



## **Handelingsperspectief tussenresultaten Piping en Macrostabieleit**

Project Praktijkonderzoek Opbarsten bij Dijken (POD)



## COLOFON

**Titel**

**Opdrachtgever** HWBP De Innovatieversneller

**Auteur(s)**

**Foto omslag**

**Kenmerk**

**Inhoudelijke kwaliteitsborging**

**Datum**

**Status**

Het handelingsperspectief Macrostabilliteit is opgesteld door het strategieteam Macrostabilliteit van De Innovatieversneller. Het handelingsperspectief Piping is opgesteld door het strategieteam Piping van De Innovatieversneller.

Beide handelingsperspectieven zijn afgestemd met het POD, gepresenteerd bij de Technisch begeleiders van de programmadirectie HWBP en op 1 maart voorgelegd aan de klankbordgroep van POD. De opmerkingen uit deze gremia zijn in versie 5 verwerkt.



## Inhoudsopgave

<b>Inleiding</b> .....	<b>4</b>
<b>Handelingsperspectief Macrostabiliiteit</b> .....	<b>5</b>
<i>Eerste resultaten POD onderzoek</i> .....	5
<i>Stroomschema</i> .....	5
<b>Handelingsperspectief Piping</b> .....	<b>8</b>
<i>Stroomschema</i> .....	8
<i>Samenvatting</i> .....	11
<b>Bijlage A: Achtergrond handelingsperspectief Piping</b> .....	<b>12</b>
<i>Theorie, observaties en metingen</i> .....	12
Faalpad .....	12
Hypothese.....	13
Bestaande gaten .....	14
Observaties en metingen POD .....	14
<i>Duiding observaties en metingen</i> .....	16
Centrifugeproeven en veldproeven .....	17
Veldproeven .....	18

## Inleiding

In de Omgevingswet zijn omgevingswaarden voor waterveiligheid vastgelegd. De omgevingswaarden zijn uitgedrukt in overstromingskansen. De overstromingskansen worden vanuit de Zorgplicht gemonitord en maatregelen worden genomen om te voorkomen dat de overstromingskans groter wordt dan de maximaal toelaatbare overstromingskans die per traject in de Omgevingswet is vastgelegd.

Monitoring van omgevingswaarde heeft zowel betrekking op: het monitoren van de 'fysieke gesteldheid' van de kering (hoe ligt de kering erbij) als de ontwikkeling van kennis van de fysica. Kennis van de fysica wordt gebruikt om het gedrag van de kering bij dagelijkse omstandigheden te vertalen naar het gedrag bij extreme omstandigheden.

In het Project Praktijkonderzoek Opbarsten bij Dijken (POD) wordt vanuit het HWBP door waterschap WDOD samen met Deltares onderzoek gedaan naar het gedrag van waterkeringen bij opbarsten van het achterland. Het gedrag is sterk afhankelijk van de dikte, sterkte en doorlatendheid van de deklaag. De modellen en rekenregels voor beoordelen en ontwerpen bevatten een aantal conservatieve uitgangspunten. Met literatuur en modelonderzoek zijn nieuwe hypothesen geformuleerd voor het gedrag van de kering bij opbarsten. Deze zijn onderzocht met grote schaal laboratorium- en praktijkproeven. Analyse van de proeven moet begin 2025 leiden tot nieuwe rekenmodellen voor ontwerp en beoordeling van waterkeringen.

Opdrijven van de deklaag treedt op wanneer de waterspanningen in een zandlaag die in verbinding staat met het buitenwater toeneemt. Wanneer de waterspanningen gelijk wordt aan het gewicht van de deklaag kan deze opdrijven. Opbarsten treedt niet op wanneer de deklaag voldoende doorlatend is, omdat er dan onvoldoende drukopbouw plaats kan vinden. Bij een ondoorlatende deklaag kan er wel drukopbouw optreden, maar bij een uniforme bodemopbouw en horizontaal maaiveld niet hoger dan het gewicht van de deklaag. Bij opbarsten verliest de deklaag samenhang en (een deel van de) sterkte. Een geperforeerde deklaag (uittredepunt) is een noodzakelijke voorwaarde voor het optreden van piping. De waterspanningen en de sterkte van de deklaag bij opdrijven hebben grote invloed op de binnenwaartse macrostabiliteit. De kennis die in POD wordt opgedaan heeft grote invloed op de veiligheids- en versterkingsopgave. Vooruitlopend op definitieve conclusies worden in dit document door De Innovatieversneller (DIV) handelingsperspectieven gegeven hoe nu met deze kennis in versterkingsprojecten kan worden omgegaan.

## Doel

Het handelingsperspectief Piping en Macrostabiliteit POD ondersteunt HWBP versterkingsprojecten bij het maken van keuzen bij het toepassen van tussentijdse inzichten over de sterkte bij opbarsten uit het project POD.

## Toepassing

Het handelingsperspectief is gebaseerd op de kennis per januari 2024 en kan worden gebruikt bij het bepalen van de veiligheidsopgave en het ontwerpen van waterkeringen.

Gevraagd wordt om bij toepassing van dit Handelingsperspectief contact op te nemen met DIV, zodat er begeleiding bij het toepassen van deze nieuwe kennis kan worden verleend en de opgedane ervaringen meegenomen kunnen worden in de verdere ontwikkeling van de aanpak.

## Leeswijzer

Het handelingsperspectief gaat in op zowel de mechanismen piping als macrostabiliteit. Voor beide mechanismen is een stroomschema opgesteld. Hoofdstuk 2 beschrijft het handelingsperspectief voor macrostabiliteit. Het handelingsperspectief voor piping is weergegeven in hoofdstuk 3. Bijlage 1 bevat een verantwoording bij het handelingsperspectief van piping.

## Handelingsperspectief Macrostabieleit

### Eerste resultaten POD onderzoek

De veldproef en een 13 tal centrifugeproeven, welke onderdeel zijn van het Praktijkonderzoek Opbarsten bij Dijken (POD), zijn uitgevoerd en worden op dit moment geanalyseerd. Hierbij worden analytische- en numerieke analyses uitgevoerd. De voorlopige conclusie uit deze proeven is, dat de huidige modellering omtrent het opbarsten bij dijken, waarbij de sterkte in de opbarstzone volledig wordt verwaarloosd ( $c'=\phi'=0$ ) en gerekend wordt met de sterkte bij eindrek, conservatief is. Dit sluit aan op de verwachting voorafgaand aan het onderzoek. De mate van conservatisme en de manier waarop de sterktebijdrage in de passieve zone het best kan worden meegenomen is nog onduidelijk. Op dit moment worden verschillende zoekrichtingen verkend. De 2 hoofdrichtingen betreffen op dit moment:

