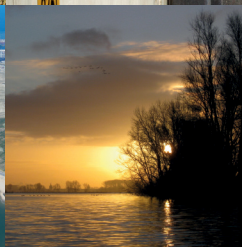
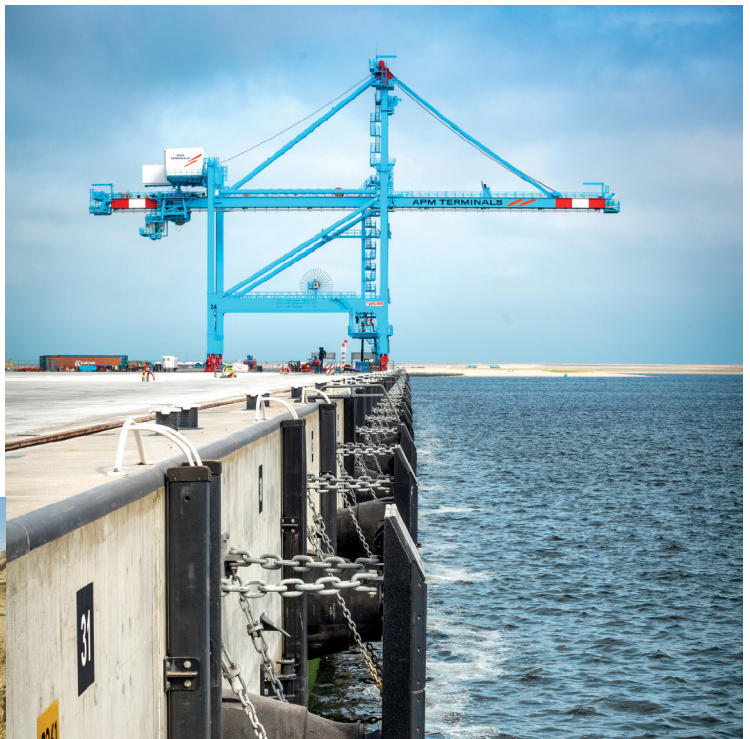


## POV Piping Regionale Kwelstroom


stappenplan beheerdersoordeel  
Piping bij regionale kwelstroom





**POV piping regionale kwelstroom****stappenplan afwijkend toetsoordeel  
regionale kweldruk**

referentie	projectcode	status
AP539-7/15-006.502	AP539-7	concept 01
projectleider	projectdirecteur	datum
ir. P.E.M. Schoonen	ir. H.J.M.A. Mols	17 april 2015

autorisatie	naam	paraaf
goedgekeurd	ir. P.E.M. Schoonen	



<b>INHOUDSOPGAVE</b>	<b>blz.</b>
<b>1. INLEIDING</b>	<b>1</b>
1.1. Aanleiding	1
1.2. Regionale kwelstroom	1
1.3. Doel	2
1.4. Positie document	3
1.5. Scope	3
1.6. Leeswijzer	4
<b>2. STAPPENPLAN</b>	<b>5</b>
<b>3. STAP 1: REGIONALE KWELSTROOM RICHTING DE DIJK AANWEZIG?</b>	<b>7</b>
3.1. Benodigde informatie	7
3.2. Analyse	7
3.3. Onderbouwing	8
3.4. Aandachtspunten	8
3.5. Resultaat	8
3.6. Achterliggende hypothese	8
<b>4. STAP 2: SCHEMATISEREN SITUATIE</b>	<b>9</b>
4.1. Benodigde informatie	9
4.2. Schematisatie ondergrond	9
4.3. Schematisatie geohydrologie	9
<b>5. STAP 3: VINDT OPBARSTEN PLAATS? EN ZO JA, WAAR?</b>	<b>11</b>
5.1. Benodigde informatie	11
5.2. Geohydrologisch model	11
5.3. Berekening: Toetsing opbarsten	12
5.4. Berekening: Model bijstellen	12
5.5. Resultaat	12
5.6. Achterliggende hypothese	13
<b>6. STAP 4: VALT DE OPBARSTLOCATIE BINNEN DE KRITIEKE L?</b>	<b>15</b>
6.1. Benodigde informatie	15
6.2. Berekening	15
6.3. Resultaat	15
<b>7. STAP 5: STROOMRICHTING TER PLAATSE VAN WEL</b>	<b>17</b>
7.1. Benodigde informatie	17
7.2. Berekening	17
7.3. Resultaat	18
7.4. Achterliggende hypothese	18
<b>8. NEGATIEF BEHEERDERSOORDEEL</b>	<b>19</b>
<b>9. REFERENTIES</b>	<b>21</b>
laatste bladzijde	21

**BIJLAGEN**

- I      Ontstaan regionale kwelstroom
- II     Schematisatie ondergrond
- III    Schematisatie geohydrologie

**aantal blz.**

1  
2  
1

## 1. INLEIDING

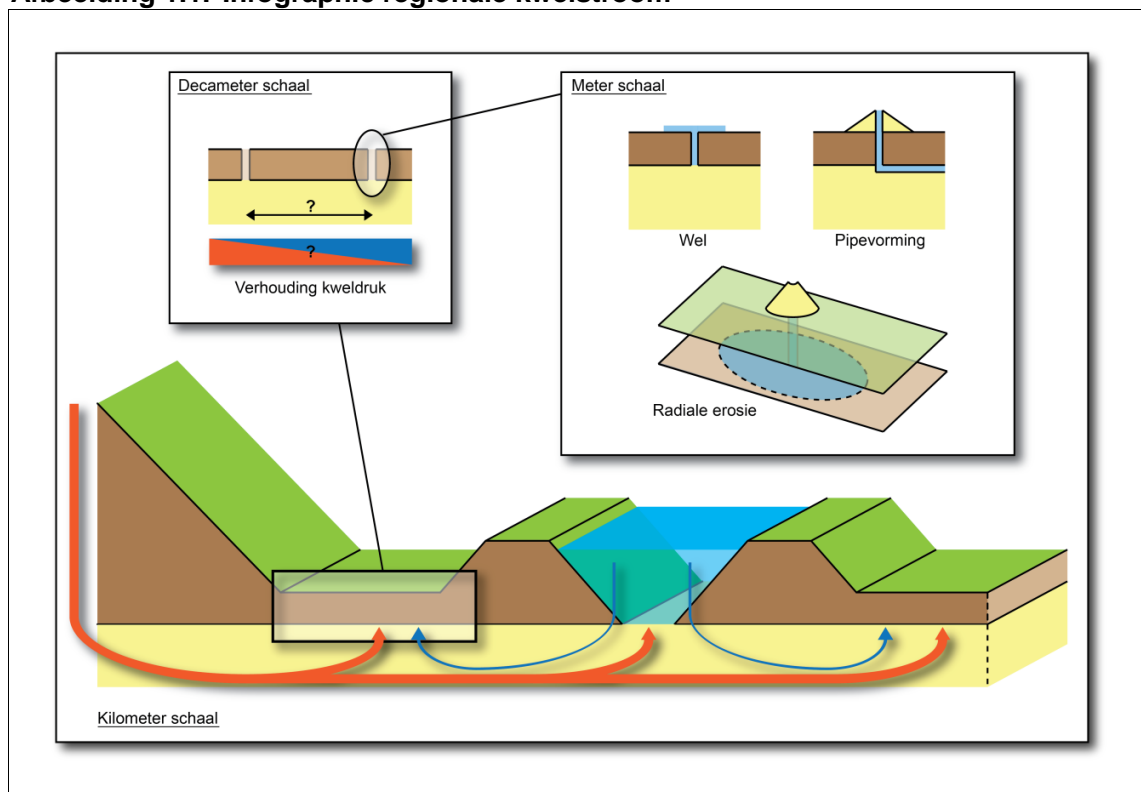
### 1.1. Aanleiding

Het stappenplan 'Afwijkend toetsoordeel regionale kweldruk' is opgesteld in het kader van het POV-Piping onderzoek naar de invloed van regionale kweldruk op piping. Achtergrondinformatie over dit onderzoek en de opzet van dit onderzoek staat in het 'Plan van aanpak' [ref. 1.]. Het stappenplan vormt samen met de 'Werkwijzer Piping bij Regionale Kwelstroom' [ref. 9.] handvaten hoe de invloed van de regionale kwelstroom op piping bepaald kan worden en of het mogelijk is om een afwijkend beheerdersoordeel op te stellen. De theoretische onderbouwing van de te volgen stappen volgt in 'Theoretische onderbouwing zandmeevoerende wellen', dit laatste rapport wordt later gepubliceerd en mogelijk wordt dit rapport om deze reden later nog aangepast.

