



HWBP Projectgebonden Innovatie 'Geohydrologische Aanpak voor Piping



## Syntheserapport

**Waterschap Aa en Maas**

2 december 2020

## COLOFON

Aangeboden door Projectteam Projectgebonden Innovatie Meanderende Maas  
Project HWBP Projectgebonden Innovatie 'Naar een geohydrologische aanpak voor piping'  
Opdrachtgever Waterschap Aa en Maas

Document Syntheserapport  
Datum 2 december 2020  
Referentie 109227/20-018.446

Auteur(s) Martine Brinkhuis, Tauw  
Jacco Hoogewoud, Advies in Water  
Heleen Niele, Tauw  
Guido van Rinsum, Witteveen en Bos  
Hendrik Kok, Tauw

Commissie van betrokken experts (CvE)	Aandachtspunt
Ruben Jongejan	Veiligheidsbenadering en probabilistiek
Henk van Hemert	Geotechniek en dijkontwerp
Ane Wiersma	Geologie en (gebrek aan) data.
Henk Weijers	Communicatie en draagvlak

## INHOUDSOPGAVE

<b>1</b>	<b>INLEIDING</b>	<b>6</b>
1.1	Aanleiding innovatietraject	6
1.2	Wat is nieuw	7
1.3	Relatie met de lopende dijkversterking en met de HWBP-community	7
1.4	Overzicht van opgeleverde documenten en hun relatie tot elkaar	8
1.5	Doelgroep en leeswijzer	10
<b>2</b>	<b>MEEGEWERKT AAN DE TOT STANDKOMING</b>	<b>11</b>
2.1	Projectteam	11
2.2	Interne kwaliteitsborging: Commissie van betrokken Experts	12
2.3	Kennisdeling en draagvlak	13
<b>3</b>	<b>DE AANPAK</b>	<b>15</b>
3.1	Toepassingsgebied voor de aanpak	17
3.2	Geohydrologisch referentiemodel (om)bouwen	17
3.3	Kalibreren op de beschikbare metingen	18
3.4	Kwantificeren van onzekerheden: stochastisch model	19
	3.4.1 95 %-waarde van de stijghoogte	20
3.5	Overzicht omgang met onzekerheden	21
3.6	Piping analyse en relatie met BOI	24
3.7	Opbrengst	27
<b>4</b>	<b>ENKELE D-GEO FLOW ANALYSES</b>	<b>30</b>
<b>5</b>	<b>AANBEVELINGEN VOOR VERVOLG</b>	<b>32</b>
5.1	Aanbeveling voor verdieping	32
5.2	Aanbevelingen voor doorwerking	33
5.3	Aanbevelingen bij toepassing	34

6	<b>PRAKTISCHE HANDREIKINGEN BIJ TOEPASSING</b>	<b>36</b>
6.1	Benodigde data voor Geohydrologisch model en bandbreedte stijghoogte	36
6.2	Bepalen pipingopgave	37
6.3	Veel gestelde vragen	37
7	<b>RELATIE MET LOPENDE ONTWIKKELINGEN</b>	<b>40</b>
7.1	Algemene ontwikkelingen	40
7.2	Andere lopende innovatieprojecten	41
8		<b>43</b>
	Laatste pagina	44
	<b>Bijlage(n)</b>	<b>Aantal pagina's</b>
	Achtergrondrapport_Kwantificering onzekerheden stijghoogte_nov2020	42
	Achtergrondrapport_Referentie grondwatermodel_nov2020	73

## SAMENVATTING

Voor u ligt het syntheserapport van de door Waterschap Aa en Maas ontwikkelde 'Geohydrologische Aanpak voor Piping' (GAP). Dit rapport is geschreven met het doel om de kennis die is opgedaan te delen met de collega's uit de HWBP-community.

De nieuwe normering stelt het waterschap Aa en Maas voor de opgave om circa 100 km primaire waterkering te versterken. Een deel van deze versterkingsopgave is toe te schrijven aan het faalmechanisme piping. Het eerste dijktraject dat waterschap Aa en Maas heeft opgestart loopt van Ravenstein tot Lith, is ruim 26 km lang en draagt de naam Meanderende Maas.

Met de komst van het op de risicobenadering gebaseerde beoordelingsinstrumentarium in 2017 worden voor veel dijken in het bovenrivierengebied hoge faalkansen voor piping berekend. Deze hoge faalkansen vertalen zich in grote opgaves voor piping in de HWBP projecten. Hoewel de ervaring bij hoogwater leert dat het rivierengebied inderdaad gevoelig is voor piping, leeft bij beheerders en experts ook het gevoel dat aanscherping van het veiligheidsbeeld mogelijk is. Dit is aanleiding geweest om in verschillende kennisprogramma's te werken aan optimalisatie en verbetering van de aanpak van pipinganalyses om daarmee reëlere faalkansen en opgaves te kunnen bepalen.

Voor het dijkversterkingsproject Meanderende Maas is een projectgebonden subsidie verleend door het Hoogwater Beschermingsprogramma (HWBP) om te onderzoeken hoe geohydrologische informatie en modellen gebruikt kunnen worden om stijghoogtes beter in te schatten om zo de pipingopgave nauwkeuriger vast te stellen. Regionale geohydrologische modellen worden hierbij gekoppeld aan de reguliere sterktemodellen voor opbarsten, heave en terugschrijdende erosie. De aanpak is ontwikkeld voor Meanderende Maas met oog voor de bredere toepasbaarheid in Nederland.

In het innovatietraject is een geohydrologisch model gebruikt om voor een dijkversterkingstraject vlakdekkende piping-analyses te kunnen doen: Met de combinatie van geohydrologisch model en onzekerheden aanpak is vlakdekkend de 95 %-waarde van de stijghoogte onder norm-omstandigheden berekend, voor toepassing in een semi-probabilistische beoordeling. Vervolgens is met de reguliere sterktemodellen uit het Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium (BOI) vlakdekkend de piping-opgave in kaart gebracht.



De conclusie is dat deze aanpak veel inzicht geeft en een meer realistisch, aangescherpt beeld van de pipingopgave oplevert, met name in gebieden met veel voorland:

- met deze aanpak kan gebiedsdekkende informatie beter worden gebruikt en zijn minder (te conservatieve) aannames nodig dan het geval zou zijn bij een dwarsdoorsnede benadering;
- met deze aanpak kan recht worden gedaan aan ruimtelijke variaties in het landschap (meanderende rivier, variërende voorlandlengtes etc.) bij het bepalen van de grondwaterstroming en de stijghoogtes bij hoogwater;
- voor de casus Meanderende Maas leidt de aanpak tot een beter onderbouwde en over het algemeen kleinere pipingopgave.

De aanpak is tot stand gekomen met een compact projectteam met medewerkers van Tauw, Witteveen+Bos, Advies in Water in samenwerking met experts en specialisten uit de brede HWBP-community waarbij de 'Commissie van betrokken Experts' een belangrijke rol heeft gehad in de interne kwaliteitsborging. In het kader van de interne kwaliteitsborging zijn onderdelen van de aanpak ook voorgelegd aan het Adviesteam Dijkontwerp (omgang met tijdverlopen voor hoogwatergolf) en Deltares (Illustratie van de gekozen aanpak met DGeo Flow).



# 1

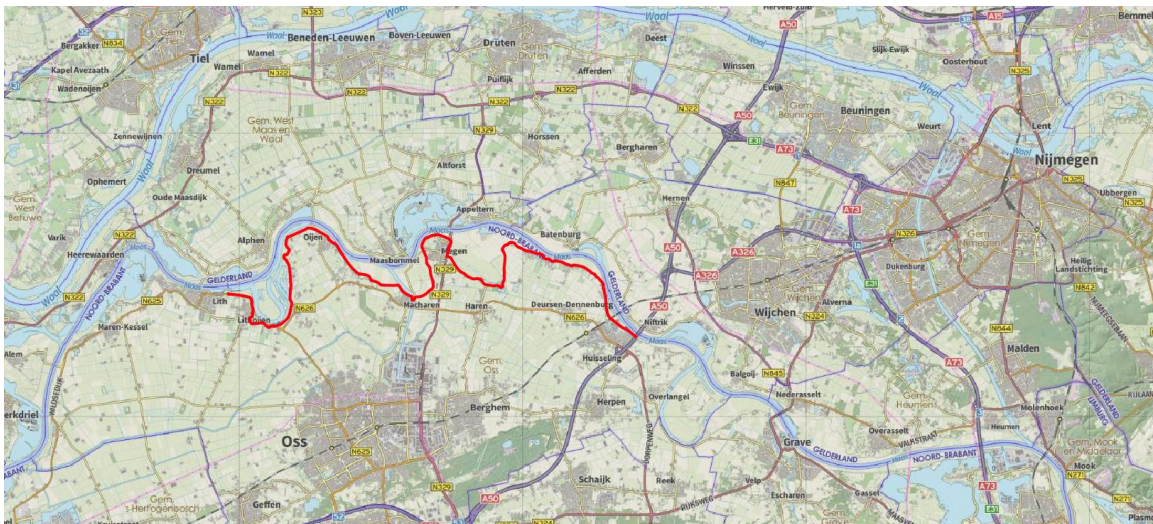
## INLEIDING

### 1.1 Aanleiding innovatietraject

Met de komst van het op de risicobenadering gebaseerde beoordelingsinstrumentarium in 2017 worden voor veel dijken in het bovenrivierengebied hoge faalkansen voor piping berekend. Deze hoge faalkansen vertalen zich in grote opgaves voor piping in de HWBP projecten. Door beheerders en experts werden de uitkomsten vaak als te conservatief en daarmee niet voldoende realistisch bestempeld. Dit is aanleiding geweest om in verschillende kennisprogramma's te werken aan optimalisatie en verbetering van de aanpak van pipinganalyses om daarmee reëlere faalkansen en opgaves te kunnen bepalen.

De nieuwe normering stelt het waterschap Aa en Maas voor de opgave om circa 100 km primaire dijk te versterken. Een deel van deze versterkingsopgave is toe te schrijven aan het faalmechanisme piping. Het eerste dijktraject dat waterschap Aa en Maas heeft opgestart loopt van Ravenstein tot Lith, is ruim 26 km lang en draagt de naam Meanderende Maas.

Afbeelding 1.1 Ligging projectgebied Meanderende Maas. (de rode lijn geeft het dijktraject 36-3 weer)



Gedurende de verkenningsfase van het dijkversterkingsproject ontstond bij het project en bij Waterschap Aa en Maas het idee om te onderzoeken hoe geohydrologische informatie en modellen gebruikt kunnen worden voor het beter inschatten van stijghoogtes om zo de pipingopgave nauwkeuriger vast te stellen. Voor dit onderzoek is een 'projectgebonden innovatie subsidie' verleend door het Hoogwater Beschermingsprogramma (HWBP). Dat is een subsidie voor innovatie op een van de speerpunten van het HWBP die vernieuwend is, besparingen oplevert, projectgebonden is en veelbelovend is voor de hele HWBP community.

In een looptijd van ongeveer 1,5 jaar is in dit innovatieproject met de naam **Projectgebonden Innovatie Geohydrologische Aanpak voor Piping** (PGI-GAP) een aanpak ontwikkeld waarbij regionale geohydrologische modellen worden gekoppeld aan de reguliere sterktemodellen voor opbarsten, piping en heave. Inmiddels is aangetoond dat deze aanpak een goede basis biedt voor een aangescherpte piping-analyse en, met name in gebieden met veel voorland, een kleinere pipingopgave oplevert. De aanpak is ontwikkeld voor algemene toepasbaarheid en de aanpak is getest op de casus Meanderende Maas.

## 1.2 Wat is nieuw

Het innovatieproject heeft zich gericht op het verbeteren van het inzicht in de geohydrologie bij hoogwatersituaties. De innovatie betreft de *combinatie* van:

- 1 het gebruik van een regionaal grondwaterstromingsmodel voor het voorspellen van de grondwaterstroming en stijghoogtes bij hoogwatersituaties;
- 2 het kwantitatief beschrijven van de onzekerheden rondom deze voorspellingen voor de in het rivierengebied veel voorkomende situatie dat er onvoldoende peilbuismetingen beschikbaar zijn (te weinig of bij niet al te extreme hoogwaters) voor een betrouwbare extrapolatie naar hoogwatersituaties;
- 3 het koppelen van de uitkomsten van een (3D-)geohydrologisch model aan de (2D-)sterktemodellen uit het BOI. En daarmee een vlakdekkend beeld kunnen geven van het pipingprobleem.

Afbeelding 1.2 Koppeling grondwater en dijksterkte



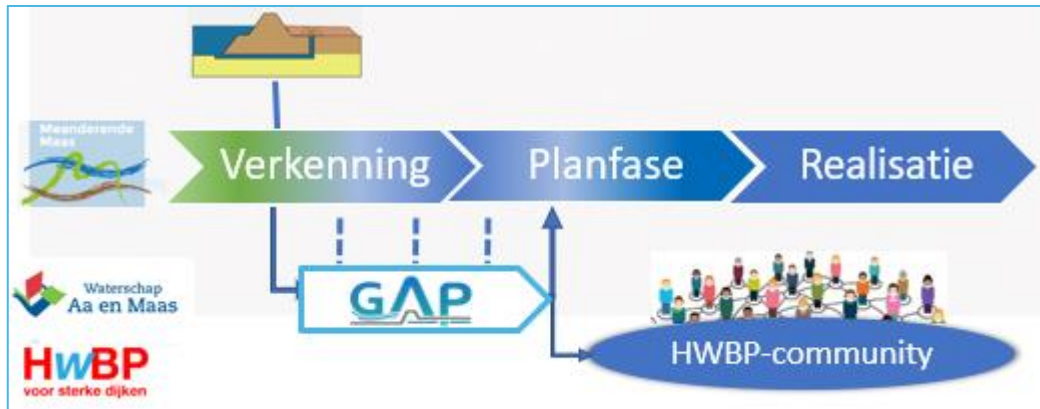
De ontwikkelde aanpak is het resultaat van een Cross Industry Innovation waarbij een koppeling is gemaakt tussen drie werkvelden, die van de geohydrologie, van de geologie en van de geotechniek. We hebben een manier ontwikkeld om de met een grondwatermodel berekende stijghoogtes te koppelen aan het wettelijk voorgeschreven instrumentarium voor beoordeling en ontwerp (het BOI). Het voorgeschreven wettelijk instrumentarium is dus niet aangepast.

## 1.3 Relatie met de lopende dijkversterking en met de HWBP-community

Hoewel het innovatieproject voortkwam uit de lopende dijkversterking is het organisatorisch ingericht als een apart traject rechtstreeks aangestuurd door Waterschap Aa en Maas. En dus niet door het IPM team van de dijkversterking Meanderende Maas. Dat maakt dat de dynamiek van het innovatie-onderzoek en de dynamiek van de dijkversterking elkaar niet hoefden te verstoren.

De verbinding tussen de twee trajecten is geborgd door regelmatig een 'Aftap moment Meanderende Maas' te organiseren voor Waterschap en Dijkversterkingsproject waarin de bevindingen vanuit het Innovatieproject gedeeld wordt en hun toepasbaarheid in de praktijk wordt besproken.

Afbeelding 1.3 Relatie met lopende dijkversterking en HWBP-community



In juni 2020 is op basis van de tussenresultaten door directie van Waterschap Aa en Maas en door IPM-team van Meanderende Maas besloten dat zij voldoende vertrouwen hebben in de aanpak om hem te gaan toepassen in de planfase van Meanderende Maas. Daarvan zal het dijkversterkingsplan eind 2021 gereed zijn. Ook bij de zojuist gestarte verkenningsfase van dijkverbetering Cuijk-Ravenstein gaat de geohydrologische aanpak worden toegepast.

De verbinding met de brede HWBP-community is bij de start van het innovatieproject gelegd via gesprekken met de innovatie coördinator van het HWBP, met het Kennis Platform Risicobenadering (KPR), met Rijkswaterstaat WVL en met de POV Piping. Op basis van deze gesprekken is de onderzoeksopzet aangescherpt. Na afronding van het project zal het HWBP de doorwerking van de geohydrologische aanpak in de praktijk bewaken.

Ook de wijze waarop de kwaliteitsborging en de kennisdeling is ingericht droeg bij aan een goede verbinding met de bredere HWBP-community. Hierover leest u in hoofdstuk 2 meer.

#### 1.4 Overzicht van opgeleverde documenten en hun relatie tot elkaar

Het innovatietraject is uitgevoerd in drie verschillende fasen. In fase I is aangetoond dat de toepassing van een geohydrologische model grote invloed kan hebben op de versterkingsopgave. In fase II is een eerste stap gezet om de onzekerheden ten aanzien van de stijghoogte in kaart te brengen. Hiervoor zijn actualisaties aan het grondwatermodel gedaan. Middels een uitvoerbaarheidstoets is aangetoond dat het gebruik van stijghoogtes volgens een geohydrologisch model in de dijkbeoordeling een werkbare methode is. In fase III zijn het referentie-grondwatermodel en de aanpak ten aanzien van de omgang met onzekerheden doorontwikkeld en definitief gemaakt. Met de combinatie van een geohydrologisch model en de onzekerheden aanpak is vlak dekkend de 95 %-waarde van de stijghoogte onder norm-omstandigheden berekend.

