



**HWBP**  
voor sterke dijken



**Deltares**

## **Rode Draden Piping**

## Samenvatting

Rondom piping vindt continue kennisontwikkeling plaats en worden onderzoeksvoorstellen op dit gebied ingediend bij Kennis voor Keringen (KvK) van DGWB, de Kennis en Innovatie (KenI) agenda, en bij het SO programma van Deltares. Deze organisaties hebben gezamenlijk de rode-draden-piping opgesteld met als doel overzicht te creëren van de kennis en kennisvragen ten behoeve van de prioritering van onderzoeken en afstemming van kennis- en innovatieprogramma's. De rode draden in dit rapport beschrijven de kennisontwikkelingen met de meeste impact op de analyse van de bepaling van de overstromingskans door piping, maar ook op de maatregelen. Beide typen rode draden gaan uit van generieke gebiedsspecifieke kenmerken voor de relevantiebepaling. De doelgroep van dit rapport zijn experts op gebied van piping.

Het faalpad voor piping vormt de basis voor de rode draden voor het faalmechanisme piping. Kennis en kennisvragen zijn gegroepeerd op basis van de gebeurtenissen in het faalpad waarop deze betrekking hebben, en de ontwikkelfase waarin de kennis zich bevindt. In combinatie met de gebiedsspecifieke relevantie volgen hieruit de rode draden piping, met per gebied de belangrijkste onderzoeksvragen.

Piping versterkingsmaatregelen zijn in vier typen maatregel onderverdeeld. Per type maatregel zijn wederom kennis en kennisvragen gestructureerd aan de hand van de ontwikkelfase waarin de maatregel zich bevindt. In combinatie met de gebiedsspecifieke relevantie volgen hieruit de rode draden voor pipingmaatregelen met de belangrijkste onderzoeksvragen voor versterkingsmaatregelen.

Vanuit de rode draden zijn verschillende projecten opgestart en uitgevoerd. Dit document biedt een overzicht van de recente ontwikkelingen.

De rode draden worden jaarlijks aangepast met de resultaten van lopende onderzoeken. De actuele versie is vindbaar op (<https://publicwiki.deltares.nl/pages/viewpage.action?pageId=187990420>).

# Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b><u>Inleiding</u></b>	<b>4</b>
<u>1.1</u>	<u>Aanleiding</u>	4
<u>1.2</u>	<u>Doelgroep</u>	4
<u>1.3</u>	<u>Totstandkoming</u>	4
<u>1.4</u>	<u>Leeswijzer</u>	5
<b>2</b>	<b><u>Algemeen</u></b>	<b>6</b>
<u>2.1</u>	<u>Generiek faalpad faalmechanisme piping</u>	6
<u>2.2</u>	<u>Gebiedsspecifieke relevantie faalmechanisme piping</u>	7
<u>2.3</u>	<u>Piping Maatregelen</u>	8
<u>2.4</u>	<u>Gebiedsspecifieke relevantie pipingmaatregelen</u>	9
<u>2.5</u>	<u>Ontwikkefasen</u>	10
<u>2.6</u>	<u>Basisinstrumentarium</u>	11
<b>3</b>	<b><u>Overzicht kennis en kennisleemtes mechanisme piping</u></b>	<b>12</b>
<b>4</b>	<b><u>Rode draden faalmechanisme piping</u></b>	<b>14</b>
<b>5</b>	<b><u>Overzicht kennis en kennisleemtes pipingmaatregelen</u></b>	<b>16</b>
<b>6</b>	<b><u>Rode draden piping maatregelen</u></b>	<b>18</b>
<b>7</b>	<b><u>Recente ontwikkelingen, stand van zaken</u></b>	<b>20</b>
<b>8</b>	<b><u>Referenties</u></b>	<b>23</b>
	<b><u>Bijlage 1: Toelichting rode draden mechanisme piping</u></b>	<b>25</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

Rondom piping vindt continue kennisontwikkeling plaats en worden onderzoeksvoorstellen op dit gebied ingediend bij Kennis voor Keringen (KvK) van DGWB, de Kennis en Innovatie (KenI) agenda, en bij het SO programma van Deltares. Deze onderzoeken en voorstellen hebben vaak betrekking op verbetering van een individuele schakel in de keten van gebeurtenissen die leidt tot een overstroming. Een keten van gebeurtenissen die tot overstroming leidt wordt ook wel een faalpad genoemd. Om overzicht te houden van ontwikkelde kennis, voorstellen op elkaar af te stemmen, en ten behoeve van de prioritering van onderzoeksvoorstellen is het van belang om de onderzoeken in deze keten te plaatsen. Het overzicht dat hieruit volgt, geeft ook inzicht in relevante kennisleemten die nog niet worden opgepakt.

Dit document geeft aanknopingspunten voor de communicatie binnen de genoemde organisaties, maar ook met andere partijen, over initiatieven voor onderzoek rondom piping. Met dit document wordt beoogd richting te geven aan de vraag welk onderzoek in welke situatie zinvol is in relatie tot de impact op de overstromingskans door piping. Daarnaast bieden de overzichten een basis voor de Comply or Explain (HWBP) en de Release Kalender (BOI, WVWL).

Uiteraard kunnen er ook andere overwegingen zijn om een onderzoek op te starten in relatie tot dijkversterkingsprojecten. Dat kan zijn vanuit een Life Cycle Costing (LCC) benadering, duurzaamheid, CO<sub>2</sub>-reductie et cetera. In dit document wordt alleen ingegaan op kennis en kennisleemtes ten aanzien van piping en piping maatregelen in de context van beheersing van overstromingsrisico's.

## 1.2 Doelgroep

De doelgroep van dit memo zijn experts met een goede achtergrondkennis van het pipingmechanisme die betrokken zijn bij het opstellen en uitvoeren van kennis- en innovatieprojecten en programma's.

## 1.3 Totstandkoming

De keten van gebeurtenissen die leiden tot een overstroming door piping staat aan de basis van deze rode draden. Bij elke gebeurtenis zijn de relevante parameters onderzocht en de beschikbare rekenmodellen en handreikingen voor het uitvoeren van een overstromingskansanalyse geïnventariseerd. De kennis en kennisleemtes die voor ieder van deze gebeurtenissen relevant zijn, zijn gecategoriseerd al naargelang die betrekking hebben op: theorie, model, ontwerp/realisatie, en implementatie<sup>1</sup>. Het belang van verschillende gebeurtenissen voor de kans op een overstroming door piping is afhankelijk van ondergrond- en belastingkarakteristieken. Dat houdt in dat kennisbehoeften vaak alleen of met name relevant zijn voor specifieke gebieden. Op basis van belasting en ondergrondkarakteristieken is Nederland in 4 deelgebieden opgedeeld. De rode draden volgen uit het combineren van het overzicht van kennis en kennisleemtes per gebeurtenis, met het overzicht van de relevantie van verschillende gebeurtenissen per gebied. De rode draden geven daarmee een overzicht van welke kennis voor welk gebied de meeste impact op de overstromingskansbepaling heeft. De rode draden zijn vervolgens gebruikt om overzicht te creëren van de lopende, voorgenomen en te agenderen onderzoeken.

Om de kans op overstroming door piping te reduceren is op basis van gebiedsspecifieke kenmerken een overzicht gemaakt van kansrijke piping maatregelen per gebied. De kennis en kennisleemten per maatregel zijn gecategoriseerd (al na gelang deze betrekking hebben op: theorie, model, ontwerp/realisatie en implementatie<sup>1</sup>). De rode draden voor maatregelen volgen uit de combinatie van deze twee overzichten.

De eerste versie van de Rode Draden Piping is in 2021 opgesteld en besproken bij ENW. In 2022 zijn de aanbevelingen meegenomen en zijn de Rode Draden geactualiseerd met nieuwe kennis, ook zijn maatregelen en een overzicht van de recente ontwikkelingen opgenomen. Jaarlijks wordt een

<sup>1</sup> theorie, model, ontwerp/realisatie, en implementatie zijn de ontwikkelfasen die voor kennis en innovatie in de Handreiking Innovatie worden onderscheiden, zie Figuur 2.2 voor toelichting

geactualiseerd overzicht geboden van de kennisontwikkelingen in het voorgaande jaar. Op hoofdlijnen worden de ontwikkelingen en wat dit betekend voor de toepassing geschetst.

## 1.4 Leeswijzer

Dit document behandelt het faalmechanisme piping en piping maatregelen in aparte hoofdstukken. Hoofdstuk 2 met basisinformatie voor de rode draden is relevant voor beide onderwerpen. Het faalmechanisme piping, voor groene dijken, is behandeld in hoofdstukken 3 en 4; piping maatregelen komen in hoofdstukken 5 en 6 aan bod. Tot slot bevat hoofdstuk 7 een overzicht van de stand van zaken op basis van de ontwikkelingen in het voorgaande jaar.

## 2 Algemeen

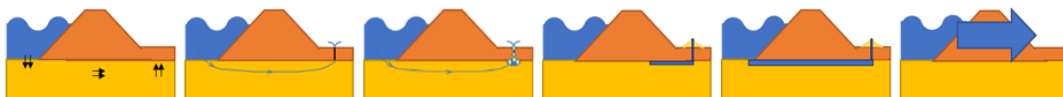
Dit hoofdstuk beschrijft de basis voor de rode draden. Het faalpad voor het faalmechanisme piping en de gebiedsspecifieke relevante gebeurtenissen wordt daartoe in paragraaf 2.1 en 2.2 eerst beschreven. Vervolgens worden de typen pipingmaatregelen beschreven en de gebiedsspecifieke relevantie hiervan geschetst (2.3 en 2.4). De ontwikkelfasen van kennis en innovatie die in dit document gehanteerd zijn worden in 2.5 beschreven en het basisinstrumentarium waarin de kennis landt is in 2.6 beschreven.

### 2.1 Generiek faalpad faalmechanisme piping

Voordat piping tot een doorbraak leidt moeten verschillende gebeurtenissen optreden.