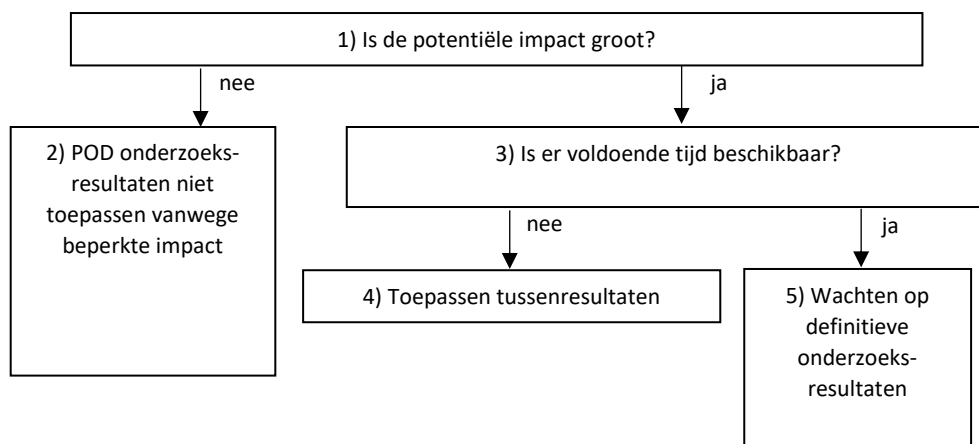
- Het modelleren van 100% van de eindsterkte in de passieve (opbarst)zone. In de actieve zone wordt ook uitgegaan van 100% van de eindsterkte, zoals op dit moment gebruikelijk is;
- Het modelleren van geen sterkte in de passieve (opbarst)zone in combinatie met pieksterkte in de actieve zone.

Enkele voorbeelden van de onderzoeksvragen die nog spelen zijn:

- Hoe om te gaan met situaties met berm, aangezien de proeven zijn uitgevoerd zonder berm
- Hoe om te gaan met afwijkende grondsoorten, in de proeven zijn alleen zanddijken beproefd
- Hoe kan de sterkte in de passieve zone het best worden gemodelleerd, aangezien zich geen duidelijk passief glijvlak ontwikkeld in de proeven.
- Wat is de verklaring dat er in de veldproef Macrostabieleit waterspanning groter dan grenspotentiaal zijn gemeten?
- 

### Stroomschema

Als advies ten aanzien van het handelingsperspectief richting projecten is een stroomschema opgesteld ten aanzien van het bepalen van de potentiële impact en aanscherping van het versterkingsontwerp. De verschillende stappen zijn onder het stroomschema nader toegelicht.



#### *Ad 1: Bepalen potentiële impact*

Om een bovengrens van de potentiële impact te bepalen kan worden uitgegaan van 100% sterkte in de passieve (opbarst)zone in combinatie met grenspotentiaal. Dit in plaats van het verwaarlozen van de sterkte in de passieve (opbarst)zone ( $c'= \phi'=0$  aanpak). Het kan voorkomen dat de modellering met pieksterkte in de actieve zone en geen sterkte in de passieve zone tot een hogere stabiliteitsfactor leidt. In dat geval geeft die modellering de bovengrens van de potentiële impact.

Op basis van deze bovengrens kan bepaald worden wat de potentiële impact op de veiligheidsopgave en/of het versterkingsontwerp is, en of dit tot een ander handelingsperspectief in het project leidt. Hierbij is het van belang om eerst de beslisvraag te formuleren (bijv. wel/niet versterken). Vervolgens kan bepaald worden of de potentiële impact dusdanig is dat dit tot een andere beslissing zou leiden. Op basis van een risicoanalyse kan vervolgens worden afgewogen hoe in het project met de tussenresultaten van het POD onderzoek wordt omgegaan.

#### *Ad 2: POD (tussen)resultaten niet toepassen*

Als blijkt dat de potentiële impact niet bepalend is, kan er voor gekozen worden om de (tussen)resultaten van het POD onderzoek niet toe te passen. De impact op het project is immers beperkt.

#### *Ad 3: Beschikbare tijd*

Als de impact groot is, is de volgende vraag of er voldoende tijd is om op de eindresultaten van het POD onderzoek te wachten of dat deze tijd niet beschikbaar is.

#### *Ad 4: Toepassen tussenresultaten*

Als er niet gewacht kan worden op de eindresultaten van het onderzoek, maar de impact op het project wel groot is, zijn er 2 basisopties hoe hier mee om kan worden gegaan. Deze 2 basisopties sluiten aan op de 2 eerder genoemde hoofdrichtingen die het POD onderzoek op dit moment onderzoekt. Voor het afwegen van deze opties kan een risico analyse behulpzaam zijn. Hierin kunnen alle aanwezige onzekerheden tegen elkaar worden afgewogen om tot een keuze te komen. Ook speelt mee in welke mate het mogelijk is om beheersmaatregelen genomen kunnen worden. Desgewenst kan DIV hierbij ondersteunen.

#### **Optie 1: Pieksterkte in actieve zone**

Indien dit niet wenselijk is én er wel alvast een aanscherping van het ontwerp doorgevoerd moet worden, wordt geadviseerd om de aanpak te volgen waarbij in de passieve (opbarst)zone geen sterkte wordt gemodelleerd (dit is dus geen wijziging ten opzichte van de huidige 'standaard'  $c'= \phi'=0$  aanpak) en in het actieve deel van het glijvlak uit te gaan van de 'pieksterkte'. Hierbij geldt dat de sterkte, in verband met rek-compatibiliteit, voor alle grondlagen bij hetzelfde (schuif)rekpercentage worden afgeleid. Voor meer achtergronden hierover wordt verwezen naar bijlage B van de Schematiseringshandleiding Macrostabiliteit. Dit rekpercentage is dan echter lager dan de eindrek die gebruikelijk is in de huidige praktijk, waardoor de sterkte hoger is. Als er sprake is van een horizontaal deel in het glijvlak (bijv. in het geval van een berm), is voor dat deel van het glijvlak de DSS proef het meest representatief, en moet de sterkte in die zone daarom bepaald worden op basis van DSS proeven. Deze aanpak is overigens ook al opgenomen in de rekenregels van het huidige instrumentarium. De kans dat de eindresultaten van het POD onderzoek tot een zwaarder ontwerp leiden is bij deze optie klein.

Opgemerkt wordt dat bij materialen die tijdens afschuiven (sterk) dilateren de pieksterkte bij eindrek wordt bereikt. In dat geval is de winst dus beperkt. Op dit moment loopt er vanuit De Innovatieversneller (DIV) een onderzoek welke laboratoriumproeven het best toegepast kunnen worden bij (sterk) dilaterend dijksmateriaal.



## ***Optie 2: Geen of gedeeltelijke sterktereductie passieve zone***

Het is ook mogelijk om in het ontwerp uit te gaan van de bovengrens van de potentiële impact. Hierbij hoort dan ook een relatief hoog risicoprofiel, als later blijkt dat de impact van het onderzoek kleiner is dan aangenomen. Op basis van projectspecifieke overwegingen kan er ook voor een 'tussenliggend' scenario's worden gekozen, waarbij bijvoorbeeld 25%, 50% of 75% van de sterkte wordt meegenomen.

## ***Ad 5: Afwachten definitieve resultaten***

Als er voldoende tijd beschikbaar is én de impact op het project is groot, kan gewacht worden totdat de definitieve resultaten beschikbaar komen. Deze resultaten worden medio 2025 verwacht.

