



# POV Piping regionale kwelstroom

Theoretische onderbouwing zandmeevoerende wellen

Waterschap Vallei en Veluwe

4 december 2015

Project POV Piping regionale kwelstroom  
Document Theoretische onderbouwing zandmeevoerende wellen  
Status Definitief  
Datum 4 december 2015  
Referentie AP539-18/15-020.229

Opdrachtgever Waterschap Vallei en Veluwe  
Projectcode AP539-18  
Projectleider mw. dr.ir. M.W.J. Smit  
Projectdirecteur ir. H.J.M.A. Mols

Auteur(s) ir. D. A. Brakenhoff  
ir. P.T.G. van Tol  
Gecontroleerd door ir. H.D.C. Meuwese  
ir. P.E.M Schoonen  
Goedgekeurd door mw. dr.ir. M.W.J. Smit

Paraaf



Adres Witteveen+Bos Raadgevende ingenieurs B.V. | Deventer  
Willemskade 19-20  
Postbus 2397  
3000 CJ Rotterdam  
+31 (0)10 244 28 00  
www.witteveenbos.com  
KvK 38020751

Het kwaliteitsmanagementsysteem van Witteveen+Bos is gecertificeerd op basis van ISO 9001.

© Witteveen+Bos

Niets uit dit document mag worden vervaelvoudigd en/of openbaar gemaakt in enige vorm zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Witteveen+Bos Raadgevende ingenieurs B.V. noch mag het zonder dergelijke toestemming worden gebruikt voor enig ander werk dan waarvoor het is vervaardigd, behoudens schriftelijk anders overeengekomen. Witteveen+Bos aanvaardt geen aansprakelijkheid voor enigerlei schade die voortvloeit uit of verband houdt met het wijzigen van de inhoud van het door Witteveen+Bos geleverde document.

# INHOUDSOPGAVE

	<b>SAMENVATTING</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>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	3
<b>2</b>	<b>HYPOTHESEN EN WERKWIJZE RAPPORT</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>OPBARSTEN EN ONTLASTENDE FUNCTIE VAN EEN WEL</b>	<b>5</b>
3.1	Hypothese 1	5
3.1.1	Uitleg hypothese 1	5
3.1.2	Geldigheid hypothese op basis van studie	5
3.2	Ontlastend effect van een wel (deel hypothese 2)	6
3.2.1	Methodiek	6
3.2.2	Systeemanalyse	7
3.2.3	Debiet door de wel	7
3.2.4	Ontlastende functie	7
3.3	Conclusie	10
<b>4</b>	<b>EFFECT REGIONALE KWELDRUK OP PIPEVORMING</b>	<b>11</b>
4.1	Hypothese 2 (op 10-meterniveau)	11
4.2	Toetsing	11
4.2.1	Laag water	12
4.2.2	Hoog water	12
4.2.3	Van laag naar hoogwater	14
4.3	Conclusie	15
<b>5</b>	<b>GEVOELIGHEIDSANALYSE</b>	<b>16</b>

5.1	Opzet gevoeligheidsanalyse	16
	5.1.1 Achterland	16
	5.1.2 Rivier	16
	5.1.3 Scenario's	17
5.2	Resultaat gevoeligheidsanalyse	18
	5.2.1 Bodemweerstand van de rivier	18
	5.2.2 Stijghoogte achterland	18
	5.2.3 Gedeeltelijk open rand bij de rivier	21
5.3	Conclusies	22
<b>6</b>	<b>EROSIE</b>	<b>23</b>
6.1	Hypothese 3 (op m niveau)	23
6.2	Methodiek	24
6.3	Conclusie uit labonderzoek	24
6.4	Toetsing hypothese	24
<b>7</b>	<b>CONCLUSIES</b>	<b>26</b>
<b>8</b>	<b>REFERENTIES</b>	<b>28</b>
	Laatste pagina	28
	<b>Bijlage(n)</b>	<b>Aantal pagina's</b>
I	Randvoorwaarden en uitgangspunten Grebbedijk	8

## SAMENVATTING

Deze theoretische onderbouwing is opgesteld in het kader van het project overstijgende verkenning (POV)-Piping onderzoek naar de invloed van regionale kwelstroom op piping. Het doel van dit rapport is om een onderbouwing te geven bij het 'stappenplan beheerdersoordeel piping bij regionale kwelstroom' (Witteveen+Bos 2015a).

Een regionale kwelstroom is gedefinieerd als een grondwaterstroming vanaf hooggelegen gronden in de richting van het buitenwater. De hoofdstroomrichting tijdens dagelijkse omstandigheden is gericht naar het buitenwater. Dit is tegengesteld aan de richting van de kwelstroom in het geval van 'klassieke' piping. De Grebbedijk langs de Nederrijn is een praktijkvoorbeeld waar regionale kwelstroom optreedt.

In dit rapport wordt onderzocht of door de regionale kwelstroom zandmeevoerende wellen kunnen ontstaan die niet noodzakelijkerwijs tot een instabiliteit van de waterkering leiden. Ook wordt er gekeken of de ontlastende werking van een opbarstlocatie buiten de minimaal benodigde kwelweglengte van de dijk ervoor kan zorgen dat er geen zandmeevoerende wel binnen de minimaal benodigde kwelweglengte van de dijk ontstaat. De minimaal benodigde kwelweglengte wordt vaak aangeduid met  $L_{crit}$  en is de minimale afstand die de kwel moet afleggen zodat er geen piping kan optreden. Een dijk die in de toetsing afgekeurd is op het faalmechanisme piping, zou dan 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 dit rapport.

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 zorgt ervoor dat het stijghoogteverschil over de deklaag toeneemt. Hierdoor kan opbarsten plaatsvinden 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. Alleen in deze situatie kan een goedgekeurde dijk afgekeurd worden.

De conclusies worden per hypothese gepresenteerd.