### 1.2. Regionale kwelstroom

Een regionale kwelstroom is gedefinieerd als een grondwaterstroming vanaf hooggelegen gronden, zoals de Grebbeberg en het Veluwemassief, in de richting van het buitenwater. De stroomrichting tijdens dagelijkse omstandigheden is door de regionale kwelstroom gericht naar het buitenwater. Dit is tegengesteld aan de richting van de kwelstroom in het geval van 'klassieke' piping, deze is namelijk tijdens hoogwater gericht van de rivier in de richting van het achterland.

**Afbeelding 1.1. Infographic regionale kwelstroom**

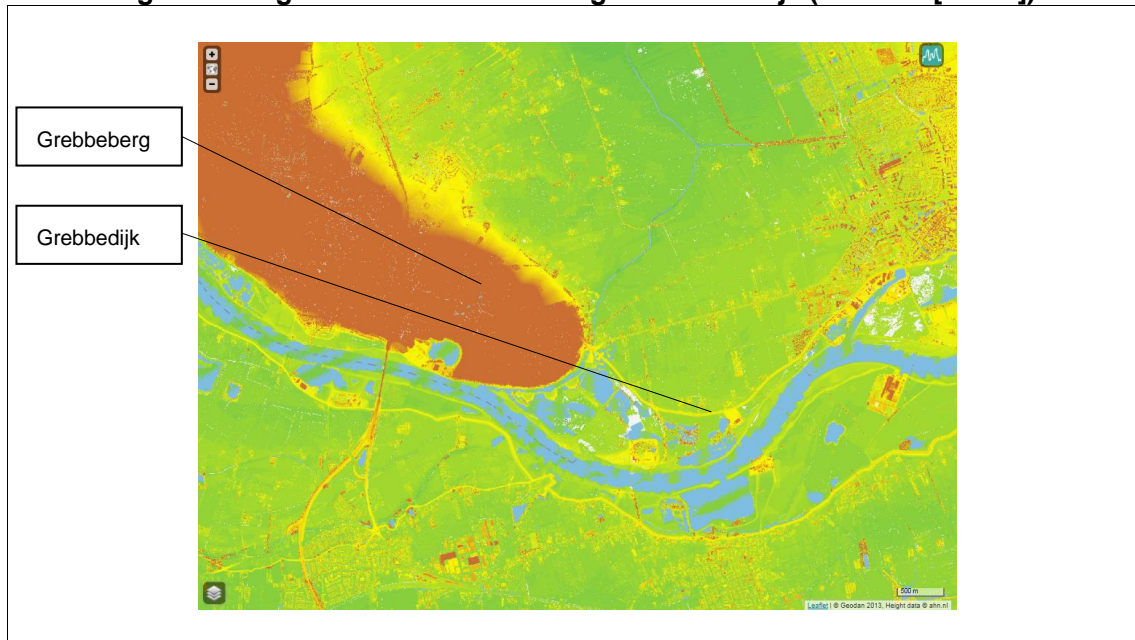


Door de regionale kwelstroom kunnen zandmeevoerende wellen ontstaan die niet noodzakelijkerwijs tot een instabiliteit van de waterkering leiden. Een opbarstlocatie buiten de minimaal benodigde kwelweglengte,  $L_{crit}$ , van de dijk kan ervoor zorgen dat er geen zandmeevoerende wel binnen de  $L_{crit}$  van de dijk ontstaat. Een dijk die in de toetsing afgekeurd is op het faalmechanisme piping, zou dus door een positief effect van regionale kwelstroom goedgekeurd kunnen worden. Dit is afhankelijk van de locatie van de wellen en de verhouding tussen de regionale kwelstroom en de kwelstroom vanaf de rivier. De onderbouwing hiervoor is opgenomen in [ref. 10].

Regionale kwelstroom kan er ook mogelijk toe leiden dat een dijk die is goedgekeurd voor 'klassieke' piping, niet voldoet door toedoen van de regionale kwelstroom. De verhoogde druk in het achterland kan voor opbarsten zorgen binnen de lengte  $L_{crit}$  en wanneer een stroom vanuit de rivier aanwezig is, kan terugschrijdende erosie ontstaan. Deze situatie kan zich alleen voordoen als in een schematisatie zonder regionale kwelstroom geen opbarsten plaatsvindt door piping vanuit de rivier of het buitenwater. Alleen in deze situatie kan een goedgekeurde dijk afgekeurd worden. Namelijk wanneer opbarsten plaatsvindt op basis van de kwelstroom vanuit het buitenwater, zal een aanwezige regionale kwelstroom de opbarstlocatie meer naar het achterland verplaatsen.

Een praktijkvoorbeeld van een locatie waar regionale kwelstroom optreedt is de Grebbedijk langs de Nederrijn. Nabij de Grebbedijk zijn in 2011 en 2012 zandmeevoerende wellen geconstateerd bij waterstanden ruim onder het maatgevend hoogwater. Deze wellen kunnen in theorie dus niet door piping van het rivierwater veroorzaakt zijn. Verwacht wordt dat de kwelstromen in de omgeving van de Grebbedijk niet alleen van rivier naar achterland lopen. De hoge gronden van de Veluwe en de Utrechtse Heuvelrug leiden mogelijk tot een regionale kweldruk in de polder die de stroming vanuit de rivier kan beïnvloeden.

**Afbeelding 1.2. Hoogtekaart van Grebbeberg en Grebbedijk (via AHN [ref. 1.]**



### 1.3. Doel

Het doel van het stappenplan is het toelichten van de te doorlopen stappen voor het opstellen van een gefundeerd beheerdersoordeel op het gebied van piping voor dijken waar sprake is van regionale kwelstroom. Het stappenplan is geschreven voor beheerders.



## 1.4. Positie document

Het stappenplan is een aanvulling op de Werkwijzer Schematiseren regionale kwelstroom [ref. 9.]. De stappenplan gaat dieper in op de te ondernemen acties om tot een aanvullend beheerdersoordeel te komen voor dijksecties beïnvloedt door regionale kwelstroom.

De onderbouwing van de genoemde hypothesen in dit stappenplan volgt in een aparte rapportage 'Theoretische onderbouwing' [ref. 10.]. Deze notitie wordt na oplevering als bijlage bij het stappenplan gepresenteerd.

### Theoretische onderbouwing volgt

De voorliggende versie van het stappenplan 'Afwijkend beheerdersoordeel regionale kweldruk' is gebaseerd op plausibel geachte hypothesen. Na het toetsen van de hypothesen en het opstellen van de rapportage 'theoretische onderbouwing' volgt een aanpassing van het stappenplan voor zover nodig.

## 1.5. Scope

Alle getoetste dijksecties dienen gecontroleerd te worden op de aanwezigheid van regionale kwelstroom. Aangezien ook goedgekeurde dijksecties mogelijk afgekeurd kunnen worden, moeten alle secties meegenomen worden wanneer in een gebied sprake is van regionale kwelstroom.

Regionale kwelstroom kan niet alleen relevant kan zijn voor rivierdijken, maar ook voor dijken gelegen aan een ander type waterlichaam, indien een hoog achterland aanwezig is. Bijvoorbeeld de dijk langs de Oosterschelde, met regionale kweldruk vanuit het brede duinengebied aan de Noordzeekust, en de dijk langs het Markiezaatsmeer bij Bergen op Zoom met regionale kweldruk vanuit het achterland (Afbeelding 1.3).