## Handelingsperspectief Piping

Piping is het faalmechanisme waarbij terugschrijdende erosie leidt tot een doorbraak. De aanwezigheid van een uittredepunt is hierbij voorwaardelijk. Een uittredepunt kan ontstaan door opbarsten van de deklaag. Voor opbarsten zijn geen gevalideerde modellen beschikbaar. In de huidige praktijk wordt de sterkte van de deklaag verwaarloosd en bij analyses van de overstromingskans uitgegaan dat bij opdrijven opbarsten optreedt. Dit is een conservatieve aanname omdat in de praktijk opdrijven zonder opbarsten wordt waargenomen<sup>1</sup>. In het Praktijk onderzoek Opdrijven bij Dijken (POD) worden met bureau-, veld- en laboratoriumonderzoek hypothesen rondom het opbarsten gevalideerd. Voor dit handelingsperspectief is op basis van de beschikbare informatie (actuele kennis) vanuit het 'verhaal van de kering' nagegaan in welke situaties opbarsten een relevant mechanisme is en is de hypothese van POD vergeleken met resultaten van centrifugeproeven en waarnemingen uit de praktijkproef.

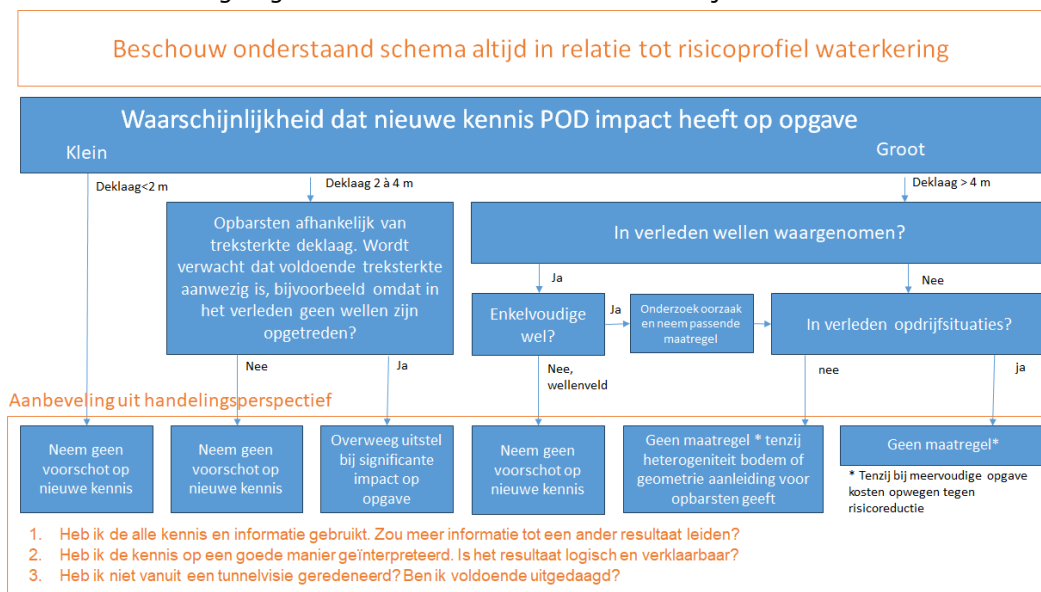
De volgende activiteiten zijn in 2024 in het project POD voorzien:

- Door POD wordt een kwalitatieve analyse voorzien waarin de relatie tussen dikte, opbouw van de deklaag en treksterkte van grondlagen in relatie tot de belasting vanuit pipinggevoelige zandlaag wordt onderzocht. Door de Innovatieversneller wordt aanbevolen om hieruit een fysisch model af te leiden en een betrouwbaarheidsfunctie te ontwikkelen waarmee dit handelingsperspectief en achterliggende hypothese kan worden onderbouwd. Aanbevolen wordt de aanpak voor het afleiden van deze betrouwbaarheidsfunctie vooraf af te stemmen met ENW.
- Door POD wordt een nadere analyse van de wellenkaart van STOWA voorzien. In de wellendatabase zijn een aantal waarnemingen van wellen bij dikkere deklaag. Van deze waarnemingen is het belangrijk om de werkelijke dikte en oorzaak van de wellen te achterhalen.

### Stroomschema

Als handelingsperspectief richting projecten is een stroomschema opgesteld. Het stroomschema geeft advies hoe in een pipinganalyse voor het bepalen van de veiligheidsopgave of versterkingsmaatregel met de huidige kennis (januari 2024) rekening kan worden gehouden met de kans op opbarsten van de deklaag in het achterland. De informatie waarop het handelingsperspectief is gebaseerd staat in de Bijlagen van dit document.

Belangrijk is dat altijd de context van de waterkering centraal staat. Bij een meervoudige opgave wordt anders omgegaan met de verwachte kennis uit de POD. En het wel of niet opbarsten heeft bij een schaaldijk met korte kwelweglengte een andere betekenis dan een dijk met veel voorland.



<sup>1</sup> In de praktijk worden situaties met grenspotential waargenomen.



De waarschijnlijkheid dat de nieuwe kennis uit POD impact heeft op de opgave is sterk afhankelijk van de dikte van de deklaag. Omdat de dikte van de deklaag lokaal sterk kan variëren is het belangrijk deze met lokaal onderzoek te bepalen. Vlakdekkende informatie vanuit bijvoorbeeld zandbanenkaarten en het SOS en kunnen worden gebruikt om de locatie en dichtheid van het lokale onderzoek vast te stellen. In veel gevallen is het regulier onderzoek dat voor versterkingsprojecten wordt uitgevoerd voldoende. Bij watervoerende tussenzandlagen geldt dat de dikte van de deklaag boven de tussenzandlaag moet worden beschouwd.

Het opbarsten van deklaag is naast de dikte van de deklaag ook afhankelijk van de (trek) sterkte van de deklaag. De treksterkte is afhankelijk van de grondsoort. Omdat de treksterkte van grond minder makkelijk is te bepalen en de relatie met opbarsten complexer is, wordt in het handelingsperspectief gedifferentieerd op basis van deklaagdikte. In een later stadium kan het handelingsperspectief worden aangescherpt op basis van de sterkte van de deklaag.

Naast dikte en sterkte van de deklaag speelt het waargenomen gedrag een belangrijke rol in het handelingsperspectief. Daarbij wordt ervan uitgegaan dat bij inspecties van recente hoogwatergolven (afgelopen 50 jaar was piping een algemeen bekend mechanisme) waarnemingen altijd zijn gedocumenteerd.

### ***Deklagen dunner dan 2 m***

Wanneer een deklaag aanwezig is geperforeerd zal deze niet opdrijven en opbarsten optreden. Bij een deklaag dunner dan 2 m is het aannemelijk dat door bodemvorming of menselijk handelen gaten door de deklaag aanwezig zijn. Voor het bepalen van de veiligheidsopgave wordt in dit handelingsperspectief aanbevolen om - conform de huidige praktijk - geen rekening te houden met de sterkte van de deklaag. De kans op terugschrijdende erosie bepaalt in de meeste gevallen de overstromingskans. Als de overstromingskans te hoog is, kan een maatregel getroffen worden. De DIV publicatie aanpak en afweegkader pipingmaatregelen (voorzien in tweede kwartaal 2024) geeft hiervoor handvatten.