### *Hypothese 1*

*De hypothese luidt: '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 gronden met hogere grondwaterstanden die gedraineerd worden door de rivier'.*

Uit een analyse volgen 2 situaties wat betreft de mogelijkheden voor opbarsten: met een potentiaal hoger of lager dan de rivier. De maatgevende situatie ontstaat wanneer het potentiaal in de wel lager is dan in de rivier. Doordat de wel bij grote drukverschillen erodeert zal de potentiaal in de wel afnemen tot hoogte waarop het water vrij afstroomt (een worst case aanname is hoogteligging maaiveld of peil in de sloot plus de weerstand in het opbarstkanaal). De gradiënt in de stijghoogte, de drijvende kracht achter piping, tussen de wel en de rivier, is gelijk aan of groter dan in de situatie zonder regionale kwelstroom. Regionale kwelstroom heeft voor dat scenario dus geen remmend effect op het ontstaan van pipes.

### *Hypothese 2*

*De hypothese luidt: 'De verhouding tussen de regionale kweldruk van de hoge grond en de kweldruk vanuit de rivier, bepaalt de mogelijke opbarstlocatie, stroomrichting en stroomsnelheid richting de zandmeevoerende wel. Alleen bij een scheve verhouding (kleine regionale kweldruk) kan 'klassieke' piping optreden'.*

Het ontlastende effect van een wel (zowel binnen als buiten de kritieke lengte) is beschouwd met een analytische formule voor de bodemopbouw uit het AZURE model. Een significante verlaging (gesteld op 0,5 m of meer) is berekend binnen een zone van circa 17 tot 50 m. De ontlastende functie wordt groter als het debiet door de wel groter wordt, als het watervoerende pakket een groter doorlaatvermogen heeft of als de weerstand van de deklaag groter is. Of deze verlaging opbarsten dicht bij de dijk kan voorkomen is

sterk afhankelijk van de lokale dikte van de deklaag. Ter indicatie is de verlaging op circa een slootafstand (circa 75 m bij de Grebbedijk) geschat op ordegrootte 0,1 m. Er kan gesteld worden dat deze verlaging relatief klein is ten opzichte van het aanwezige stijghoogteverschil en dat daarmee de ontlastende functie van een wel beperkt is.

De invloed van regionale kweldruk op de stromingsrichting naar een wel is onderzocht met een driedimensionaal numeriek model. In een situatie met laag water op de rivier, heeft de rivier een drainerende werking en is de grondwaterstroming vanuit de hoge grond naar de rivier gericht. In deze situatie is er uiteraard geen risico op piping.

In een situatie met hoog water op de rivier is er een kwelstroom vanuit de rivier richting het achterland. De aanwezige regionale kweldruk verhoogt de stijghoogte in het watervoerend pakket waardoor een groter deel van het achterland mogelijk gevoelig wordt voor opbarsten. De opbarstlocatie is echter niet alleen een functie van het verschil in stijghoogte tussen het watervoerend pakket en de deklaag maar ook de dikte van de deklaag. De regionale kweldruk vergroot dus het gebied waar opbarsten eventueel kan optreden maar de stroming naar de wel die dan ontstaat, komt vanuit de rivier omdat uit waarnemingen bij de Grebbedijk blijkt dat bij hoogwater het rivierpeil altijd hoger ligt dan de stijghoogte in de hoge grond. Ook treden de grootste stijghoogteverschillen op bij de dijk.

### *Hypothese 3*

*De hypothese luidt: 'Het zand onder de deklaag wordt door de kwelwaterstroom slechts plaatselijk rondom het opbarstkanaal meegevoerd, waarna de stroomsnelheid vervolgens in 3D snel afneemt. Onder het diepste punt van het opbarstkanaal neemt het zandtransport aan de buitenranden van de met watergevulde holle ruimte snel af vanwege de vergroting van het geërodeerd oppervlak'.*

De hypothese stelt dat door de uitholling onder de deklaag het effectieve oppervlak waardoor grondwater stroomt toeneemt. Het verhang blijft echter gelijk, dit is de drijvende kracht voor piping. Daarom neemt door de uitholling onder de deklaag het risico op piping niet af.

Uit het uitgevoerde schaalmodelonderzoek (Van den Broek, et al., 2015) kan geconcludeerd worden dat de kritieke waterspanningsgradiënten voor het optreden van piping (doorgaande erosie) niet wijzigen bij meerzijdige aanvoer. Deze lijken zelfs iets af te nemen wat suggereert dat bij tweezijdige toestroming piping juist sneller kan optreden en de kritieke kwelweglengte bijgevolg toeneemt. Verder werd gevonden dat doorgaande erosie optreedt bij het overschrijden van het kritieke verhang, onafhankelijk van aanvoer van 1 of van 2 kanten. In het numerieke model is er sprake van alzijdige toestroming naar de wel toe waarbij alle stroming afkomstig is van de rivier. Ondanks de alzijdige toestroming zullen de stroombanen zich concentreren op het punt van de uitholling dat het dichtst bij de rivier ligt. Daar is het pad het kortste. Hierdoor kan er op dat punt toch een hoge stroomsnelheid plaatsvinden die voor terugschrijdende erosie zorgt. Ondanks de afname van stroomsnelheid direct onder het opbarstkanaal kan er toch piping optreden.

De hypothese is bijgevolg niet correct.

