<b>642,5</b>	<b>283,6</b>

Figuur 33: resultaat KosWat analyse pipingopgave areaal 2015

Pipingmaatregelen zijn geraamd op gemiddeld 29,5 m€ / 8,81km = € 3.350 / m.

De "overige constructieve" maatregelen (verlengde kistdammen) op € 12.100 / m.

Alleen al op constructieve maatregelen in de oude raming is aanzienlijk te besparen door uit te gaan van innovatieve maatregelen van gemiddeld ca. € 2.000 / m.

Samenvattend:

Areaal	Pipingopgave	Kostenraming
HWBP '15-21	252 km	€ 1,200 miljoen
besparing POVP		€ 400 – 500 miljoen (+/- 30 – 40%)

## 4.4. Pipingopgave 2050

Aangezien de 1<sup>e</sup> landelijke beoordelingsronde (LBO1) nog niet is afgerond, is ook nog niet bekend wat de opgave op het faalmechanisme piping zal worden. Er is wel duidelijk dat de opgave in het rivierengebied aanzienlijk zal zijn.

### 4.4.1. Raming huidig areaal

Na 2015 zijn er veel strekkingen aan het HWBP toegevoegd (o.a. de 140km "top 14") waarin onduidelijk is wat werd geraamd voor piping en wat werd geraamd voor andere faalmechanismes. Er is gewoon met een kostenkental van 7 miljoen per kilometer gewerkt, ongeacht de mate van afkeuring en faalmechanismes. Hierop kunnen we dus ook niet de besparingen voor alleen de pipingopgave vaststellen. Wel is duidelijk dat veel van de toegevoegde projecten urgent zijn afgekeurd op piping. Veel projecten implementeren de ontwikkelde inzichten van de POV's in de loop van het project zonder dat inzichtelijk is welke besparing dat precies oplevert.

### 4.4.2. Herziening raming rivierengebied

Ten behoeve van het kunnen vaststellen van de uitwisseling van financiering tussen dijkversterking en rivierverruiming is het instrument Okader ontwikkeld. In deze database is de opgave aan dijkversterkingen op basis van nieuwe norm en instrumentarium ingeschat. Oorspronkelijk is daarbij uitgegaan van de verdringingsreeks zoals gehanteerd in KosWat. In totaal werd een bedrag van € 5.600 miljoen geraamd, voor een lengte van 624 aan dijkversterkingen in het rivierengebied. Dit betreft faalmechanismes hoogte, stabiliteit en vooral piping.

In overleg met POV's voorlanden en piping is de raming geactualiseerd naar de inzichten van 2017.

Dit betrof met name:

1. Het (beperkt) meenemen van aanwezige voorlanden in de kwelweglengte
2. Het vervangen van pipingbermen met een lengte > 20m door een filterscherm (onder een berm van 10m).

Daarmee werd becijferd dat er ca. € 2.339 miljoen zou worden bespaard door het meenemen van voorlanden en nieuwe verbeter technieken. Nauwkeurigheid: de besparing is ingeschat op +/- 25 tot 50% t.o.v. de oorspronkelijke opgave. De besparing is dus veel meer dan de oorspronkelijke opgave van 1,2 miljard die in 2015 werd geraamd. Dat komt dus omdat in de MKBA wordt uitgegaan van cijfers van VNK etc. op basis van nieuwe norm en nieuwe rekenregel van Sellmeijer.

	Rijn takken		Bedijkte maas		totaal	
	kosten (M€)	lengte (km)	kosten (M€)	lengte (km)	kosten (M€)	lengte (km)
oorspronkelijke opgave	4.226	426	1.377	198	5.603	624
met voorlanden	3.594	403	1.086	189	4.680	592
besparing voorlanden	632	23	291	9	923	32
+ voorland +nieuwe technieken	2.454	403	810	189	3.264	592
besparing nieuwe technieken	1.140	-	276	-	1.416	-
totaal besparing	1.772	23	567	9	2.339	32

Door het meenemen van voorlanden zou 32 kilometer (ca. 5%) alsnog worden goedgekeurd (t.g.v. technische onderbouwing POVP, maar ook door procesinnovaties/draagvlak POVV).

In onderstaand overzicht wordt duidelijk gemaakt hoeveel kilometer pipingopgave volgens Okader tot een kwelwegtekort van meer dan 20m is berekend volgens de uitgangspunten van Okader. Dit is nog vóór het implementeren van POVP inzichten over nieuwe meettechnieken en analysemethodes volgens hoofdstuk 2. Het betreft een analyse alléén van de riviertakken Nederrijn/Lek en Waal.

Lengtes dijk [km]				
Opgave piping volgens OKADER				
Aanname opgave > 20m leidt tot technische oplossing				
Waterschap	Geen opgave piping	Piping opgave oplossing in grond	Piping technische oplossing	Eindtotaal
De Stichtse Rijnlanden	13.8	6.1	33.6	53.5
Schieland en de Krimpenerwaard	14.9	1.2	3.6	19.7
Vallei & Veluwe	0.0	0.0	5.3	5.3
Waterschap Rijn en IJssel	11.3	4.4	36.2	51.9
Waterschap Rivierenland	31.6	10.9	292.8	335.3
<b>Eindtotaal</b>	<b>71.7</b>	<b>22.6</b>	<b>371.5</b>	<b>465.8</b>

Deze informatie kan worden gebruikt voor het verder vaststellen van de totaalraming van de pipingopgave in Nederland. Bovendien kan het gebruikt worden voor het opstellen van de business case voor het doorontwikkelen van door POVP genoemde innovaties.