### ***Deklagen dikker dan 4 m***

Gaten door een deklaag van meer dan 4 m kunnen ontstaan door bijvoorbeeld het niet afdichten van gaten uit boringen en sonderingen of het trekken van funderingspalen. Dit betreffen activiteiten waarvoor beheersmaatregelen (afdichten van gaten) in legger of beleidsregels zijn vastgelegd. Niet afgedichte gaten zijn tijdens hoogwatersituaties zichtbaar wanneer de stijghoogte in de zandlaag hoger wordt dan maaiveldniveau. De wellen kunnen dan alsnog worden afgedicht of opgekist. Voor het bepalen van de veiligheidsopgave wordt daarom aanbevolen uit te gaan van een gesloten deklaag.

Opdrijven van een gesloten deklaag treedt op wanneer de stijghoogte in de watervoerende zandlaag gelijk wordt aan de grenspotentiaal. Bij een uniforme deklaag kan de stijghoogte niet groter worden dan de grenspotentiaal. Wanneer de buitenwaterstand stijgt zal de oprijfzone groter worden. Het is mogelijk dat door heterogeniteit van bodemopbouw en maaiveldligging lokaal de stijghoogte hoger wordt dan de grenspotentiaal.

Opbarsten treedt op wanneer door heterogeniteit of geometrie trekspanningen in de deklaag ontstaan. Uit de experimenten van het Praktijkonderzoek Opdrijven bij Dijken volgt dat er bij uniforme deklagen dikker dan 4 m geen aanleiding is om te veronderstellen dat opbarsten optreedt als gevolg van opdrijven.

Bij dikke deklagen (dikker dan 4m) geven historische waarnemingen veel informatie over de kans op opbarsten. In dit handelingsperspectief wordt bij dikke deklagen aanbevolen om op basis van historische waterstanden te controleren of de stijghoogte in het verleden hoger is geweest dan maaiveld, of de deklaag in het verleden al een keer is belast tot opdrijven, en of inspectie naar wellen<sup>2</sup> heeft plaatsgevonden. Daarbij is het belangrijk om rekening te houden met de onzekerheid in respons en eigenschappen van de deklaag.

<sup>2</sup> Het betreft hier zandmeevoerende en schone wellen die duiden op gaten door de deklaag.

1. Indien er observaties van wellen zijn is het belangrijk de oorzaak van deze wellen te onderzoeken. Bij enkelvoudige wellen is de kans groot dat deze zijn veroorzaakt door (niet afgedichte) gaten. Aanbevolen wordt deze in dat geval af te dichten. Wanneer er meerdere wellen (wellenveld) aanwezig zijn, is het aannemelijk dat opbarsten is opgetreden. In dit handelingsperspectief wordt aanbevolen om in dat geval voor het bepalen van de veiligheidsopgave geen voorschot te nemen op nieuwe kennis uit de Praktijkproef Opbarsten bij Dijken. Wanneer de overstromingskans door terugschrijdende erosie te hoog is dient een passende maatregel te worden getroffen.
2. Indien er geen situaties zijn geweest waarbij waterspanningen onder de deklaag in het achterland hoger dan maaiveld zijn gekomen, kunnen bestaande gaten niet zijn waargenomen. Het is onwaarschijnlijk dat bij ontwerpcondities een stijghoogte aanwezig is waarbij de deklaag opdrijft.<sup>3</sup>
3. Indien er geen (historische) observaties van wellen zijn in situaties waarbij de stijghoogte onder de deklaag in het achterland hoger was dan maaiveldniveau, is het aannemelijk dat er geen gaten zijn. Het is belangrijk om altijd te blijven controleren op wellen en indien deze worden waargenomen de gaten met zwelklei of alternatief hiervoor af te dichten.
4. Indien er geen observaties zijn van wellen in situaties dat de stijghoogte hoger was dan de grenspotentiaal (situatie van opdrijven) zal opbarsten normaal gesproken onder ontwerpcondities ook niet optreden. Aanbevolen wordt om na te gaan of door heterogeniteit van de ondergrond of bijzondere geometrische omstandigheden de stijghoogte significant groter kan worden dan de grenspotentiaal.
5. Wanneer in ontwerpcondities sprake is van opdrijven en in historische situatie de stijghoogte altijd lager was dan de grenspotentiaal (maar hoger dan maaiveld) wordt aanbevolen na te gaan of er bijzondere geometrische omstandigheden of heterogeniteit in de ondergrond aanleiding kunnen zijn voor opbarsten.
6. Indien uit 4 of 5 volgt dat opbarsten niet voldoende kan worden uitgesloten wordt aanbevolen om bij een enkelvoudige opgave de maatregel te heroverwegen. Bij een meervoudige opgave wordt aanbevolen de extra kosten als wordt uitgegaan van opbarsten af te wegen tegen de reductie van het restrisico zonder opbarsten. De DIV kan bij deze overweging ondersteunen.

In situaties waar de deklaag bij maaiveld dikker dan 4 m is, maar onder slootbodems dunner, kan voor de analyse van opdrijven gewerkt worden met een equivalente dikte op basis van spanningspreiding.

### ***Deklagen tussen 2 m en 4 m***

Er is onvoldoende kennis om het gedrag van de deklaag te voorspellen. Mogelijk leidt nadere analyse van de proeven tot aanscherping van de grenzen voor de dikte van de deklaag in dit handelingsperspectief of een rekenmodel waarmee de kans op opbarsten afhankelijk van de sterkte eigenschappen kan worden bepaald.

Zolang deze kennis er niet is, wordt in dit handelingsperspectief geadviseerd om – conform de huidige praktijk - uit te gaan dat bij opdrijven de deklaag ook opbarst. Voor het bepalen van de kans op een doorbraak door piping wordt verwezen naar de bestaande rekenregels en modellen zoals beschreven in de handleiding overstromingskansanalyse door piping en de technische leidraden. Als de overstromingskans te hoog is, kan een maatregel getroffen worden. De DIV publicatie aanpak en afweegkader pipingmaatregelen (voorzien in tweede kwartaal 2024) geeft hiervoor handvatten.

Voor situaties met een deklaag tussen 2 m en 4 m én waarnemingen van (zandmeevoerende) wellen wordt voor begrip van de situatie aanbevolen de oorzaak van deze wellen te onderzoeken. Indien alleen ter plaatse van sloot een probleem is, wordt aanbevolen een passende beheermaatregel te nemen (bijvoorbeeld grindkoffer of verplaatsen sloot).

<sup>3</sup> Wanneer in het verleden de stijghoogte niet hoger is geweest is het bij een deklaag van minimaal 4 m niet waarschijnlijk dat de stijghoogte tijdens ontwerpcondities hoger wordt dan de grenspotentiaal. Dit treedt alleen op bij een hoge decimeringshoogte van de waterstand, een grote dempingsfactor en een laag volumiek gewicht. Deze combinatie komt in de praktijk nauwelijks voor.

In situaties met een enkelvoudige veiligheidsopgave en waarbij in het verleden geen wellen zijn waargenomen, kan worden overwogen de versterkingsmaatregel uit te stellen. De beslisboom piping geeft hiervoor handvatten.