De keten van gebeurtenissen die samen leiden tot overstroming bestaat uit:

1. Toename van waterspanningen en opbarsten: Dit hangt af van de dikte en samenstelling van de toplaag. Afhankelijk van deze eigenschappen zal de toplaag opdrijven en niet opbarsten. Opbarsten is een voorwaarde voor het optreden van vervolgmecanismen in situaties met een intacte deklaag.
2. Heave: bij voldoende verticale stroming kunnen zandkorreltjes naar het maaiveld worden getransporteerd. Dit is ook afhankelijk van zandeigenschappen. Heave is een voorwaarde voor vervolgprocessen in situaties met een intacte deklaag.
3. Horizontale pipegroei tot aan kritiek verval: afhankelijk van opbouw, doorlatendheden en korrel diameter(s) van de aquifer kan een horizontale pipe ontstaan. Het kritiek verval is het verval waarbij geen evenwicht meer is en de pipe zal doorgroeien.
4. Doorlopende pipe en hydraulische kortsluiting, verbreden en verdiepen pipe: Het kan bij een kritiek verval nog een behoorlijke tijd duren voordat een doorgaande pipe is gevormd.
5. Kruinverlaging, overloop en bresgroei: Wanneer de pipe zo groot is dat deze instort zal het dijklichaam mee zakken. Water dat over de dijk en door scheuren in de dijk stroomt veroorzaakt erosie en uiteindelijk een bres.



Toename waterspanningen en opdrijven / Heave / Horizontale pipegroei / doorgaande pipe / kruinverlaging en bresgroei

Figuur 1 Keten van gebeurtenissen piping

De eerste drie gebeurtenissen tot horizontale pipegroei worden het initiële mechanisme genoemd. Het ontstaan van een doorlopende pipe welke uiteindelijk leidt tot kruinverlaging en bresgroei wordt vaak aangeduid met het vervolgproces.

## 2.2 Gebiedsspecifieke relevantie faalmechanisme piping

In het kader van de prioritering van onderzoeksvragen is op basis van de keten van gebeurtenissen en lokale kenmerken van de ondergrond en de belasting nagegaan welke gebeurtenissen dominant zijn voor de overstromingskans in verschillende gebieden (Rosenbrand et al., 2020). Hierbij is onderscheid gemaakt naar 4 hoofdgebieden: getijdengebied, bovenrivieren- en benedenrivierengebied en Limburg. In onderstaande tabel zijn de resultaten hiervan weergegeven. Uiteraard zijn er nog vele variaties en uitzonderingen te identificeren, dit is slechts een versimpeling van de situatie "in het veld".

Tabel 1 Karakteristieken van de gebieden en dominante gebeurtenissen bij overstroming door piping.

gebied	Gebiedsbeschrijving en belangrijke gebeurtenissen
Getijdengebied (plaatafzetting)	<p>Getijdenplaatafzettingen zijn veelal slechts enkele meters dik. De opbouw van de plaat kan sterk variëren: van zeer homogeen tot sterk gelaagd. De algemeen lage doorlatendheid, hoge mate van anisotropie, gelaagdheid, en de relatief dunne pakketten leiden tot minder toename van de waterspanning onder de deklaag in het achterland, zeker als het doorlatendheidscontrast met de deklaag klein is, wat leidt tot een kleinere kans op opbarsten en heave (ook door weinig stroming naar de wel). Wat betreft terugschrijdende erosie is het de vraag hoe het piping proces in dergelijke afzettingen verloopt wanneer er sprake is van een hoge concentratie kleilaagjes in de baan van de pipe. De erosiegevoeligheid van het zand is waarschijnlijk ook laag door invloed van biologische en fysische cohesie en de aanwezigheid van fines.</p> <p><b>Dominante gebeurtenissen:</b> bij kleiige plaatafzettingen is piping niet relevant.</p>
Getijdengebied (geulafzetting)	<p>Ten opzichte van getijdenplaatafzettingen zijn getijdengeulafzettingen dikker, veelal zandiger, en kunnen relatief weinig kleilaagjes bevatten, waardoor de bulkdoorlatendheid hoger en bulkanisotropie lager is. Ook kan de deklaag boven recent actieve geulen lokaal dunner zijn. De afmetingen van de geul, en het al dan niet kortsluiting maken met het Pleistocene watervoerende pakket, zijn dan van groot belang om te bepalen of de waterspanning en concentratie van stroming voldoende zijn voor alle processen in het faalpad. Na optreden van initiële mechanismen is de duur van de belasting van belang, het is de vraag in hoeverre de vervolgprocessen op kunnen treden binnen de beperkte duur van de hoogwaterbelasting.</p> <p><b>Dominante gebeurtenissen:</b> opbarsten, heave en terugschrijdende erosie, vervolggebeurtenissen.</p>
Bovenrivieren	<p>De initiële mechanismen en met name horizontale pipegroei bepalen in grote mate de overstromingskans. De invloed van de intredeweerstand in het voorland, heterogeniteit van het watervoerend pakket (preferente stroombanen en zwakke plekken, meerlaagsheid, anisotropie) en aspecten die concentratie van stroming naar de pipe beïnvloeden (zoals de doorlatendheid van de deklaag binnendijs en aanwezigheid van sloten) zijn aandachtspunten voor het maken van een scherpe analyse van de overstromingskans.</p> <p><b>Dominante gebeurtenissen:</b> terugschrijdende erosie (opbarsten bij dikkere deklagen)</p>
Benedenrivieren	<p>Het westelijke deel van gebied vertoont veel overeenkomst met getijdengebied, het oostelijke deel meer met bovenrivieren gebied. Voor beide delen zijn geohydrologische aspecten die de toename van waterspanning buiten- en binnendijs beïnvloeden van groot belang voor de faalkans. In beide gebieden is het van belang of het Holocene WVP kortsluiting maakt met het Pleistocene WVP.</p> <p>In het westelijke deel van het gebied is de duur van de belasting beperkt en wordt de piekbelasting gedomineerd door het aandeel uit getij en storm, daardoor is het de vraag in hoeverre vervolgprocessen op kunnen treden. In het oostelijke deel is de duur van de belasting langer en wordt gedomineerd door de rivierafvoer.</p> <p><b>Dominante gebeurtenissen:</b> opbarsten (m.n. bij dikkere deklagen), heave en terugschrijdende erosie, vervolgprocessen bij beperkte duur van de hoogwaterbelasting.</p>
Limburg	<p>De initiële mechanismen en met name horizontale pipegroei bepalen in grote mate de overstromingskans. Kenmerkend voor Limburg is de veelal dunne doorlatende deklaag waardoor wel veel kwel ontstaat, maar weinig zandmeevoerende wellen waargenomen worden. Over terugschrijdende erosie is veel onzekerheid omtrent de erosiegevoeligheid van de grove zand- en grindpakketten in Limburg. De grotere korrels, de hoge uniformiteitscoëfficiënt en mogelijk verkitting dragen naar verwachting bij aan een hogere erosieweerstand.</p> <p><b>Dominante gebeurtenissen:</b> terugschrijdende erosie</p>

## 2.3 Pipingmaatregelen

Met maatregelen kan de overstromingskans door piping worden verkleind. Er zijn verschillende typen maatregelen mogelijk die op verschillende plaatsen in het faalpad ingrijpen.

Op basis van het doel van de maatregel kunnen vier typen maatregelen worden onderscheiden:

- **Filtertechnieken:** doel is voorkomen dat een terugschrijdende pipe kortsluiting maakt. Het werkingsprincipe is dat water wel doorgelaten wordt maar korrels uit het watervoerend pakket niet. De GZB, het Prolock scherm, en de VZG zijn filtertechnieken die onder de deklaag in de baan van de pipe worden geïnstalleerd. Een terugschrijdende pipe kan dan groeien tot het filter maar wordt daar tegengehouden. Een grindkoffer is een filtertechniek die aan het maaiveld wordt geïnstalleerd en al aan het begin van horizontale pipegroei voorkomt.
- **Drainage:** doel is verlagen van de waterspanningen onder de deklaag binnendijks. Drainage kan effectief zijn tegen opbarsten, heave en terugschrijdende erosie.
- **Heaveschermen:** doel is voorkomen dat een terugschrijdende pipe kortsluiting maakt. Het werkingsprincipe is dat water tegengehouden wordt, waardoor een doorgaande pipe alleen op kan treden als de grondmoot benedenstrooms van het scherm fluïdiseert. Het heavescherm wordt onder de deklaag in de baan van de pipe geïnstalleerd en houdt grondwaterstroming en pipegroei tegen (al kunnen bepaalde technieken, bijv. soilmix, een beperkte mate van water doorlaten).
- **Verhogen weerstand tegen stroming:** doel is om de geohydrologische weerstand tegen stroming (grondwaterstroming) naar de polder of de pipe te verhogen. Daardoor is de effectieve belasting, de waterspanning onder de deklaag bij opbarsten, of de stroming naar de pipe voor terugschrijdende erosie, lager. Hieronder vallen horizontale maatregelen als voorlandverbetering (kwelwegverlenging) of maatregelen waarbij de doorlatendheid van het watervoerend pakket lokaal verlaagd wordt de stroming naar het achterland en de pipe verlaagd<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Hoewel heave schermen ook de stroming naar het achterland verlagen is dat niet het primaire werkingsprincipe van een heave scherm.



## 2.4 Gebiedsspecifieke relevantie pipingmaatregelen

Voor het ontwerp van pipingmaatregelen is informatie uit de pipinganalyse relevant. Het ligt vaak voor de hand om maatregelen te ontwerpen voor die gebeurtenissen. Op basis van kenmerken van de ondergrond, kan een afweging gemaakt worden welke typen maatregel effectief zijn:

- **Filtertechnieken:** bij dunnere deklagen in het achterland(GZB en VZG tot ca. 3-4 m; grindkoffer bij zeer dunne of afwezige deklaag).
- **Drainage:** bij dikkere minder doorlatende deklagen in het achterland, in combinatie met dunnere en/of minder doorlatende watervoerende pakketten.
- **Heaveschermen:** ook bij dikkere deklagen in het achterland, of als scherm niet bij de teen maar in de dijk geplaatst moet worden (> ca. 4 m, indien opbarsten nog aannemelijk is).
- **Verhogen weerstand tegen stroming:** horizontaal, voorlandverbetering, bij veel voorland vooral bij dunnere deklagen. Verticaal, reduceren doorlatendheid van watervoerend pakket, in alle situaties.