Het document dat voor u ligt is het Synthesedocument: Een concluderend en samenvattend rapport waarin de voorgestelde aanpak wordt beschreven. Hierin verwijzen we voor meer diepgang naar de bijbehorende twee achtergrondrapporten waarin het geohydrologische referentiemodel beschreven wordt en waarin de aanpak voor het kwantificeren van onzekerheden beschreven wordt. Ook geven we in dit rapport praktische handreikingen voor degenen die nu aan de slag willen en doen we aanbevelingen voor verdieping en doorwerking van de aanpak.

De inhoud van dit synthesedocument berust op de in de verschillende fasen van het innovatietraject opgedane kennis die is vastgelegd in 6 deelproducten. De projectfasen en bijbehorende deelproducten zijn weergegeven in Afbeelding 1.4 Fasen en deelproducten innovatietraject. Daaronder volgt een opsomming van de opgeleverde documenten per fase.



Afbeelding 1.4 Fases en deelproducten innovatietraject



De onderzoeksactiviteiten borduren op elkaar voort. Gedurende het innovatietraject is op drie momenten de beschikbare kennis afgetapt en toegepast in een ontwerp-aanpak ('uitvoerbaarheidstoets') die vervolgens is besproken in een setting met beheerder, dijkversterkingsproject en innovatieproject (Aftapmoment Meanderende Maas).

### Fase I: potentie van de aanpak

- Plan van Aanpak Subsidie aanvraag. 'Naar een geohydrologische benadering voor het berekenen van de pipingopgave' [1];
- (#1) deelproduct 1: Uitvoerbaarheidstoets I [2]  
In dit deelproduct is beschreven dat het meenemen van de geohydrologische aanpak potentie heeft en een grote invloed kan hebben op de versterkingsopgave.

### Fase II: het fundament van de aanpak

- (#2) deelproduct 2: Faalpad en grenstoestandsfuncties [3]  
In dit deelproduct is beschreven hoe de geohydrologische informatie gebruikt wordt in de (reguliere) sterktemodellen van het Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium (BOI);
- (#3) deelproduct 3: Kwantificering Onzekerheden [4]  
In dit deelproduct zijn de geohydrologische modellen geüpdatet en is een 95 %-waarde van de stijghoogte afgeleid.
- (#4) deelproduct 4: Uitvoerbaarheidstoets II [5]  
Met de in deelproduct 3 afgeleide stijghoogte is bepaald wat het effect is op de pipingopgave. In dit deelproduct is aangetoond dat de methode werkt en dat eenvoudig vlakdekkende sterktesommen gemaakt kunnen worden. Hierbij hoort de volgende zelfstandig leesbare bijlage:
  - notitie verkenning probabilistische pipinganalyse\_PGI Piping [6].

### Fase III: praktische uitwerking van de aanpak

- (#5) deelproduct 5: Kwantificering Onzekerheden Stijghoogte [7]  
In dit deelproduct is de onzekerheden aanpak aangescherpt en is verder gewerkt aan het afleiden van een 95 %-waarde van de stijghoogte. Hierbij horen de volgende zelfstandig leesbare bijlagen:
  - hoogwatergolf geohydrologisch model. Bijlage bij deelproduct 5 [8];
  - beschrijving referentie grondwatermodel, zelfstandig leesbare bijlage bij deelproduct 5 [9];
- (#6) deelproduct 6, Uitvoerbaarheidstoets III [10]  
In dit deelproduct is in kaart gebracht wat de geüpdatete stijghoogte betekent voor de pipingopgave in het projectgebied van Meanderende Maas en zijn aanbevelingen gedaan voor de toepassing van de aanpak. Hierbij horen de volgende zelfstandig leesbare bijlagen:
  - notitie bruikbaarheid voor macrostabiliteit en heaveschermen [11];
  - terugschrijdende erosie en voorland: enkele D-Geo Flow analyses [12].

## 1.5 Doelgroep en leeswijzer

Dit rapport is een samenvatting geschreven als afronding van het innovatieproject. Doelgroep zijn onze collega's in de HWBP-community. In hoofdstuk 2 wordt beschreven wie op welke wijze betrokken is bij de tot stand koming van de geohydrologische aanpak voor piping. In hoofdstuk 3 wordt een samenvatting gegeven van de ontwikkelde aanpak, waarbij verwijzingen naar de achtergrondrapporten zijn gegeven voor de mensen die meer detail en diepgang zoeken. In hoofdstuk 4 worden de voorlopige aanbevelingen ten aanzien van verdieping en doorwerking van de aanpak beschreven. In hoofdstuk 5 tot slot vindt u de referenties waarvan gebruik is gemaakt.

# 2

## MEEGEWERKT AAN DE TOT STANDKOMING

In dit hoofdstuk beschrijven we met behulp van welke personen de geohydrologische aanpak tot stand is gekomen. Dit is geen uitputtende beschrijving maar wel een compleet overzicht van de belangrijkste sleutelrollen in het project.

### 2.1 Projectteam

Opdrachtgever aan waterschap Aa en Maas is de programmadirectie van het HWBP. Opdrachtgever aan het innovatieproject is de directie van Waterschap Aa en Maas.

Tabel 2.1 Overzicht opdrachtgevers

Opdrachtgever	Naam
namens HWBP	Diederik Bijvoet
namens Waterschap Aa en Maas	Fer Kalis

Tabel 2.2 Uitvoerend projectteam

Rol	Naam
projectmanager	Martine Brinkhuis
technisch manager	Jacco Hoogewoud
beheerder en kennis, Waterschap Aa en Maas	Kees Jan Leuvenink
<b>Kernteam</b>	
data	Heleen Niele
geotechniek en dijkontwerp	Guido van Rinsum, Rick Veenhof
geohydrologie	Hendrik Kok, Marc Steenvoorden, Margrietha Bor
onzekerheden aanpak	Heleen Niele

De specialistenpool is gedurende het project betrokken geweest als verdiepend sparringpartner op hun specialisatie. Soms in interne kwaliteitsborging op producten in de vorm van collegiale review, soms puur om mee te denken.

Tabel 2.3 Specialisten

<b>Schil: specialisten pool</b>	
piping en geohydrologie	Hendrik Meuwese
piping en probabilistiek	Wim Kanning
geologie en onzekerheden	Martin Knotters
geotechniek en dijkontwerp	Hizkia Trul

Een aantal specialisten dat niet in het projectteam betrokken was maar die wel hun bijdrage hebben geleverd in de vorm van specifiek advies of consultatie is weergegeven in tabel 2.4.

Tabel 2.4 Specialisten advies c.q. consultatie

<b>Specifiek advies c.q. consultatie</b>	
D-GeoFlow analyses: review uitgevoerd namens Deltares	Vera van Beek, Esther Rosenbrand
Hydr. rvw tijdsafhankelijke afvoergolf: advies geformuleerd namens ADO	Alfons Smale

## 2.2 Interne kwaliteitsborging: Commissie van betrokken Experts

Voor het borgen van de kwaliteit van de methodeontwikkeling is gewerkt met een beslis-ondersteunende commissie van experts ('commissie van betrokken experts'). Een team van vier op persoonlijke titel gevraagde deskundigen die een vakgebied en/of krachtenveld goed overzien en gedurende het hele project meedenken en meesturen op inhoud.

Tabel 2.5 Commissie van betrokken experts

<b>Betrokken experts</b>	<b>Aandachtspunt</b>
Ruben Jongejan	veiligheidsbenadering en probabilistiek
Henk van Hemert	geotechniek en dijkontwerp
Ane Wiersma	geologie en (gebrek aan) data
Henk Weijers	communicatie en draagvlak

Dit team van vier is aangevuld met drie personen om de inhoudelijke betrokkenheid van het HWBP en het Waterschap te borgen.

Tabel 2.6 Aanvulling commissie van betrokken experts

<b>Inhoudelijk betrokken</b>	<b>Namens</b>
Kees Jan Leuvenink (geotechniek)	Waterschap Aa en Maas
Frank van der Bolt (geohydrologie)	Waterschap Aa en Maas
Huub de Bruijn	HWBP

De bovengenoemde zeven personen vormden samen de Commissie van betrokken Experts (CvE). Deze commissie speelde bij de methodische beslismomenten een belangrijke rol. Zij kwam bij de start van een nieuwe fase samen met het projectteam en stelde de te hanteren uitgangspunten vast. Na afloop van een onderzoeksfase adviseren zij over verbeterpunten, accenten en aanbevelingen voor de volgende fase.

De vier betrokken experts zijn persoonlijk en inhoudelijk geïnteresseerd. Ze hoeven niet het belang van hun moederorganisatie te vertegenwoordigen maar mogen uiteraard wel hun netwerk benutten. De drie inhoudelijk betrokkenen namens het Waterschap en HWBP konden volledig meedenken, maar hielden ook de mogelijkheid om vanuit het belang van hun organisatie te redeneren. Waar afsluitend van een discussie aan de 4 leden van CvE om hun inhoudelijk advies werd gevraagd, werd aan de andere drie hun reflectie vanuit Aa en Maas en/of HWBP gevraagd.

De verantwoordelijkheid voor de besluiten lag te allen tijde bij het projectteam, te weten de technisch manager en projectmanager van het innovatieproject. De inhoudelijke deelproducten zijn steeds vrijgegeven door de projectmanager na consultatie van de commissie van Experts en controle door de technisch manager.

## 2.3 Kennisdeling en draagvlak

Om te werken aan kennisdeling en aan draagvlak in de HWBP-community zijn klankbordbijeenkomsten georganiseerd, is een groep samengesteld met als doel externe kwaliteitsborging en zachte landing na afloop, wordt twee maal een artikel geplaatst in Land+Water (juli 2020 en jan 2021) en is regelmatig contact gehouden met de begeleidingsgroep van het HWBP (Diederik Bijvoet, Josan Tielen, Christian Slot).

Afbeelding 2.1 Illustratie bij het artikel in Land+Water nummer 6/7 juli 2020. Illustrator Bas Raven



### Klankbordgroep

Op drie momenten gedurende de looptijd van het innovatieproject zijn klankbordbijeenkomsten georganiseerd. Doel was het met collega-waterkeringbeheerders van gedachten wisselen over de toepasbaarheid van de ontwikkelde aanpak. De eerste twee bijeenkomsten vonden plaats in april en in mei, toen de tussenresultaten bekend waren. De derde in november toen het project in afronding was. Opkomst was goed, de interesse was groot, de gesprekken heel inhoudelijk. Goede mix van geohydrologen en geotechnici.



### Zachte landing van de aanpak na afloop van het innovatieproject: consultatie op doorwerking

Externe kwaliteitsborging was met name gericht op het inhoudelijk draagvlak voor de breed toepasbare methode, en op een zachte landing ervan na afloop van dit innovatietraject.

Tabel 2.7 consultatie op doorwerking

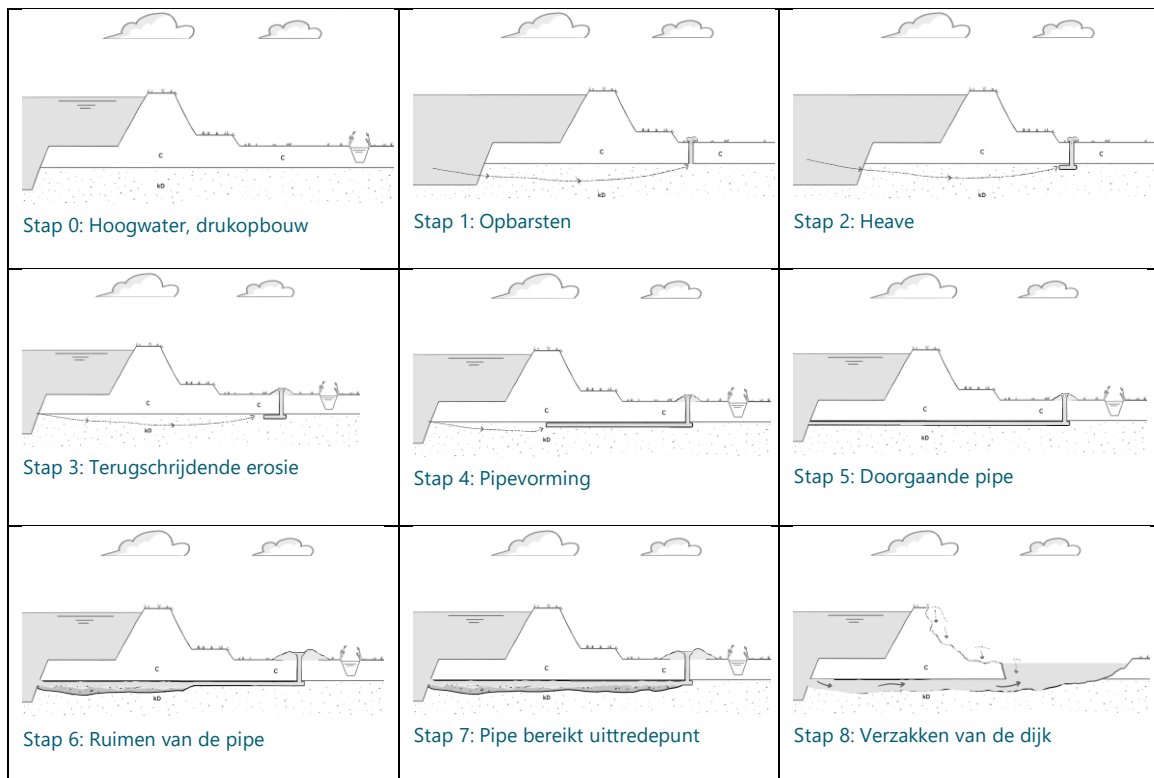
Consultatie op doorwerking	Focus op draagvlak:
Alex Roos	RWS-WVL, het wettelijk beheer- en ontwerpinstrumentarium (BOI)
Goaitske de Vries	HWBP, innovatie coördinator
Laura Taal	Waterschap Rivierenland, beoordeling en beleid waterkering

# 3

## DE AANPAK

De basis van de aanpak wordt geschetst aan de hand van het faalpad voor piping en de grenstoestandsfuncties voor de verschillende deelmechanismen. Grenstoestandsfuncties zijn een modelmatige beschrijving van de fysica en vormen de basis voor probabilistische en semi-probabilistische beoordelingen. Bij probabilistische beoordelingen worden grenstoestandsfuncties gevoed met de kansverdelingen van de verschillende onzekere modelparameters. Bij semi-probabilistische beoordelingen worden grenstoestandsfuncties gevoed met veilige waarden van de onzekere modelparameters, zogenaamde rekenwaarden. Het faalpad voor piping ziet er als volgt uit:

Afbeelding 3.1 Faalpad voor piping in beeld



De stappen 0 tot en met 3 staan centraal bij de binnen dit innovatieproject ontwikkelde methode. De intrede van rivierwater in een watervoerend pakket en de toename van de druk onder een deklaag (stap 0) kan met een regionaal grondwaterstromingsmodel worden beschreven. Opbarsten, heave en doorgroei van een pipe/overschrijding van het kritieke verval (stappen 1, 2 en 3) kunnen worden gemodelleerd door de combinatie van een regionaal grondwaterstromingsmodel met de BOI-sterktemodellen voor de gedetailleerde beoordeling.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Koppeling met complexere modellen (bijvoorbeeld D-GeoFlow) is uiteraard ook een mogelijkheid. Voor een goed begrip en brede toepasbaarheid wordt echter zoveel mogelijk aangesloten op de relatief eenvoudige rekenregels uit het WBI2017/BOI.

De stijghoogtes die zijn berekend met het geohydrologisch model worden gebruikt als invoerparameters van dit model.