**Afbeelding 1.3 Hoogtekaart van locaties met mogelijk regionale kwelstroom relevant voor waterkeringen (links: Schouwen-Duiveland, rechts: Bergen op Zoom) (via AHN [ref. 1.]**



In Afbeelding 1.1 staat het beschouwde proces van regionale kwelstroom wat, eventueel in combinatie met de 'klassieke' pipingstroom, leidt tot opbarsten en pipevorming. Op de kilometerschaal is het beschouwde invloedsgebied van de regionale kwelstroom omkaderd: het gaat om de invloed van de regionale kwelstroom op het eventuele opbarsten aan dezelfde zijde van de dijk als de regionale kwelstroom ontstaat. Deze regionale kwelstroom is gericht richting de dijk. Zoals ook in Afbeelding 1.1 te zien is kan de regionale kwelstroom

ook invloed hebben aan een tegenoverliggende dijk. Dit geval, waarin de regionale kwelstroom gericht is in de richting 'van de dijk af', ligt buiten de scope van dit stappenplan.

Opgemerkt wordt dat er opbarsten plaats kan vinden door toedoen van de regionale kwelstroom, wanneer de dijk voor 'klassieke piping' voldoet. Oorzaak is de drukverhoging onder de deklaag door de regionale kweldruk in combinatie met de druk vanuit het buitenwater.

De invloed van regionale kwelstroom kan mogelijk ook interessant zijn voor de invloed op piping op regionale waterkeringen, maar dit type waterkeringen is geen onderdeel van deze studie.

## **1.6. Leeswijzer**

Het stappenplan voor een afwijkend beheerdersoordeel op basis van regionale kwelstroom staat in hoofdstuk 2. In de hoofdstukken 3 tot en met 6 wordt achtereenvolgens een stap uit het stappenplan toegelicht. In deze hoofdstukken wordt toegelicht wat het doel is van de stap en hoe de stap uitgevoerd dient te worden. Hoofdstuk 7 geeft kort aan hoe te handelen als er maatregelen nodig zijn. Een lijst van gebruikte referenties staat in hoofdstuk 8.

## 2. STAPPENPLAN

Dit hoofdstuk bespreekt het te doorlopen stappenplan voor het bepalen van de invloed van regionale kwelstroom op het faalmechanisme piping bij dijken. Het stappenplan is schematisch weergegeven in Afbeelding 2.1.

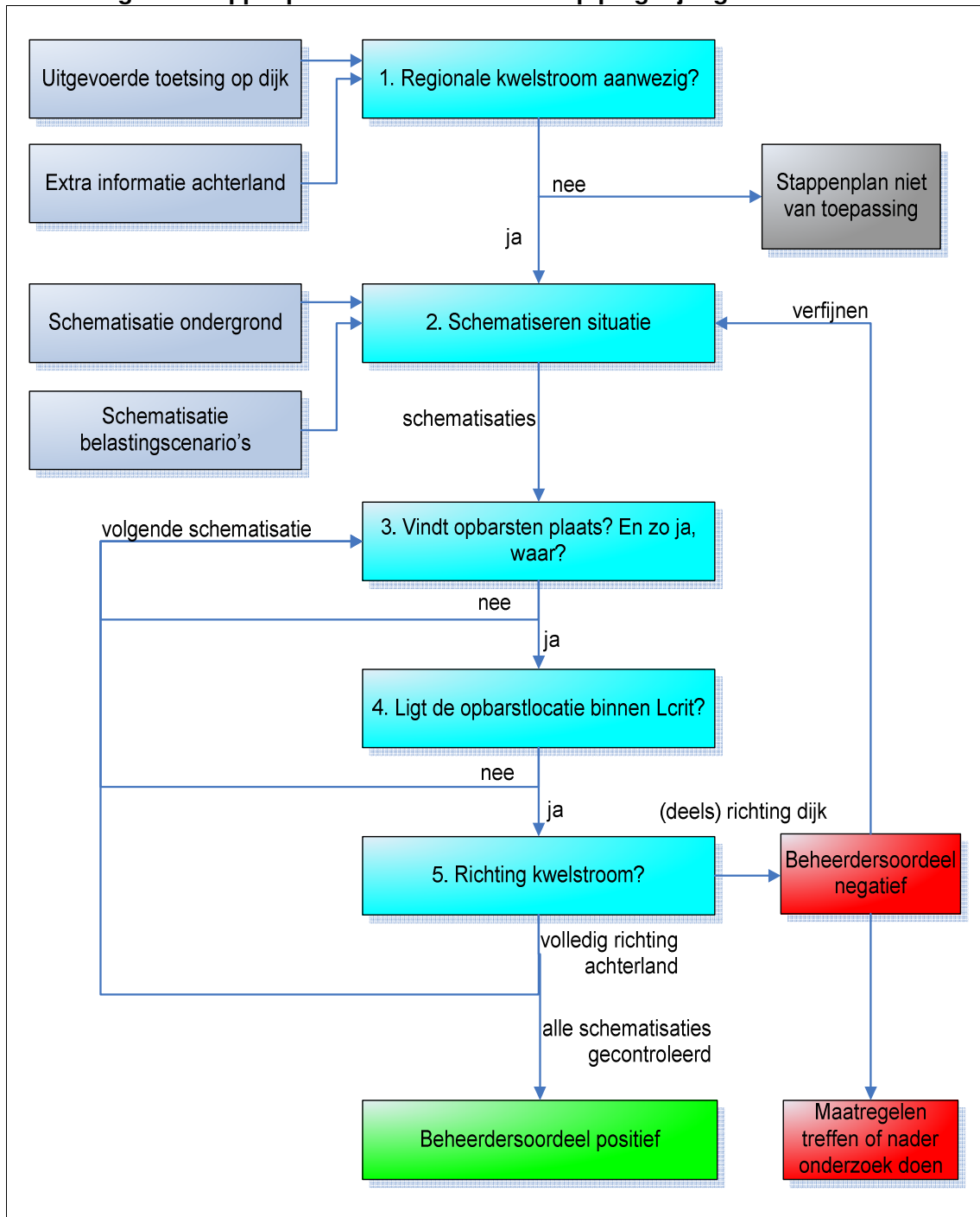
Uitgangspunt bij het te doorlopen schema is dat de dijksectie in een eerder stadium is getoetst op het faalmechanisme piping. De aanwezige informatie verzameld is ten behoeve van deze toetsing en de resultaten van de toetsing kunnen worden toegepast in de stappen voor het bepalen van de invloed van regionale kwelstroom. Een overzicht van de benodigde informatie en een toelichting op het proces staan in de 'Werkwijzer schematiseren regionale kweldruk' [ref. 9].

In de eerste stap wordt gekeken of regionale kwelstroom aanwezig kan zijn op de locatie van de te onderzoeken dijksectie. Wanneer dit niet het geval is, is het doorlopen van het stappenplan niet relevant. De ondergrond wordt geschematiseerd in de tweede stap, samen met het opstellen van relevante combinaties van belastingsscenario's. Stap drie, vier en vijf stellen vast of er opbarsten plaatsvindt binnen de minimaal benodigde kritische kwelweglengte van de dijksectie en wat de stroomrichting is ter plaatse van de wel. Wanneer grondwaterstroming vanaf de dijk naar de wel stroomt, wordt een negatief beheerdersoordeel gegeven voor piping bij regionale kwelstroom. Bij een negatief beheerdersoordeel is het mogelijk voor de schematisaties waarvoor dit geldt de schematisatie te verfijnen. Een verfijning van het model zou kunnen leiden tot een positief beheerdersoordeel. Andere mogelijke acties bij een negatief beheerdersoordeel zijn het treffen van maatregelen om piping tegen te gaan, of het doen van meer onderzoek om vast te stellen of er sprake is van piping. Dit onderzoek kan zich bijvoorbeeld richten op de aanwezigheid van radiale toestrooming en erosie rond een wel.

Wanneer voor alle schematisaties geen negatief beheerdersoordeel wordt gegeven, kan een positief beheerdersoordeel gegeven worden voor de dijksectie voor piping bij regionale kwelstroom.