Deze afweging is op basis van alleen globale gebiedsspecifieke kenmerken, andere overwegingen vanuit beleid, beheerorganisatie of inpassing kunnen leiden tot andere inschattingen.<sup>3</sup>

<sup>3</sup> In verschillende projecten zijn afweegkaders voor maatregelen opgesteld. De Innovatieversneller wil deze inventariseren en in 2023 tot een generiek afweegkader komen.

## 2.5 Ontwikkefasen

Om overzicht van beschikbare kennis te krijgen wordt onderscheid gemaakt tussen de verschillende ontwikkelingsfasen. Daarbij wordt aangesloten bij de Technology Readiness Level niveaus. De vertaling van de TRL fasen naar kennis en (product) innovatie ontwikkeling voor hoogwaterbescherming is in onderstaande figuur gegeven.

TRL	kennis	product	
1	Concept van technologie is beschreven basisprincipes zijn bekend	Geobserveerd gedrag vastgelegd	Theorie
2	Het concept is uitgewerkt <b>Theorie beschreven</b>	Hypothese geformuleerd	
3	Werking concept aangetoond <b>Model beschikbaar</b>	1 <sup>e</sup> bewijs van functioneren vastgelegd	Model/ ontwikkel
4	De technologie is gevalideerd <b>Toepasbaarheid model is bekend</b>	Prototype getest op laboratoriumschaal	
5	De technologie is getest <b>Veiligheidsformat uitgewerkt</b>	Valisatie onderzoek uitgevoerd (maakbaarheids-, grote schaalproef)	Ontwerp/ realisatie
6	De werking is gedemonstreerd <b>Groene versies van tools beschikbaar</b>	Pilot full scale	
7	De technologie is geïntegreerd in <b>Best practices</b>	Full scale toepassing in praktijk	Implementatie
8	De technologie presteert naar behoren <b>Geïntegreerd in instrumentarium</b>	Werking naar behoren, praktijkhandreikingen opgesteld	
9	Klaar voor toepassing	Klaar voor toepassing	

Figuur 2 Vertaling van TRL fase naar kennis en product innovatie ontwikkeling voor hoogwaterbescherming. Rode tekst beschrijft het resultaat van de fase. De haken geven de relatie met de ontwikkelingsfasen in de handreiking innovaties aan.

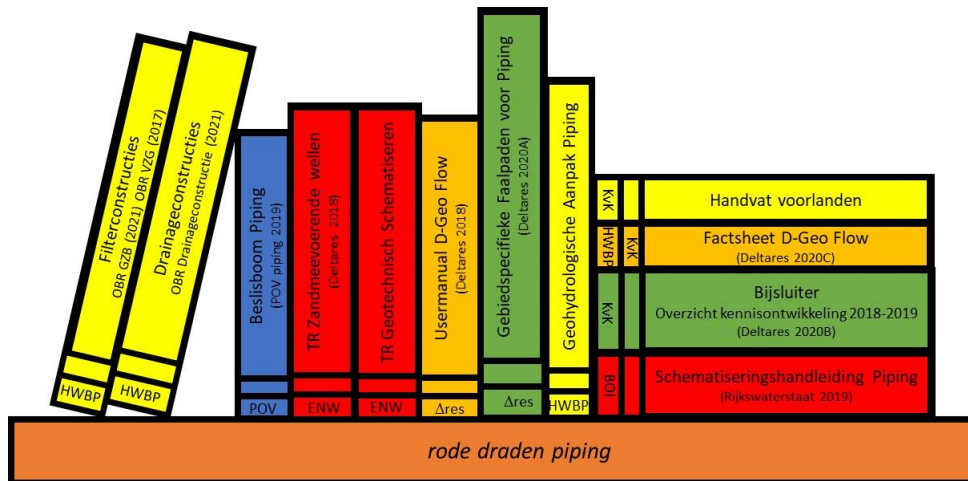
Voor de beschrijving van de beschikbare kennis wordt in dit document onderscheid gemaakt tussen:

- Theorie: de theoretische beschrijvingen van het fysisch proces
- Model/ontwikkeling: de vertaling theorie naar model (toepasbare formule)
- Ontwerp/realisatie: het afregelen/kalibreren model en vertalen naar ontwerp- en beoordelingsregels
- Implementatie: het ontsluiten van kennis in instrumenten

## 2.6 Instrumentarium

Nieuwe (generieke) kennis landt uiteindelijk in (basis)instrumenten waarmee veiligheidsanalyses voor beoordelen en ontwerpen kunnen worden uitgevoerd. Voor het faalmechanisme piping bestaat het instrumentarium uit de volgende instrumenten:

- Software (D-Soil model, D-Geo Flow (op termijn)) met bijbehorende handleidingen
- Schematiseringshandreiking (in 2022 vervangen door handleiding faalpadanalyse piping) en koppeling met WBI-SOS en BRO
- Technische Leidraden met achtergrondinformatie en in 2022 een releasekalender waarin verwachte ontwikkelingen staan beschreven



Figuur 3 Illustratie basisinstrumentarium piping

In de Innovatieversneller worden 8 publicaties geschreven met handreikingen voor het uitvoeren van pipinganalyses en ontwerpen van pipingmaatregelen. Vier publicaties gaan in op generieke aspecten (Inleiding, aanpak piping, veiligheidsfilosofie en maatregelen afweegkader) en vier gaan in op de vier typen piping maatregel (heaveschermen, filtertechnieken, drainage en verhogen weerstand tegen stroming) Op de WIKI van de Innovatieversneller worden de publicaties actief beheerd en achtergronddocumenten ontsloten.



Figuur 4 Structuur piping publicaties van de Innovatieversneller

### 3 Overzicht kennis en kennisleemtes mechanisme piping

De stand van zaken per knoop in het faalpad is in Tabel 2 weergegeven. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen initiële mechanismen (initiatie) en vervolprocessen. Dit betreft de stand van zaken voor zover bekend bij de auteurs op het moment dat deze rode draad geschreven is en dit wordt jaarlijks ge-update.

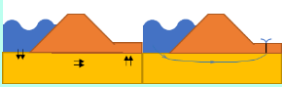




Kennis is gecategoriseerd al naargelang deze betrekking heeft op theorie, model, ontwerp/realisatie en implementatie zoals in 2.5 beschreven is. Wanneer een kennisleemte betrekking heeft op theorie zal deze ook leiden tot kennisleemte voor de volgende stadia. Zonder begrip van hoe een proces werkt kun je bijvoorbeeld niet fysisch modelleren (wel empirisch bij voldoende data) of rekenregels afleiden. De betreffende leemte wordt dan alleen bij theorie genoemd.

Omdat voor de knoop terugschrijdende erosie het *model* van Sellmeijer de erosie van korrels in de pipe beschrijft en de *rekenregel* van Sellmeijer het model van Sellmeijer combineert met de stroming naar de pipe zijn kennisvragen met betrekking *op model* en/of *rekenregel* apart opgenomen.

De geaccepteerde kennis en gevalideerde modellen zijn met zwart weergegeven, de kennisleemten en benodigde ontwikkeling van software met rood, en kennis die in een vergevorderd stadium is, maar nog niet gevalideerd, wordt met paars aangegeven.

Geconcludeerd kan worden dat op dit moment de theoretische kennis van het fysische proces, met name rondom vervolprocessen, nog niet voldoende is.