Voor gedetailleerde beoordeling voor Stabiliteit Piping & Heave (STPH) wordt in het WBI2017 [13] de volgende, samengestelde grenstoestandsfunctie gebruikt:

$$Z = \max(Z_{uplift}, Z_{heave}, Z_{pip}) \quad (1)$$

Waarin:

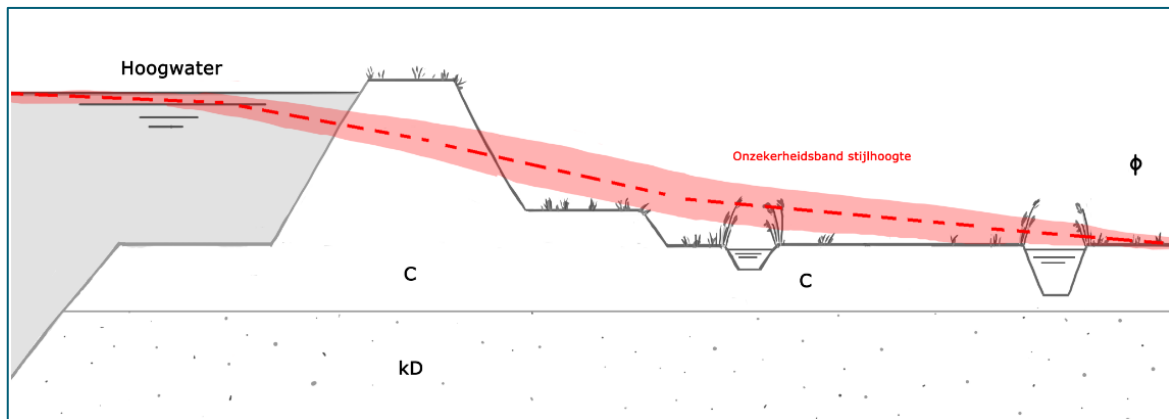
- $Z_{uplift}$  Grenstoestandsfunctie voor opbarsten;  $Z_{uplift} < 0$  betekent het optreden van opbarsten;
- $Z_{heave}$  Grenstoestandsfunctie voor heave;  $Z_{heave} < 0$  betekent het optreden van heave;
- $Z_{pip}$  Grenstoestandsfunctie voor piping;  $Z_{pip} < 0$  betekent het overschrijden van het kritieke verhang, ofwel: het optreden van een dusdanig verhang dat de pipe kan doorgroeien.

Dit betekent dat alle mechanismen moeten optreden om tot een overstroming door piping te leiden of, andersom, dat geen overstroming optreedt als een van de deelmechanismen niet optreedt. De belastingparameter voor deze grenstoestandsfuncties is de stijghoogte.

### Karakteristieke waarde van de stijghoogte

De stijghoogte vormt dus de 'linking pin' tussen de al bestaande (semi-) probabilistische aanpak voor sterkte en de vernieuwde aanpak voor bepalen van de belasting met behulp van regionale grondwatermodellen. Het (semi-)probabilistische karakter van de sterkteberekeningen maakt het nodig om de karakteristieke waarde (95 %-waarde) voor de stijghoogte af te leiden. De essentie van de innovatie was daarmee: *'het ontwikkelen van een aanpak voor het kwantificeren van de model- en parameter onzekerheden rondom de met een regionaal grondwaterstromingsmodel berekende stijghoogtes.'*

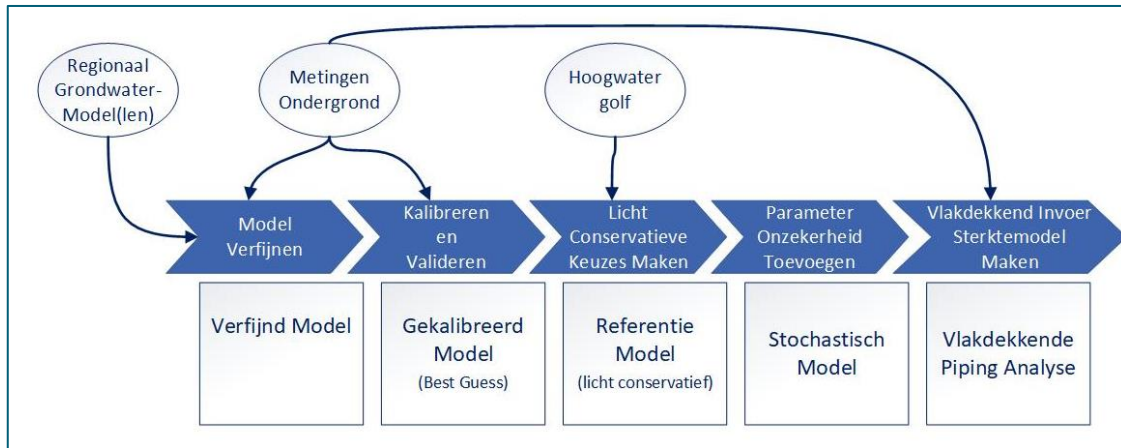
Afbeelding 3.2 De sterktemodellen willen weten hoe zeker je bent van de berekende stijghoogte



De aanpak die resulteert bestaat uit achtereenvolgens het: vijf stappen worden doorlopen:

- 1 (om)bouwen van een geohydrologisch model voor het gehele projectgebied;
- 2 kalibreren van het model op de beschikbare metingen;
- 3 het bouwen van een voor hoogwater geschikt licht conservatief model;
- 4 kwantificeren van onzekerheden: stochastisch model;
- 5 uitvoeren van vlakdekkende sterkteberekeningen voor Piping met het Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium.

Afbeelding 3.3 Stroomschema voor de te doorlopen stappen bij de geohydrologische aanpak voor piping



In onderstaande paragraaf beschrijven we het toepassingsgebied voor deze aanpak. In de daarop volgende paragrafen lichten we elke stap in de aanpak toe.

### 3.1 Toepassingsgebied voor de aanpak

De ontwikkelde geohydrologische aanpak is met name van grote toegevoegde waarde voor dijktrajecten met een forse piping opgave, een ruimtelijk variabel landschap (bijvoorbeeld meanderende rivier), veel voorland en een zandpakket afgedekt met een kleilaag. Een groot deel van de dijken in het rivierengebied dus.

### 3.2 Geohydrologisch referentiemodel (om)bouwen

Het startmateriaal bij deze aanpak is het regionale geohydrologische model dat vrijwel elk waterschap al heeft. Bij waterschap Aa en Maas is dat het **GR**ondwatermodel **Aa & Maas** (GRAM2.0). Dit model is gekalibreerd en geschikt voor grondwater vragen over 'gemiddelde' grondwaterstanden en rekt met tijdstappen van 1 dag de periode 1990-2018 door.

Dit grondwatermodel is voor de geohydrologische aanpak voor piping geschikt gemaakt voor het berekenen van stijghoogtes ten behoeve van piping analyses. Daartoe zijn de volgende aanpassingen gedaan:

- uitbreiden ten noorden van de Maas;
- schematiseren hoogwatergolf in de Maas.

In rapport 'Beschrijving referentie grondwatermodel' [9] vindt u een complete beschrijving van de uitgevoerde gevoeligheidsanalyses, kalibraties en validaties. In dit hoofdstuk vatten we de hoofdpunten per genoemd onderwerp samen.

#### Uitbreiden ten noorden van de Maas

Omdat GRAM2.0 ten noorden van de Maas eindigt, is het voor berekeningen rond de waterkeringen noodzakelijk om het model richting het noorden uit te breiden. Daarom zijn de modellen GRAM2.0 en MORIA4.3 (grondwatermodel van Waterschap Rivierenland) gekoppeld langs de waterschapsgrens van Waterschap Aa en Maas en Waterschap Rivierland. Het lagenmodel van Regis is uitgangspunt geweest om de twee modellen technische aan elkaar te 'knopen'.

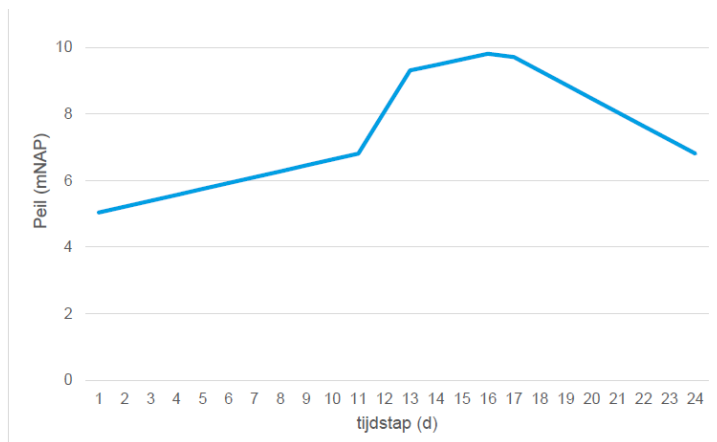
### Schematisering aanscherpen

Met oog op het gebruik van het model tijdens hoogwater zijn een aantal aanpassingen gedaan, zoals de weerstand van het zomerbed van de Maas, doorlaatvermogen van watervoerend pakket, weerstand van de deklaag en schematisatie van de ontwateringsmiddelen.

### Hoogwatergolf

Omdat gerekend wordt met een niet-stationaire situatie is een hoogwatergolf afgeleid. Daarbij is afstemming gezocht met het ADO (Adviesteam Dijk Ontwerp) bij het HWBP. In de memo 'Hoogwatergolf geohydrologisch model' [8] is een gevoeligheidsanalyse op de piek en vorm van de hoogwatergolf gedaan. Hieruit bleek dat de piekwaterstand belangrijker is dan de vorm voor de afvoergolf voor de stijghoogte. De combinatie van piekwaterstand met standaard-afvoergolf levert de grootste stijghoogtes op. In het basis geohydrologisch model is daarom gerekend met de Waterstand bij Norm en een standaard-afvoergolf.

Afbeelding 3.4 Het verloop van de hoogwatergolf in het referentiemodel



## 3.3 Kalibreren op de beschikbare metingen

Kalibratie en validatie is nader toegelicht in [1]. Hieronder volgt een bondige samenvatting.

Het aangepaste referentiemodel is stationair gekalibreerd en niet-stationair gevalideerd.

Het referentiemodel is stationair gekalibreerd met behulp van het programma PEST voor de volgende parameters:

- 1 de deklaagweerstand;
- 2 de weerstand aan de onderzijde van het 1<sup>e</sup> watervoerende pakket;
- 3 de kD van het 1<sup>e</sup> watervoerende pakket;
- 4 de conductance van de legger en detailwaterlopen.

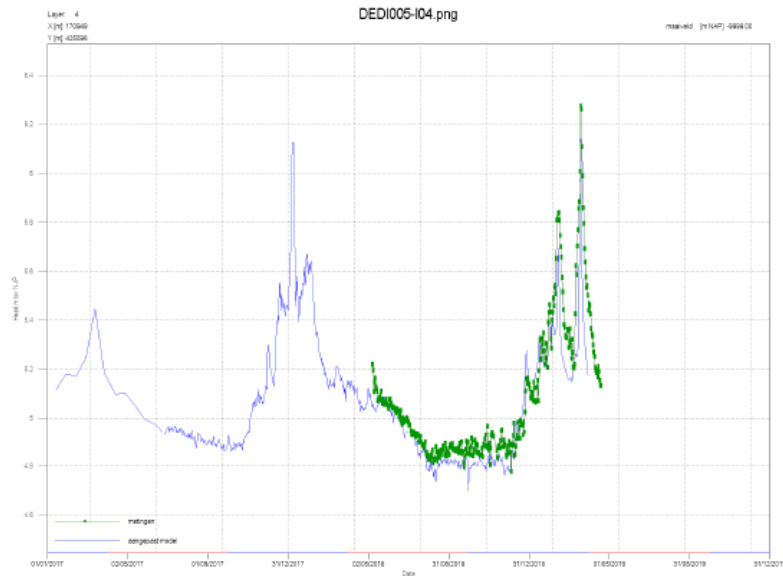
De parameteraanpassingen zijn steeds vlakdekkend toegepast. Voor deze vier parameters bleek het initiële model al goed te presteren. [9]

Vervolgens vond de niet-stationaire validatie plaats. Op basis van gemeten grondwaterstanden is het model gevalideerd. Hierbij wordt met name gekeken hoe goed het grondwatermodel de grondwaterstand bij pieken in het Maaspeil simuleert. Er zijn geen meetreeksen beschikbaar voor hoge waterpeilen zoals in 1993 of 1995. Daarom is naar de kleine pieken in de winter van 2018/2019 gekeken.



Er is een validatieset gemaakt met peilbuizen en met data uit het meetnet van waterschap Aa en Maas zoals opgeleverd bij Evaluatie grondwatermeetnet Ravenstein Lith<sup>1</sup>. De grondwaterstand blijkt bij pieken in het Maaspeil goed te worden berekend. Ter illustratie zijn de tijdstijghoogtelijnen voor een locatie weergegeven in onderstaande figuur.

Afbeelding 3.5 Tijdstijghoogte lijnen voor een locatie tijdens het hoogwater van 2018. In blauw is de gesimuleerde stijghoogte weergegeven en in groen de gemeten. Voorlanden stonden destijds slechts deels onderwater: op aantal plekken waterplassen



Te zien is dat de pieken behoorlijk goed overeenkomen, dat geeft vertrouwen in het model. Omdat het model gebouwd is om situaties te simuleren die extremer zijn dan de hoogst beschikbare hoogwatermetingen is de onzekerheid rond stijghoogtevoorspellingen bij extreme hoogwaters niet goed te bepalen op basis van waarnemingen alleen. Daarom is een stochastisch model ontwikkeld.

### 3.4 Kwantificeren van onzekerheden: stochastisch model

*De omgang met onzekerheden is nader toegelicht in [7]. Hieronder volgt een bondige samenvatting.*

Onzekerheden vormen een integraal onderdeel van de BOI-systematiek. In de semi-probabilistische benadering worden modellen, voor bijvoorbeeld opbarsten, heave en piping, gevoed met zogenaamde karakteristieke waarden. Dit zijn doorgaans waarden met een onderschrijdingskans van 95 % voor belastingparameters (met een negatieve invloed), ook wel de P95 genoemd. Voor sterkteparameters (met een positieve invloed op de grenstoestand) wordt doorgaans een 5 % onderschrijdingswaarde gebruikt. De stijghoogte is een bepalende (belasting)parameter in de sterktemodellen, en hier wordt daarom de karakteristieke waarde (P95) van gezocht bij een gegeven hoogwater.

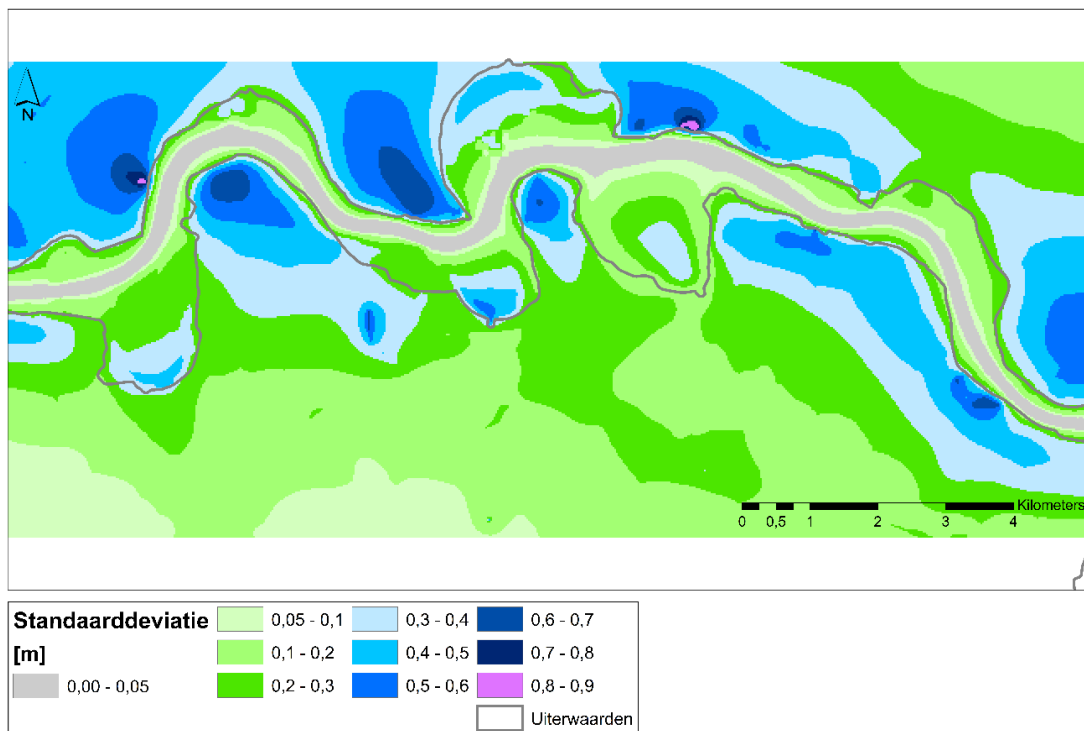
De in deze geohydrologische aanpak gekozen omgang met onzekerheden gaat uit van een situatie waarin er weinig stijghoogtemetingen bij hoogwater beschikbaar zijn. Dat is (nu nog) in veel situaties het geval: bij Meanderende Maas staat al een aantal jaren een goed meetnet, maar er is nog geen hoogwater geregistreerd waarbij de uiterwaarden zijn ondergelopen. Omdat in zo'n geval statistische analyses ('klassiek' of 'Bayesiaans') niet haalbaar zijn door het gebrek aan metingen bij hoogwater, is gekozen voor een combinatie van expert judgement met probabilistische berekeningen. De leemtes in de probabilistische analyses (geen modelonzekerheid) zijn ingevuld op basis van expert judgement.