De volgende hoofdstukken lichten de stappen uit dit stappenplan toe.

**Afbeelding 2.1. Stappenplan 'Beheerdersoordeel piping bij regionale kwelstroom'**



### 3. STAP 1: REGIONALE KWELSTROOM RICHTING DE DIJK AANWEZIG?

Het doel van stap 1 is te bepalen of regionale kwelstroom in de richting van de dijk kan optreden in een gebied. Wanneer er geen regionale kwelstroom kan optreden wordt het doorlopen van het stappenplan afgebroken dan is regionale kwelstroom niet aanwezig waardoor de rest van het stappenplan niet van toepassing is.

Deze stap omvat de dijk en het achterland, het is een toetsing op kilometerschaal. De situatie wordt zodanig versimpeld dat het gezien kan worden als een grove benadering van de stromingssituatie in het achterland. Ondanks de grove benadering moet de analyse wel zorgvuldig worden uitgevoerd, om te voorkomen dat ten onrechte wordt geconcludeerd dat een regionale kwelstroom afwezig is. Op voorhand is namelijk niet te zeggen is of aanwezige regionale kwelstroom een positief of negatief effect op de pipingsituatie onder de dijk heeft.

De maatgevende situatie is een MHW-golf. De situatie tijdens de zomer (met laag water) is namelijk niet maatgevend voor piping. De MHW-golf is een uitzonderlijke situatie die maar korte tijd duurt. Daarom vindt de toetsing in eerste instantie plaats voor een gemiddelde wintersituatie, een situatie die gangbaar is in de geohydrologie. Dit levert de randvoorwaarden voor de toetsing tijdens de MHW-golf.

Een quickscan is al uitgevoerd voor een groot aantal dijken in het rivierengebied in de rapportage 'POV Piping regionale kwelstroom - quickscan areaal' [ref. 8.]. Wanneer het te onderzoeken gebied al is onderzocht in deze quickscan, kan het resultaat van de quickscan worden beschouwd als een eerste indicatie. Het is een eerste indicatie omdat alleen gebruik is gemaakt van het landelijke grondwatermodel NHI en niet van lokale geohydrologische analyses en modellen. Wanneer uit de quickscan blijkt dat er bij een dijksectie geen regionale kwelstroom verwacht wordt, kan op basis van een geohydrologische systeem-analyse door de toetsers besloten worden om een dijksectie toch te onderzoeken.

#### 3.1. Benodigde informatie

De benodigde informatie moet inzicht en begrip geven in de stijghoogte van het 1e watervoerende pakket tijdens gemiddelde winter in een zone van circa 500 m rond de rivier. Hiervoor kan een analyse worden gemaakt uit de volgende bronnen:

- de waterstand in de rivier tijdens een gemiddelde winter;
- een geohydrologische systeemanalyse van het gebied die in ieder geval de bodemopbouw, waarnemingen van de grondwaterstand en stijghoogte omvat en het oppervlaktewater. Indien relevant moet het actuele effect van grondwatergebruikers zoals drinkwateronttrekkingen worden beschouwd, of juist de mogelijke stopzetting van deze gebruikers;
- een regionaal instationair grondwatermodel, wanneer dit model succesvol is gekalibreerd rondom de rivier.

#### 3.2. Analyse

De stijghoogte in het 1<sup>e</sup> watervoerende pakket wordt vergeleken met de waterstand in de rivier tijdens een gemiddelde wintersituatie. Wanneer de stijghoogte boven het rivierpeil ligt, is er sprake van een waterstroom in de richting van de rivier.

Een toelichting van de bepaling van de aanwezigheid van een regionale kwelstroom richting de dijk staat in bijlage I.

### **3.3. Onderbouwing**

Grondwater stroomt van een gebied met een hoge potentiaal naar een gebied met een lagere potentiaal (Wet van Darcy). Ook tijdens een gemiddelde wintersituatie moet de rivier een lagere potentiaal hebben, om een relevante factor te zijn in de toetsing.

### **3.4. Aandachtspunten**

De volgende aandachtspunten worden belangrijk geacht:

- afleiding van stijghoogte in watervoerende pakket;
- afleiding van hoogwater op rivier;
- kans van voorkomen van combinatie bovenstaande.

### **3.5. Resultaat**

De uitkomst van deze stap is een antwoord op de vraag of er een regionale kwelstroom in het gebied kan optreden.

### **3.6. Achterliggende hypothese**

De volgende hypothese ligt ten grondslag aan het bovenstaande en moet nog geverifieerd worden in de nog op te leveren theoretische onderbouwing [ref. 10.]:

*'Piping kan volgens de 'klassieke' schematisatie plaatsvinden in lagen waar één kwelstroom aanwezig is (eenrichtingsverkeer), maar niet in combinatie met een regionale tegenstroom. Dit is het geval bij hogere grondwaterstanden die draineren richting rivier'.*

## 4. STAP 2: SCHEMATISEREN SITUATIE

Het doel van de tweede stap is het schematiseren van de situatie. Een onderverdeling is gemaakt in de schematisatie van de ondergrond, weerstand biedend tegen opbarsten, en de schematisatie van belastingssituaties.

Dit hoofdstuk presenteert de wijze waarop de ondergrond en de belastingssituaties geschematiseerd worden. Resultaat van dit hoofdstuk is een aantal schematisaties van de situatie. Deze schematisaties kunnen getoetst worden op opbarsten.

### 4.1. Benodigde informatie

Het dijkprofiel en het achterland worden geschematiseerd in een 3D situatie met een geohydrologisch model. De eerste stap is het vaststellen van de mogelijke schematiseringen van de ondergrond en de belastingssituaties (stijghoogte). Op basis van ervaring en kennis worden de relevante combinaties van de ondergrondschematisatie en belastingssituaties als scenario gekenmerkt.

Met ondergrondschematisatie wordt de variatie van de volgende parameters in de ruimte bedoeld:

- dikte van de deklaag;
- volumieke gewicht van de deklaag.

De wijze van schematisering van de ondergrond is verder toegelicht in paragraaf 4.2.

Met belastingssituaties worden combinaties van de volgende geohydrologische aspecten bedoeld:

- grondwaterstand in het achterland;
- stijghoogte in het watervoerende pakket;
- waterstand op het buitenwater.

De verschillende relevante combinaties van scenario's zijn verder toegelicht in paragraaf 4.3.

### 4.2. Schematisatie ondergrond

De geboden weerstand van de ondergrond tegen opbarsten is afhankelijk van de bodemopbouw en de grondparameters. De dikte van de deklaag en het volumieke gewicht van de deklaag zijn invoerparameters in de opbarstformule.

De ruimtelijke verschillen in deze geotechnische parameters kunnen zeer groot zijn. Zo laat onderzoek naar de ruimtelijke variatie van geotechnische parameters in Proeftuin Mastenbroek [ref. 5.] zien dat de ruimtelijke verschillen in deklaagdikte zeer groot kunnen zijn. Bijvoorbeeld een variatie van 2 m in de deklaagdikte in een gebied van 250x250 m<sup>2</sup>. Dit onderzoek is een voorbeeld van de grote mogelijke ruimtelijke variatie in de dikte van de deklaag. Aangezien dit type ruimtelijke variatie zonder uitgebreid geotechnisch onderzoek niet uit te sluiten is, dient in de schematisatie rekening gehouden te worden met een ruimtelijke variatie in de dikte van de deklaag.

Een toelichting op de wijze van schematisatie van de ondergrond staat in bijlage II.

### 4.3. Schematisatie geohydrologie

De belasting op de deklaag wordt veroorzaakt door de stijghoogte in het 1<sup>e</sup> watervoerende pakket. Deze waarde hangt af van een aantal onzekerheden in de schematisatie van de geohydrologische situatie, de belangrijkste variaties worden opgenomen in de scenario's.

Per scenario kan het gevolg: opbarsten of niet, en opbarstlocatie, anders zijn. Voor ieder scenario wordt het stappenplan van stap 2 tot en met stap 4 dus doorlopen, indien er opbarsten plaatsvindt.