Tabel 2 Overzicht kennis en kennisleemtes mechanisme piping

					
	<p><b>Toename waterspanningen in watervoerend pakket en opbarsten</b>                      Buitenwaterstand: kans op overschrijding combinatie kritieke waterstand EN kritieke duur                      Geohydrologie: waterhuishouding binnendijs, bodemopbouw (in 3D), doorlatendheden (incl. anisotropie), intredeweerstand voorland (&amp; rivierbodern), leklengte achterland                      Opbarsten: dikte deklaag</p>	<p><b>Heave</b>                      Buitenwaterstand &amp; geohydrologie zie kolom <b>initiatie</b>, en effect erosielen en concentratie stroming naar wel, effect van meerdere wellen, optillen korrels: korrelgrootte, diameter opbarstkanaal</p>	<p><b>Horizontale pipegroei tot aan kritiek verval (verval waarbij geen evenwicht meer is en pipe zal doorgroeien)</b>                      Buitenwaterstand &amp; geohydrologie zie kolom <b>initiatie</b>, en ook concentratie van stroming naar pipe, heterogeniteit in de baan van de pipe, weerstand in het opbarstkanaal                      erosie van korrels:  <i>secundaire erosie</i>: korrelgrootte, fijne fractie, gradering van zand, heterogeniteit in de baan van de pipe  <i>primaire erosie</i>: pakkingsdichtheid, uniformiteit</p>	<p><b>Doorlopende pipe en hydraulische kortsluiting, verbreden en verdiepen pipe</b>                      zie ook kolom <b>horizontale pipegroei</b>.                      Duur van de waterstand i.r.t. pipegroeisnelheid en kwelweglengte en noodmaatregelen.</p>	<p><b>Kruinverlaging en overloop, leidend tot bresgroei</b>                      zie ook kolom <b>horizontale pipegroei</b>.</p>
<b>Theorie</b>	<p>Grondwaterstroming theorie                      Theorie voor sterkte van grond</p>	<p>Grondwaterstroming theorie                      Theorie voor fluidisatie zand                      Theorie voor optillen van korrels ten gevolge van stroomsnelheid                      Theorie voor ontwikkeling erosielen</p>	<p>Theorie voor in beweging brengen van korrels op de bodem van pipe door grondwaterstroming door een pijp (<i>secundaire erosie</i>) 2D (3D)                      Theorie voor optillen van korrels ten gevolge van stroomsnelheid (voor weerstand in opbarstkanaal)                      Theorie voor sterkte van grond (wanneer een laag als dak voor een pipe kan dienen)                      Theorie voor in beweging brengen korrels aan de kop van de pipe (<i>primaire erosie</i>) (2D-3D)                      Theorie pipegroei bij instroom door deklaag naar pipe</p>	<p>Theorie voor pipegroeisnelheid (in relatie tot buitenwaterstandsverloop &amp; duur)                      Theorie voor wanneer grondbreuk optreedt bij voorland en wanneer pipe doorgroeit.                      Theorie voor verbreding/verdieping van pipe.                      Theorie voor eigenschappen van de deklaag waarbij pipe in stand blijft tussen opeenvolgende hoogwaters.</p>	<p>Theorie voor invloed deklaag en dijklichaam op kruinverlaging en bresgroei.</p>
<b>Model</b>	<p><u>Voor belasting</u>                      Gecombineerde kansverdeling overschrijding waterstand en overschrijding duur  <u>Voor waterspanning onder deklaag</u>                      Regionale 3D grondwaterstromingsmodellen                      Lokale EEM grondwaterstromingsmodellen(2D, D-GeoFlow, Plaxflow...)  <u>Voor opbarsten</u>                      Gekoppeld model grondwaterstroming en opbarsten (met sterkte deklaag).</p>	<p>Zie ook kolom initiatie voor belasting.                      Gekoppeld model grondwaterstroming &amp; weerstand in opbarstkanaal (2D-3D)</p>	<p><i>Secundaire erosie</i>:                      Sellmeijer model, andere erosie formules (e.g. Shields)                      D-Geo Flow: koppeling geohydrologisch model met Sellmeijer voor erosie van korrels (2D)                      Toepassingsgebied Sellmeijer model: korrelgrootte en gradering (fines of grof materiaal), toestroom door deklaag voorland                      Invloed 3D stroming naar de pipe in Sellmeijer model                      Gekoppeld model grondwaterstroming, pipegroei &amp; weerstand in opbarstkanaal (2D-3D)                      Toepassingsgebied pipelengte in D-Geo Flow bij voorland                      Analytische berekening weerstand in opbarstkanaal</p>	<p>Zie ook kolom initiatie voor belasting.</p>	<p>Zie ook kolom initiatie voor belasting.</p>
<b>rekenregel</b>	<p><u>Voor waterspanning onder deklaag</u>                      Analytische of empirische modellen/rekenregels voor stijghoogte onder deklaag.                      Voor opbarsten: verticaal krachtevenwicht voor opbarsten.  <u>Voor opbarsten</u>                      Toepassingsgebied verticaal krachtevenwicht.                      Vuistregels Macrostabiliteit wanneer geen opbarsten.  <u>Voor belasting</u>                      Rekenwaarde voor waterstand en duur</p>	<p>Zie ook kolom initiatie voor belasting                      Huidige heave regel o.b.v. fluidisatie zand &amp; waterspanning voor opbarsten.                      Toepassingsgebied heave regel.                      Effect opbarsten op waterspanning voor heave.</p>	<p>Zie ook kolom initiatie voor belasting.                      Sellmeijer rekenregel (1-laags grondwaterstroming &amp; korrel erosie).                      Toepassingsgebied 0,3d rekenregel.                      Toepassingsgebied voorland in rekenregel</p>	<p><b>Legenda</b>                      Geaccepteerde kennis en gevalideerde modellen                      In ontwikkeling                      Kennisleemte</p>	
<b>Ontwerp /realisatie</b>	<p><u>Geohydrologie en bodemopbouw</u>                      Datagedreven ondergrondschematisatie                      Omgang met onzekerheden bodemopbouw in 3D modellen                      Omgang met lengte effect en lokale zwakke plekken                      Omgang met onzekerheden i.r.t. dataverzameling</p>	<p>Zie ook kolom initiatie voor geohydrologie &amp; bodemopbouw                      Huidige heave regel voor fluidisatie.</p>	<p>Zie ook kolom initiatie voor geohydrologie &amp; bodemopbouw                      Veiligheidsformat D-Geo Flow voor kritiek verval                      Ontwerp en beoordelingsregel meenemen voorland incl. bepaling effectieve voorlandlengte.                      Onzekerheden lengte effect en lokaal schematiseren                      Probabilistiek &amp; kalibratieregul D-Geo Flow (incl. pipe lengte)</p>		
<b>Implementatie</b>	<p><u>Geohydrologie en bodemopbouw</u>                      Schematiseringshandleiding piping, <b>beschrijving wat te doen buiten toepassingsgebied</b>                      Factsheet anisotropie bepaling voor getijdenafzettingen.                      Handreikingen zoals: meenemen grondwaterstroming (2D &amp; 3D); <b>grondonderzoek &amp; monitoringstrategie i.r.t. faalpad, omgang met heterogeniteit op verschillende schalen</b>,                      Validatie HPT-AMPT meetmethode                      Tools: Screening tool (piping tool WSRL)</p>	<p>Zie ook kolom initiatie voor geohydrologie &amp; bodemopbouw                      SH Piping: heave regel, <b>beschrijving wat te doen buiten toepassingsgebied</b>                      KvK Bijsluiter Wanneer zijn wellen een risico voor terugschrijdende erosie?</p>	<p>Zie ook kolom initiatie voor geohydrologie &amp; bodemopbouw                      Factsheets: Gebruik D-Geo Flow. Voorland, Fijne Fractie, 3D, 0,3d                      Schematiseringshandleiding piping, <b>beschrijving wat te doen buiten toepassingsgebied, o.a. bij 'zand op zand'</b>; handvat meenemen voorland</p>		

## 4 Rode draden faalmechanisme piping

Dit hoofdstuk bevat de rode draden voor het faalmechanisme piping, het overzicht welke kennis voor welk gebied van belang is. Ook wordt het overzicht gegeven van de voorgenomen kennisontwikkeling in relatie tot de rode draad.

Wanneer het kennisoverzicht uit Tabel 2 naast Tabel 1 met gebiedsspecifieke dominante gebeurtenissen en belangrijkste parameters wordt gehouden ontstaat een beeld van de gebiedsspecifieke aspecten die relevant zijn voor de overstromingskans. Hieruit kunnen de rode draden voor onderzoek naar het mechanisme piping worden getrokken in Tabel 3. In bijlage 1 zijn de rode draden voor het mechanisme piping nader uitgewerkt.

Tabel 3 Rode draden voor onderzoek naar het mechanisme piping

	Wat is meest belangrijk
Basis (Alle gebieden)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Basis op orde, omgaan met onzekerheden, veiligheidsraamwerk</li> <li>- Kritieke belasting in termen van duur en hoogte</li> <li>- Verbinden geologie, geohydrologie geotechniek,               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Geologie: ondergrondkarakterisatie, data verzameling, schematisatie,</li> <li>- Geohydrologie: grondwaterstroming en stijghoogte</li> <li>- Geotechniek: analyse mechanismen</li> </ul> </li> </ul>
getijdengebied & benedenrivieren (westelijk deel)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Opbarsten: effecten van de sterkte van de deklaag op opbarsten bij dikke deklaag.</li> <li>- Heave:               <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>debiet in de wel in plaats van gradiënt in WVP bepaalt het transport van korrels in het opbarstkanaal.</i></li> <li>- <i>3D stroming</i></li> </ul> </li> <li>- Plaatafzettingen: ontwikkelen voldoende debiet voor terugschrijdende erosie, zijn ze überhaupt pipinggevoelig?</li> <li>- Geulafzettingen: Toepassingsgebied Sellmeijer model bij fijne fractie en aanpassing rekenregel voor getijdenafzettingen</li> <li>- Kortere hoogwaterbelasting bij storm: voor vervolprocessen.</li> </ul>
bovenrivieren & benedenrivieren (oostelijk deel)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Toename waterspanning: met name voor heave en terugschrijdende erosie.</li> <li>- 3D effecten en terugschrijdende erosie (grootst bij minder doorlatend deklaag achterland, klein bij doorsnijdende sloten of afwezige/zeer doorlatende deklaag)</li> <li>- 0,3d drukval in wel bij terugschrijdende erosie (grootst bij doorlatendere deklaag achterland &amp; dikke deklaag).</li> <li>- Terugschrijdende erosie: Toepassingsgebied pipelengte berekening i.r.t. meenemen voorland</li> </ul>
Limburg	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Opbarsten (in relatie tot drukopbouw onder de deklaag bij doorlatende deklaag)</li> <li>- Heave</li> <li>- Terugschrijdende erosie: Toepassingsgebied Sellmeijer model bij grof of gegradeerd materiaal.</li> </ul>

De rode draden zijn gecombineerd met een overzicht van de lopende ontwikkelingen in onderzoek en projecten is een voorlopige prioritering in de belangrijke aspecten voor het faalmechanisme piping geschetst in Tabel 4.