<sup>1</sup> Berendrecht Consultancy, Evaluatie grondwatermeetnet Meanderende Maas, traject Ravenstein Lith, kenmerk 2019.001, d.d. 31 mei 2019.

Er is een stochastisch model opgesteld waarin de belangrijkste parameteronzekerheden als stochastische variabelen zijn meegenomen. De meeste parameters zijn ruimtelijk 100 % gecorreleerd veronderstelt, de dikte van de deklaag is ruimtelijk gevarieerd in een random gepositioneerd schaakbordpatroon. Binnen elk vak van het schaakbord is overal dezelfde waarde aangehouden. De vakken zijn iedere run verplaatst. Voor de overige 'gevoelige parameters' (dat wil zeggen parameters waardoor de berekende stijghoogtes wezenlijk worden beïnvloed) zijn licht veilige waarden gebruikt en voor de ongevoelige parameters gemiddelde waarden. Alle onzekerheden die niet expliciet zijn gemodelleerd zijn gevat in een modelonzekerheidsterm.

De berekende onzekerheid is ruimtelijk variabel. In de binnenbochten van de dijk-'meanders' is de onzekerheid in de berekende stijghoogten aanzienlijk groter dan in de buitenbochten. In de binnenbocht is er toestroming van meerder kanten. Dit betekent dat een verandering in parameterwaarden extra doorwerkt in het effect op de stijghoogte. Bij buitenbochten geldt het omgekeerde. Verder zit bij grote uiterwaarden de meeste onzekerheid vaak buitendijks, maar meestal ligt de grootste onzekerheid een paar honderd meter binnendijks. Onder de dijk is de onzekerheid vaak 'gemiddeld' en bij sommige trajecten zelfs expliciet kleiner dan in de omgeving. Dit komt onder andere doordat dijken zich (relatief ten opzichte van de spreidingslengte) vaak dicht bij het zomerbed van de rivier bevinden. Op grote afstand van de rivier (enkele kilometers) neemt de onzekerheid duidelijk weer af tot een waarde kleiner dan 10-20 cm.

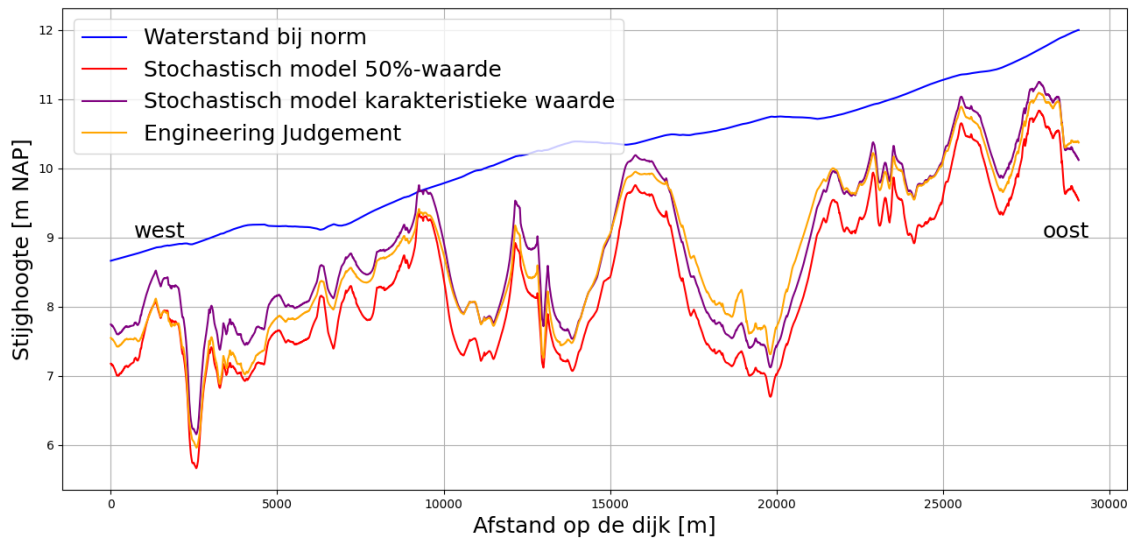
Afbeelding 3.6 Standaarddeviatie van de stijghoogte in het stochastisch model door expliciet gemodelleerde parameteronzekerheden



### 3.4.1 95 %-waarde van de stijghoogte

Op grond van stochastisch model inclusief modelonzekerheid is de 95 %-waarde van de stijghoogte berekend, als karakteristieke waarde. Ter controle is door geohydrologen een behoudend (conservatief) geohydrologisch model opgesteld op basis van engineering-judgement. De karakteristieke waarden uit het stochastisch model komen redelijk goed overeen met de stijghoogtes uit een engineering-judgement model dat is opgesteld ter controle ('sanity-check'). Dit geeft vertrouwen in het stochastisch model.

Afbeelding 3.7 Verloop onzekerheid stijghoogte in langs richting van de dijk. Paars lijn, karakteristieke waarde, is de in de aanpak gebruikte 95 %-waarde van het stochastisch model



De karakteristieke waarden zoals bepaald met het stochastisch model zijn geschikt als uitgangspunt voor semi-probabilistische analyses van opbarsten, piping en heave. De verwachtingswaarde (50 %) van de stijghoogte en de karakteristieke waarde liggen over het algemeen 40 tot 80 cm uit elkaar. Dit geeft gevoel voor wat je nog zou kunnen winnen met het verkleinen van onzekerheden. Bijvoorbeeld na een gemeten hoogwater.

### 3.5 Overzicht omgang met onzekerheden

We hebben in het project belangrijke stappen gezet om onzekerheden expliciet mee te nemen maar er blijven altijd restpunten over. In deze notitie wordt een overzicht gegeven van hoe daar mee is omgegaan in de casus Meanderende Maas. We adviseren om bij het lezen van deze notitie ook *deelproduct 5, kwantificering onzekerheden stijghoogte* bij de hand te houden.

Er zijn in het innovatieproject drie typen onzekerheden onderscheiden. Het eerste type is parameteronzekerheid die als stochast in het stochastisch model is meegenomen. Het tweede type noemen we schematiseringonzekerheid; dat wil zeggen dat we een aantal scenario's los onderzocht hebben en vervolgens een conservatief scenario als uitgangspunt van het stochastisch model hebben gekozen. Als er geen significant verschil tussen de scenario's was, zoals bij een klein gat in de deklaag, hebben we het model niet aangepast. Tot slot is het derde type onzekerheid de modelonzekerheid. Deze staat voor alle onzekerheden die we niet expliciet onderzocht hebben en de onzekerheden die voortkomen uit het stochastisch model zelf; oftewel versimpelingen van de werkelijkheid. In onderstaande tabel worden deze drie types verder uitgewerkt.

Tabel 3.1 Parameteronzekerheden als stochast

	Parameter	Variatiecoëfficiënt
onzekerheden	- dikte deklaag	0,5
	- weerstand deklaag	0,4
	- dikte eerste scheidende laag	0,1
	- doorlatendheid eerste scheidende laag	0,4
	- dikte eerste wvp	0,1
	- doorlatendheid eerste wvp	0,5
	- dikte tweede wvp	0,1
	- doorlatendheid tweede wvp	0,5
	- intredeweerstand waterlopen	0,4
	- intredeweerstand zomer- en winterbed	0,4
	- specifieke bergingscoëfficiënt	0,5
methode	bovenstaande onzekerheden zijn expliciet in het stochastisch model verwerkt met een Monte-Carlosimulatie. Iedere parameter heeft hierbij een variatiecoëfficiënt gebaseerd op het BOI meegekregen, die in de rechter kolom genoemd staan	
conservatieve keuzes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ook parameters in de watervoerende pakketten die goed gekalibreerd zijn in de stationaire kalibratie hebben een variatiecoëfficiënt uit het BOI, dit leidt tot een overschatting van hun onzekerheid</li> <li>- de lagen binnen één laag (bijvoorbeeld een watervoerend pakket) zijn per run als 100 % gecorreleerd beschouwd. In werkelijkheid zijn ze dat niet en zouden ze tot een lagere onzekerheid uitmiddelen</li> <li>- behalve de deklaagweerstand zijn alle parameters 100 % ruimtelijk gecorreleerd. Voor de watervoerende pakketten leidt dit tot een overschatting van de onzekerheid, omdat deze zich als weerstand in serie gedragen</li> <li>- de deklaagweerstand kon niet goed gekalibreerd worden. Daarom is op basis van boringen in het voorland een dunne diklaag afgeleid en in het achterland een dikke. Dit levert ten aanzien van de stijghoogte in het achterland een conservatief model op. Dit is apart gecontroleerd, zie schematiseringonzekerheid</li> </ul>	
niet-conservatieve keuzes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- als de deklaag volledig afwezig is, is de weerstand van geulen op tien dagen gezet. Het is mogelijk dat bij hoogwater deze weerstand lager is. In de planfase is twee dagen gehanteerd</li> <li>- in de uiterwaarden is de afleiding van de deklaagweerstand niet conservatief, omdat er (nog) geen methode gehanteerd is om een dunne deklaag af te leiden. In de planfase wordt dit wel gedaan</li> <li>- een aantal scheidende lagen zijn niet terug te zien in dinoboringen. In de planfase is daarom op sommige plekken de eerste scheidende laag verwijderd</li> </ul>	

Tabel 3.2 Schematiseringsonzekerheid

op basis van een gevoeligheidsanalyse is een conservatieve basisschematisering voor het geohydrologisch model opgesteld. Deze is vervolgens nog getoetst op een aantal onzekerheden

onzekerheden	<ul style="list-style-type: none"> <li>- geologische scenario's in het achterland en voorland</li> <li>- afwateringsmiddelen als slootjes en dergelijke</li> <li>- gat in de deklaag in het voorland door fauna</li> <li>- vorm en piek van hoogwatergolf</li> <li>- stromingsrichting onder de dijk: is niet altijd haaks op de dijk</li> </ul>
methode	de scenario's zijn afzonderlijk onderzocht. De resultaten zijn indien nodig zo in de basisschematisering verwerkt, dat deze conservatief is
verwerking in stochastisch model	<ul style="list-style-type: none"> <li>- de geologische scenario's wijzen uit dat de basisschematisering al conservatief is</li> <li>- een (klein) gat in de deklaag heeft een verwaarloosbaar effect op de stijghoogte. Dit scenario is daarom niet in de schematisering verwerkt. We gaan ervan uit dat er geen grootschalige erosie van klei in het voorland op grote afstand van het zomerbed plaatsvindt</li> <li>- er is een conservatieve hoogwatergolf gekozen, zie paragraaf 1516071554.0.413411816</li> <li>- de stromingsrichting is bij terugschrijdende erosie (Sellmeijer) haaks op de dijk verondersteld. Dat is een conservatieve keuze</li> </ul>
conservatieve keuzes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- we hebben het verlagende effect van opbarsten niet meegenomen in het bepalen van de stijghoogteverdeling</li> <li>- binnen het interessegebied snijden geen waterlopen in het eerste watervoerende pakket. Daardoor wordt de hoogwatergolf minder gedempt</li> </ul>

Tabel 3.2 Modelonzekerheid

onder modelonzekerheid valt alle onzekerheid die niet in de parameteronzekerheden of schematiseringsonzekerheden is meegenomen. Deze staan bij de kopjes niet-conservatieve keuzes, maar worden (deels) weer gecompenseerd door de conservatieve keuzes. De modelonzekerheid wordt na de Monte-Carlosimulatie opgeteld bij de daarin berekende onzekerheid van de stijghoogte

onzekerheden	<ul style="list-style-type: none"> <li>- onzekere parameters worden behandeld als deterministische parameters</li> <li>- de ruimtelijke variabiliteit van parameters is versimpeld gemodelleerd. Die van de deklaag in een schaakbord patroon, die van de overige parameters is ruimtelijk als 100 % gecorreleerd verondersteld</li> <li>- er is aangenomen dat de stijghoogteverdeling normaal verdeeld is. Op een eindig aantal van 50 runs is een normaalverdeling gefit</li> <li>- darcy-stromingsvergelijking, numerieke fouten en ruimtelijke resolutie. Darcy veronderstelt een constante weerstand en werkt niet goed in onverzadigde grond. Ook veranderingen in het korrelskelet worden niet mee genomen</li> </ul>
methode	<p>de totale onzekerheid is ingeschat door twee onzekerheden met het response-surface model (10.000 Monte-Carloruns met alleen 100 % ruimtelijke correleerde parameters in kaart te brengen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- fout door aanname normaal verdeelde stijghoogteverdeling</li> <li>- fout van de parameters doorlaatbaarheid zomer/winterbed, doorlaatbaarheid waterlopen, weerstand scheidende laag, doorlatendheid tweede wvp, bergingscoëfficiënt</li> </ul> <p>van de berekende standaarddeviaties op de stijghoogte is ruimtelijk gezien het 95-percentiel genomen. Op basis van expert judgement is bepaald dat dit een conservatieve schatting van de modelonzekerheid oplevert. Mede omdat er al veel conservatieve keuzes in de basisschematisering besloten liggen</p>



---

onder modelonzekerheid valt alle onzekerheid die niet in de parameteronzekerheden of schematiseringsonzekerheden is meegenomen. Deze staan bij de kopjes niet-conservatieve keuzes, maar worden (deels) weer gecompenseerd door de conservatieve keuzes. De modelonzekerheid wordt na de Monte-Carlosimulatie opgeteld bij de daarin berekende onzekerheid van de stijghoogte

	daarnaast zijn de resultaten vergeleken met het maatgevend hoogwater en het expert judgement model. Deze duiden op een veilige karakteristieke stijghoogte. Tot slot weten we dat we nooit alle onzekerheden in het model kunnen verwerken, maar dat de modelonzekerheid niet groter is dan de bijdragen van de belangrijkste parameteronzekerheden: de deklaagweerstand en het doorlaatvermogen van het eerste watervoerende pakket (per stuk circa 35 cm).
resultaat	in totaal hebben we een modelonzekerheid aangenomen die normaal verdeeld is, additief en een standaarddeviatie van 22 cm heeft

### 3.6 Piping analyse en relatie met BOI

*De aanpak en resultaten van de piping analyse is nader toegelicht in [10]. Hieronder volgt een bondige samenvatting.*

Vanuit een behoefte om de ruimtelijke informatie zo lang mogelijk te bewaren rekenen we bij de aanpak de sterktesommen vlakdekkend door. Dat is niet een noodzaak: de berekende stijghoogtes kunnen ook heel goed de input zijn voor klassieke dwarsdoorsnede sommen. Dit is geïllustreerd in [5].

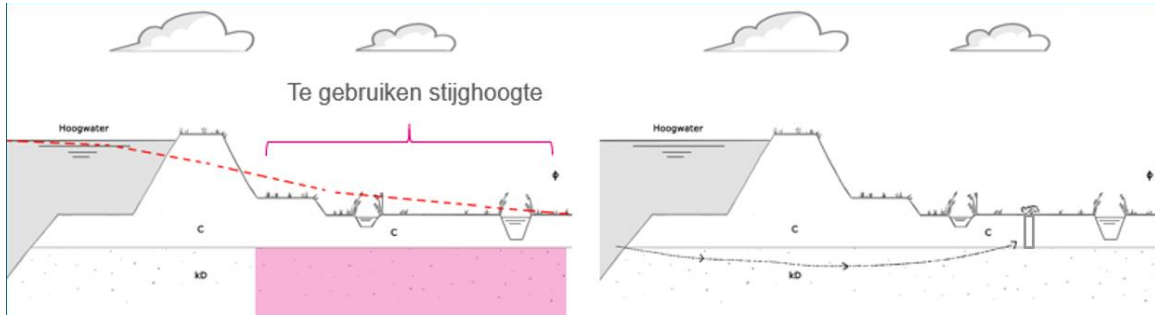
Per gridcel (5 bij 5 m) zijn invoerparameters bepaald (deklaagdikte, volumiek gewicht, et cetera) en is de analyse van de sterktevergelijkingen uitgevoerd. Het resultaat is een bovenaanzicht van het projectgebied waarin per gridcel weergegeven is of opbarsten of heave optreedt en wat het kwelweglengtetekort ten gevolge van terugschrijdende erosie is. Als voor één van de mechanismen geen falen optreedt is de dijk veilig.

Het relateren van de BOI rekenmodellen aan de berekende stijghoogtes is voor opbarsten en heave eenvoudig. Voor die mechanismen wordt bij het BOI gewerkt met een lokale stijghoogte (afbeelding 3.8 en 3.9). De rekenregel van Sellmeijer (berekening kritiek verval voor doorgaande pipegroei) gaat uit van een gefixeerd intredepunt. Aanvankelijk was ons idee dat ook hiervoor een pragmatische oplossing te gebruiken die al vaker is gebruikt en staat beschreven in de publicatie van POV-piping 'handreiking meetnetten en grondwaterstroming'. In deze publicatie wordt geschetst hoe je gebruik kunt maken van de stijghoogte ter plaatse van de buitenteen als bovenstroomse randvoorwaarde. We liepen echter op dit punt tegen een principiële discussie aan over de juistheid van deze aanpak.