Onzekerheid in de analyse volgt vooral uit de intreeweerstand. In werkelijkheid zal er een intreeweerstand zijn bij het intreepunt, maar de grootte van deze intreeweerstand is onbekend. Het POV-Piping onderzoek van Marieke de Visser richt zich op het bepalen van de intreeweerstand. In dit onderzoek naar de invloed van de regionale kwelstroom wordt conservatief de intreeweerstand niet meegenomen. Na afronding van het POV-piping onderzoek naar de intreeweerstand kan dit wel meegenomen worden in de analyse.

Scenario's zijn mogelijke combinaties van:

- verticale weerstand van de deklaag voor kwel/infiltratie;
- weerstand tussen rivier, winterbed en ondergrond;
- doorlatendheid van watervoerend pakket;
- stijghoogte in achterland;
- indien relevant: beëindiging van (drink)wateronttrekking.

Een toelichting op de wijze van het schematiseren van de geohydrologische schematisatie staat in bijlage III.



## 5. STAP 3: VINDT OPBARSTEN PLAATS? EN ZO JA, WAAR?

Het doel van deze stap is te bepalen of de grond opbarst wanneer regionale kwelstroom meegenomen wordt in de analyse. Wanneer opbarsten plaatsvindt wordt de opbarstlocatie vastgesteld.

Indien opbarsten plaatsvindt, wordt het model bijgesteld en wordt de berekening voortgezet. Na het opbarsten op een bepaalde locatie kan de belastingsituatie namelijk wijzigen, zoals bijvoorbeeld het stijgen van de waterstand van het buitenwater. Daardoor kan de deklaag op een andere locatie ook opbarsten. In het aangepaste model wordt het opbarstkanaal in het grondwatermodel meegenomen. Dit opbarstkanaal zal de stijghoogte verlagen. De invloed van het opbarsten op een locatie kan beperkt zijn wanneer de afstand tussen opbarstlocatie en potentiële opbarstlocatie (bijvoorbeeld direct achter de dijk) groot is.

### 5.1. Benodigde informatie

De benodigde informatie voor deze stap moet het mogelijk maken om afwegingen te maken over de wijze van schematisatie van ondergrond en belastingsituaties en het samenstellen van relevante scenario's voor de dijksectie. De volgende informatie is hiervoor benodigd:

- verloop MHW-golf;
- verloop van grondwaterstand en stijghoogte in de tijd tijdens een MHW-golf bij de schematisatie;
- bodemopbouw, ;
- grondparameters.

Wanneer het model bijgesteld wordt (na opbarsten), is de volgende informatie nodig:

- de afvoercapaciteit van het opbarstkanaal en de ontwikkeling van het opbarstkanaal in de ondergrond;
- opbarstlocatie

### 5.2. Geohydrologisch model

Het geohydrologisch model moet allereerst in staat zijn om de verandering van de stijghoogte tijdens de MHW-golf te modelleren en input te leveren aan de opbarstberekening. Dit betekent dat de ruimtelijke en temporele discretisatie hierop moet worden aangepast. Een stationaire berekening kan voldoen wanneer de stijghoogte in het watervoerende pakket nauwelijks een vertraging heeft ten opzichte van de rivier, anders is een instationaire berekening vereist.

De berekende stijghoogte moet worden getoetst aan de opbarstberekening. Wanneer opbarsten plaatsvindt, dan moet het geohydrologische model kunnen worden aangepast. De berekening moet opnieuw worden uitgevoerd inclusief de ontlastende werking van het opbarstkanaal. Deze interactieve modellering vraagt om een maatwerk oplossing via een pakket dat automatisch het modelresultaat kan uitlezen, controleren en indien noodzakelijk de modelinvoer kan aanpassen. Witteveen+Bos heeft hiervoor bij Modflow-modellen goede ervaringen met de Python-plugin Flopy.

Voor de modellering van de ontlastende werking van een opbarstkanaal kan ofwel het basis grondwatermodel rondom het opbarstkanaal worden verfijnd, ofwel het debiet kan worden berekend in een separaat model met een fijn grid. Het berekende debiet kan dan worden overgenomen in het basis model.

### 5.3. Berekening: Toetsing opbarsten

Het geohydrologisch model bepaalt de stijghoogte op verschillende locaties in het achterland. Een toetsing van opbarsten is het vergelijken van deze stijghoogte met de tegenwerkende kracht veroorzaakt door het gewicht van de deklaag. In deze vergelijking wordt een veiligheidsfactor  $\gamma$  (partiële weerstandsfactor) toegepast, deze is afhankelijk van de normfrequentie, modelonzekerheid, lengte-effect en toegestane kansbijdrage van piping op falen waterkering.

De veiligheidsfactor heeft een waarde van 1,2 in de huidige norm. Deze veiligheidsfactor wordt toegepast wanneer opbarsten ongewenst is. In de toekomstige norm wordt de veiligheidsfactor tegen opbarsten verhoogd naar 1,5. Deze hoge veiligheidsfactor heeft als gevolg dat grond met een volumiek gewicht van  $15 \text{ kN/m}^3$  rekenkundig op zal opbarsten. De verhoging van de veiligheidsfactor van 1,2 naar 1,5 heeft veel invloed op deze stap: vindt er opbarsten plaats en zo ja, waar? Met een factor van 1,5 zal er eerder (rekenkundig) opbarsten plaatsvinden, ook binnen de lengte  $L_{\text{crit}}$  van de dijk.

In een aantal geschematiseerde situaties zal opbarsten juist gewenst zijn, bijvoorbeeld wanneer opbarsten juist buiten de lengte  $L_{\text{crit}}$  plaatsvindt en zo de stijghoogte in de potentiële opbarstlocaties in de nabijheid van de dijk doet afnemen. Om deze reden moet per schematisatie allereerst een berekening uitgevoerd worden met een neutrale veiligheidsfactor (van 1,0). Wanneer blijkt dat het opbarsten een negatief effect heeft wordt een hogere waarde aangehouden. Wanneer blijkt dat het opbarsten een positief effect heeft wordt een lagere waarde aangehouden (van 0,9).

### 5.4. Berekening: Model bijstellen

Indien opbarsten plaatsvindt, is het nodig het model aan te passen, omdat het opbarstkanaal een ontlastende werking heeft op de stijghoogte.

In het aangepaste model wordt de grondwaterstroming door het opbarstkanaal opgenomen. Het debiet door het opbarstkanaal is afhankelijk van onder andere de weerstand in het opbarstkanaal, de toestroming naar het opbarstkanaal en het waterpeil aan de bovenzijde van het opbarstkanaal. De hoogte van het debiet beïnvloedt het verloop van de stijghoogte op afstand van de wel en het invloedsgebied van de wel.

Na het aanpassen van het model wordt de nieuwe geohydrologische situatie bepaald en kan weer een toets op opbarsten gedaan worden. Vervolgens wordt de overgebleven periode van de MHW-golf doorgerekend. Het model wordt opnieuw bijgesteld als op andere locaties opbarsten plaatsvindt.

### 5.5. Resultaat

Uitkomst van deze stap is of zijn de opbarstlocatie(s) bij de verschillende schematisaties. Wanneer bij alle mogelijke schematisaties geen opbarsten optreedt, kan de dijk als veilig beoordeeld worden.

## 5.6. Achterliggende hypothese

De volgende hypothese ligt ten grondslag aan het bovenstaande en moet nog geverifieerd worden in de nog op te leveren theoretische onderbouwing [ref. 5.]:

*'De verhouding tussen de regionale kweldruk van de hoge grond en de kweldruk vanuit de rivier, bepaalt de mogelijke opbarstlocatie'.*



## **6. STAP 4: VALT DE OPBARSTLOCATIE BINNEN DE KRITIEKE L?**

De dijk kan als veilig beoordeeld worden wanneer er voldoende zekerheid is dat opbarsten plaatsvindt buiten de lengte  $L_{crit}$  vanaf het intreepunt. Wanneer er niet voldoende zekerheid is over de opbarstlocatie, of wanneer er vastgesteld is dat opbarsten binnen de lengte  $L_{crit}$  vanaf het intreepunt zal plaatsvinden, is een analyse over de stroomrichting van de kwelstroom mogelijk.