Tabel 4 Rode draad en voorlopige onderzoek prioritering mechanisme piping

Gebied	Rode draden	Lopende/ geagendeerde ontwikkelingen	Resterende aspecten urgent	Lange termijn
<b>Basis</b>	<p>1 Basis op orde</p> <p>a Veiligheidsraamwerk</p> <p>b Technische Leidraden</p> <p>c Embankment Suite</p> <p>d Handvat sanity check / werkwijze piping<sup>1</sup></p> <p>e Comply or explain lijst en Releasekalender</p>	<p><u>Implementatie</u>: Digitale technische leidraad incl. schematiseren D-Piping; Handreiking piping analyse incl. beslisregels &amp; sanity check; Release kalender (<b>BOI 2023</b>)</p> <p><u>Model</u>: Validatie en nieuwbouw D-Geo Flow in Embankment suite. Probabilistisch piping met D-Geo Flow/veiligheidsformat D-Geo Flow (<b>HWBP &amp; BOI</b>)</p> <p><u>Implementatie</u>: Handreiking geohydrologische aanpak piping (<b>HWBP DIV</b>)</p> <p><u>Implementatie</u>: Comply or explain (<b>HWBP DIV</b>)</p> <p><u>Implementatie</u>: Prototype sanity check (<b>Deltares</b>)</p> <p><u>Implementatie</u>: Decision support framework (internationale sanity check) (<b>WVL MOU USACE</b>)</p>	<p><u>Ontwerp</u>: Geologische Aanpak: grondonderzoek en monitoring i.r.t. omgang met onzekerheden</p>	<p>Probabilistische faalpaden</p> <p>Update SOS waardes k en aanvulling SOS met anisotropie</p> <p>Detail meerlaagsheid en anisotropie</p>
<b>Getijdengebied - Plaatafzettingen</b>	<p>2 Uitsluiten piping o.b.v. beslisregels</p>	<p><u>Implementatie</u>: uitsluitingscriteria o.b.v. eenvoudig in het veld te meten geotechnische parameters <b>HWBP KIA - Hedwigepolder</b></p>	<p><u>Implementatie</u>: (geofysische) methoden voor bepalen pipinggevoelige gebieden</p>	<p>Zie geul-afzetting</p>
<b>Getijdengebied-Geulafzetting</b>	<p>3 Scherpere bepaling kans <u>terugschrijdende erosie</u></p> <p>a extra sterkte fines</p> <p>b extra sterkte anisotropie</p>	<p><u>Theorie/Model</u>: extra sterkte fines meenemen in Sellmeijer model (rekenregel/D-Geo Flow) <b>HWBP KIA – Hedwigepolder</b></p>	<p><u>Implementatie</u>: Validatie meetmethoden anisotropie &amp; fines</p>	<p>Combinatie van kritieke duur &amp; hoogte van de belasting. Pipegroei-snelheid <b>AllRisk</b></p>
<b>Bovenrivieren</b>	<p>4 Scherpere bepaling <u>toename waterspanningen</u>:</p> <p>a Voorland</p> <p>b Gelaagdheid &amp; anisotropie</p> <p>c 3D stroming</p> <p>d. 0,3d regel</p>	<p><u>Model/Ontwerp</u>: Voorlanden omgaan met onzekerheden en schematisatie en handreiking voorlanden (<b>KvK</b>)</p> <p><u>Theorie/ Model</u>: 3D effecten bij terugschrijdende erosie (incl. pipe lengte) (<b>KvK</b>)</p> <p><u>Theorie</u>: leren van wellen en 0,3d regel bij terugschrijdende erosie (<b>KvK</b>)</p> <p><u>Implementatie</u>: Datagedreven schematiseren (<b>KvK</b>)</p>	<p><u>Implementatie</u>: Regionale grondwaterstroming met erosie modellen.</p> <p><u>Theorie</u>: bij welke eigenschappen is pipevorming onder zandige toplaag mogelijk ('zand op zand').</p>	<p>Primaire erosie en 3D stroming naar pipe (op fundamenteel niveau) (<b>WVL MOU USACE</b>)</p> <p>Detail karakterisatie afzettingen rivierengebied. (<b>Piping in Practice</b>)</p>
<b>Benedenrivieren</b>	<p>5 Scherpere bepaling kans <u>opbarsten en heave</u></p>	<p><u>Theorie/model/implementatie</u>: beslis- en rekenregels opbarsten deklaag inclusief sterkte deklaag (<b>HWBP KIA Reevediep</b>)</p>	<p><u>Theorie</u>: heave o.b.v. stroomsnelheid en korrelgrootte en 3D stroming naar wel.</p> <p><u>Implementatie</u>: Handvatten omgang met individuele wellen in situatie met dikke deklaag.</p>	<p>Meenemen noodmaatregelen bij bepalen kans op doorbraak door piping</p> <p>Tijdsafhankelijkheid meenemen (zie getijdengeul afzetting)</p>
<b>Limburg</b>	<p>6 faalpadanalyse piping in Limburg</p>		<p><u>Theorie</u>: Faalpadanalyse Limburg</p> <p><u>Model/veiligheidsformat</u>: toepassingsgebied erosiemodel bij breed gegradeerde zanden of situatie leem op grind.</p>	

## 5 Overzicht kennis en kennisleemtes pipingmaatregelen

Dit hoofdstuk presenteert het overzicht van kennis en kennisleemtes voor pipingmaatregelen, gerubriceerd naar ontwikkelfase.

Op dit moment is er veel ontwikkeling gaande op gebied van versterkingsmaatregelen tegen piping. Innovatieve pipingmaatregelen worden in KenI projecten en in reguliere projecten ontwikkeld en doorontwikkeld waarbij de Innovatieversneller een coördinerende rol speelt om kennisvragen af te stemmen en om te komen tot een consistente set OBR's.

De stand van zaken per type versterkingsmaatregel is in Tabel 5 weergegeven. Sommige kennis is specifiek voor enkele technieken binnen een type maatregel, andere kennis heeft betrekking op alle technieken binnen een type maatregel. Bij kennis die specifiek voor een techniek is wordt de techniek tussen haakjes vermeldt.

Voor het overzicht van kennis en kennisvragen wordt onderscheid gemaakt tussen theorie, model, ontwerp/realisatie en implementatie zoals in 2.5 beschreven. Wanneer een kennisleemte betrekking heeft op theorie zal deze ook leiden tot kennisleemte voor de volgende stadia. Dit overzicht wordt het komende jaar verder doorontwikkeld door de Innovatieversneller. Voor de actuele stand van zaken wordt verwezen naar de Innovatieversneller.

De geaccepteerde kennis en gevalideerde modellen is met zwart weergegeven, de kennisleemten en benodigde ontwikkeling van software met rood, en kennis die in een vergevorderd stadium is wordt met paars aangegeven. Wanneer optimalisaties mogelijk zijn maar nieuwe kennisvragen behelzen zijn deze met groen aangegeven.



Tabel 5 Overzicht kennis en kennisleemtes piping versterkingsmaatregelen

	Filtertechnieken	Heaveschermen	Drainagemaatregelen	Verhogen weerstand tegen stroming
<b>Tabel 3</b>	Technieken die voorkomen dat terugschrijdende pipe kortsluiting maakt doordat korrels tegen worden gehouden en water wordt doorgelaten.  <i>Relevante karakteristieken zijn de korrelgrootteverdeling bovenin het watervoerend pakket voor filterwerking. Voor de belasting is de geohydrologie van belang</i>	Technieken die zorgen voor meer weerstand tegen terugschrijdende erosie door verticaal scherm dat grondwaterstroming tegenhoudt.  <i>Relevante karakteristieken zijn diepte van scherm, de doorlatendheid en weerstand tegen erosie van het scherm, en de geohydrologie voor belasting.</i>	Technieken die waterspanningen onder de deklaag binnendijs verlagen om zo opbarsten, heave en terugschrijdende erosie tegen te gaan.  <i>Relevante karakteristiek is geohydrologie, de maatregel grijpt in op de belasting.</i>	Technieken om de kwelweg te verlengen en daardoor waterspanning binnendijs te verlagen om zo opbarsten, heave en terugschrijdende erosie tegen te gaan.  <i>Relevante karakteristieken zijn de geohydrologie, en expliciet de karakteristieken in het voorland.</i>
<b>Theorie:</b>	Faalpadanalyse Grondwaterstroming Sterkte/vervorming geotextiel Erosieproces (van de GZB) <b>Bezwijkmechanisme voor VZG &amp; Prolock</b>	Faalpadanalyse Grondwaterstroming Erosieproces (pipegroei tot aan scherm) Weerstand heave (fluidisatie van grond bij constante gradiënt langs het scherm; <b>niet constante gradiënt</b> )	Faalpadanalyse Grondwaterstroming Fluidisatie (grindkoffer) Verstopingsprocessen Zie tabel 2	Faalpadanalyse Zie tabel 2 voor voorlandverbetering Flocculatie (SoSeal) <b>Erosieproces, stabiliteit van SoSeal, en bezwijkmechanisme voor SoSeal</b>
<b>Rekenmodel</b>	Filterregels Grondwaterstromingsmodel met GZB Rekenregels 3D effecten met GZB <b>Interactie grondwaterstroming, erosie en sterkte filter/erosie van filter</b> <b>3D effecten bij filtermaatregelen</b>	Heave voor homogeen isotroop aquifer (2D) en ondoorlatend heave scherm Grondwaterstroming <b>Model met interactie grondwaterstroming, erosie, en fluidisatie bij heavescherm</b> Heave bij meerlaagsheid, of bij semi-doorlatend heave scherm 3D effecten bij heave	Filterregels Grondwaterstroming Model met interactie drainage en terugschrijdende erosie (3D)	Zie tabel 2 voor voorlandverbetering Gekoppeld grondwaterstroming en terugschrijdende erosie
<b>Ontwerp/ realisatie</b>	Full scale pilots (VZG, GZB, Grindkoffer) Maakbaarheidsproef (Prolock)  <b>Omgaan met onzekerheden en veiligheidsformat filterregels</b>  <b>Optimalisaties: aanbrengmethodieken, ontwerp andere dimensies en andere materialen voor de GZB. Combinatie van maatregelen.</b>	Heaverregel bij dichte stalen of kunststofschermen,  Veiligheidsformat heave dichte schermen ( <b>0,3d regel, geohydrologie</b> ) <b>Omgaan met onzekerheden en veiligheidsformat overige niet volledig dichte schermen zoals Soilmix heaveschermen</b>	DMC, ontlastputten, etc. in verschillende projecten, toepassing ontlastputten op grote schaal in buitenland (relief wells) <b>Omgaan met onzekerheden en veiligheidsformat drainage</b>	Zie tabel 2 Bermen en voorlandverbetering veelvuldig toegepast Toepassing SoSeal in pilot (als kwel beperkende maatregel) <b>Omgaan met onzekerheden en veiligheidsformat</b>
<b>Implementatie</b>	<b>Publicatie Filtertechnieken, inclusief schematisering en monitoring strategie</b>  OBR VZG OBR GZB OBR kunststof filterschermen (Prolock)	Toepassing damwanden bij o.m. GOWA, voorzien bij vele projecten  <b>Publicatie Filtertechnieken, inclusief schematisering en monitoring strategie</b>  OBR Soilmix heaveschermen OBR kunststof heaveschermen	Publicatie drainagetechnieken, inclusief schematisering en monitoring strategie  OBR drainagetechnieken  <b>Legenda</b> Geaccepteerde kennis en gevalideerde modellen In ontwikkeling <b>Kennisleemte</b> <b>Optimalisatie:</b>	Zie tabel 2 standaard instrumenten voor ontwerp bermen  <b>Publicatie inclusief schematisering en monitoring strategie</b>  OBR Geoclayliner OBR SoSeal

## 6 Rode draden piping maatregelen

Dit hoofdstuk bevat de rode draden voor pipingmaatregelen, het overzicht welke kennis voor welk gebied van belang is. Ook wordt het overzicht gegeven van de voorgenomen kennisontwikkeling in relatie tot de rode draden.