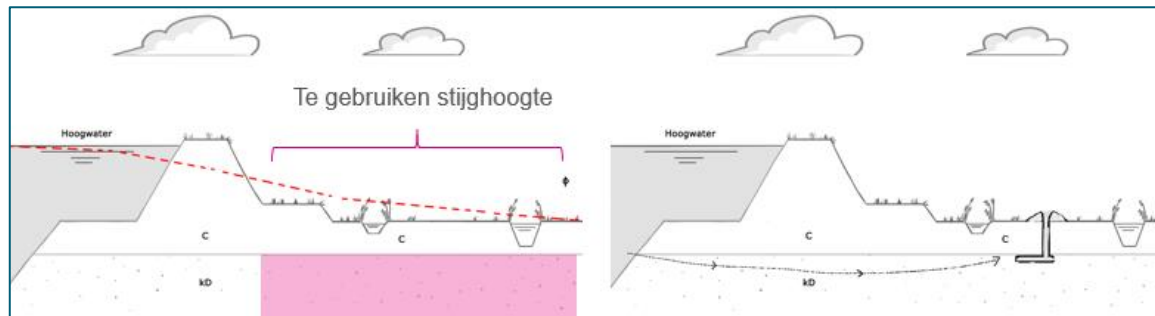
Daarom zijn eerst vanuit de theorie (veilige) benaderingen opgesteld hoe de Sellmeijer rekenregel geparametriseerd kan worden [3]. Vervolgens is een verificatie gedaan met enkele D-Geo Flow berekeningen [12]. Samenvatting hiervan vindt u in hoofdstuk 4. Bij de voorgestelde Geohydrologische Aanpak wordt de berekende stijghoogte aan de teen van de dijk als bovenstroomse randvoorwaarde opgelegd. Bij die berekende stijghoogte is dus het dempende effect van het volledige voorland meegenomen (afbeelding 3.10).

Voor Meanderende Maas hebben we op deze wijze kunnen onderbouwen dat het gebruiken van de met het geohydrologische model berekende stijghoogte (dus vóór opbarsten) als randvoorwaarde in de analytische Sellmeijer vergelijking in deze situatie veilig is.

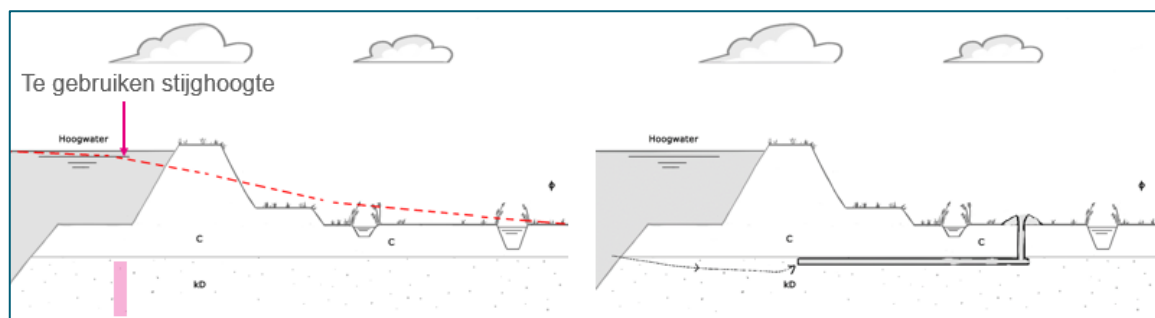
Afbeelding 3.8 Stijghoogtes koppelen aan sterktemodel: Opbarsten



Afbeelding 3.9 Stijghoogtes koppelen aan sterktemodel: Heave



Afbeelding 3.10 Stijghoogtes koppelen aan sterktemodel: Terugschrijdende erosie



De sterkte berekeningen zijn 2D, hoewel de vlakdekkende resultaten een 3D suggestie wekken. Het zijn (heel veel) 2D berekeningen van intredepunt tot uitredepunt. Dit geeft wel heel veel meer inzicht dan een aantal losse dwarsprofielen: Voor dijktrajecten langs een meanderende rivier en/of met gevarieerd voorland zie je dat er best veel variatie in belasting en sterkte is. Met het vlakdekkende overzicht is het beter mogelijk om (voor piping) homogene dijkvakken te bepalen.

In de berekeningen gaan we uit van stroomrichting haaks op de dijk, maar door het meanderende karakter van de rivier in het projectgebied van Meanderende Maas is dat lang niet altijd het geval. De aanwezige kwelweglengte is groter als de stroomrichting niet haaks op de dijk staat.

Verkennde berekeningen voor een locatie waarbij de stroomrichting zelfs onder 45 graden staat laten zien dat het berekende kwelweglengtetekort fors kleiner wordt als rekening gehouden wordt met stroming onder een hoek (van circa 28 m naar circa 9 m). We zien echter ook dat de stroomrichting variabel is met het verval over de waterkering en dus gedurende de duur van de hoogwatergolf. Dit was reden voor de dijkversterking Meanderende Maas om dit voornog slechts als incidenteel maatwerk en niet als algemene methode te gebruiken. Het onderwerp leent zich dus zeker wel voor toekomstige optimalisatie.

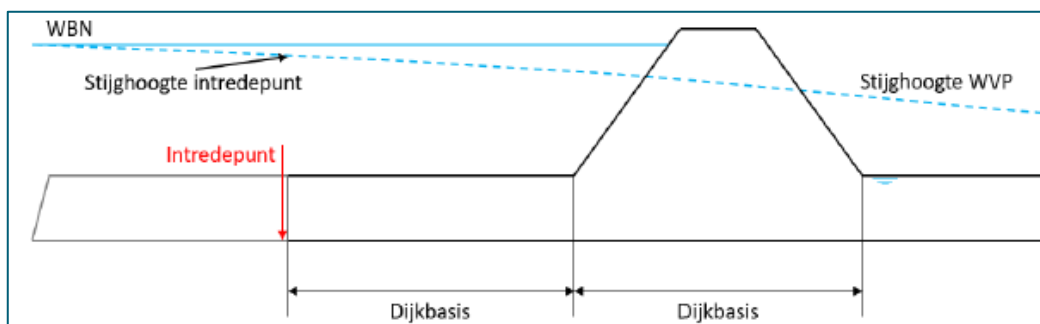
Een illustratie van de bruikbaarheid van de vlakdekkende presentatie is hieronder weergegeven voor de afvoergolf van 1995. In afbeelding 3.11 is het berekende opbarstrisico gecombineerd met de locaties waar in destijds kwel of zandmeevoerende wellen zijn geregistreerd. De wellen vallen goed samen met de locaties waar een grote kans op opbarsten is berekend.

Afbeelding 3.11 Berekende opbarstrisico gecombineerd met (k)wel locaties 1995

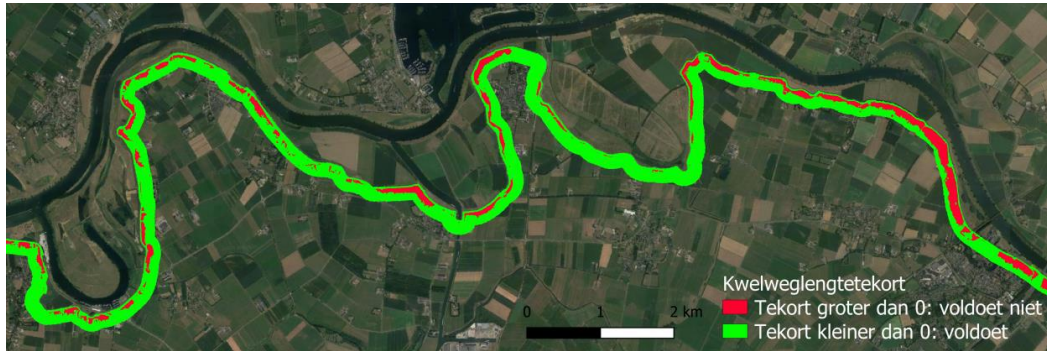


Met een gevoeligheidsanalyse bij uitvoerbaarheidstoets II is geïllustreerd dat het effect groot is van het verleggen van het intredepunt naar een afstand van 40 m (=ongeveer 1x de dijkbasis) verder richting de rivier.

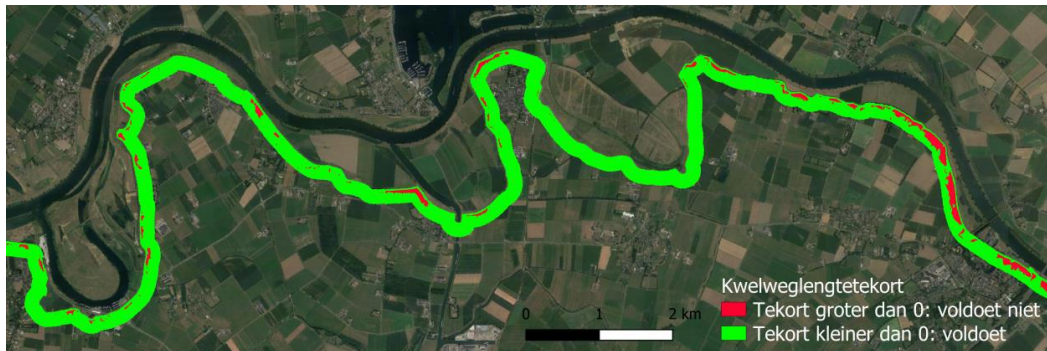
Afbeelding 3.12 Gevoeligheidsanalyse voor terugschrijdende erosie met intredepunt verder in voorland (één keer dijkbasis)



Afbeelding 3.13 kwelwegtekort intredepunt teen van de dijk



Afbeelding 3.14: Gevoeligheidsberekening Kwelwegtekort intredepunt op 40 m uit de teen van de dijk



### 3.7 Opbrengst

Voor de casus Meanderende Maas leidt de aanpak tot een beter onderbouwde en over het algemeen kleinere pipingopgave. Ten opzichte het Voorkeursalternatief uit de verkenningsfase van Meanderende Maas kunnen pipingschermen gemiddeld 4 m korter (gemiddeld 5 in plaats van gemiddeld 9 m diep) en de pipingbermen kunnen over het algemeen tussen de 10 en 30 m korter, van gemiddeld 70 m naar gemiddeld 40 tot 55 m, afhankelijk van waar je je intredepunt kunt leggen; 1x of 0x de dijkzate. Dit is slechts indicatie van de orde-grootte van de besparingen: wat dat betekent voor kostenbesparing hangt af van de uitwerking van het voorlopig ontwerp en definitief ontwerp voor dijkversterking Meanderende Maas in 2021. De keuze voor een grondberm of voor een verticale oplossing per dijkvak is van invloed op de omvang van de besparing die je bereikt met de innovatieve aanpak. Ook kunnen er locaties zijn waar het pipingprobleem zo klein geworden is dat de oplossing kan samenvallen met een berm die toch al nodig is vanuit macrostabiliteit, of dat heel andere oplossingen opeens in beeld komen zoals drainage of werken met de sterkte van het voorland<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Met voorlandverbetering wordt hier bedoeld het verlengen van de horizontale kwelweglengte met extra kleilaag voor buitenteen dijk.

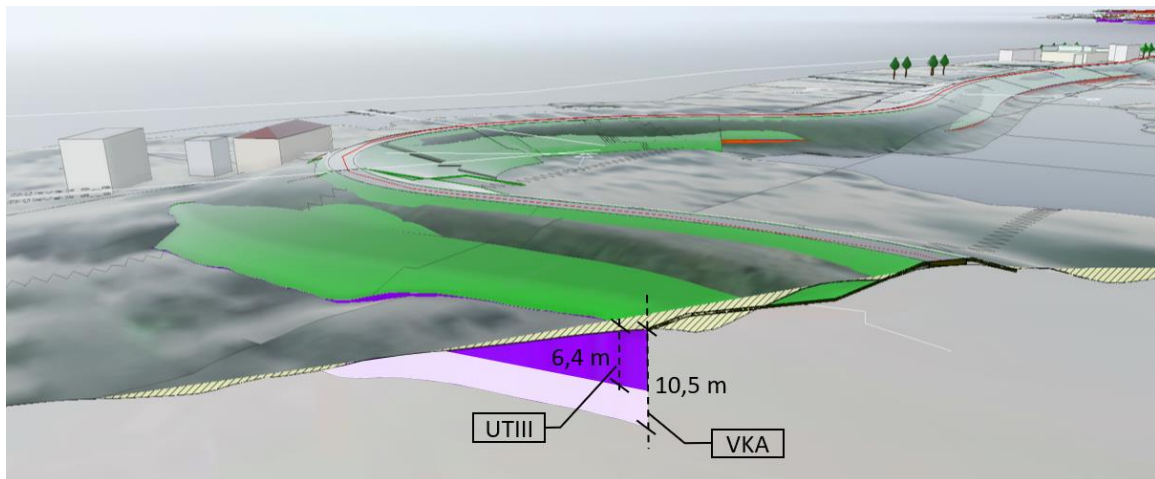


Afbeelding 3.15 Ligging van de voorbeeldlocaties

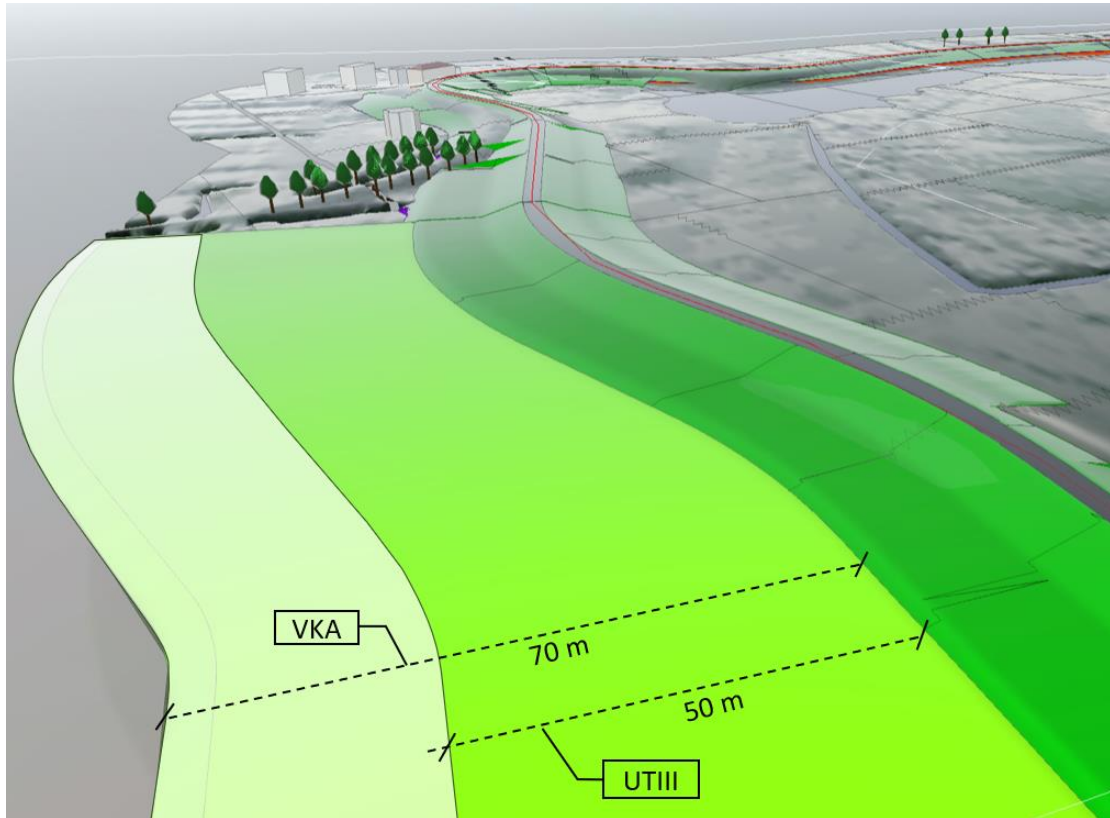


Een illustratie van wat de aanpak kan opleveren wordt hieronder gegeven voor twee voorbeeldlocaties die bij elkaar in de buurt liggen (groene cirkel op de overzichtskaart). Daarbij is de berekening uit het innovatieproject (UVTIII) vergeleken met de analyse uit het voorkeursalternatief van de verkenningfase van de dijkversterking (VKA)

Afbeelding 3.16 Visualisatie van verschil in lengte van benodigd kwelscherm volgens VKA en volgens UVTIII (resp. wit en paars)



Afbeelding 3.17 Visualisatie van verschil in benodigde pipingberm volgens VKA en volgens UVTIII



# 4

## ENKELE D-GEO FLOW ANALYSES

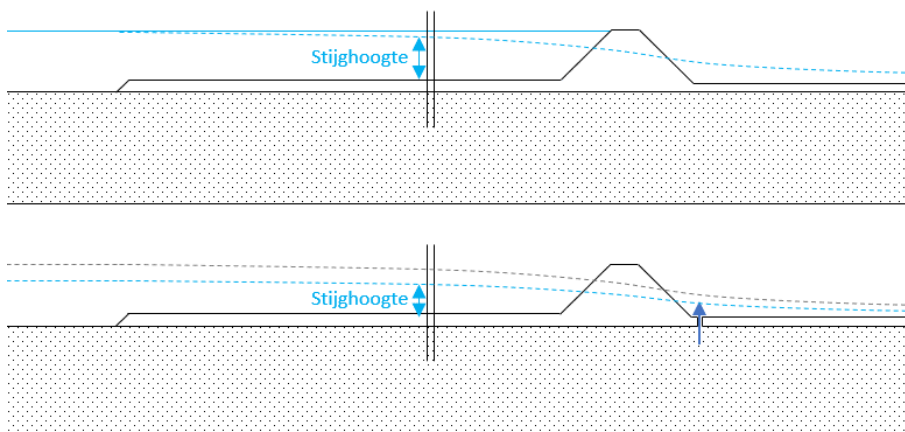
Om te controleren of de door het projectteam ontwikkelde opties voor de omgang met voorlanden nog altijd conservatieve vereenvoudigingen zijn, is een aantal vergelijkende berekeningen gemaakt met D-Geo Flow [ [12] ]. Daarbij is geïllustreerd hoe de verschillende benaderingen in parameterkeuze van de waterstandsrandvoorwaarde van de analytische Sellmeijer vergelijking zich tot elkaar verhouden in kritiek verval en pijpgroei. Deze studie met D-Geo Flow heeft waardevolle inzichten opgeleverd hoe de uitkomsten van een geohydrologisch model in de toekomst gekoppeld kunnen worden aan sterktemodellen. Een samenvatting wordt gegeven in dit hoofdstuk.