### **6.1. Benodigde informatie**

Uit stap 2 volgen de opbarstlocaties per schematisatie. Per schematisatie wordt de meest maatgevende opbarstlocatie gebruikt, dit is de opbarstlocatie die het meest dichtbij de dijk ligt.

Voor het bepalen van de minimaal benodigde kwelweglengte,  $L_{crit}$  is de methode van Sellmeijer zoals gepresenteerd in het Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen (ORZW) [ref. 2.] aangehouden.

### **6.2. Berekening**

De kritieke kwelweglengte wordt bepaald met behulp van de verbeterde rekenregel van Sellmeijer, zoals deze is gepresenteerd in het ORZW [ref. 8.].

De afstand van de opbarstlocatie vanaf het intreepunt wordt vergeleken met de kritieke kwelweglengte. Wanneer de afstand tot de opbarstlocatie kleiner is dan de kritieke kwelweglengte is er mogelijk gevaar voor piping onder de dijk.

### **6.3. Resultaat**

Het resultaat van deze stap is een antwoord op de vraag of de afstand tot de opbarstlocatie kleiner is dan de kritieke kwelweglengte.



## 7. STAP 5: STROOMRICHTING TER PLAATSE VAN WEL

De vijfde en laatste stap heeft als doel te bepalen wat de stroomrichting ter plaatse van een opbarstlocatie. Dit is van belang voor opbarstlocaties binnen de lengte  $L_{crit}$  vanaf het in-treepunt. Daarnaast is de relevantie van het uitvoeren van deze stap afhankelijk van de locatie waar de dijksectie zich bevindt en het effect op de omgeving. Het onderzoek naar de stroomrichting is wellicht de extra inspanning niet waard voor een waterkering waarbij het piping-probleem op een eenvoudige wijze kan worden opgelost, bijvoorbeeld in landelijk gebied. Dan kan een maatregel om piping tegen te gaan een kosten effectievere methode zijn. Wanneer deze analyse overgeslagen wordt, kan meteen over gegaan worden naar het eindstation 'maatregelen treffen', om het faalmechanisme piping bij de dijk tegen te gaan.

De schaalgrootte van deze analyse is de m-schaal. De omgeving van een wel wordt geschematiseerd en geanalyseerd. Het probleem zal in 3D geanalyseerd moeten worden, wanneer er stroming uit meerdere zijden komt.

### Onderzoek naar toestroming rond wellen

Een POV-piping onderzoek richt zich op de toestroming rond wellen. Gedetailleerd onderzoek naar deze radiale stroming valt buiten de scope van dit onderzoek. Voor resultaat van dit onderzoek wordt verwezen naar het onderzoek van Waterschap Rivierenland naar toestroming rond wellen. Het is mogelijk dat de mate van toestroming naar een wel sterker afneemt dan nu aangenomen, doordat in het driedimensionale vlak toestroming plaatsvindt.

Parallel aan het opstellen van dit stappenplan voeren studenten van de Hogeschool Arnhem Nijmegen (HAN) modeltesten uit om de erosiepatronen bij opbarstlocaties te analyseren.

De resultaten van beide onderzoeken zullen verwerkt worden in een latere versie van dit stappenplan.

### 7.1. Benodigde informatie

De benodigde informatie voor het bepalen van de stroomrichting rond de opbarstlocatie zijn ook gebruikt in stap 2 waar de opbarstlocatie is bepaald. Voor het uitvoeren van deze stap kan aanvullende informatie vereist zijn van de kritische modelparameters en een finer grondwatermodel, dit is beiden in de volgende paragraaf toegelicht.

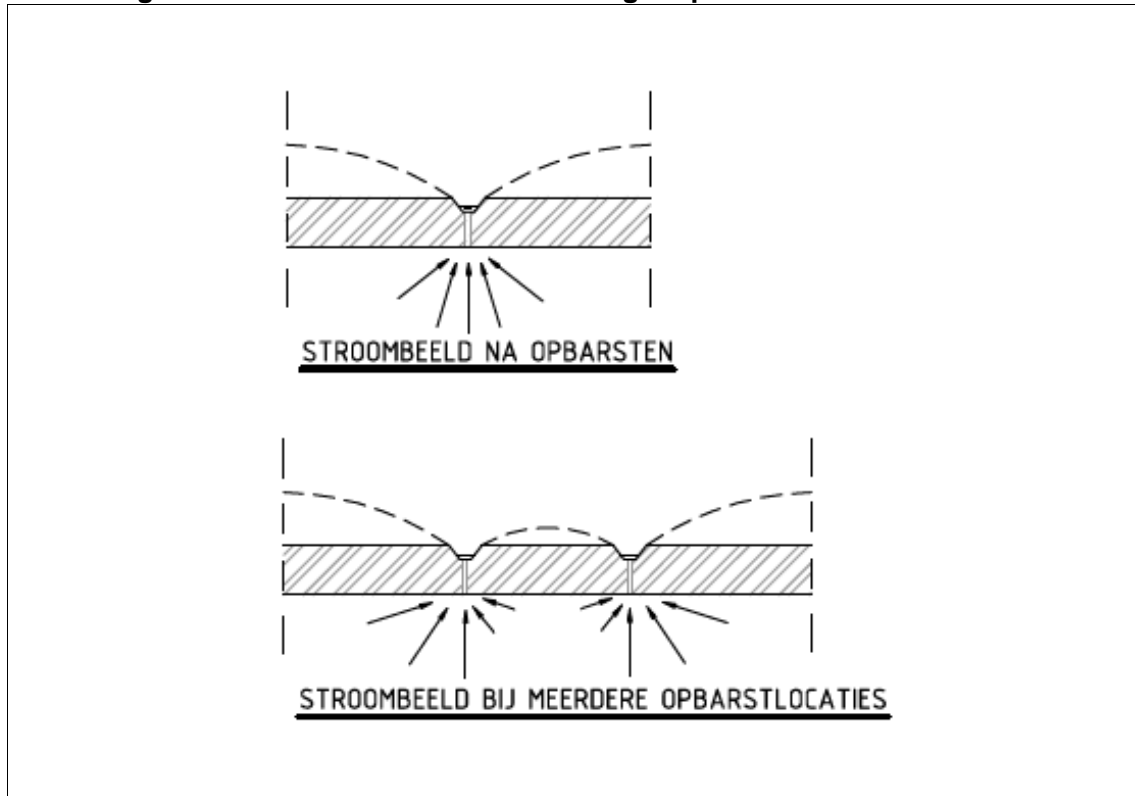
### 7.2. Berekening

Onderstaande afbeelding geeft een principe doorsnede van optredende grondwaterstroming. bij opbarsten op 1 of 2 locaties. Het doel van de berekening is om deze stroming in 3D te berekenen na elk moment van opbarsten tot het einde van de MHW-golf.

De basis voor de berekening van de stroomrichting bij een opbarstlocatie is hetzelfde grondwatermodel als gemaakt onder stap 2. Een ervaren geohydroloog moet beoordelen of de discretisatie (celgrootte, laagdikte en/of tijdschaal) moet worden verfijnd. Daarnaast moet de noodzaak voor een groter detailniveau van kritische modelparameters worden beschouwd, bijvoorbeeld door het uitvoeren van extra veldwerk.

Met het grondwatermodel kan vervolgens voor alle opbarstlocaties de stroomrichting worden berekend vanaf het moment van opbarsten tot het einde van de MHW-golf. Per locatie wordt getoetst of deze in alle tijdstappen vanuit het achterland komt.