# 1

## INLEIDING

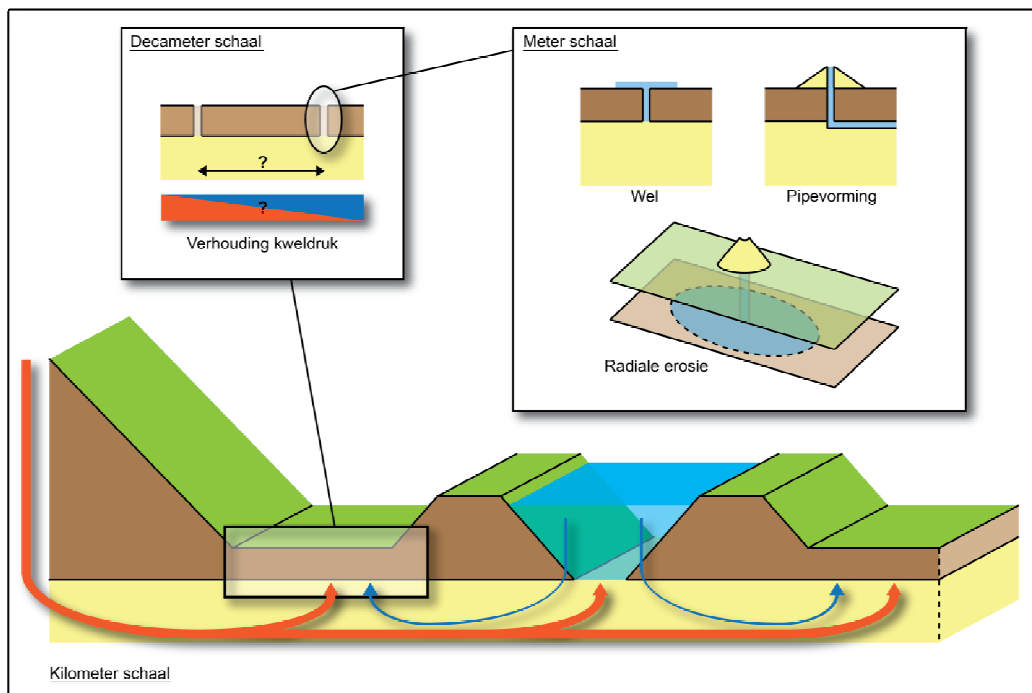
### 1.1 Aanleiding

Deze theoretische onderbouwing is opgesteld in het kader van het project overstijgende verkenning (POV)-Piping onderzoek naar de invloed van regionale kwelstroom op piping. Achtergrondinformatie en de opzet van dit onderzoek staan in het 'plan van aanpak' (Witteveen+Bos, 2014a). Dit rapport vormt de theoretische onderbouwing bij de 'werkwijzer piping bij regionale kwelstroom' (Witteveen+Bos, 2015b) en 'stappenplan beheerdersoordeel piping bij regionale kwelstroom' (Witteveen+Bos, 2015c)

### 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 een rivier. De hoofdstroomrichting tijdens dagelijkse omstandigheden is gericht naar de rivier. 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 Schematisatie regionale kwelstroom

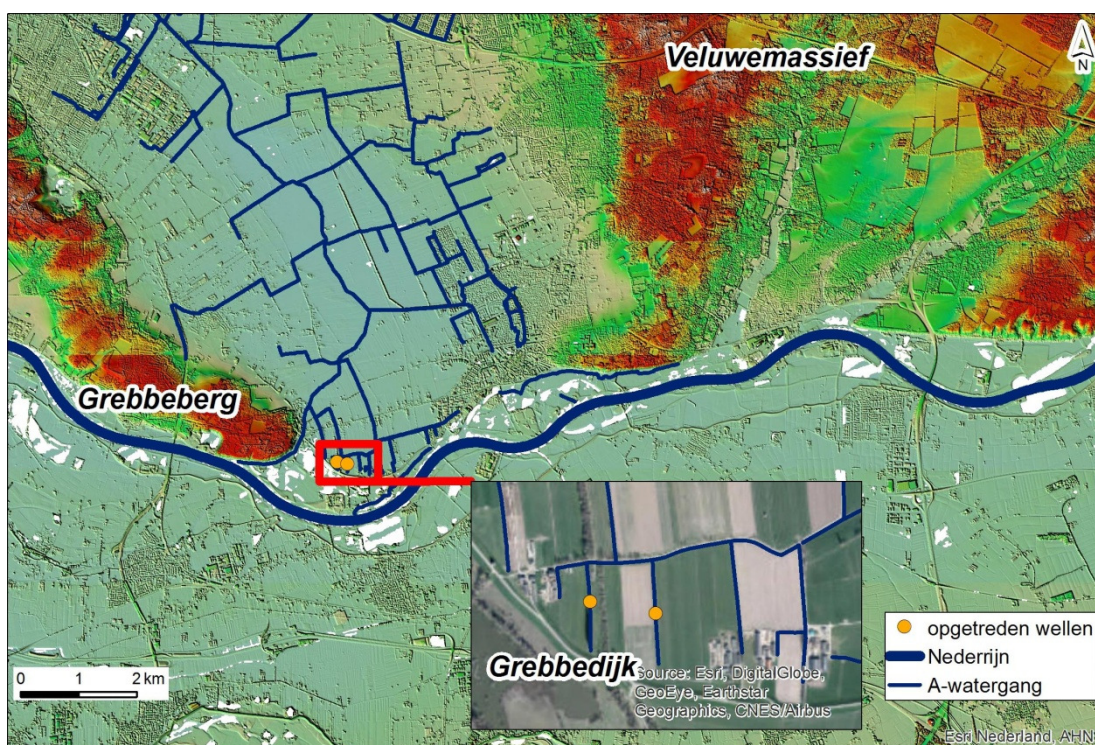


In dit rapport worden de mogelijke positieve en negatieve invloeden van regionale kwelstroom op het optreden van piping geanalyseerd. Eerst wordt gekeken of door de regionale kwelstroom zandmeevoerende wellen kunnen ontstaan die niet noodzakelijkerwijs tot een instabiliteit van de waterkering leiden. Ook wordt er gekeken of de ontlastende werking van een opbarstlocatie buiten de minimaal benodigde kwelweglengte van de dijk ervoor kan zorgen dat er geen zandmeevoerende wel binnen de minimaal benodigde kwelweglengte van de dijk ontstaat. De minimaal benodigde kwelweglengte wordt vaak aangeduid met  $L_{crit}$  en is de minimale afstand die de kwel moet afleggen zodat er geen piping kan optreden.