#### 4.4.3. Raming landelijk

Okader betreft alleen het rivierengebied. Er worden echter ook dijken afgekeurd op piping langs de bedijkte kust. Er is bij POVP geen raming bekend van deze opgave.

Er zijn wel inzichten waarmee de piping opgave langs de kust kan worden gereduceerd. We noemen met name:

- Tijdsafhankelijk rekenen: kustdijken zijn omvangrijk, dus er is een periode nodig voordat stationaire grondwaterstroming optreedt. Bovendien is de maatgevende belasting relatief kortdurend i.v.m. getij.
- Vanuit KvK programma is onderzoek geïnitieerd naar de sterkte van getijdezanden tegen piping. In getijdezanden is altijd een fijne korrelfractie aanwezig, die medebepalend is voor de sterkte tegen terugschrijdende erosie. Er is vervolgonderzoek voorgesteld, o.a. in de vorm van een full-scale bezwijkproef in de Hedwigepolder.

Algemeen kan worden gesteld dat er een behoefte is aan duidelijkheid over de totale piping opgave in Nederland. Daarmee kan worden bepaald in hoeverre het efficiënt is om verder te investeren in onderzoek (door de overheid en kennisinstellingen) en in innovatieve verbetermaatregelen (ook door de markt). Ook van al lopende projecten is op landelijk niveau onduidelijk welk deel van de projectramingen pipingopgave betreft en welk deel andere faalmechanismes. POVP beveelt aan om de projecten hier inzicht in te laten verschaffen. En om de door beheerders gepresenteerde opgave te vergelijken met een "neutraal" begrotingsinstrument op beleidsniveau zoals Okader. Daarmee wordt toegewerkt naar een programmaraming voor de opgave tot 2050.

## Bibliografie

- 
- <sup>i</sup> *POV Piping Plan van aanpak*, versie 9.0, 6 oktober 2015, Ir. C.J.H. Griffioen
- <sup>ii</sup> Gevoeligheidsanalyse inzichten uit de POV Piping, Genne-Streukel en Hasselt-Zwartsluis, Lievense, W+B en Antea, B. van Zwol e.a., februari 2019.
- <sup>iii</sup> Gevoeligheidsanalyse inzichten uit de POV Piping, Pannerden-Kandia en 's Gravenwaard, Lievense, W+B en Antea, B. van Zwol e.a., februari 2019.
- <sup>iv</sup> Gevoeligheidsanalyse Piping, Nijmegen en Zaltbommel, Arcadis en Tauw, N. v.d. Picht e.a., maart 2018
- <sup>v</sup> Initieel verkenning scopereductie piping WOS, Ontwerpteam De Betuwse Waard, B.M. Berbee en W.R. Halter, maart 2019
- <sup>vi</sup> Maatwerkbeoordeling traject 52-1 rondom Leuvenheim, Fugro, N. Stoop en A. Pool, december 2018
- <sup>vii</sup> Onderzoeksproject Anisotropie / Pipinganalyse 20-3, Nick Stoop en Gert-Ruben van Goor, juli 2018
- <sup>viii</sup> Maatwerkbeoordeling Traject 36-2 Cuijk Ravenstein, W. Wilbrink en N. Stoop, december 2019
- <sup>ix</sup> POVP Samenvatting proefvoetsingen Stabiliteit Piping en Heave, C. Briele, augustus 2019
- <sup>x</sup> Handreiking Grondonderzoek voor Piping, oktober 2019, B.M. Berbee en F. Fennis
- <sup>xi</sup> Handreiking Voorland, maart 2019, N. Roode e.a.
- <sup>xii</sup> Zandlaagopbouw maakt realistisch dijkontwerp mogelijk, Land+Water April 2016, B.M. Berbee en G.R.P. Van Goor
- <sup>xiii</sup> *Anisotropie in doorlatendheid, Een literatuuronderzoek naar anisotropie in doorlatendheid en de effecten hiervan op piping*, 11202960-002 B Deltares, 2018, Sanneke van Asselen, Marc Hijma, Wim Kanning
- <sup>xiv</sup> *Anisotropie in doorlatendheid, een literatuuronderzoek naar anisotropie in doorlatendheid en de effecten hiervan op piping*, kenmerk 11202960-002 Deltares, 2018, Sanneke van Asselen e.a.
- <sup>xv</sup> Dijkstabilisatiemet waterglascement FIXUM, Rapportage van het onderzoeksproject, adviesbureau Verschueren, December 2017
- <sup>xvi</sup> Presentatie "User meeting SoSEAL Results De Gijster pilot", Jiani Zhou, Susanne Laumann, Timo Heimovaara, juli 2019
- <sup>xvii</sup> *POV Drainagetechnieken*, mei 2018, Dr. ir. G.A.M. (Gerard) van Meurs e.a.
- <sup>xviii</sup> *Snelle analyse benodigde reductie waterspanning bij afgekeurde dijken*, kenmerk 11200543-006, Deltares, 2017, dr.ir. G.A.M. van Meurs e.a.
- <sup>xix</sup> Ontwerp- en beoordelingsrichtlijn Verticaal Zanddicht Geotextiel, Groene versie, 14 juni 2017, Laura Taal e.a.
- <sup>xx</sup> POV Piping kostennota, Kodos, maart 2020
- <sup>xxi</sup> Analyse programmaraming HWBP t.b.v. POV Piping, Kenmerk 11201312-000-ZWS-0003, Deltares, oktober 2017, Peter de Grave



is onderdeel van het  
Hoogwaterbeschermingsprogramma