**Afbeelding 7.1. Schematisaties: stroomrichting ter plaatse van wel**



De uitkomst van deze stap is een conclusie over de stroomrichting per wel. Wanneer met het model voldoende zeker kan worden gesteld dat deze stroomrichting gedurende de gehele MHW-golf volledig uit het achterland komt, dan kan geen terugschrijdende erosie plaatsvinden in de richting van het buitenwater. In dit geval kan de dijk veilig beoordeeld worden voor het faalmechanisme piping inclusief de invloed van de regionale kwelstroom. Wanneer de stroming bij de wel (deels) vanuit de richting van de dijk komt, is terugschrijdende erosie onder de dijk mogelijk en dienen er maatregelen genomen te worden om falen door piping te voorkomen (stap 4).

### 7.3. Resultaat

Het resultaat van deze vierde stap is de stroomrichting bij de opbarstlocatie.

### 7.4. Achterliggende hypothese

De volgende hypothese ligt ten grondslag aan het bovenstaande en moet nog geverifieerd worden in de nog op te leveren theoretische onderbouwing [ref. 5.]:

*'De verhouding tussen de regionale kweldruk van de hoge grond en de kweldruk vanuit de rivier, bepaalt de stroomrichting en stroomsnelheid richting de zandmeevoerende wel'.*



## 8. NEGATIEF BEHEERDERSOORDEEL

Wanneer blijkt dat opbarsten plaatsvindt waarbij kwelstroming ten minste deels van de rivier of ander buiten water komt, wordt een negatief beheerdersoordeel voor piping bij regionale kwelstroom gegeven. Om uiteindelijk een positief beheerdersoordeel te kunnen geven zijn meerdere trajecten mogelijk.

Allereerst kan de gebruikte schematisatie en het gebruikte model verfijnd worden om te onderzoeken of met deze verfijning in de huidige situatie de dijksectie een positief beheerdersoordeel voor piping bij regionale kwelstroom kan krijgen.

Daarnaast is het mogelijk om in te zetten op meer onderzoek om te kijken of er daadwerkelijk sprake kan zijn van piping. Onderzoek kan zich bijvoorbeeld richten op de wijze van toestroming bij een wel en de daarbij horende erosie in de richting van de dijk. Bij een wel met alzijdige toestroming zal de druk op afstand van de wel eerder afnemen, en daarmee neemt ook de terugschrijdende erosie in de richting van de dijk af (Afbeelding 8.1). Wanneer uit onderzoek blijkt dat piping geen probleem is, zijn maatregelen niet nodig.

**Afbeelding 8.1. Bovenaanzicht opbarstlocatie bij alzijdige toestroming**



Tenslotte kan een negatief beheerdersoordeel omgezet worden in een positief beheerdersoordeel wanneer maatregelen getroffen worden om piping tegen te gaan. Mogelijke maatregelen om piping tegen te gaan zijn dezelfde maatregelen als van toepassing zijn voor 'klassieke piping'. Voor een overzicht van deze maatregelen wordt verwezen naar de Werkwijzer Piping bij Dijken [ref. 4.].



## 9. REFERENTIES

1. AHN (2015). internetdienst. Actueel Hoogtebestand Nederland.
2. Deltares (2012). Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen. Kenmerk: 1202123-003-GEO-0002
3. Dinoloket, gegevens van de Nederlandse ondergrond beschikbaar via <http://www.dinoloket.nl>
4. Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2014). Werkwijzer Piping bij Dijken. versie: 1.2., groeidocument.
5. Waterschap Rivierenland (2013). Presentatie POV-piping. D70-waarden in proeftuin.
6. Witteveen+Bos (2014). POV Piping regionale kwelstroom - plan van aanpak. definitief. 30 oktober 2014. AP539-7/14-020.541
7. Witteveen+Bos (2014). POV Piping regionale kwelstroom - theoretische beschrijving. concept 02. 2 december 2014. AP539-7/14.022.734
8. Witteveen+Bos (2015). POV Piping regionale kwelstroom - quickscan areaal. concept 02. 26 februari 2015. AP539-7/15-003.412
9. Witteveen+Bos (2015). POV Piping regionale kwelstroom - werkwijzer. nog op te leveren.
10. Witteveen+Bos (2015). POV Piping regionale kwelstroom - theoretische onderbouwing. nog op te leveren.

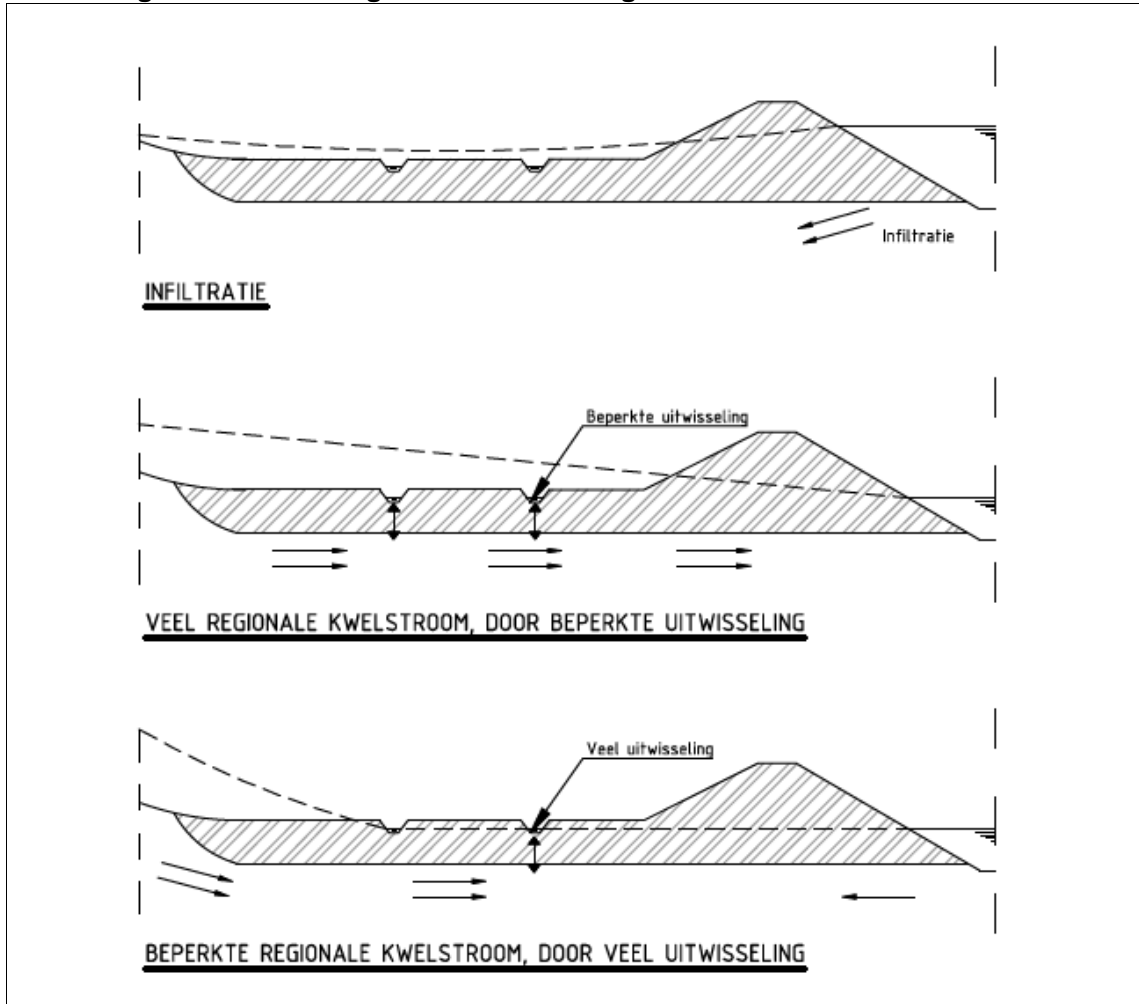


## **BIJLAGE I    ONTSTAAN REGIONALE KWELSTROOM**



De aanwezigheid van een regionale kwelstroom wordt door afgeleid via een geohydrologische analyse van het gebied. Dit betekent dat inzichtelijk wordt gemaakt hoe de grondwaterstroming in het gebied is, met de nadruk op een wintersituatie. Afbeelding I.1 geeft een voorbeeld voor mogelijke grondwaterstroming nabij een rivier.