Het volgende potentiële negatieve effect van regionale kwelstroom op dijkstabiliteit wordt onderzocht. 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 zorgt ervoor dat het stijghoogteverschil toeneemt. Hierdoor kan opbarsten plaatsvinden 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. Alleen in deze situatie kan een goedgekeurde dijk afgekeurd worden.

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 (zie afbeelding 1.2). Verwacht wordt dat de regionale kwelstroom een mogelijke verklaring is voor het ontstaan van deze wellen. Dit heeft invloed op het ontstaan van piping, de pipe-vorming en risicobepaling.

Afbeelding 1.2 Hoogtekaart van Grebbeberg, Veluwemassief en Grebbedijk en locatie wellen



### 1.3 Doel

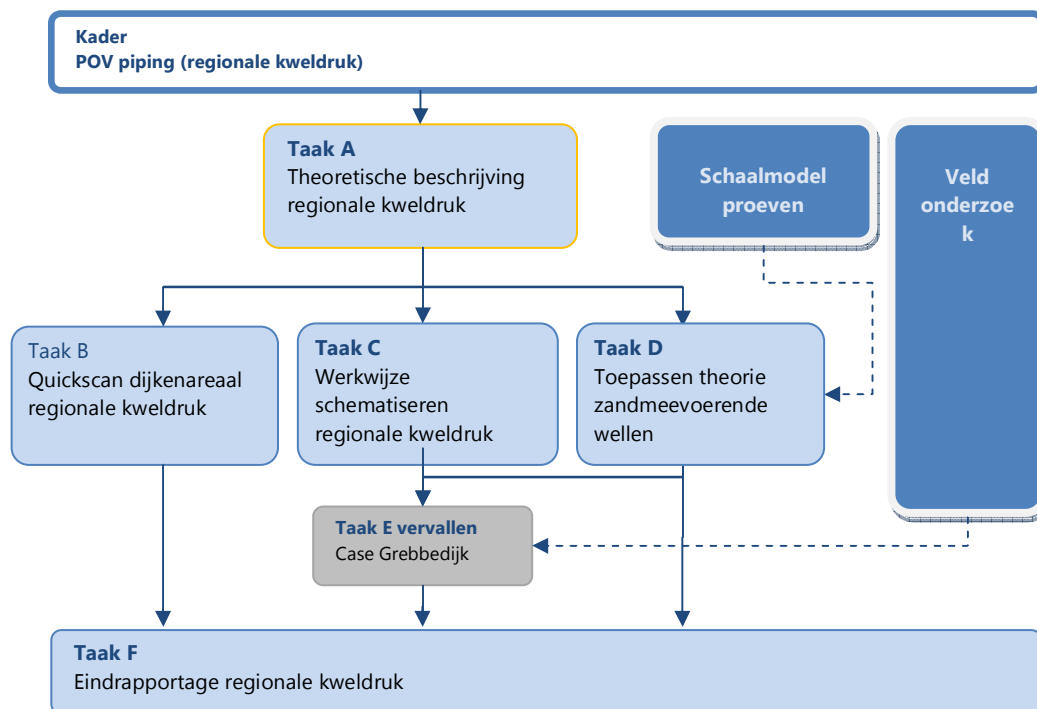
Het doel van dit rapport is om een onderbouwing te geven bij het 'stappenplan beheerdersoordeel piping bij regionale kwelstroom' (Witteveen+Bos 2015c) en het 'POV Piping Eindrapport regionale kwelstroom' (Witteveen+Bos, 2015d). De onderbouwing wordt gebaseerd op een combinatie van theorie en praktijkkennis. Het rapport is geschreven voor waterkering specialisten en geohydrologen.



## 1.4 Positie document

Het document dient als theoretische onderbouwing bij het stappenplan (Witteveen+Bos 2015c) en het eindrapport 'POV Piping Eindrapport regionale kwelstroom' (Witteveen+Bos, 2015d). De positie van het document in het stappenplan is weergegeven in afbeelding 1.3.

Afbeelding 1.3 Stappenplan onderzoek regionale kweldruk



## 1.5 Scope

In afbeelding 1.1 staat het beschouwde proces van regionale kwelstroom wat, eventueel in combinatie met de 'klassieke' pipingstroom, kan leiden tot opbarsten en pipevorming. Op de kilometerschaal is het beschouwde invloedsgebied van de regionale kwelstroom omkadert: 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 vanuit het achterland 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.

## 1.6 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 geeft de hypothesen weer en de uitgevoerde stappen in dit rapport. Hoofdstuk 3 beschrijft het opbarsten en de ontlastende functie van een wel. Hoofdstuk 4 beschrijft het effect van regionale kweldruk op pipevorming. In hoofdstuk 5 is de gevoeligheidsanalyse opgenomen. Hoofdstuk 6 beschrijft de erosie rond een wel. Hoofdstuk 7 bevat de conclusies.

# 2

## HYPOTHESEN EN WERKWIJZE RAPPORT

Uit onderzoek is gebleken dat de bestaande toetsregels voor piping het mechanisme onderschatten (Deltares 2012). Zandmeevoerende wellen treden in sommige gevallen op onder condities die volgens de huidige toetssystematiek niet tot zandtransport kan leiden. Eén van die locaties is de Grebbedijk, onderdeel van dijkkring 45, waarbij in 2011 en 2012 zandmeevoerende wellen zijn geconstateerd bij waterstanden ruim onder het maatgevend hoogwater. De verklaring hiervoor is naar verwachting de aanwezigheid van een hoge regionale stijghoogte in het achterland die een verhoging van de kweldruk in de polder veroorzaakt.