### Samenvatting

Onderstaande tabel geeft een samenvatting van het handelingsperspectief voor locaties met en zonder waarnemingen van (zandmeevoerende) wellen.

	Enkelvoudige opgave	Meervoudige opgave
Deklaag < 2 m	Huidige praktijk, geen nieuwe kennis vanuit POD verwacht	Huidige praktijk, geen nieuwe kennis vanuit POD verwacht
Deklaag 2 – 4 m zonder opgetreden bedrijfsituatie		
Deklaag 2 – 4 m en opgetreden bedrijfsituatie	Overweeg uitstel maatregel bij grote impact	Afweging kosten (extra) maatregel t.o.v. risicoreductie
Deklaag > 4 m en verondersteld* opgetreden bedrijfsituatie	Geen maatregel	
Deklaag > 4 m zonder verondersteld* opgetreden bedrijfsituatie	Geen opbarsten tenzij geometrie of heterogeniteit hiervoor aanleiding	

Tabel 1: Handelingsperspectief voor locaties zonder waarnemingen (zandmeevoerende) wellen

	Enkelvoudige opgave	Meervoudige opgave
Deklaag < 2 m	Huidige praktijk, geen nieuwe kennis vanuit POD verwacht	Huidige praktijk, geen nieuwe kennis vanuit POD verwacht
Deklaag 2 – 4 m en stijghoogte hoger dan maaiveld		
Deklaag 2 – 4 m en opgetreden bedrijfsituatie		
Deklaag > 4 m en stijghoogte hoger dan maaiveld maar lager dan grenspotentiaal	Betreft bestaande perforaties, bij wellenveld opdrijven = opbarsten anders passende maatregel (gat afdichten)	Betreft bestaande perforaties, afweging kosten (extra) maatregel t.o.v. risicoreductie met afgedichte gaten
Deklaag > 4 m en opgetreden bedrijfsituatie	Onderzoek oorzaak en neem passende maatregel	Onderzoek oorzaak en neem passende maatregel

Tabel 2: Handelingsperspectief voor locaties met waarnemingen van (zandmeevoerende) wellen

### Plausibiliteitscontrole

Belangrijk is dat altijd de context van de waterkering centraal staat. Bij een meervoudige opgave wordt anders omgegaan met de verwachte kennis uit de POD. En het wel of niet opbarsten heeft bij een schaaldijk met korte kwelweglengte een andere betekenis dan een dijk met veel voorland. In alle gevallen wordt daarom een plausibiliteitscontrole aanbevolen. Daarbij worden de volgende vragen gesteld:

1. Heb ik de alle kennis gebruikt. Zou meer informatie tot een ander resultaat leiden?
2. Heb ik de kennis op een goede manier geïnterpreteerd. Is het resultaat logisch en verklaarbaar? Beschouw daarbij (kwalitatief) het totaal aan gebeurtenissen en onzekerheden die kunnen leiden tot een overstroming. Daarbij is het van belang of er sprake is van een enkelvoudige of een meervoudige opgave. In situaties met een meervoudige opgave (de overstromingskans door meerdere faalmechanismen is te hoog) is een globale onderbouwing vaak al voldoende.
3. Heb ik niet vanuit een tunnelvisie geredeneerd? Ben ik voldoende uitgedaagd, bijvoorbeeld vanuit kwaliteitsborging en vierogenprincipe, check bij DIV of challenge door Adviesteam Dijkontwerp?

\* Bij verwachte situatie rekening houden met onzekerheden respons waterspanningen en eigenschappen deklaag

## Bijlage A: Achtergrond handelingsperspectief Piping

### Theorie, observaties en metingen

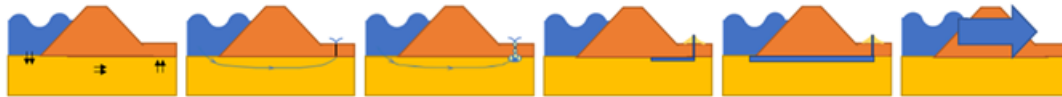
Deze bijlage bevat een overzicht van de theorie, observaties en metingen op basis waarvan het handelingsperspectief tot stand is gekomen. De analyse van het onderzoek in de Praktijkproef Opbarsten bij Dijken is nog niet compleet. In de analyse wordt nog nagegaan hoe de observaties en metingen moeten worden geïnterpreteerd en of ze de hypothese bevestigen voor situatie in de proeven, hoe de resultaten kunnen worden vertaald naar andere situaties, en of er nog aanvullende (onverwachte) inzichten zijn.

### Faalpad

Opbarsten is onderdeel van het faalpad voor het faalmechanisme piping (zie onderstaand kader).

Het faalpad voor piping bestaat uit:

1. Toename van waterspanningen en opbarsten: toename van de waterspanning in het watervoerend pakket leidt tot opdrijven en opbarsten in gevallen met een intacte deklaag in het achterland. Dit creëert leidt tot een uittredpunt voor zandtransport.
2. Heave: bij voldoende verticale stroming kunnen zandkorreltjes naar het maaiveld worden getransporteerd.
3. Horizontale pipegroei tot aan kritiek verval: het kritiek verval is het verval waarbij geen evenwicht meer is en de pipe zal doorgroeien.
4. Doorlopende pipe en hydraulische kortsluiting, verbreden en verdiepen pipe.
5. Kruinverlaging, overloop en bresgroei: Wanneer de pipe zo groot is dat deze instort zal het dijklichaam mee zakken. Water dat over de dijk en door scheuren in de dijk stroomt veroorzaakt erosie en uiteindelijk een bres.



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

Figuur 1 Keten van gebeurtenissen piping (uit Rode Draden Piping)

De toename van waterspanning voor opdrijven en opbarsten wordt beïnvloed door de lokale kenmerken van de belasting, de configuratie, en de ondergrond. De toename van waterspanning in het watervoerend pakket binnendijks wordt beïnvloed door:

- Contact met de het buitenwater, en eventuele intredeweerstand bij dit contact
- Intredeweerstand van het voorland (indien aanwezig).
- Eigenschappen van het watervoerend pakket (dikte en doorlatendheid)
- Uittredeweerstand van de deklaag in het achterland
- Eventuele andere factoren die de geohydrologie in het achterland beïnvloeden, bijvoorbeeld, hoge gronden, drainagemaatregelen, peilbeheer, aanwezige gaten, sloten, ...

*Het opdrijven van de deklaag* ontstaat wanneer de opwaartse druk vanuit een watervoerende laag hoger is dan het gewicht van de deklaag.

*Opbarsten treedt op* wanneer die deklaag ook daadwerkelijk kapot gaat als gevolg van opdrijven. De weerstand van de deklaag tegen opbarsten wordt naar verwachting bepaald door de dikte en sterkte en stijfheid.

Opbarsten is in principe voorwaardelijk voor het falen van een waterkering door piping in situaties met een intacte deklaag in het achterland. Het scheuren van de deklaag na opdrijven zorgt dan voor een uittredepunt waardoor zand getransporteerd kan worden. Wanneer een deklaag afwezig is of (sterk) geperforeerd is (bijvoorbeeld door een sloot, gestructureerde deklaag of andere gaten) is er al een uittredepunt aanwezig en is opdrijven en opbarsten niet voorwaardelijk voor piping.