Er is een vergelijking gemaakt tussen:

- 1 de weerstand tegen terugschrijdende erosie van een (D-Geo Flow) model met een voorland van 400 m. Als waterstandsrandvoorwaarde wordt de waterstand bij norm gehanteerd;
- 2 de weerstand tegen terugschrijdende erosie van een (D-Geo Flow) model met een afgeknipt voorland bij de buitenteen en op 40 m (één keer dijkbasis). Als waterstandsrandvoorwaarde wordt de berekende stijghoogte voor opbarsten gehanteerd.

Ten eerste is gevonden dat het effect van opbarsten in een standaard Sellmeijer analyse (in D-Geo Flow) zorgt voor een significante reductie van de stijghoogte (ook buitendijs), zie Afbeelding 4.1 Effect opbarsten op stijghoogte in D-Geo Flow. Dit betekent dat het loskoppelen van de geohydrologie (eerst bepalen stijghoogte) en de sterktevergelijking (deze stijghoogte gebruiken als hydraulische randvoorwaarde) leidt tot een overschatting van de ware stijghoogte. In deze illustrerende studie is deze verlaging fors omdat de stijghoogte voorafgaand aan opbarsten wordt bepaald met het geohydrologisch model.

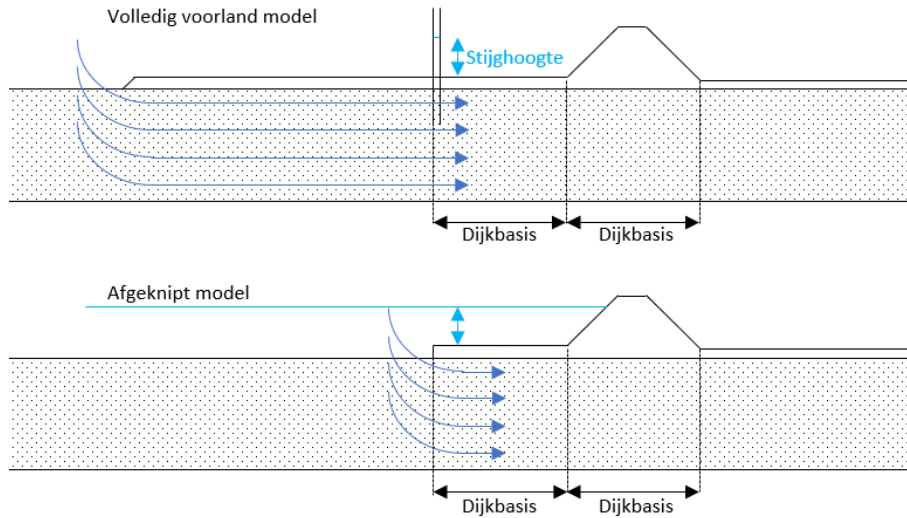
Afbeelding 4.1 Effect opbarsten op stijghoogte in D-Geo Flow





Als tweede is gevonden dat de radiale weerstand (gekromde stroombanen bij instroom naar het watervoerend pakket) invloed heeft op het kritiek verval, Zie afbeelding 4.2. Water dat via een horizontaal vlak verticaal instroomt zorgt voor gekromde stroombanen. Deze gekromde stroombanen zorgen voor weerstand. Voor een afgeknipt model betekent dit dat het tot een overschatting van het kritiek verval leidt. Er is een hogere bovenstroomse randvoorwaarde nodig om te komen tot het overschrijden van de kritieke pijplengte.

Afbeelding 4.2 Effect radiale toestroming water



Bij het gebruik van een afgeknipt model is het dus nodig te compenseren voor het effect van radiale instroming om een overschatting van het kritiek verval te voorkomen. Dit kan door een hogere bovenstroomse randvoorwaarde te hanteren.

In de studie Meanderende Maas is het gecombineerde netto effect van opbarsten (onderschatting kritiek verval) en radiale instroming (overschatting kritiek verval) ruim voldoende. Het rekenen met de stijghoogte voor opbarsten uit het geohydrologisch model als randvoorwaarde in de Sellmeijer vergelijking met een afgeknipt model (buitenteen én op één keer de dijkbasis in het voorland) leidt tot een onderschatting van de stabiliteitsfactor.

# 5

## AANBEVELINGEN VOOR VERVOLG

In dit hoofdstuk doen we een aantal aanbevelingen zoals we die zien nu we tegen het einde van het innovatietraject zitten.

### 5.1 Aanbeveling voor verdieping

#### Integratie geohydrologische modellering en faalmechanismemodellering

In de Projectgebonden Innovatie Meanderende Maas is gekozen voor een modulaire opzet waarin:

- 1 de uitvoer van het hydraulisch belastingmodel (Hydra-model) de invoer vormt van het geohydrologisch model;
- 2 de uitvoer van het geohydrologisch model de invoer vormt van faalmechanismemodellen uit het BOI voor opbarsten, heave en piping (en macrostabiliteit).

Deze modulaire opzet heeft voor- en nadelen. Belangrijke voordelen zijn dat de verschillende modules afzonderlijk ontwikkeld, gevalideerd en beheerd kunnen worden. Niet voor niets is in het BOI ook zo veel mogelijk gekozen voor een modulaire opzet (bijvoorbeeld afzonderlijk belastingmodel met hergebruik van modules voor verschillende faalmechanismen en een bibliotheek met faalmechanismemodellen). Een nadeel van een modulaire opzet is dat de afhankelijkheden tussen de onzekere invoer van verschillende modules minder makkelijk zijn mee te nemen. Ter illustratie: in opeenvolgende modules kunnen dezelfde kenmerken van de ondergrond een rol spelen, random trekkingen van deze kenmerken moeten in alle modules hetzelfde zijn.

Gelet op de voordelen die een modulaire opzet biedt, wordt aanbevolen om hieraan vast te houden. Voor een landelijke toepassing van de ontwikkelde methodiek is op onderdelen echter verdieping gewenst:

- 1 aanbevolen wordt om een pragmatische werkwijze te ontwikkelen om binnen gehele modelketen met verschillende ondergrondscenario's rekening te kunnen houden, zonder dat daarvoor de modulaire opzet opgegeven moet worden. Dit is vooral van belang bij dijktrajecten waar de schematiseringonzekerheid van groot belang is voor het beoordelingsresultaat;
- 2 het verdient aanbeveling om meer generiek een 'good practice' te formuleren voor het relateren van de uitvoer van regionale geohydrologische modellen aan pipingmodellen (zoals de Sellmeijer formule) die uitgaan van een duidelijk aanwijsbaar intredepunt;
- 3 het faalmechanisme opbarsten zou middels een eenvoudige (nog te schrijven) MODFLOW package ook integraal berekend kunnen worden met het grondwaterstromingsmodel;
- 4 maak het inzien van fluxen in D-Geo Flow mogelijk: in de huidige versie van D-Geo Flow is het niet mogelijk de fluxen in te zien of te visualiseren. Dat betekent dat niet bekend is hoeveel water uit het opbarstpunt stroomt en of dit theoretisch juist en praktisch verklaarbaar is;
- 5 maak een 3D pipingberekening in D-Geo Flow mogelijk en beschikbaar: het stijghoogte-reducerende effect door een 2D schematisatie blijkt een groot effect te hebben op de geohydrologie. Recent onderzoek toont aan dat een 2D beschouwing niet per definitie veilig is. Het rekenen met 3D grondwaterstroming biedt ruimte om dit verder te onderzoeken.

### Modellering onzekerheden

Zoals toegelicht c.q. aangekondigd in paragraaf 3.4 kan het stochastisch model op diverse punten worden verfijnd om onzekerheden preciezer te beschrijven. Verfijning is echter geen doel op zich. Daar waar onzekerheden niet expliciet zijn gemodelleerd maar zijn afgedekt door een behoudende keuze of door het verruimen van de modelonzekerheid, wordt geadviseerd om na te gaan:

- 1 hoe belangrijk de verschillende onzekerheden zijn bij het bepalen van de stijghoogte. Ofwel is de bijdrage van een parameteronzekerheid aan de totale onzekerheidsband significant?
- 2 welke (stochastische)modelverbeteringen dan de hoogste prioriteit verdienen.

Omdat het belang van de restpunten per regio kan verschillen, wordt geadviseerd om steeds op projectniveau af te wegen of en, zo ja, welke onzekerheidsreductie wenselijk is.

### Faalmechanismemodellering piping

Hoewel de Projectgebonden Innovatie Meanderende zich primair heeft gericht op het voorspellen van stijghoogtes bij hoogwater met regionale geohydrologische modellen, zijn er ook inzichten opgedaan over de faalmechanismemodellen die in het innovatieproject als een gegeven zijn beschouwd. De uitgevoerde D-Geo Flow-berekeningen hebben getoond dat de grondwaterstroming nabij het uittredepunt niet alleen van groot belang is voor het berekende kritieke verval, maar ook vragen oproept. Daarbij gaat het zowel over de fysica, als over de modellering daarvan in D-Geo Flow. Op dit punt worden onderzoek en ontwikkeling aanbevolen:

- houd rekening met het effect van radiale waterstroming in het parametriseren van de Sellmeijer formule; Radiale instroming van water zorgt voor een hoger kritiek verval. In de studie Meanderende Maas wordt dit effect gecompenseerd door een conservatieve waterstandsrandvoorwaarde (voor opbarsten). Deze studie biedt potentie om de waterstandsrandvoorwaarde aan te scherpen. Bij aanscherping dient rekening te worden gehouden met het niet-conservatieve effect van radiale instroming van water;
- evalueer de 0,3d-regel: Bij de uitgevoerde berekeningen blijkt de invloed van opbarsten en de 0,3d-regel dominant in de uitkomst van D-Geo Flow. Gezien het belang van de parameter wordt aanbevolen dit nader te onderzoeken.

## 5.2 Aanbevelingen voor doorwerking

### Geohydrologie in relatie tot opbarsten (en heave): stijghoogte

De bepaling van de stijghoogten binnendijks met een regionaal grondwatermodel leidt ten opzichte van een aangenomen respons tot een nauwkeuriger stijghoogte, en daarmee tot een betrouwbaardere beoordeling van de kans op opbarsten (en heave). Daarbij is gebleken dat deze aanpak ten opzichte van analytische formules in een aantal gevallen kan leiden tot een hogere berekende stijghoogte, met name wanneer sprake is van situaties waarin toestroming vanuit meerdere kanten plaats vindt (door bochten in de rivier, hydraulische kortsluiting in de uiterwaarden of bijv. wielen binnendijks). Aanbevolen wordt deze bevindingen als aandachtspunten bekend te maken, bijvoorbeeld in de Schematiseringhandleidingen voor Piping en Macrostabieliteit.

### Geohydrologie in relatie tot terugschrijdende erosie: stijghoogte

Bij de periodieke beoordeling van de waterkeringen dient te worden uitgegaan van het werkelijke profiel van de kering en de toestand op de peildatum [WBI 2017 Bijlage I, par. 6.6 gesteld]. Dit betekent dat ook een aanwezig voorland moet worden meegenomen, zelfs als het niet is opgenomen in de legger. Hierdoor verschuift het intredepunt richting het buitenwater, wat een gunstige invloed heeft op de berekende stijghoogte onder de kering en de gradiënt van de stijghoogte over de kwelweg. Onder voorwaarden kan (een fictief deel van) het voorland worden meegerekend bij de bepaling van de kwelweglengte. Het Sellmeijer model is echter niet gevalideerd voor situaties waarin water op het voorland door de deklaag naar de pipe toestroomt. Aanbevolen wordt om hier goede handreikingen voor te maken.

### Geohydrologie in relatie tot terugschrijdende erosie: kwelweglengte

De berekende kans op piping kan in grote mate worden geoptimaliseerd indien het voorland tevens als kwelweglengte kan worden meegerekend in de sterktemodellering. Aanbeveling is om de in dit innovatieproject gelegde basis verder uit te werken op dit punt. Zodat met toepassing van een geohydrologisch model in de toekomst op eenvoudige wijze (=zonder DGeoFlow berekeningen) het voorland als kwelweg kan worden meegerekend.

### Opnemen in handleidingen en richtlijnen

Bovenstaande aanbevelingen leiden tot een praktische samenvattende aanbeveling voor de doorwerking in de praktijk: De geohydrologische aanpak voor piping zoals nu toegepast bij Meanderende Maas vormt een betrekkelijk eenvoudige aanpak om binnen de geldende voorwaarden het gunstige effect van het aanwezige voorland op de stijghoogte mee te nemen in de beoordeling op piping. Aanbevolen wordt de toepassing van deze werkwijze te stimuleren, door deze expliciet in de Schematiseringhandleiding Piping te benoemen (beschrijven) en/of er een Ontwerp- en beoordelingsrichtlijn van te maken

### Geohydrologie in dijkverbeteringsprojecten

In het kader van Meanderende Maas is het gebruik van geohydrologische modellen bij andere dijkverbeteringsprojecten verkennend geïnventariseerd. Hieruit is gebleken dat bij meerdere projecten (circa vijf) geohydrologische modellen zijn gebruikt voor de afleiding van de waterspanningen. Het gebruik van zo'n model is echter niet eenduidig, waarbij geldt dat een voorzichtige schematisering niet gelijk is uit oogpunt van de toepassing voor piping of voor macrostabiliteit. Daarom is op dit punt onze aanbeveling tweeledig:

- stimuleer dat geohydrologen en geotechnici in dijkversterkingsprojecten die met geohydrologische modellen werken leren van elkaars ervaringen. Faciliteer vanuit het HWBP de kennisuitwisseling op dit onderwerp via een 'community of practice'. Kennisdelen zowel gericht op de aannames die je doet bij het bouwen van het model en bij de parametrisatie als de uitgangspunten die je hanteert bij het meenemen van voorland sterkte;
- doe een inventarisatie van het gebruik van geohydrologische modellen en de (gedetailleerde) beschrijving van de toepassing, werkwijzen en keuzen bij de schematisering. Zulks om als basis te dienen voor een te definiëren 'good practice' voor het gebruik van geohydrologische modellen in dijkversterkingsprojecten.

## 5.3 Aanbevelingen bij toepassing

### Benut deze aanpak bij het ontwerp

De aanpak biedt een goede basis voor het ontwerpen van dijken op het faalmechanisme piping: je kunt er - als je het geohydrologische model eenmaal hebt - eenvoudig verschillende versterkingsmaatregelen mee ontwerpen. Van de klassieke oplossingen als scherm en berm tot en met innovatievere maatregelen die meer gericht zijn op drainagetechnieken en voorlandverbetering.