Als onderdeel van het hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP), wordt de project overstijgende verkenning (POV) piping uitgevoerd. Voor het begrijpen en verkleinen van het verbeterareaal wordt gezocht naar locatie specifieke omstandigheden die nu in de bestaande toetsmethodiek buiten beschouwing blijven. Eén hiervan is de invloed van regionale kweldruk. Indien de aanwezigheid van regionale kweldruk kan worden aangetoond en het effect op piping kan worden gekwantificeerd, kan mogelijk het totaal te verbeteren areaal afnemen.

Bij de Grebbedijk lopen de kwelstromen niet enkel vanuit de rivier naar het achterland; bij laag water op de rivier is de kwelstroom naar de rivier gericht, maar bij hoog water loopt de kwelstroom vanuit de rivier richting het achterland. De hoge gronden van de Grebbeberg, de Veluwe en de Utrechtse Heuvelrug leiden tot een regionale kweldruk in de polder die mogelijk de stroming vanuit de rivier kan beïnvloeden. Een globale kwalitatieve beschrijving van de invloed van deze kwelstroom vanuit het achterland is gegeven door het waterschap Vallei en Veluwe. Zij stellen drie hypothesen over de mogelijke invloed van de regionale kwelstroom op verschillende schalen:

- 1 **hypothese 1 (op kilometerniveau):** 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 gronden met hogere grondwaterstanden die gedraineerd worden door de rivier;
- 2 **hypothese 2 (op 10-meterniveau):** de verhouding tussen de regionale kweldruk van de hoge grond en de kweldruk vanuit de rivier, bepaalt de mogelijke opbarstlocatie, stroomrichting en stroomsnelheid richting de zandmeevoerende wel. Alleen bij een scheve verhouding (kleine regionale kweldruk) kan 'klassieke' piping optreden;
- 3 **hypothese 3 (op meterniveau):** het zand onder de deklaag wordt door de kwelwaterstroom slechts plaatselijk rondom het opbarstkanaal meegevoerd, waarna de stroomsnelheid vervolgens in 3D snel afneemt. Onder het diepste punt van het opbarstkanaal neemt het zandtransport aan de buitenranden van de met watergevulde holle ruimte snel af vanwege de vergroting van het geërodeerd oppervlak.

De hypothesen worden in voorliggende rapportage onderbouwd door het onderzoeken van de effecten van regionale kwelstroom op de volgende aspecten van piping:

- hoofdstuk 3 beschrijft het effect van opbarsten en het ontlastende effect van een wel (in de vorm van een ventiel) op de stijghoogte. De ontlastende werking kan mogelijk het ontstaan van een opbarstlocatie dicht bij de waterkering voorkomen. Dit omvat hypothese 1 en deels hypothese 2;
- hoofdstuk 4 analyseert het effect van regionale kweldruk op pipevorming. Daarbij wordt hypothese 2 getoetst. Hoofdstuk 5 bevat de gevoeligheidsanalyse voor dat onderzoek;
- hoofdstuk 6 bevat de erosie en behandelt daarmee hypothese 3 .

# 3

## OPBARSTEN EN ONTLASTENDE FUNCTIE VAN EEN WEL

In dit hoofdstuk wordt het effect van opbarsten en de ontlastende werking van een wel beschouwd. De ontlastende werking kan mogelijk het ontstaan van een opbarstlocatie dicht bij de waterkering voorkomen. Dit omvat hypothese 1 en deels hypothese 2.

### 3.1 Hypothese 1

De hypothese luidt: *'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 gronden met hogere grondwaterstanden die gedraineerd worden door de rivier'*.

#### 3.1.1 Uitleg hypothese 1

In hypothese 1 wordt gesproken van de 'klassieke' schematisatie van de piping. Deze schematisatie betreft het optreden van de verschillende fasen zoals aangehouden in het onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen (Deltares, 2012):

1. opbarsten van de deklaag/heave binnen de kritische lengte;
2. kwel/welvorming: begin van de erosie;
3. beginnende pipe-vorming door terugschrijdende erosie *in de richting van de rivier*;
4. pipe-vorming door terugschrijdende erosie *in de richting van de rivier*.

In de fasen van de klassieke schematisatie worden de eerste twee fasen niet noemenswaardig beïnvloed door de stroomrichting in het watervoerende pakket. Opbarsten en de stroming in het opbarstkanaal zijn alleen gerelateerd aan het verval over de deklaag (Deltares 2012) en het eigen gewicht van de deklaag.

De pipe-vorming (fase 3 en 4) kan worden beïnvloed door de stroomrichting. De pipe-vorming wordt veroorzaakt door terugschrijdende erosie, dat wil zeggen erosie tegen de stroomrichting in. Bij hogere grondwaterstanden die draineren richting rivier, zal een eventuele pipe groeien richting het achterland. Hierdoor zal geen doorgaande pipe onder de waterkering kunnen ontstaan en zal de standzekerheid van de waterkering niet door piping in het geding komen.