In theorie is het mogelijk dat bij opdrijven een ruimte tussen de onderkant van de deklaag en de bovenkant van het watervoerende pakket ontstaat welke tot terugschrijdende erosie kan leiden zonder dat er een uittredepunt is. Van dit mechanisme zijn geen praktijkvoorbeelden bekend. In onderstaande tekstbox is beschreven waarom dit mechanisme niet aannemelijk is.

In theorie is het mogelijk dat opdrijven leidt tot ruimte tussen de onderkant van de deklaag en de bovenkant van het watervoerend pakket, als gevolg waarvan ook zandtransport of pipevorming zou kunnen initiëren zonder een uittredepunt aan maaiveld. Hoewel dit zou kunnen leiden tot initiatie van korreltransport aan de oppervlakte van het watervoerend pakket, lijkt onwaarschijnlijk dat dit tot een overstroming door piping zou kunnen leiden om twee redenen.

- Als de deklaag niet zou scheuren is de waterspanning in het achterland onder de opgedreven deklaag nog hoog, waardoor het debiet veel lager is dan in een geval van opbarsten. De vraag is of er voldoende debiet zal zijn voor pipevorming. Een eerste inschatting kan gemaakt worden met de rekenregel van Sellmeijer waarin uit wordt gegaan van het effectieve verval tussen de buitenwaterstand (al dan niet vermindert door intredeweerstand) en de grenspotential onder de deklaag.
- Zelfs als er pipevorming zou initiëren is de vraag of er voldoende ruimte zou zijn om al het zand te eroderen dat zou leiden tot kruinverlaging en bresgroei.

### *Hypothese*

In de huidige piping analyse wordt de kans op opdrijven gelijkgesteld aan de kans op opbarsten, er wordt geen rekening gehouden met de sterkte van de deklaag.

De overkoepelende hypothese van POD is dat bij intacte dikkere deklagen, vanaf ca. 3 à 4 m, de kans op opbarsten en daarmee op een overstroming door piping, verwaarloosbaar klein is.

Dit is gebaseerd op de onderstaande hypothese en redenering.

De kans dat de deklaag scheurt is afhankelijk van de mate waarin trekspanningen ontstaan, en de mate waarin de grond trekspanningen kan opnemen. Hoe dikker de deklaag, hoe kleiner de optredende trekspanning aan de onder- en bovenzijde van de deklaag. Wanneer de deklaag dikker is, is de kans op scheurvorming dus kleiner. De grote van de trekspanning die de grond kan opnemen is afhankelijk van de sterkte-eigenschappen van de grond. Bij gestructureerde, onverzadigde grondlagen is de kans dat deze in zijn geheel geen trekspanning op kunnen nemen groter (vanwege de aanwezige scheuren) dan bij meer verzadigde cohesieve gronden.

Bij deklagen dikker dan 4 m is de verwachting dat een significant deel van de deklaag verzadigd en cohesief is en dat trekspanningen daardoor voldoende kunnen worden opgenomen om de vorming van een scheur te voorkomen.

Trekspanning ontstaat door spanningsconcentraties die optreden bij geometrische overgangen of heterogeniteiten in de ondergrond. Bij dikkere deklagen dempen spanningsconcentraties naar verwachting meer uit. Spanningsconcentraties treden op bij:

- De binnenteen van de dijk.
- Aan de bovenzijde van de deklaag kunnen door opbolling trekscheuren ontstaan. De hypothese is dat dit bij een vlak maaiveld niet maatgevend is.
- brede sloten, ter plaatse van de overgang talud naar slootbodembodem.
- In gevallen van bebouwing in het achterland. De bebouwing voorkomt lokaal opdrijven. De omgeving rond de bebouwing drijft wel op.
- Bij heterogeniteit in de deklaag, bijvoorbeeld horizontale of verticale variatie in sterkte en stijfheid door gelaagdheid, variatie in doorlatendheid, ...

Naast spanningsconcentraties kan het ook zijn dat er concentraties zijn in de belasting door heterogeniteit in de ondergrond, bijvoorbeeld preferente stroombanen, als zandbanen niet doorlopen in het achterland of van dimensie variëren.

### ***Bestaande gaten***

Bij deklagen dikker dan 3 à 4 meter is het wel mogelijk dat er al gaten aanwezig zijn die niet het gevolg zijn van opbarsten. Echter vaak zal dit alleen zo zijn bij grotere werken (sondeergaten, boorgaten, funderingspalen) waarbij door waterschap voorwaarden worden gesteld voor afdichten. Indien een dergelijk gat wel wordt waargenomen kan dit alsnog worden afgedicht.

De verwachting is dat, indien dergelijke gaten aanwezig zijn, ze worden opgemerkt bij inspecties bij hoogwater. Kwel ontstaat al voordat opdrijven optreedt. Indien gaten worden opgemerkt kunnen deze worden dichtgezet met zwelklei of vergelijkbaar alternatief. Gaten zorgen wel voor concentratie van stroming (3D effect), wat de kans op erosie vergroot.

Bij echte dunne deklagen is de kans op het reeds aanwezig zijn van perforaties door menselijk of dierlijke activiteiten of door structuurvorming (zeker in het geval dat de deklaag niet het hele jaar door een volledig verzadigde zone heeft) heel groot. Dunnere deklagen (<1,5 à 2 m) komen vooral in het bovenrivierengebied voor waarbij de grondwaterstand vaak laag is.

### ***Observaties en metingen POD***

De resultaten van het Praktijkonderzoek opbarsten bij Dijken (POD) zijn gebruikt om de hypothese en het handelingsperspectief te onderbouwen. In dit onderzoek is middels centrifugeproeven en een veldproef onderzoek gedaan naar het opbarsten van de deklaag. Voor meer informatie wordt verwezen naar de factual reports van deze proeven.

### ***Opdrijven***

In zowel de veldproef als in de centrifugeproeven is opdrijven van de deklaag waargenomen, met uitzondering van één van de centrifuge proeven met een 0,06 m dikke deklaag (equivalente dikte orde 6 m).