### Voor effect ingrepen in voorland/rivieren

Met de geohydrologische aanpak is het effect van maatregelen in de rivierbedding zoals nevengeulen en kleiwinning goed te kwantificeren, zowel voor dagelijkse omstandigheden als voor maatgevende hoogwatersituaties. Daarmee is het niet alleen een instrument voor dijkontwerp maar ook voor brede integrale afwegingen.

### Doen van metingen

Een betrouwbare schatting van de optredende stijghoogte tijdens hoogwatersituaties is van groot belang voor zowel de beoordeling op piping als macrostabiliteit binnenwaarts. Voor het kalibreren van de berekeningen is de beschikbaarheid van metingen tijdens voldoende representatieve situaties cruciaal. Het is zodoende van belang te beschikken over een goed functionerend netwerk met meetlocaties van de stijghoogten. Vanwege dit belang wordt de overige waterkeringbeheerders aanbevolen dergelijke netwerken in te richten.

Naast stijghoogtemetingen zijn metingen belangrijk die helpen de onzekerheden te verkleinen in de geohydrologische opbouw van het gebied. Ervaring Meanderende Maas leert dat de volgende metingen zinvol zijn:

- meting van de deklaagdikte: In verband met het bepalen van het intrede punt is het prettig om zekerheid te hebben de ligging en sterkte van kleilagen in het voorland (buitendijks);
- bulkweerstand van de deklaag meten bij een hoogwater of een veldproef uitvoeren;
- insnijdende waterlopen in het achterland zijn bepalend voor de te verwachten stijghoogten langs de dijk. Meten of ze insnijden of niet is betrekkelijk eenvoudig (prikken).

### Stochastische ondergrond schematisatie

In de ontwikkelde aanpak is voor de bepaling van de deklaagdikte in het geohydrologische model de SOS (stochastische ondergrond schematisatie) methodiek toegepast. Aanbevolen wordt om deze methodiek nader uit te werken voor diepere lagen zodat verschillende realisaties van de ondergrondopbouw met een kans van voorkomen kunnen worden meegenomen. Zo kunnen onzekerheden in de opbouw van de ondergrond mee worden genomen. Bij Meanderende Maas is dit iets minder relevant voor de diepere ondergrond onder de deklaag, in andere gebieden kan dit wel een grote invloed hebben.

### Informatiemanagement

Het regionale geohydrologische model zoals dat reeds aanwezig is bij beheerders krijgt met deze aanpak een groter toepassingsbereik. En dat brengt een groter aantal typen gebruikers met zich mee. Ook het actueel houden van het model en het verrijken ervan met nieuwe meetgegevens zal gebeuren vanuit deze verschillende disciplines. Daarom zijn overzicht houden vanuit een procesmatig oogpunt en het gelijktijdig juist inrichten van de informatievoorziening vereisten. Met een goed informatiemanagement garandeer je de herleidbaarheid van uitkomsten, voorkom je onduidelijkheid en het werken met verkeerde data en is kwaliteitsborging beter in te richten.

Bij dijkversterkingsprojecten raden we aan om vanaf de start een informatiemanager in te zetten die de verbinding expliciet kan maken tussen de behoeften van technische domeinkenners, beschikbare IT voorzieningen, en de behoeften vanuit kwaliteitsboring en reproduceerbaarheid binnen het project.

# 6

## PRAKTISCHE HANDREIKINGEN BIJ TOEPASSING

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op gegevens die essentieel of (onverwacht) belangrijk zijn gebleken bij het toepassen van de methode uit het innovatietraject Meanderende Maas. Dit hoofdstuk biedt daarbij aangrijpingspunten voor waterschappen en andere partijen die met de methode willen werken. Hierbij wordt in het hoofdstuk ingegaan op:

- 1 benodigde gegevens: wat is minimaal nodig om het geohydrologisch model te kunnen bouwen en de bandbreedte van de stijghoogte te kunnen bepalen;
- 2 het bepalen van de pipingopgave gegeven de berekende stijghoogte;
- 3 veel gestelde vragen.

### 6.1 Benodigde data voor Geohydrologisch model en bandbreedte stijghoogte

Ten behoeve van het bepalen van de onzekere waarde van de stijghoogte is een tijdsafhankelijk regionaal grondwatermodel opgesteld. Dit grondwatermodel dient als basis voor al de berekeningen. Voor de onzekere parameters van het grondwatermodel is een range aan waardes doorgerekend. Voor het opstellen van een grondwatermodel voor deze toepassing (extreme hoogwatersituaties) zijn een aantal zaken van belang:

- 1 De methode geeft de grootste aanscherping van de pipingopgave als er relatief weinig onzekerheid is met betrekking tot de geologie van de toplagen (cohesieve lagen). Voor het projectgebied Meanderende Maas is veel grondonderzoek beschikbaar (in de uiterwaard). Dit grondonderzoek bestaat uit boringen, sonderingen en EM-metingen. Als er veel onzekerheid is over de toplaag zal een conservatieve keuze (of een grote spreiding op de parameters) naar verwachting leiden tot ook een zeer grote bandbreedte in de stijghoogte. Je kunt deze onzekerheid expliciet meenemen in het stochastisch grondwatermodel. Maar het is in dat geval waarschijnlijk effectiever de ondergrond eerst beter in kaart te brengen door grondonderzoek, zodat de bandbreedte verkleind kan worden.
- 2 De stijghoogte in het watervoerend pakket wordt in grote mate bepaald door bulk-parameters. Een lokale grove (grind) afzetting of lokale graverij (konijnenhol) zal beperkt van invloed zijn op de stijghoogte. Het op grote schaal doorsnijden van de deklaag buitendijks (voeding watervoerend pakket) en binnendijks (ontlasting waterdruk) heeft wel een grote invloed op de stijghoogteberekeningen. Bovenstaande betekent dat bij het werken met de methode het van belang is het wel of niet doorsnijden van de deklaag te kennen. Een conservatieve aanname bij onzekerheid zal naar verwachting leiden tot een grote onzekerheid in de berekende stijghoogte en daarmee in een hoge veilige waarde van de berekende stijghoogte. Met een relatief beperkte onderzoeksinspanning (inmeten watergangen) kan de onzekerheid verkleind worden.
- 3 Voor een grondwatermodel ter bepaling van de stijghoogte gedurende hoogwater condities zijn twee parameters van grote invloed gebleken: de bergingscoëfficiënt en de geohydrologische uitgangssituatie (waterpeilen, neerslag et cetera). Het is van groot belang om aandacht te besteden aan de parameters die voor het beschouwde watersysteem van belang zijn. Een kustsysteem zal bijvoorbeeld een andere geohydrologische uitgangssituatie hebben dan een (boven) rivierensysteem.

- 4 Voor een grondwatermodel is de doorlatendheid van de deklaag en de transitiviteit van het watervoerend pakket in alle gevallen van belang te onderzoeken. Het locatiespecifiek bepalen van de doorlatendheid van de deklaag op basis van een grootschalige proef zou de onzekerheid kunnen verkleinen. Als een conservatief uitgangspunt gehanteerd wordt is het van belang te weten dat een hoge transitiviteit van het watervoerend pakket (kD) niet in alle gevallen leidt tot de hoogste stijghoogte binnendijks.
- 5 Het kennen van de vorm van de hoogwatergolf is van belang. Per watersysteem zal de vorm anders zijn. Een veelgebruikte golfvorm is die op basis van de waterstandsverlooptool. De vorm van deze afvoergolf is een gemiddelde (en dus geen veilige) waarde. Per situatie dient nagegaan te worden of het gebruik van deze gemiddelde waarde veilig genoeg is of dat er een kans moet worden meegenomen dat deze golfvorm anders is. Een andere golf zou bijvoorbeeld een lagere piek maar langere duur kunnen zijn.

Tot slot geven we de tip dat er vanuit de POV-Piping een aantal praktische handreikingen is geschreven die behulpzaam kunnen zijn bij het bepalen van de benodigde hoeveelheid metingen, zoals 'Grondonderzoek voor Piping'<sup>1</sup> en 'Meetnetten en grondwatermonitoring voor piping'.

## 6.2 Bepalen pipingopgave

De stijghoogte wordt op basis van het geohydrologisch model en de onzekerheden aanpak vlakdekkend voor het gehele projectgebied bepaald. Deze stijghoogte is input voor de sterktevergelijkingen (analytisch) voor opbarsten, heave en terugschrijdende erosie. Voor elke locatie waar een stijghoogte bepaald is kan de weerstand tegen piping worden bepaald. In het innovatietraject is dit vlakdekkend gedaan. Dat betekent dat voor elke gridcel binnendijks (5 bij 5 m) de analytische formules zijn geëvalueerd. Deze aanpak levert inzicht in de weerstand tegen piping op een hoog detailniveau.

Het vlakdekkend bepalen van de weerstand tegen piping kan ook zonder een complex grondwatermodel. Met de innovatieve aanpak Meanderende Maas is het echter wel eenvoudiger. Veel van de parameters zijn al vlakdekkend bepaald (deklaagdikte, dikte watervoerend pakket et cetera). De sterktevergelijking vlakdekkend evalueren is dus een beperkte extra inspanning die veel inzicht oplevert.

Bij het vlakdekkend bepalen van de pipingopgave dient wel rekening te worden gehouden met het feit dat parameterkeuzes een tegengesteld (positief of negatief) effect kunnen hebben op het grondwatermodel en de sterktevergelijkingen. Een dikke deklaag binnendijks is bijvoorbeeld conservatief voor het bepalen van de stijghoogte (veel tegendruk) maar juist positief voor de sterktevergelijking. Idealiter worden deze beschouwingen niet los van elkaar gehaald omdat het een parametercombinatie op kan leveren die fysiek onmogelijk is.

Op hoofdlijnen zijn bij vlakdekkend rekenen geen andere parameters benodigd ten opzichte van een andere berekeningsmethode. De vertaling van de parameters naar vlakdekkende grids dient wel met zorg te worden uitgevoerd ten aanzien van interpolatie tussen meetpunten. Zeker op locaties waar de dijkoriëntatie sterk varieert kan interpolatie en extrapolatie leiden tot fouten.

## 6.3 Veel gestelde vragen

### **Wat voor start-set van model en meet-data heb je minimaal nodig om deze aanpak zinvol toe te passen?**

Bij de start van het innovatietraject Meanderende Maas was een basis grondwatermodel beschikbaar. Daarnaast was een relatief hoge hoeveelheid grondonderzoek beschikbaar omdat de verkenningsfase van de dijkversterking net was afgerond. Gedurende het innovatietraject is steeds meer informatie beschikbaar gekomen. Deels gevoed door de informatiebehoefte uit het innovatietraject zelf.

---

<sup>1</sup> [https://issuu.com/pov-piping/docs/18-5830\\_rapportage\\_1\\_pov\\_piping\\_web](https://issuu.com/pov-piping/docs/18-5830_rapportage_1_pov_piping_web)



Het kan zinvol zijn bij de start van het toepassen van de methode in een andere situatie eerst twee modellen op te zetten: een worst-case model en een optimistisch model. Het is dan direct inzichtelijk wat maximaal behaald kan worden. Op deze manier kan gericht onderzoek gedaan worden naar parameters die er (lokaal) toe doen. Het onderzoek kan dan doelmatig ingezet worden.

Als laatste wordt opgemerkt dat de meeste informatie sowieso al benodigd was voor de dijkversterking. Het toepassen van een grondwatermodel overlapt voor een groot gedeelte met informatie die al (vanuit) andere sporen benodigd is.

### Wat waren voor Meanderende Maas de tijdens maatgevend hoogwater berekende stijghoogtes in het achterland (opbarsten)?

De berekende stijghoogte in het achterland varieert over het projectgebied. Op locaties met ruim voorland voor de dijk is een stijghoogtereductie in de orde van meters berekend. Op locaties met weinig demping is de respons relatief hoog. Voor vrijwel het gehele gebied is wel een té hoog opbarst risico berekend. Dit is grotendeels het gevolg van de hoge veiligheidsnorm die voor dit gebied gehaald moet worden.

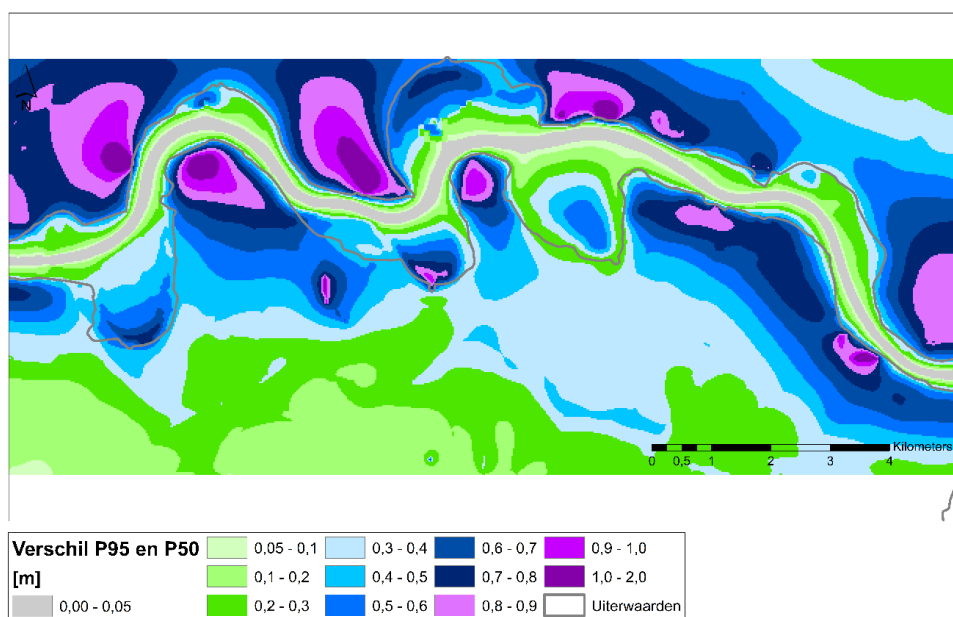
### Wat kan/mag je al doen met je gekalibreerde licht-conservatieve grondwatermodel zonder dat je de onzekerheden hebt gekwantificeerd?

Ten behoeve van sterkteberekeningen van de dijk zijn in vrijwel alle gevallen inschattingen van de stijghoogte nodig. Voor stabiliteitsberekeningen (STBI) en opbarsten en heave (STPH) zijn stijghoogtes in het watervoerend pakket nodig. Een licht-conservatief grondwatermodel kan al informatie verschaffen voor deze afweging. Hoe minder onzekerheid expliciet wordt meegenomen hoe groter de bandbreedte van het eindantwoord zal zijn. Een licht-conservatief grondwatermodel geeft inzicht in het relatieve verschil tussen stijghoogtes. Voor Meanderende Maas is bijvoorbeeld duidelijk te zien dat de stijghoogtes relatief hoog zijn op locaties waar waterstroming van verschillende richtingen aanwezig is (daar waar de dijk een hoek maakt).

### Hoe groot is het verschil tussen de berekende p50 van de stijghoogte en de p95 van de stijghoogte onder hoogwateromstandigheden?

Dit verschil is bij Meanderende Maas enkele centimeters tot ruim een meter groot, afhankelijk van de locatie. In binnenbochten is het verschil groter dan in buitenbochten. Bij de buitenteen van de dijk is het verschil maximaal ongeveer een meter.

Afbeelding 6.1 Verschil P95 en P50



### Hoeveel (doorloop) tijd kost het om een voor hoogwater geschikt geohydrologisch model te bouwen?

Grootste potentiële vertrager is het inventariseren en beoordelen van beschikbare data gebleken. Daarnaast is het erg belangrijk om, als je een geohydrologisch model bouwt voor andere toepassing dan je gewend bent, te werken met ten minste twee ervaren geohydrologisch modellers inzet voor sparring en collegiale toets. Bij Meanderende Maas hebben we ongeveer 135 mandagen besteed aan het bouwen, kalibreren, valideren en runnen van het model in een doorlooptijd van 1 jaar. Iets vergelijkbaars elders doen voor vergelijkbare casus, met de uitgewerkte methode als basis kan in 60 % van de (doorloop)tijd verwachten we. Wat neerkomt op 80 mandag en 7 maanden doorlooptijd.