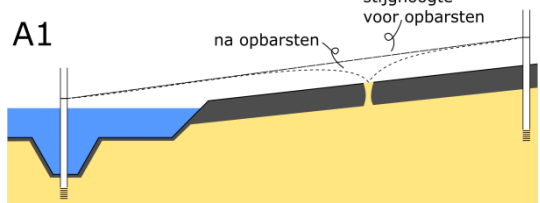
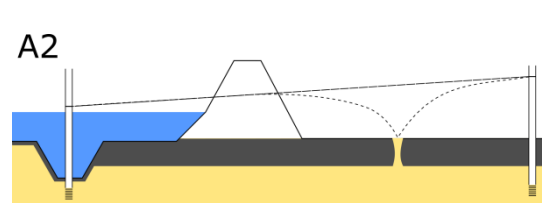
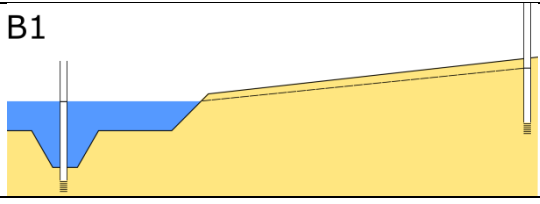
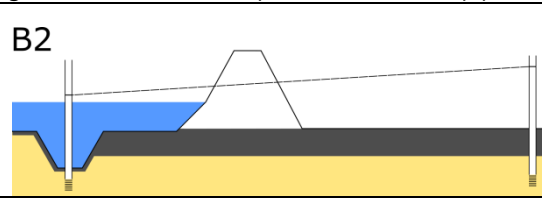
#### 3.1.2 Geldigheid hypothese op basis van studie

Een dominante grondwaterstroomrichting tijdens MHW vanuit het achterland richting de rivier is geanalyseerd voor twee situaties:

- (A) met opbarsten;
- (B) zonder opbarsten in het achterland.

De analyse van de verschillende situaties die kunnen optreden is weergegeven in tabel 3.1.

Tabel 3.1 Analyse invloed regionale kwelstroom in situatie met opbarsten (A) en zonder opbarsten (B).

	potentiaal hoger dan rivierpeil	potentiaal lager dan rivierpeil
opbarsten	<p><b>A1</b></p>  <p>Doordat de wel bij grote drukverschillen erodeert zal de potentiaal in de wel afnemen tot hoogte waarop het water vrij afstroomt (hoogteligging maaiveld of peil in de sloot plus de weerstand in het opbarstkanaal). Indien in scenario A1 deze potentiaal groter dan of gelijk is aan de rivierwaterstand, ligt dus ook het maaiveld gelijk aan of hoger dan de rivierwaterstand. In dat geval kan piping niet optreden ongeacht de aanwezigheid van een regionale kwelstroom.</p>	<p><b>A2</b></p>  <p>Doordat de wel bij grote drukverschillen erodeert zal de potentiaal in de wel afnemen tot hoogte waarop het water vrij afstroomt (een worst case aanname is hoogteligging maaiveld of peil in de sloot plus de weerstand in het opbarstkanaal). Indien de potentiaal in de wel lager is dan de rivierwaterstand (A2), dan is de gradiënt in de stijghoogte, de drijvende kracht achter piping, tussen de wel en de rivier, gelijk aan of groter dan in de situatie zonder regionale kwelstroom. Regionale kwelstroom heeft voor dat scenario dus geen remmend effect op het ontstaan van pipes.</p>
geen opbarsten	<p><b>B1</b></p>  <p>In het geval de deklaag afwezig is (B1) kan er in het achterland geen piping optreden omdat de maximale potentiaal gelijk is aan maaiveld. Nabij een kleidijk kan de potentiaal wel oplopen en dus piping optreden, maar dat is onafhankelijk van de regionale kwelstroom</p>	<p><b>B2</b></p>  <p>In situatie B2 barst de deklaag niet op, ondanks de hogere potentiaal. Hierdoor zal de opbarstveiligheid afnemen (zie hypothese 2, paragraaf 3.2). Doordat opbarsten niet plaatsvindt, is er geen risico op piping.</p>

In afbeelding 3.1 zijn de verschillende scenario's in een diagram geplaatst. De aanname dat de hypothese waar is leidt daarbij telkens tot de conclusie dat de piping situatie niet verbeterd kan worden. Hypothese 1 is daardoor niet waar.

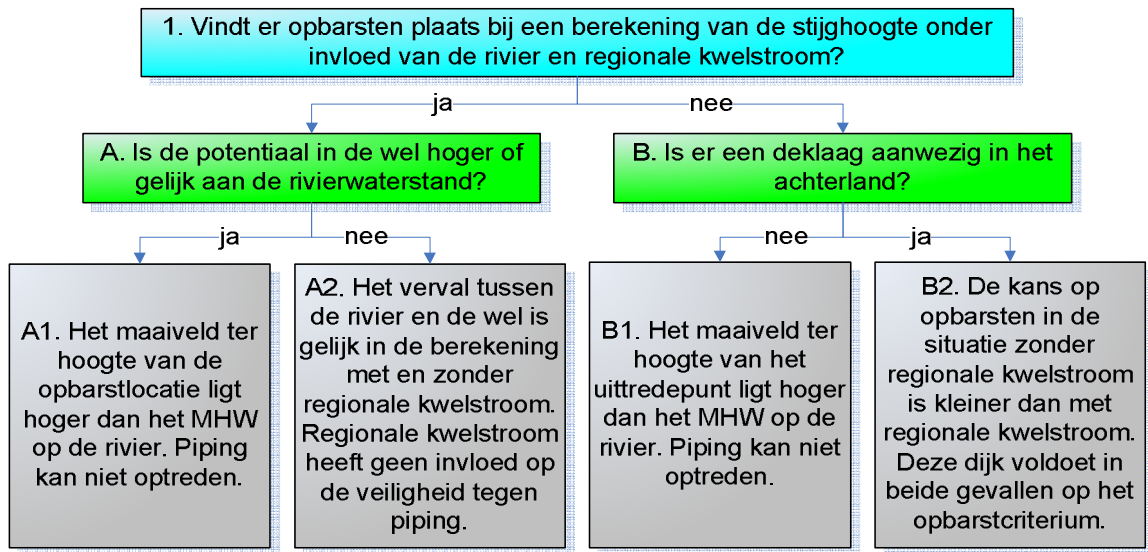
### 3.2 Ontlastend effect van een wel (deel hypothese 2)

Indien opbarsten buiten de kritische lengte van een waterkering plaatsvindt, zal de wel die ontstaat de potentiaal in het watervoerende pakket verlagen binnen een bepaald gebied. Indien de ontlastende functie van de wel voldoende groot is zou dit ervoor kunnen zorgen dat er geen opbarsten plaatsvindt op een locatie dicht bij de waterkering. Dit is situatie A2 uit de vorige paragraaf.