### ***Opbarsten***

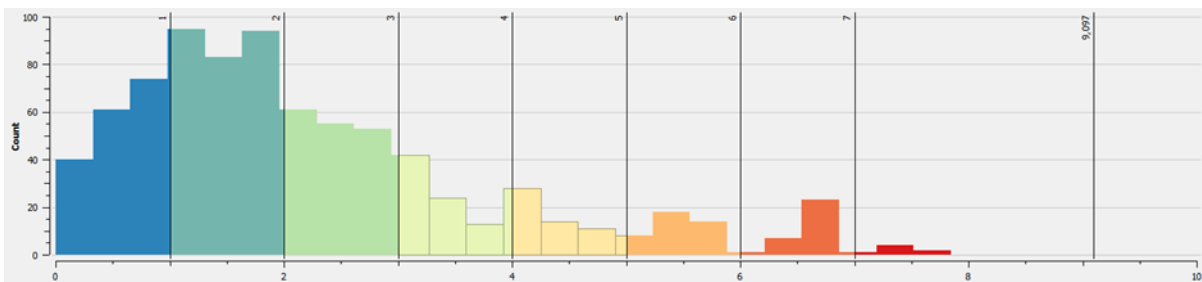
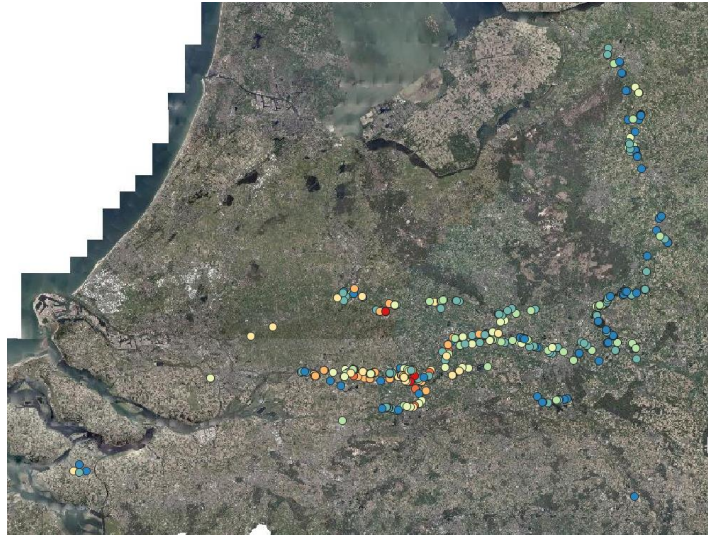
De volgende waarnemingen zijn gedaan:

- In de centrifugeproeven van POD ontstonden scheuren aan de onderzijde van de deklaag bij de binnenteen van de dijk. Diagonale scheuren ontwikkelden zich van onder naar boven door de deklaag. Ook zijn lengtescheuren geobserveerd.
- In de centrifugeproeven is opbarsten waargenomen in alle proeven met een deklaagdikte van 0,03 m en in een proef met een dikte van de deklaag van 0,06 m.
- In de veldproef van POD is geen scheurvorming gezien.



### **Praktijkobservaties**

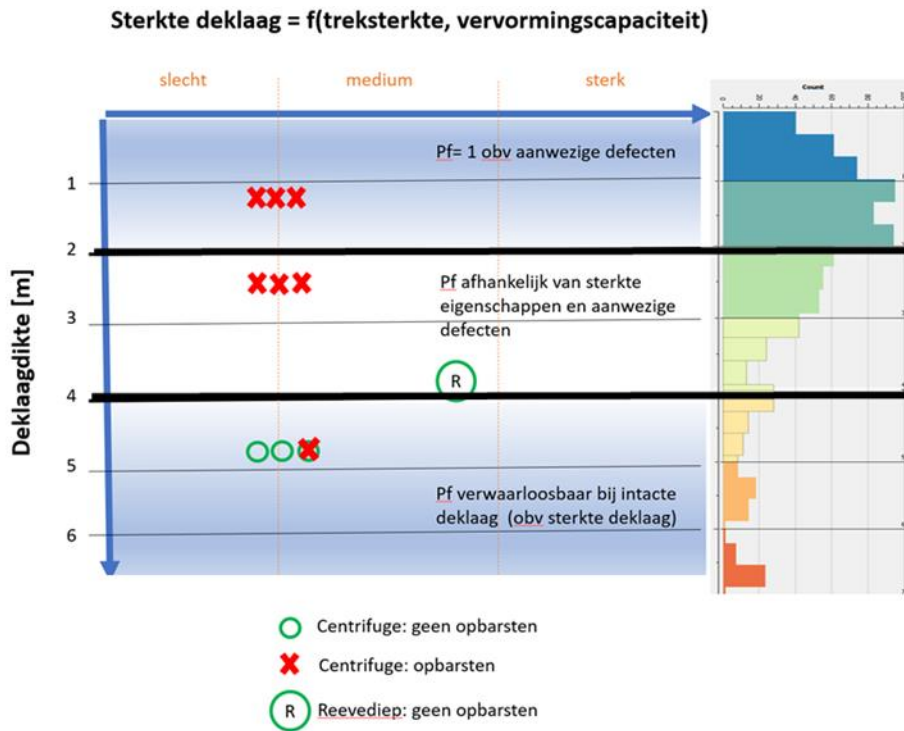
Analyse van de wellenkaart geeft aan dat ca. 18% van de wellen op die kaart is gesignaleerd bij een deklaag dunner dan 3 m. Wellen worden ook op grotere afstand van de dijk waargenomen (referentie Rapport Reevediep).



Figuur 1b: analyse van wellenkaart (Referentie rapport Reevediep).

## Duiding observaties en metingen

Onderstaande figuur geeft een overzicht van de observaties en metingen. Deze bijlage bevat hiervan een duiding.



## Praktijkobservaties

Wellen zijn waargenomen bij een dikte van de deklaag tot 7 m. Het zwaartepunt van de wellen is waargenomen bij een deklaag tot 3 m. daarbij wordt opgemerkt:

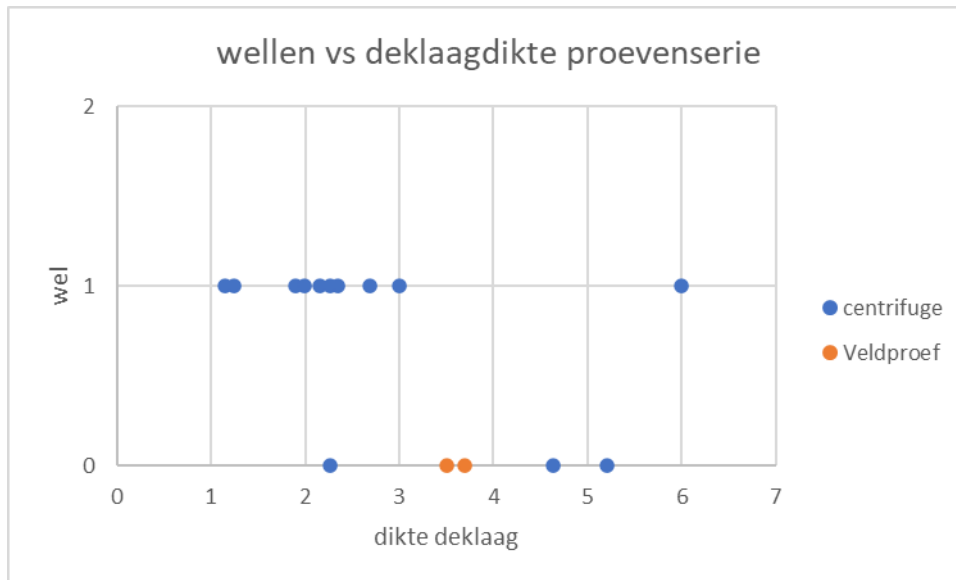
- De wellenkaart bevat observaties van zandmeevoerende wellen bij deklagen dikker dan 4 m. Dat suggereert dat ook dikkere deklagen kunnen opbarsten. Ook bevat de wellenkaart wellen die niet bij de binnenteen maar verder binnendijks zijn.
- De wellenkaart is niet gecorrigeerd voor wellen bij gaten die niet het gevolg van opbarsten hoeven te zijn, en de dikte van de deklaag bij wellen is vaak afgeleid van sonderingen en boringen in de omgeving. De deklaag zou dus ter plaatse van die wellen dunner kunnen zijn.