Op basis van het overzicht van de kennis van de technieken in Tabel 5 en de gebiedsspecifieke eigenschappen van de ondergrond en de belastingen in Tabel 1 *Tabel* zijn in 6 rode draden voor kansrijke maatregelen per gebied weergegeven. De rode draden geven per gebied inzicht in kansrijke versterkingsmaatregelen en belangrijke kennisvragen met betrekking daarop. De meeste versterkingsmaatregelen zijn in verschillende gebieden relevant, maar zijn voor de leesbaarheid slechts bij 1 gebied genoemd.

*Tabel 6 Rode draden voor typen pipingmaatregelen en belangrijke kennisvragen.*

	<b>Wat is meest belangrijk</b>
Basis op orde	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faalpadanalyse voor pipingmaatregelen</li> <li>- Omgang met onzekerheden en veiligheidsformat maatregelen</li> <li>- Afweegkader maatregelen</li> </ul>
getijdengebied & benedenrivieren (westelijk deel)	<p>Kleiige getijdenplaatafzettingen niet piping-gevoelig dus geen maatregelen nodig.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bij dikke deklagen afweegkader beheermaatregelen (afdichten bestaande gaten) en versterkingsmaatregelen.</li> </ul>
bovenrivieren & benedenrivieren (oostelijk deel)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bij zeer dunne deklagen: Grindkoffers implementatie OBR grindkoffers in publicatie filtertechnieken.</li> <li>- Bij relatief dunne deklagen: VZG en Prolock bezwijkmechanismen bepalen Omgang met 3D effecten bij filtertechnieken.</li> <li>- Bij dikkere deklagen Heaveschermen: rekenmodel voor heave bij meerlaagsheid of semi-doorlatend heave scherm en 3D effecten bij heave. Bezwijkmechanisme SoSeal</li> </ul>
Limburg	<p>Gezien de kennisvragen omtrent het faalpad in Limburg is het niet eenduidig welke maatregelen het meest effectief zullen blijken.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Faalpad uitwerken</li> </ul>

Voor de rode draden is een stand van zaken geschetst in Tabel 7.

Tabel 7: Rode draden en voorlopige onderzoek prioritering pipingmaatregelen

Gebied	Rode lijn	Lopende/ geagendeerde kennisontwikkeling	Resterende aspecten urgent	Lange termijn
<b>Basis op orde</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faalpadanalyse</li> <li>- Omgang met onzekerheden en veiligheidsformat maatregelen</li> <li>- Afweegkader maatregelen</li> </ul>	<p><u>Theorie faalpad</u>: Faalpadanalyse pipingmaatregelen (<b>Deltares -SO</b>)</p> <p><u>Ontwerp/Realisatie</u> Publicatie veiligheidsfilosofie maatregelen (<b>HWBP DIV</b>)</p> <p><u>Ontwerp/Realisatie</u> publicatie afweegkader maatregelen (<b>HWBP DIV &amp; Kenl Reevediep</b>)</p>		<p><u>Ontwerp/realisatie</u></p> <p>- Beheer en calamiteitenplan in overstromingskans</p>
<b>Getijdengebied-Geulafzetting</b>				
<b>Bovenrivieren</b>	<p>Bezwijkmechanisme VZG, Prolock, SoSeal</p> <p>3D effecten bij filtermaatregelen en heaveschermen</p>	<p><u>Rekenmodel</u> heave met meerlaagsheid en 3D effecten (<b>Aa en Maas</b>)</p> <p><u>Theorie</u>: Erosieproces en bezwijkmechanisme SoSeal (<b>Sterke Lekdijk WAM</b>)</p> <p><u>Ontwerp/ Realisatie</u> Pilot soilmix heaveschermen (<b>HWBP K&amp;I – GOWA</b>)</p> <p><u>Ontwerp/Realisatie</u> Prolock filtertechniek (<b>HWBP – HDSR-Salmsteke</b>)</p> <p><u>Implementatie</u> OBR VZG (<b>HWVP – WDOD- Zwolle OIst</b>)</p> <p><u>Implementatie</u> OBR GZB (<b>HWVP – Sterke Lekdijken-CUB</b>)</p> <p><u>Implementatie</u> Publicatie filtertechnieken (<b>HWBP DIV</b>)</p> <p><u>Implementatie</u> Publicatie heaveschermen (<b>HWBP DIV</b>)</p>	<p><u>Rekenmodel</u>: 3D effecten bij filtermaatregelen en heaveschermen</p> <p><u>Optimalisatie</u>: aanbrenghmethoden en ontwerp dimensies en materialen GZB.</p>	<p><u>Implementatie</u> DIV publicatie verhogen weerstand tegen stroming</p>
<b>Benedenrivieren</b>	Bij dikke deklagen afweegkader beheermaatregelen			<p><u>Implementatie</u> Publicatie drainagetechnieken</p>
<b>Limburg</b>	Faalpadanalyse			

## 7 Recente ontwikkelingen, stand van zaken

Vanuit de rode draden zijn verschillende projecten opgestart en uitgevoerd om de kennisvragen uit Tabel 2 en Tabel 5 te beantwoorden.

In Tabel 8 is een overzicht gegeven van de resultaten en ontwikkelingen van de afgelopen jaren. De huidige fase geeft aan in welke fase het onderzoek was ten tijde van het opstellen van deze versie van de rode draad. De rode draad wordt jaarlijks geactualiseerd, voor projecten die tussentijds de actuele stand van zaken willen raadplegen wordt verwezen naar de Innovatieversneller, en in de Releasekalender wordt aangegeven welke nieuwe kennis en software wanneer verwacht wordt.

Tabel 8 is de basis voor het Comply or Explain instrument van het HWBP. Hieronder wordt een korte samenvatting gegeven van de items in de tabel. Voor nadere informatie over deze innovaties wordt verwezen naar de Innovatieversneller.

Tabel 8 Overzicht van recent ontwikkelde kennis en innovaties.

Recente ontwikkelingen	Huidige fase <sup>1</sup>	Rode lijn
Geohydrologische aanpak piping	implementatie	Faalmechanisme piping: Basis op orde
D-Geo Flow (meerlaagsheid, anisotropie)	Ontwerp / implementatie	Faalmechanisme piping: Basis op orde en Bovenrivieren
Meenemen voorland	Ontwerp /implementatie	Faalmechanisme piping: Boven en benedenrivieren
Uitsluiten pipegroei getijdenplatafzettingen	implementatie	Faalmechanisme piping: Getijdegebieden
Drainageconstructies	Ontwerp / implementatie	Piping maatregelen: Benedenrivierengebied drainage
Grof Zand Barrière (GZB)	Ontwerp/ implementatie	Piping maatregelen: Bovenrivierengebied filtertechnieken
Verticaal Zanddicht Geotextiel (VZG)	Ontwerp / implementatie	Piping maatregelen: Bovenrivierengebied filtertechnieken
Prolock schermen	Ontwerp	Piping maatregelen: Bovenrivierengebied filtertechnieken
Soil Mix en kunststof heaveschermen	Ontwerp	Piping maatregelen: Bovenrivierengebied heaveschermen

<sup>1</sup> Voor ontwikkelingen die zich in de implementatiefase bevinden wordt aan HWBP projecten een expliciete afweging gevraagd om deze toe te passen. Voor projecten in de ontwerpfase wordt aan HWBP projecten gevraagd bij te dragen aan doorontwikkeling.

### **Geohydrologische aanpak piping**

Geohydrologische modellen zijn in verschillende HWBP projecten toegepast om de belasting nauwkeuriger en scherper te bepalen. In alle gebieden heeft dit geleid tot een reductie en soms zelfs verdwijnen van de opgave. Van de verschillende projecten zijn factsheets opgesteld (Brinkhuis et al., 2021). In 2021 is door de Innovatieversneller (DIV) een geannoteerde inhoudsopgave voor een geohydrologische aanpak opgesteld. In afstemming met BOI wordt over dit onderwerp in 2022 door DIV een publicatie opgesteld.

### **Meenemen voorland**

Het meenemen van voorland kan leiden tot een ordegruotte reductie van de overstromingskans. Voorland kan in de rekenregel van Sellmeijer meegenomen worden, mits de pipe niet onder het voorland groeit bij kritiek verval. In 2021 is in Kennis voor Keringen een conceptueel model opgesteld om de pipe lengte te verklaren. Dit is vertaald naar een concept stappenplan om de bij kritiek verval te bepalen. Resultaten van het onderzoek zijn gerapporteerd in een achtergrondrapport (Rosenbrand et al., 2021). In 2022 is in Kennis voor Keringen de doorontwikkeling naar een handvat voor de toepassing in het kader van het veiligheidsformat voorzien. Hierbij wordt het handvat op een pilot project toegepast.

### **Meerlaagsheid, anisotropie, D-Geo Flow**

In 2018 - 2020 is in Kennis voor Keringen en het HWBP project Spui 20-3 onderzoek gedaan naar de impact van anisotropie en meerlaagsheid voor piping. Dit onderzoek is gerapporteerd in (Kanning et al., 2018; Stoop and van Goor, 2018; Kanning et al., 2019; van Beek et al., 2019; Hijma, 2020). Anisotropie en meerlaagsheid kunnen met D-Geo Flow in rekening worden gebracht. Door HWBP en BOI is een factsheet opgesteld voor de toepassing van D-Geo Flow (Knoeff et al., 2020), en vanuit het HWBP project is een factsheet opgesteld met anisotropie waarden voor afzettingen in verschillende gebieden in Nederland (Hijma, 2020). Met name in het bovenrivierengebied kan het meenemen van anisotropie en meerlaagsheid leiden tot een factor 10 lagere overstromingskans.