#### 3.2.1 Methodiek

Het effect van een wel in het achterland is afhankelijk van de lokale omstandigheden. Daarom wordt naast een theoretische beschouwing ook de praktijksituatie beschouwd voor de Grebbedijk. De Grebbedijk is gekozen als locatie omdat dit ook de beoogde locatie van de casestudie in de volgende stap van het project is. De schematisatie van de Grebbedijk is gebaseerd op een eerste analyse van de situatie die is opgenomen in bijlage I.

Afbeelding 3.1 Stroomschema weerleggen hypothese 1



### 3.2.2 Systemanalyse

Binnen het vakgebied geohydrologie wordt verondersteld dat door een watervoerend pakket voornamelijk horizontale stroming plaatsvindt. De omvang van deze stroming wordt bepaald door het verhang, dikte en de doorlaatfactor. Wanneer de deklaag opbarst, dan zal de wel in eerste instantie worden gevoed door de bovenzijde van het watervoerende pakket. Of en hoeveel de onderzijde van het watervoerende pakket wordt ontlast is afhankelijk van de dikte en gelaagdheid van het watervoerende pakket, plus het debiet wat door de wel stroomt.

Het debiet door een wel lijkt niet te worden beperkt door de voeding vanuit het watervoerende pakket op basis van bovenstaande paragraaf. Dan is de wel zelf (grootte, stijghoogteverschil en weerstand) beperkend voor het debiet dat kan worden afgevoerd. Het debiet is in de volgende paragraaf geanalyseerd.

### 3.2.3 Debiet door de wel

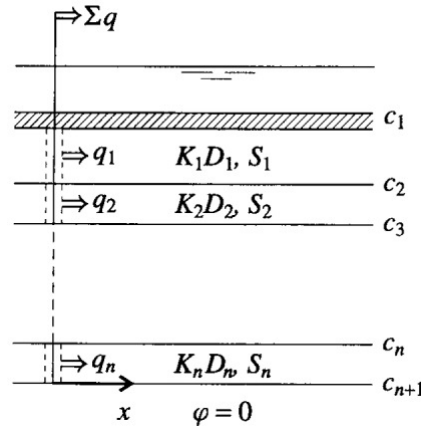
Bij verschillende waterbeheerders is navraag gedaan naar het debiet van wellen. Waterbeheerders monitoren het voorkomen van wellen, maar hebben geen metingen beschikbaar van het debiet.

Daarom is een literatuuronderzoek verricht. Dat heeft geresulteerd in 1 onderzoek. Het debiet in permanente wellen in de Noordplas Polder nabij Leiden is gemeten via het temperatuurverloop (De Louw, 2013). Van de 54 aangetroffen wellen zijn bij 15 wellen debietsmetingen uitgevoerd. De resultaten van alle metingen variëren tussen 0,5 en 100 m<sup>3</sup>/dag, bij een waterstandsverschil van 1,0 m tussen het watervoerende pakket en de deklaag. Stroomsnelheden in de wellen bedroegen tussen de 50 en 800 m/dag.

### 3.2.4 Ontlastende functie

De ontlastende functie van een wel is onderzocht via een analytische oplossing voor een doorsnede met meerdere lagen en een onttrekking in de bovenste laag (vergelijking 710.15 (Bruggeman, 1999)), zie afbeelding 3.2. De formule is geldig voor een oneindig domein. Aan de bovenrand staat een vast waterpeil. De situatie is stationair beschouwd, omdat verwacht wordt dat de ontlastende functie in het watervoerende pakket snel de stationaire situatie zal bereiken.

Afbeelding 3.2 Doorsnede vergelijking 710.15 uit Bruggeman (1999)



Via bovenstaande formule is de ontlastende werking van een opbarstkanaal onderzocht voor de locatie bij de Grebbedijk. Daarbij is als weerstand tussen de vaste stijghoogte en het watervoerende pakket een waarde van 10 dagen gehanteerd. Dit schematiseert de goede en snelle aanvulling van de stijghoogte vanuit het achterland en de Nederrijn. Als bodemparameters zijn de waarden uit het AZURE grondwatermodel als basis beschouwd, zie tabel I.1. Vervolgens zijn de doorlatendheden en weerstanden met een factor 2 en 0,5 gevarieerd om inzicht te geven in het effect van de bodemparameters.

Om de invloed van het debiet van de wel op de ontlastende functie te onderzoeken zijn verschillende stijghoogteverschillen ( $\Delta h$ ) opgelegd: hoogwater 2012, hoogwater 1995 en het gemiddelde tussen deze situaties. Daarbij is aangenomen dat de potentiaal bij het uittreepunt van de wel gelijk is aan het polderpeil; de weerstand tegen de stroming door de wel wordt verwaarloosbaar verondersteld. Het debiet is proportioneel met het aanwezige stijghoogteverschil, dus bij een groter stijghoogteverschil zal het debiet ook toenemen. Het debiet is ook afhankelijk van de bodemopbouw. Eventuele effecten van weerstand van het opbarstkanaal (zoals de 0,3d-regel) is hierin niet meegenomen.

De stijghoogteverschillen waarvoor de debieten van de onttrekking zijn bepaald zijn samengevat in tabel 3.2. Het ontlastend effect op de omgeving is berekend door het debiet in de wel zodanig te kiezen dat de verlaging ter plaatse van de wel gelijk is aan het stijghoogteverschil. Dit vormt een veilige bovengrens omdat wordt aangenomen dat er geen weerstand is van stroming door de wel, en verdere verlaging is niet reëel. De ontlastende functie van een wel wordt daarmee overschat, waardoor dit een worst case benadering betreft. De debieten variëren daarmee tussen de 4 en 20 m<sup>3</sup>/dag/m<sup>1</sup> afhankelijk van het stijghoogteverschil<sup>2</sup> en de bodemopbouw.