Om beter beeld te krijgen van de achtergrond van wellen op locaties met dikke deklagen gaat de Innovatieversneller met beheerders van piping waterschappen in gesprek. De verwachting is dat beheerders zelf vaak ook een beeld hebben waarom wellen op locaties zijn waar ze zijn. Hiermee kan het beeld uit de praktijk mogelijk worden aangescherpt.



### Centrifugeproeven en veldproeven

In de centrifugeproeven is scheurvorming geobserveerd in de proeven met een deklaag van 0,015 m en 0,03 m (deklaagdikte tot 3 m). In een proef met een dikte van de deklaag van 0,015 m trad geen opbarsten op. In één van de drie proeven met een deklaag van 0,06 m (equivalent van 6 m) is opbarsten opgetreden. Dit is weergegeven in onderstaande figuur. In de figuur zijn ook de waarnemingen van de veldproeven weergegeven.



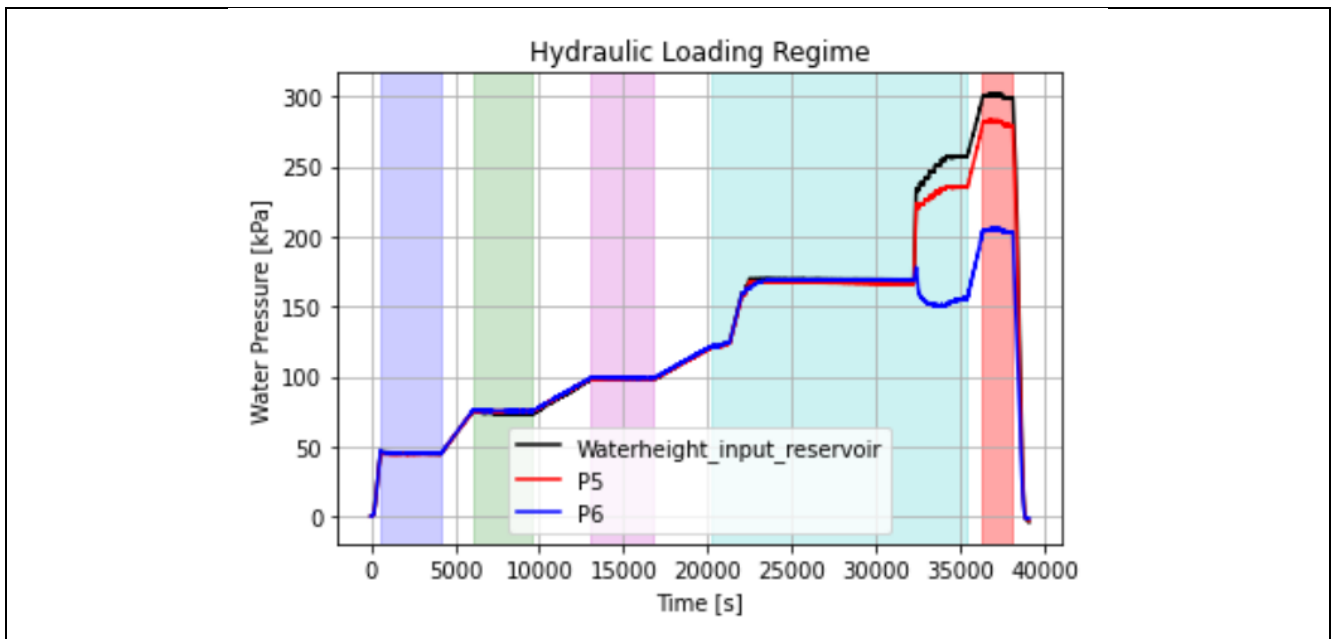
Figuur B2: Observatie van wellen in de proeven voor POD, 1 betekent dat een wel is geobserveerd, 0 dat dit niet het geval was. Data uit REF Reevediep.

Daarbij opgemerkt:

- Voor de proef met een equivalente deklaagdikte van 6 m die opgebarsten is, was een wel in de teen van de dijk. Deze proef is doorgezet tot een extreme buitenwaterstand die 7 cm (equivalent 7 m) hoger dan lag dan de dijk kruin. De proef wordt in POD gebruikt voor validatie van het rekenmodel en is niet bedoeld voor beschrijving van het fenomeen in de praktijk. Deze omstandigheden zijn fysiek gezien fysisch onmogelijk voor de Nederlandse dijken (nog kwantificeren). In onderstaande tekstbox is deze proef nader geduid.

#### Duiding opbarsten proef met 6 m dikke deklaag

Een wel in de teen van de dijk is waargenomen bij een deklaagdikte van omgerekend 6 m. Deze proef (proef 2) is doorgezet tot een extreme buitenwaterstand die 7 cm (equivalent 7 m) hoger dan lag dan de dijk kruin. Opdrijven van de deklaag treedt bij veel lagere waterdrukken op (circa 4 cm onder de dijk kruin) zie onderstaande figuur uit het feitelijk rapport. De vlakke waterdruk van om en nabij 170 kPa stijghoogte geeft de situatie aan met een opdrijffactor van 1,0, de rode lijn p5 is de stijghoogte bij intredepunt, de blauwe lijn de stijghoogte in het achterland. De stijghoogte waarbij de wellen zijn waargenomen en opdrijven optrad ligt in onderstaande figuur op een niveau van 280 kPa. De proef is voor het onderzoek wel relevant om te kijken wat er in deze situatie met het achterland gebeurt. Voor de waarnemingen met betrekking tot al dan niet opbarsten niet, omdat de stijghoogte is opgevoerd tot een voor deze dijk fysisch onmogelijke stijghoogte. Voor wat betreft de waarnemingen van wel vorming gegeven opdrijven bij in de praktijk realistische belastingen moeten we deze waarde niet meebeschuwen.



- De kleilaag in de Centrifugeproef bestaat uit Oostvaardersplassenklei. Dit betreft een siltige klei die nauwelijks trek kan opnemen. De afzettingen die bij deklaagdicken groter dan 4 m op de zandlaag liggen hebben in de praktijk veelal meer treksterkte.
- In de centrifugeproeven de dijkopbouw sterk is geïdealiseerd zodat de proefsituatie eenvoudig kan worden geschematiseerd in een rekenmodel. Homogene deklaag, strakke geometrie, rechte laagscheidingen. In de praktijk zullen overgangen vaak geleidelijke zijn waardoor ook buig- en trekspanningen kleiner kunnen zijn dan in de centrifugeproef. Daar staat tegenover dat in de praktijk de ondergrond (zowel watervoerend pakket als deklaag) heterogeniteit kunnen bevatten die wel kunnen leiden tot concentratie van spanningen of lokaal zwakkere plekken.
- Voor dunnere deklagen trad scheurvorming op bij de binnenteen van de dijk in de proeven, waar spanningsconcentraties het hoogste zijn. Dit komt overeen met de verwachting dat scheurvorming daar optreedt waar de spanningsconcentratie het hoogste is.

### Veldproeven

In de veldproeven is bij een deklaagdikte van 4 m geen opbarsten waargenomen.