**Afbeelding I.1. Voorbeeld grondwaterstroming rondom rivier**



De aanwezigheid van de regionale kwelstroom wordt door een ervaren geohydroloog afgeleid via de meest geschikte methode voor de betreffende locatie. Daarbij kan bijvoorbeeld gedacht worden aan:

- een systeembeschrijving via doorsneden, waarnemingen in peilbuizen en de rivierwaterstand;
- een analytisch model;
- een regionaal gekalibreerd numeriek grondwatermodel.

Bij iedere methode moet worden onderzocht welke onzekerheden een rol spelen, en of verdere verfijning vereist is om een beter antwoord te krijgen.





## **BIJLAGE II SCHEMATISATIE ONDERGROND**



In deze bijlagen worden de verschillende mogelijkheden om de ondergrond te schematiseren toegelicht.

Een methode om de ondergrond te schematiseren is het gebruik maken van Stochastische Ondergrond Schematisatie (SOS). Dit instrument zal gebruikt worden in het WTI2017. Met de SOS kunnen de type grondlagen geschematiseerd worden. De bijbehorende grondparameters kunnen dan volgen uit ontwerpwaarden uit de norm.

Voor een gedetailleerdere studie kunnen grondmonsters genomen worden om met laboratoriumonderzoek het volumieke gewicht van deze monsters te bepalen. De spreiding uit het resultaat van het laboratoriumonderzoek kan dan gebruikt worden voor de analyse.

Lokaal grondonderzoek kan naast het zorgen voor een gedetailleerdere invulling van de schematisatie van de ondergrond op basis van SOS ook op zichzelf staan als methode om de ondergrond te kunnen schematiseren.

In de schematisatie van de ondergrond moet onderscheid gemaakt worden in het gebied dat binnen de lengte  $L_{crit}$ , de minimaal benodigde kwelweglengte vanaf het intrepunt, ligt en het gebied dat hier buiten ligt. Reden om hier onderscheid tussen te maken is het verschil in invloed op het optreden van piping: een lichte deklaag leidt binnen  $L_{crit}$  tot een grotere kans op het optreden van opbarsten. De grootte en de richting van de kwelstroom wordt echter ook beïnvloed door variaties in deklaagdikte, zo zal de potentiaal hoger zijn bij een zware deklaag, waardoor bij een zware deklaag in het achterland de regionale kwelstroom groter is en er bij het ontstaan van een wel meer stroming van het achterland kan komen.

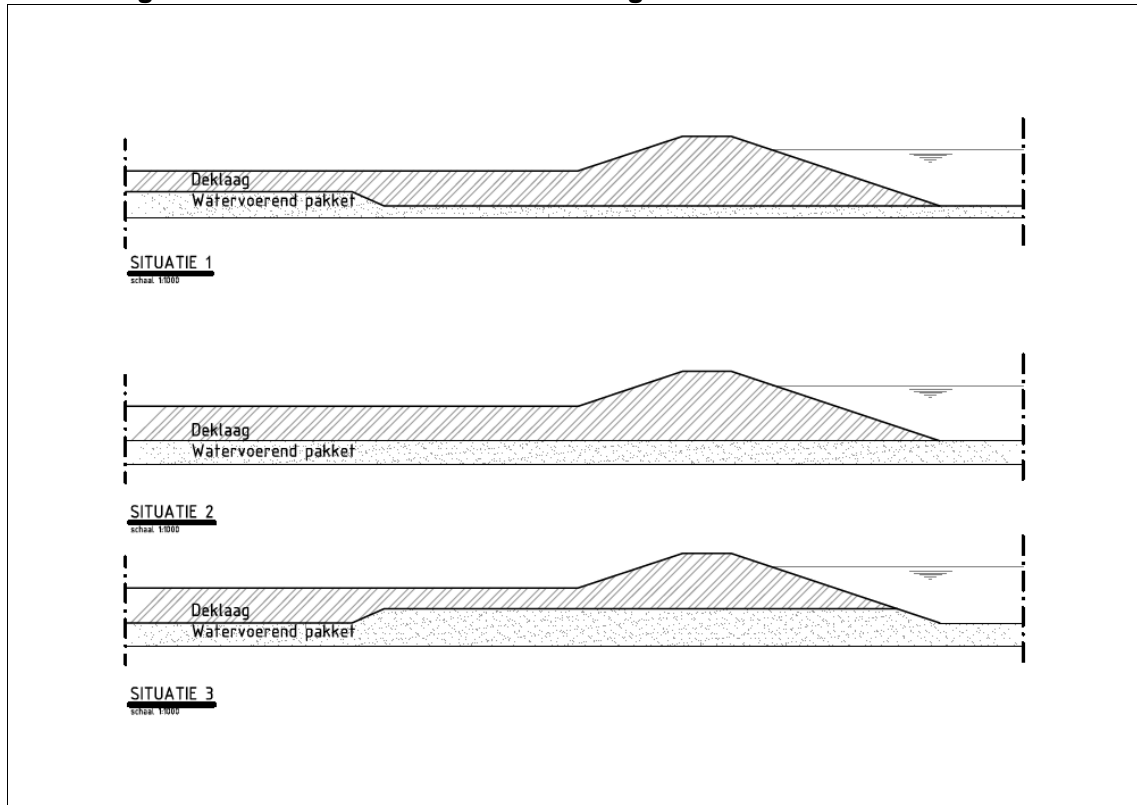
Wanneer de deklaag in het achterland (buiten  $L_{crit}$ ) lichter is, zal hier eerder opbarsten optreden. Dit heeft een gunstig effect op de weerstand tegen het faalmechanisme piping onder de dijk door, aangezien een opbarstlocatie de waterstand in de omgeving verlaagt. De locatie van deze opbarstlocatie is hiervoor relevant.

Schematisatie van de grondparameters wordt bepaald per gebied volgend uit de geologische kenmerken [bijvoorbeeld ref. 3.]. Per type gebied dient een hoge en lage representatieve waarde voor de laagdikte en het volumieke gewicht bepaald te worden. Voorgestelde eerste schematisaties van de ondergrond zijn aangegeven in Tabel II.1. Met type deklaag 'licht, gemiddeld, zwaar' wordt de combinatie van deklaagdikte en volumiek gewicht bedoeld. Een lichte deklaag wil dus zeggen een dunne deklaag met een klein volumiek gewicht. Deze schematisaties zijn gepresenteerd in Afbeelding II.2.

**Tabel II.1. Globale schematisaties deklaag**

<b>schematisatie ondergrond</b>	<b>type deklaag, dijk tot afstand <math>L_{crit}</math></b>	<b>type deklaag, buiten lengte <math>L_{crit}</math></b>
A	zwaar	licht
B	gemiddeld	gemiddeld
C	licht	zwaar

## Afbeelding II.2. Globale schematisaties deklaag







## **BIJLAGE III SCHEMATISATIE GEOHYDROLOGIE**





De geohydrologische schematisatie moet zo worden gekozen dat de situatie aan de maatgevende stijghoogte wordt getoetst. Hiervoor moet door een ervaren geohydroloog de situatie worden beschouwd, en de bekenden en onbekenden worden geïdentificeerd. Voor de onbekende parameters moet de mogelijke variatie worden onderzocht.

De variatie kan worden onderzocht door bijvoorbeeld een statische analyse van beschikbare gegevens of een gevoeligheidsanalyse van een grondwatermodel.

De verschillende schematisaties moeten worden doorgerekend met een grondwatermodel. Dit levert per schematisatie het verloop van de stijghoogte.

Het gevolg van de verschillende schematisaties kan zijn dat in het ene scenario (bijvoorbeeld een lage verticale doorlatendheid van de deklaag) er wel een regionale kwelstroom aanwezig is, en dat in een ander scenario (hoge verticale doorlatendheid van de deklaag) de regionale kwelstroom nagenoeg afwezig is. In het laatste geval werkt het oppervlaktewater in het achterland blijkbaar drainerend.