### **Getijdenplaatafzettingen**

In de HWBP innovatieprojecten Vijfhuisterdijk en Hedwigepolder is aangetoond dat in getijdenplaatafzettingen onvoldoende debiet kan worden ontwikkeld voor het ontstaan van doorgaande pipes. De innovatieprojecten ontwikkelen in 2022 een handvat om vast te stellen wanneer sprake is van getijdenplaatafzettingen.

### **Drainageconstructies**

In 2021 is door het HWBP project Meanderende Maas een OBR drainagetechnieken opgesteld. Door ENW is de OBR positief ontvangen. Geconcludeerd wordt dat alle relevante aspecten aandacht krijgen maar ook dat enkele onderdelen een nadere onderbouwing vragen. De aanbevelingen van ENW zullen worden meegenomen bij het opstellen van een publicatie drainagetechnieken door de innovatieversneller. Deze is in 2022 voorzien. Verwacht wordt dat drainagetechnieken vooral potentie hebben bij piping door tussenzandlagen in het getijden (geul) en benedenrivierengebied.

### **Verticaal Zanddicht Geotextiel (VZG)**

In 2017 is door de POV piping een groene versie van de Ontwerp en Beoordelingsrichtlijn opgesteld voor een VZG (Taal, 2017). Deze is het resultaat van een ontwikkeltraject van WSRL, de POV-P, waarin laboratorium-, veld- en maakbaarheidsproeven zijn uitgevoerd en de toepassing van de techniek in dijkversterkingsprojecten. Inmiddels zijn een aantal pilots uitgevoerd. Een verticaal zanddicht geotextiel wordt onder de deklaag in de baan van de pipe aangebracht om pipegroei te stoppen, net als andere filtertechnieken heeft het VZG naar verwachting veel potentie in het bovenrivierengebied met relatief dunne deklagen. Het VZG is duurzamer dan een traditioneel heavescherm, maar de toepassing is door de aanbrengmethode beperkt tot deklagen dunner dan ca. 4 m. In 2022 wordt in het versterkingsproject Zwolle-Olst een update van de OBR als onderdeel van de publicatie filtertechnieken van DIV voorzien.

### **Grof zand barrière (GZB)**

Van 2017-2021 is voor het HWBP versterkingsproject Gameren onderzoek gedaan naar de haalbaarheid van de GZB als piping maatregel. De GZB is een filtertechniek waarbij een sleuf met grof zand onder de deklaag in de baan van de pipe wordt aangebracht die pipegroei stopt. Het concept is onderzocht in proeven op 3 schalen, waarmee een ontwerpcriterium is afgeleid. Maakbaarheidsproeven zijn uitgevoerd, en de GZB is succesvol toegepast in een veldschaal pilot bij Gameren. Voor Gameren is een ontwerp- en beoordelingsrichtlijn opgesteld (Koelewijn, 2021). Filtertechnieken zoals de GZB hebben naar verwachting veel potentie in het bovenrivierengebied. De GZB heeft als voordeel dat er geen plastic in de ondergrond wordt aangebracht, maar de toepassing is door de aanbrenghmethode beperkt tot deklagen dunner dan ca. 4 m.

### Prolock Filterscherm

Het HWBP project Sterke Lekdijk werkt aan de doorontwikkeling van het Prolock filterscherm tegen piping. Hierin wordt het werkingsprincipe met laboratoriumproeven onderzocht, worden maakbaarheidsproeven uitgevoerd, en wordt een project specifieke ontwerprichtlijn voor het versterkingsproject Salmsteke opgesteld. Het Prolock filterscherm is een kunststof scherm met kokers die geperforeerd zijn en gevuld met filtermateriaal. Deze kokers laten wel grondwaterstroming door maar geen zandkorrels, waardoor de pipe wordt tegengehouden. Net als de GZB en VZG heeft Prolock naar verwachting potentie in het rivierengebied. Waar de VZG en GZB bij deklagen dunner dan ca. 4 m toegepast kunnen worden kan een Prolock filterscherm naar verwachting ook bij dikkere deklagen worden toegepast.

### Soilmix en kunststof heaveschermen

Traditioneel worden heaveschermen gerealiseerd door gebruik te maken van stalen damwandschermen. In diverse HWBP projecten worden alternatieve materialen overwogen, zoals een kunststof scherm en een soilmix wand. Deze technieken zijn met name interessant vanwege het kostenvoordeel ten opzichte van een stalen damwand. In het versterkingsproject Gorinchem-Waardenburg wordt in een pilot de soilmix techniek onderzocht. Bij deze techniek wordt bestaande grond met een freestechiek gemengd met een toeslagmateriaal waardoor een slecht waterdoorlatende wand wordt gecreëerd in de grond. Begin 2022 worden de specifieke risico's van deze techniek voor het functioneren van het heavescherm geïnventariseerd en eventueel met modelberekeningen verder uitgewerkt. Afhankelijk van de bevindingen wordt vervolgens een maakbaarheidsproef en een pilotproef uitgevoerd. Het geleerde uit dit project zal vertaald worden naar een generieke aanpak voor het toepassen van alternatieve technieken voor het ontwerpen en realiseren van heaveschermen. Dit zal resulteren in een OBR soilmix heaveschermen als onderdeel van een publicatie heaveschermen.

Figuur 5 geeft een overzicht van piping maatregelen gekoppeld aan de ontwikkelfase daarvan. Voor meer informatie over de maatregelen wordt verwezen naar de Wiki van Innovatieversneller .

	Filtertechnieken				Drainage		Verhogen weerstand tegen stroming			Heaveschermen			
	VZG	GZB	Prolock	Grindkoffer	Verticale Bron	Horizontale drainage	Voorland verbetering	Berm	So Seal (vertikaal)	Staal	Kunststof	Soilmix	
Theorie	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	TRL1
	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	TRL2
Model/ Ontwikkel	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	TRL3
	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	TRL4
Ontwerp/ realisatie	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	TRL5
	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	TRL6
Implementatie	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	TRL7
	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	TRL8
	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	TRL9

Figuur 5 Overzicht van pipingmaatregelen en indicatie van niveau van de ontwikkeling.

## 8 Referenties

- Brinkhuis, M., van Rinsum, G., Hoogewoud, J., 2021. RWS - Inventarisatie gebruik voorlanden bij pipingberekeningen.
- Hijma, M.P., 2020. Anisotropieonderzoek in gebieden met andere afzettingen.
- Kanning, W., Berbee, B., Horst, W., Van der Meer, A., Stoop, N., 2018. KPP Piping - Anisotropie.
- Kanning, W., Hijma, M., van Meerten, H., 2019. KVK Piping deelproject 014 : Anisotropie KVK Piping deelproject 014 : Anisotropie.
- Knoeff, H., Kanning, W., Rosenbrand, E., van Beek, V.M., 2020. Factsheet D-Geo Flow.
- Koelewijn, A.R., 2021. Ontwerp grofzandbarrière pilot Gameren.
- Rosenbrand, E., Knoeff, J., Hijma, M., Onselen, V., 2020. Gebiedsspecifieke Faalpaden voor Piping (concept).
- Rosenbrand, E., Wopereis, L., Wiersma, A.P., Kanning, W., Bezuijen, A., Blinde, J., 2, 2021. Kennis voor Kering 2021 : Achtergrondrapport Voorlanden.
- Stoop, N., van Goor, G.-R., 2018. Onderzoeksproject Anisotropie / HPT-AMPT. Pipinganalyse dijktraject 20-3.
- Taal, L., 2017. Ontwerp - en beoordelingsrichtlijn Verticaal Zanddicht Geotextiel.
- van Beek, V.M., Hoogendoorn, R., Rosenbrand, E., Hijma, M.P., 2019. KvK Piping deelproject 019 - Syntheserapport.





## Bijlage 1: Toelichting rode draden mechanisme piping

### Getijdengebied

#### **Uitsluiten piping in getijdenplatafzettingen op basis van geotechnische parameters die eenvoudig in het veld te meten zijn.**

Doel is om op basis van beslisregels en eenvoudige meetmethode/karakterisatie van afzetting onderscheid te maken tussen gebieden die wel en niet piping gevoelig zijn.

De onderbouwing voor de uitsluiting kan gezocht worden in bijvoorbeeld:

- Uitsluiten van heave (zie toelichting bij geul) door het lage debiet naar de wel waardoor korrels niet opgetild worden. Belangrijke aspecten die al meegenomen kunnen worden zijn, geringe dikte van WVP, lage doorlatendheid WVP, meenemen van het voorland, laag contrast WVP/deklaag. Op basis van afzettingskarakteristieken voor doorlatendheid en afmetingen voorland beslisregels opstellen?
- Uitsluiten van terugschrijdende erosie door: te weinig debiet naar pipe (zie boven) en/of, hoge sterkte van fines in het WVP, kleilaagjes in de baan van de pipe (doolhofstructuur). Op basis van afzettingskarakteristiek beslisregels opstellen?

*Het uitsluiten van piping in getijdenplatafzettingen verkleint de pipingopgave in het getijdengebied sterk. Hiervoor wordt kennis ontwikkeld in de KIA projecten Vijfhuisterdijk en Hedwigepolder in 2020- 2022 zie ook getijdengeulen.*

*Opbarsten is voor macrostabiliteit binnenwaarts ook van belang en hiervoor ligt aansluiting met de KIA Reevediep voor de hand.*

Verwacht wordt dat bovenstaande onderzoeken naar de initiële mechanismen voldoende informatie leveren om piping bij platafzettingen verantwoord uit te sluiten. Beschouwing van vervolprocessen en tijdsafhankelijkheid is daarom waarschijnlijk niet noodzakelijk.

**Scherpere inschatting piping in getijdengeulen:** Hiervoor zijn meerdere aspecten van belang.

- Rol van geohydrologie die debiet naar wel (heave) en de pipe (terugschrijdende erosie) beperkt beter meenemen (bijv. aanwezigheid voorland, doorlatendheid & anisotropie & meerlaagsheid WVP, insnijding in Pleistoceen en afmeting geul, 3D concentratie stroming naar wel/pipe, weerstand in opbarstkanaal).
- De erosieweerstand ten gevolge van fines voor terugschrijdende erosie beter meenemen (vaststellen effect van fines op erosieweerstand, relatie van voorkomen van fines met afzettingskarakteristiek vaststellen).