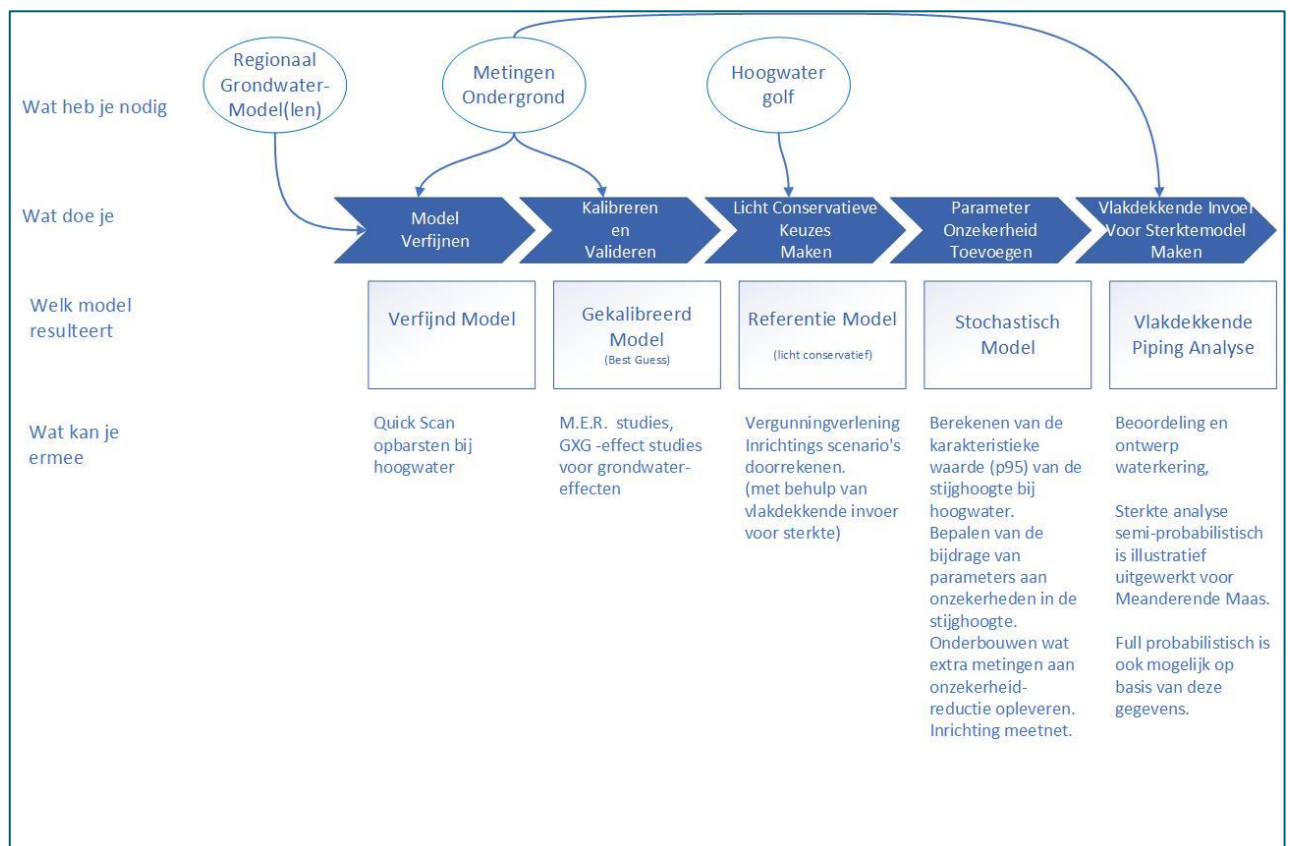
### Wat tikt het meeste aan om (op termijn) de onzekerheidsmarges te verkleinen?

Stijghoogtemetingen. Het belangrijkste instrument om onzekerheden te verkleinen is het hebben van stijghoogtemetingen gedurende een hoogwater. Het is daarom raadzaam niet te wachten tot de start van een (dijkversterkings-)project met het plaatsen van peilbuizen. Een hoogwater dat bruikbaar is voor een grondwatermodel komt niet elk jaar voor. Naast stijghoogtemetingen is het ook van groot belang te weten of watergangen binnen- en buitendijs de deklaag doorsnijden. Binnendijs zal een doorsnijding een ontlastend effect op de stijghoogte hebben en buitendijs juist een voeding naar het watervoerend pakket.

### Heb je altijd het stochastische model nodig om uitspraken te kunnen doen?

Nee, het stochastische model is wel nodig als je de karakteristieke waarde van de stijghoogte wilt kunnen bepalen voor gebruik in combinatie met de sterktemodellen uit het BOI. Maar met het referentiemodel en de versies om daartoe te komen zijn ook al heel veel analyses mogelijk. In onderstaande afbeelding het resultaat van een brainstorm met het kernteam: in de onderste rij staat per model waarvoor het toepasbaar kan zijn.

Afbeelding 6.1 Brainstormresultaat 'Wat kan je ermee'



# 7

## RELATIE MET LOPENDE ONTWIKKELINGEN

In dit hoofdstuk staan we stil bij een aantal ontwikkelingen in de wereld van waterveiligheid die een relatie hebben, of waarbij een raakvlak kan ontstaan, met de ontwikkelde geohydrologische aanpak bij het innovatietraject Meanderende Maas. De werkwijze in de aanpak uit het innovatietraject geeft goed invulling aan een van de belangrijkste adviezen die voortkwam vanuit de POV-Piping: voor goede analyses en doorontwikkeling op vlak van piping moeten de drie geo-gerelateerde werkvelden beter met elkaar in contact staan. Combineren van kennis vergroot inzicht en hierdoor ontstaat uiteindelijk een beter beheer, beoordeling en ontwerp van waterkeringen.

Afbeelding 7.1 De 'geodriehoek' – Schematiseren vanuit meerdere invalhoeken (Bron: POV Piping)



### 7.1 Algemene ontwikkelingen

#### Integraal Ontwerpen

De bij Meanderende Maas ontwikkelde methode is nuttig bij integrale projecten, waar naast een opgave aan de dijk (waterveiligheid) bijvoorbeeld ook zaken als rivierverruiming, natuurontwikkeling of een herinrichting van een gebied spelen. Met deze geohydrologische benadering kan het effect van maatregelen op het pipingrisico of kwel en wegzijging in een gebied in beeld gebracht en gekwantificeerd worden om zo tot beter onderbouwde ontwerpafwegingen komen. In het licht van de ontwikkelingen rond integraal rivier management (IRM) zijn dit methoden waar veel behoefte naar zal ontstaan. Ook helpt de aanpak in de consistentie en efficiëntie: Je gebruikt één model en dataset die je toepast voor verschillende doeleinden.

#### Beheer en Zorgplicht

Dezelfde parallel kan getrokken worden bij initiatieven van derden (zoals geplande uiterwaardvervragingen). Met het gebruik van de bij Meanderende Maas ontwikkelde methode kan de impact van een geplande ingreep op de stijghoogtes (en daarmee de waterveiligheid) bepaald worden. Verder is het een methode die ingezet kan worden om de leggerzonering beter te onderbouwen. Vragen als 'welk deel van de uiterwaard neem je op in de legger?' en 'welke restricties verbind je aan dit gebied' kunnen helder beantwoord worden.

### De digitale transformatie in de watersector

Waterbeheerders en waterschappen zijn al enige jaren volop bezig met digitalisering. Als aanvulling op droge voeten en schoon water is binnenkort het leveren van betrouwbare informatie onderdeel van de missie van de sector. Samen met de ontwikkeling dat rekenmodellen steeds krachtiger worden ontstaat een beweging richting steeds gedetailleerdere 2- en 3D basisdata, (ondergrond)schematisaties en modellen. Het zo lang mogelijk inzichtelijk houden van de gebiedsdekkende informatie zoals de geohydrologische aanpak voor piping mogelijk maakt past hierbij. Net als bij de ontwikkeling die volgens sommige waterbeheerders al binnen bereik ligt: Een virtuele versie van de werkelijkheid die kan helpen bij complexe vraagstukken of die zorgt dat je data altijd compleet en up-to-date is: de Digital Twin.

### Dijkversterking met gebiedseigen grond

In 2021 zal de HWBP verkenning 'Dijkversterking met Gebiedseigen Grond' POV DGG afronden met aanbevelingen om veel meer gebruik te maken van grond die ter plekke gewonnen kan worden. Bij het meer toepassen van gebiedseigen grond kan de bij Meanderende Maas ontwikkelde aanpak van dienst zijn om de optimale grondstrategie en vergravingen te relateren aan de dijksterkte voor piping en macrostabiliteit.

## 7.2 Andere lopende innovatieprojecten

In deze paragraaf geven we een (zeker niet uitputtende) beschrijving van een aantal innovatieprojecten dat op dit moment ook loopt. Daarbij beperken we ons tot de hoofdlijn en een duiding van de relatie die er kan liggen met de aanpak zoals die voor Meanderende af Maas is ontwikkeld.

### Ontwerp en beoordelingsrichtlijn Drainage: OBR Drainage

Dit project bestaat uit het opstellen van een Ontwerp- en Beoordelingsrichtlijn (OBR) om in een beoordeling, verkenning, planuitwerking en realisatie een gedragen werkwijze voor het beoordelen en ontwerpen van drainagetechnieken te komen. De OBR is gebaseerd op de laatste inzichten en ontwikkelingen vanuit de POV's en sluit aan bij de nieuwste systematiek voor het beoordelen en het ontwerpen van waterkeringen. Een van de onderwerpen waar de OBR een uitspraak over wil doen is de manier waarop de karakteristieke bovengrens (95 %-waarde) van een grondwatermodel bepaald kan worden. Het project heeft daarmee naar verwachting veel aan het innovatietraject Meanderende Maas. Met name de in het innovatietraject ontwikkelde methode om vanuit een grondwatermodel via het kwantificeren van onzekerheden rondom de stijghoogte een verdeling van de stijghoogte af te leiden zal veel raakvlakken hebben.

### Voorlandonderzoek binnen dijkversterking Wolferen Sprok (WOS)

In het project Wolferen Sprok is onderzocht hoe (meer) voorland in de Sellmeijer analyse meegenomen kan worden. Hierbij is ten eerste onderzocht of de pijp bij het meenemen van meer dan één keer de dijkbasis (standaard werkwijze) in het voorland zorgt voor pijpgroei onder het voorland. Uit het onderzoek blijkt hier meer marge in te zitten dan tot nu toe aangenomen. Ten tweede is in dit project onderzocht onder welke voorwaarden pijpgroei onder het voorland wel acceptabel is. Het meenemen van meer dan één keer de dijkbasis in het voorland is ook voor Meanderende Maas goed mogelijk. Lokaal zou dan nog aangetoond kunnen worden (met D-Geo Flow) wat de lokale pijpgroefactor is (welk deel van de kwelweglengte is gelijk aan de pijplengte voordat progressieve pijpgroei optreedt). Het laten groeien van de pijp onder het voorland is gecompliceerder. Het vraagt meer van het beheer van het voorland en het deel waar pijpgroei wordt toegestaan dient goed in beeld te zijn. Met ervaringen uitwisselen op dit punt kan nog veel van elkaar geleerd worden is de verwachting.

### Rivierenland, Piping tool op basis van de uitredepunt methode

Voor het verkleinen en stabiliseren van de piping opgave langs een aantal dijkversterkingstrajecten (GoWa, TiWa, Nebe) heeft waterschap Rivierenland een aanpak ontwikkeld en ingebouwd in een GIS-tool. Deze tool rekent vanaf potentiële opbarstpunten het mechanisme piping door. Daarnaast (en hieraan gekoppeld) wordt voor het rekenen aan terugschrijdende erosie een spreidingslengte bepaald met behulp van een grondwaterstromingsmodel. Met de spreidingslengte wordt de fictieve voorlandlengte bepaald. De fictieve voorlandlengte is gebruikt als kwelweglengte in de Sellmeijer beschouwing. Als bovenstroomse hydraulische randvoorwaarde is de waterstand bij norm (WBN) gehanteerd.

Op basis van de Sellmeijer analyse wordt bepaald of de pipe behorende bij het optredende verval onder het voorland komt. De tool maakt schematiseren in GIS eenvoudig en helpt bij het selecteren van het uittredepunt met de grootste kans op falen door piping. De aanpakken van Rivierenland en de Geohydrologische Aanpak van Aa en Maas hebben een gezamenlijk doel: een goede en algemeen geldige verbinding tussen (de resultaten van) een geohydrologisch model en de Sellmeijer formulering.

### **Kennis voor keringen**

Dit kennisprogramma van Rijkswaterstaat heeft voor komende jaren voor het mechanisme piping een grote prioriteit gelegd bij het realistisch modelleren van de geohydrologie. Daarbij wordt concreet benoemd het meenemen van voorland, het 3D-effect van grondwaterstroming beter meenemen en het omgaan met de pipelengte in D-GeoFlow. Ook wordt hierin het valideren van de 0,3D-regel genoemd. Daarmee passen de prioriteiten in het Kennis voor Keringen programma goed bij de aanbevelingen die we vanuit het innovatietraject hebben. Een groot deel van deze onderzoeksgebieden zijn in het innovatietraject in meerdere of mindere mate aan de orde geweest. Kennisleemtes zijn onderkend en uit het innovatietraject blijkt ook duidelijk dat de genoemde zaken essentieel zijn in het (beter) schematiseren van piping. Het zou goed zijn om de experts uit het kernteam van het innovatietraject te betrekken bij de concretisering van een aantal onderzoeksporen binnen het Kennis voor Keringen programma.



## REFERENTIES

- [1] Projectteam innovatiespoor piping, „Naar een geohydrologische benadering voor het berekenen van de pipingopgave. Plan van aanpak,” 2019.
- [2] Projectteam innovatietraject Meanderende Maas, „Deelproduct 1: uitvoerbaarheidstoets I,” 2019.
- [3] Projectteam innovatietraject Meanderende Maas, „Deelproduct 2: faalpad en grenstoestandsfuncties,” 2019.
- [4] Projectteam innovatietraject Meanderende Maas, „Deelproduct 3: kwantificering onzekerheden,” 2020.
- [5] Projectteam innovatietraject Meanderende Maas, „Deelproduct 4: uitvoerbaarheidstoets II,” 2020.
- [6] Projectteam innovatietraject Meanderende Maas, „Notitie verkenning probabilistische pipinganalyse\_PGI Piping\_def. Zelfstandig leesbare bijlage bij deelproduct 4,” 2020.
- [7] Projectteam innovatietraject Meanderende Maas, „Deelproduct 5: kwantificering onzekerheden stijghoogte [CONCEPT],” 2020.
- [8] Meanderende Maas Planuitwerking, „Hoogwatergolf geohydrologisch model. Bijlage bij deelproduct 5,” 2020.
- [9] Projectteam innovatietraject Meanderende Maas, „Beschrijving referentie grondwatermodel, zelfstandig leesbare bijlage deelproduct 5,” 2020.
- [10] Projectteam innovatietraject Meanderende Maas, „Deelproduct 6: uitvoerbaarheidstoets III [CONCEPT],” 2020.
- [11] Projectteam innovatietraject Meanderende Maas, „Notitie bruikbaarheid voor macrostabiliteit en heaveschermen. Zelfstandig leesbare bijlage bij deelproduct 6,” 2020.
- [12] Projectteam Innovatietraject Meanderende Maas, „Terugschrijdende erosie en voorland: enkele D-Geo Flow analyses. Zelfstandig leesbare bijlage bij deelproduct 6,” 2020.
- [13] Deltares, „WBI Onzekerheden. Overzicht van belasting- en sterkteonzekerheden in het wettelijk beoordelingsinstrumentarium,” 2017.
- [14] Deltares, „WBI Onzekerheden. Overzicht van belasting- en sterkteonzekerheden in het wettelijk beoordelingsinstrumentarium”.
- [15] Ministerie van Infrastructuur en Milieu, „Handreiking ontwerpen met overstromingskansen. Veiligheidsfactoren en belastingen bij nieuwe overstromingskansnormen,” 2017.
- [16] TAW, „Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies. Geotechnische aspecten van dijken, dammen en boezemkaden,” 2001.
- [17] Hoogwaterbeschermingsprogramma, „Projectoverstijgende Verkenning Voorlanden,” 2019.
- [18] Ministerie van Infrastructuur en Milieu, „Schematiseringshandleiding piping,” 2019.
- [19] Arcadis, „Geotechnisch onderzoek Ravenstein-Lith. Proevenverzameling met d70m, S, m en POP almede phi,” 2018.
- [20] Projectteam Innovatiespoor Piping, „Innovatiespoor Piping MeMa\_Stappenplan nav overleg 26-2-2019,” 2019.
- [21] Deltares, „WBI Onzekerheden. Overzicht van belasting- en sterkteonzekerheden in het wettelijk beoordelingsinstrumentarium,” 2016.
- [22] Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, „Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken. DWW-2004-057,” 2004.

- [23] Projectteam Meanderende Maas, „VO-2.1.3-20-008.610-R001. Beschrijving referentie grondwatermodel, zelfstandig leesbare bijlage bij deelproduct 5,“ 2020.
- [24] POV Voorlanden, „Eindrapport POV Voorlanden,“ 2019.



Bijlage(n)



**BIJLAGE: ACHTERGRONDRAPPORT\_KWANTIFICERING ONZEKERHEDEN  
STIJGHOOGTE\_NOV2020**



BIJLAGE: ACHTERGRONDRAPPORT\_REFERENTIE GRONDWATERMODEL\_NOV2020