*In het KIA project Hedwigepolder worden/zijn:*

- *de erosieweerstand van fines*
  - *meenemen anisotropie en meerlaagsheid (voor getijdengebied)*
  - *naar verwachting locatie specifiek voor de analyse 3D concentratie van stroming.*
- opgepakt.*

Anisotropie en meerlaagsheid kunnen al meegenomen worden in D-Geo Flow. Omtrent implementatie (meten van representatieve waarden, en veiligheidsformatie) van anisotropie voor andere gebieden dan het getijdengebied spelen nog kennisaspecten.

Indien bovenstaande aanscherpingen onvoldoende zijn om een voldoende scherpe pipinganalyse zijn bij vervolprocessen aanscherpingen mogelijk (zie Benedenrivierengebied).

### **Benedenrivierengebied**

De problematiek in het benedenrivierengebied is nog niet geheel in beeld. Wel wordt een hoge mate van overeenkomst met problematiek in het bovenrivierengebied (voor het oostelijke deel van het gebied) en het getijdengebied (voor het westelijke deel).

In het benedenrivierengebied is vaak sprake van dikke deklagen. Daarbij is de vraag of deze wel scheuren als ze opdrijven. In de analyse van de knoop opbarsten wordt momenteel alleen het verticaal krachterevenwicht meegenomen. Door de sterkte/cohesie van de deklaag tegen scheurvorming wel mee te nemen kan naar verwachting opbarsten vanaf een minimale deklaag dikte (ca. 3-4 m) worden uitgesloten.

*Het HWBP KIA onderzoek Reevediep heeft tot doel de rol van de sterkte van de deklaag te onderzoeken en te komen tot een werkwijze/beslisregel om deze mee te nemen. Dit project loopt van 2022-2023.*

*Verdere aanscherping kan verwacht worden door:*

- Verbeterd inzicht in welke situaties leiden tot wellen die niet tot terugschrijdende erosie leiden, bijvoorbeeld door lokale concentratie stroming bij stroomgeul die doodloopt in het achterland.
- *Op basis van observaties is in KvK Piping 2019 al een indicatie gegeven van geologische kenmerken.*
- De rol van geohydrologie voor het heave mechanisme, en heave bepalen op basis van debiet naar de wel i.p.v. gradiënt
- *Dit onderwerp is nog niet geagendeerd.*
- Rol van geohydrologie die debiet naar wel (heave) en de pipe (terugschrijdende erosie) beperkt beter meenemen (bijv. aanwezigheid voorland, doorlatendheid & anisotropie & meerlaagsheid WVP, insnijding in Pleistoceen en afmeting geul, 3D concentratie stroming naar wel/pipe, weerstand in opbarstkanaal).
- *De rol van voorlanden is in KvK 2021 opgepakt.*
- *3D stroming en de weerstand in het opbarstkanaal (0,3d regel) staan in de periode 2022-2023 op de agenda van KvK.*
- Tijdsafhankelijkheid bij pipegroei modellering meenemen voor een doorlopende pipe, in relatie tot duur hoogwater. Met name voor het westelijke deel van het benedenrivierengebied waar het hoogwater door storm gedomineerd wordt.
- *Het modelleren van tijdsafhankelijke pipegroei bevindt zich op een fundamenteeler niveau en biedt op langere termijn mogelijk perspectief voor dit gebied. Hierbij spelen ook vragen rondom het in stand blijven van de pipe tussen opeenvolgende hoogwaters.*
- Noodmaatregelen meenemen bij overstromingskans analyse, zeker in gebieden waar relatief weinig wellen voorkomen (naar verwachting bij dikke deklagen in het westelijke deel van het gebied) is de kans op succesvolle maatregelen groter.
- *Een prototype raamwerk voor het meenemen hiervan is in KvK 2019 uitgewerkt. Bij sommige ontwerpvoorstellen, bijv. kwelkade, zijn noodmaatregelen niet meer mogelijk wat een rol kan spelen bij de afweging van alternatieven (zie comply or explain).*

### **Bovenrivierengebied**

Er zijn/lopen ontwikkelingen op gebied van het meenemen van de geohydrologie voor het modelleren van terugschrijdende erosie (meenemen van het voorland, anisotropie, meerlaagsheid, regionale beschouwing van de geohydrologie, 3D effecten, weerstand in het opbarstkanaal). Zeker het integraal beschouwen van de geohydrologie kan tot een sterke reductie in de opgave leiden. Enkele van deze aspecten kunnen alleen meegenomen worden in een gekoppeld grondwaterstroming-erosie model zoals D-Geo Flow.

- *In 2021-2022 wordt meenemen van voorlanden nader uitgewerkt naar handvaten voor de praktijk in KvK.*  
*In het onderzoek van 2021 is de conceptuele kennis omtrent pipegroei uitgewerkt. Deze kennis van de pipelengte is nodig om te onderbouwen dat de kans dat de pipe onder het voorland komt voldoende klein is, wanneer meer voorland meegenomen wordt in de analyse. Op basis van het onderzoek zijn*

*generiek toepasbare grafieken afgeleid om de pipe lengte op basis van bekende parameters (dikte en lengte van watervoerend pakket) te bepalen.*

*Een concept handvat voor het meenemen van meer voorlanden is opgesteld waarvoor in 2022 de veiligheidsbenadering nader wordt uitgewerkt, en waarvan het toepassingsgebied wordt onderzocht tot en handvat voor generieke toepassing.*

- *Het beter bepalen van de weerstand in het opbarstkanaal (0,3d rekenregel) is een onderwerp dat in KvK in de periode 2022-2023 op de agenda staat. Dat geldt ook voor 3D effecten bij terugschrijdende erosie.*
- *Voor gebruik van anisotropie is de bepaling van representatieve waarden op de schaal van het piping fenomeen van belang, hiervoor is de kennis voor getijdenzanden verder ontwikkeld dan voor de rest van Nederland.*
- *Verskillende modelleeraanpakken, zoals 3D regionale modellen (bijv. MeMa en de piping tool), D-Geo Flow, en eventuele toekomstige aanpakken, hebben eigen sterke punten. Het ligt voor de hand om deze gecombineerd in te zetten waar mogelijk om het rendement te vergroten. Voorbeelden zijn gebruik van de piping tool om te bepalen voor welke doorsnedes D-Geo Flow wordt ingezet, en/of het gebruik van een model als bij MeMa om randvoorwaarden voor de D-Geo Flow analyse af te leiden. Deze koppeling en relatie met instrumentontwikkeling wordt in een samenwerking met KvK/BOI en de Innovatieversneller gelegd in de Geohydrologische Aanpak Piping en de Handleiding Faalpadanalyse Piping.*

### **Limburg**

Hier is de toepasbaarheid van het Sellmeijer model voor grind en minder uniform zand nog een kennisleemte. Het toepassen van het huidige model leidt tot een grote opgave en een aanscherping hiervan is naar verwachting mogelijk.

*In afwachting van kennisontwikkeling kan ook het meenemen van maatregelen als beheermaatregelen in de overstromingskansanalyse relevant zijn.*

### **Alle gebieden**

In de sanity check bij afronding van de piping analyse is het aan de gebruiker om een afweging te maken van de resultaten in het licht van het faalpad en de onzekerheden. Hierbij speelt de omgang met de verwachte invloed van bestaande kennisleemten en nieuwe kennis op de piping analyse een belangrijke rol.

Het modelleren van terugschrijdende erosie is momenteel gebaseerd om het Sellmeijer model en een 2D benadering. De theorie wijst echter aan dat er nog een component is die het terugschrijden van de pipes beïnvloed, dat is primaire erosie aan de kop van de pipe. Daarnaast is bekend dat de concentratie van stroming naar een pipe in 3D anders is dan in 2D.

*Deze aspecten bevinden zich op een fundamenteeler niveau en biedt op langere termijn mogelijk perspectief voor dit gebied. Hieraan wordt in samenwerking met de US Army Corps of Engineers gewerkt, en 3D effecten staan in KvK 2022-2023 op de onderzoeksagenda.*

*De invloed van het 3D effect leidt tot een grote bandbreedte van de overstromingskans, zowel in positieve als negatieve zin, en hangt sterk samen met andere geologische aspecten (voorlanden, anisotropie & meerlaagsheid). Vanuit dat perspectief is het wenselijk de kennisontwikkeling op dit vlak te prioriteren.*

De ontwikkeling van D-Geo Flow is voor alle gebieden relevant, evenals de vertaling van resultaten van een DGF analyse naar een faalkans.

*Een nieuwbouw van D-Geo Flow is onderdeel van de Embankment Suite.*

De combinatie van de duur en hoogte van de hydraulische belasting kan van belang zijn voor de overstromingskans, en een aanscherping geven ten opzichte van de huidige werkwijze met een piekbelasting. Dit effect zal de grootste impact hebben in gebieden met een kortere duur van de belasting (Getijdengebied, westelijk deel Benedenrivierengebied). Naar deze interactie is nog weinig onderzoek gedaan. Hierbij spelen naast de belastings- hoogte-duur statistiek ook vragen zoals wat bepaald of pipes in stand blijven tussen opeenvolgende hoogwaters, de waterstand waarbij pipes groeien, de pipegroeisnelheid, en het effect van herstelmaatregelen/noodmaatregelen.

*Aangezien dit effect groot is in gebieden waar de reeds ingezette kennisontwikkeling mogelijk al tot dusdanige optimalisatie leidt dat de opgave verdwijnt (Getijdengebied, deel benedenrivierengebied) heeft dit niet de hoogste prioriteit. Eerste stappen kunnen wel gezet worden om na te gaan wat dit zou kunnen betekenen voor gebieden waar de pipingopgave blijft.*

COLOFON

**Titel: Rode Draden Piping**

**Auteur(s): Esther Rosenbrand  
(Deltares), Bianca Hardeman  
(HWBP), Han Knoeff (de  
Innovatieversneller), Henk van  
Hemert (Rijkswaterstaat, WVL)**

**Datum: Maart 2022**

**Status: Definitief Maart 2022**