Tabel 3.2 Stijghoogteverschillen bij dijk voor verschillende rivierwaterstanden

Omschrijving	Waterstand rivier (m NAP)	Binnenwaterpeil (m NAP)	Stijghoogte (m NAP)	$\Delta h$ (m)
hoogwater 2012	8,7 <sup>3</sup>	6,0	7,5 <sup>3</sup>	1,5
tussenscenario	9,5, schatting	6,0	8,5 <sup>4</sup>	2,5
hoogwater 1995	10,2, zie tabel i.2	6,0	9,5 <sup>4</sup>	3,5

<sup>1</sup> Omdat het een doorsnede model betreft strekt de onttrekking zich oneindig uit loodrecht op het vlak van afbeelding 3.2 (wel in de vorm van een oneindige spleet). Het debiet wordt daardoor gegeven in m<sup>3</sup>/dag per meter onttrekking, of m<sup>3</sup>/dag/m.

<sup>2</sup> De stijghoogte in het watervoerende pakket is afhankelijk van de buitenwaterstand en de afstand tot het buitenwater.

<sup>3</sup> Gemeten door meetnet Deltares tussen eind november 2012 en begin januari 2013.

<sup>4</sup> Schatting op basis verschil in tussen buitenwaterstand hoogwater 2012 en buitenwaterstand in dit scenario.

In onderstaande tabellen is samengevat welke scenario's zijn doorgerekend. Voor verschillende onttrekkingsdebieten op basis van het stijghoogteverschil is de afstand tussen de onttrekking en de volgende zones bepaald:

- het hydrologische invloedsgebied, dit is de zone waarbinnen geen merkbaar effect meer optreedt. In de geohydrologie wordt hiervoor een verlaging van 0,05 m of meer aangehouden;
- de zone met een significant effect op het verticale evenwicht en daarmee het ontstaan van nieuwe wel-len. Hiervoor is een verlaging van 0,5 m of meer aangehouden op basis van ervaring.

Tabel 3.3 Afstand in m tot hydrologische invloedsgebied aan bovenkant 1<sup>ste</sup> watervoerend pakket (0,05 m verlaging)

Scenario	$\Delta h = 1,5 \text{ m}$	$\Delta h = 2,5 \text{ m}$	$\Delta h = 3,5 \text{ m}$
1: AZURE	79	103	122
2: weerstanden factor 2	71	90	106
3: weerstanden factor 0,5	91	122	153
4: $k_H$ factor 2	113	148	174
5: $k_H$ factor 0,5	55	72	86

Bovenstaande analyse laat zien dat in scenario 1 (de 0-situatie) een wel de stijghoogte met meer dan 0,05 m kan ontlasten binnen een afstand tussen de 79 en 122 m afhankelijk van het aanwezige stijghoogteverschil (dus bij een toenemend debiet van 6 naar 14 m<sup>3</sup>/dag/m). Maximaal is de afstand waarbij 0,05 m verlaging plaatsvindt 174 m in scenario 4, waar de horizontale doorlatendheid van de bodem met factor 2 is vermenigvuldigd.

De afstand is ook berekend voor een verlaging van een 0,5 m. Een stijghoogteverschil van 0,5 m is gekozen op basis van de minimale spreiding in het gewicht van een natuurlijke deklaag (zie bijlage II).

Tabel 3.4 Afstand in m tot significant effect aan bovenkant 1<sup>ste</sup> watervoerend pakket (0,5 m verlaging)

Scenario	$\Delta h = 1,5 \text{ m}$	$\Delta h = 2,5 \text{ m}$	$\Delta h = 3,5 \text{ m}$
1: AZURE	17	27	34
2: Weerstanden factor 2	17	26	32
3: Weerstanden factor 0,5	17	28	36
4: $k_H$ factor 2	24	38	48
5: $k_H$ factor 0,5	12	19	24

De afstand waarbinnen een verlaging van minimaal 0,5 m optreedt, ligt tussen de 17 en 34 m voor scenario 1, afhankelijk van het aanwezige stijghoogteverschil. Maximaal is de afstand waarbij een halve m verlaging optreedt circa 50 m in scenario 4.

### 3.3 Conclusie

Door het ontlastende effect van een wel daalt de stijghoogte in het invloedsgebied van de wel. Een significante verlaging (gesteld op 0,5 m of meer) is berekend binnen een zone van 17 en 50 m, daarbij treedt een debiet op van 4 tot 20 m<sup>3</sup>/dag/m afhankelijk van de bodemopbouw. In deze zone wordt geen nieuwe wel verwacht wanneer de bodemopbouw vergelijkbaar is. Meestal treden wellen het eerst op in een slootbodem. Bij de Grebbedijk liggen de sloten ongeveer 75 m van elkaar. Op deze afstand is de ontlastende functie van een wel in de orde grootte van 0,1 m. Bij een bodemopbouw met hoge doorlatendheid of een groter debiet zal de verlaging groter zijn dan bij een lage doorlatendheid of een laag debiet. Daarmee lijkt de ontlastende werking van een wel niet significant om opbarsten ter plaatse van de volgende watergang te voorkomen. Of opbarsten daadwerkelijk voorkomt is sterk afhankelijk van de dikte van de deklaag. Wel kan er gesteld worden dat op enige afstand de verlaging relatief klein is ten opzichte van het stijghoogteverschil en dus dat de ontlastende functie niet groot is.

Daarnaast is in de analyse de weerstand van het opbarstkanaal niet meegenomen. Indien deze weerstand zou worden meegenomen, bijvoorbeeld door het toepassen van de 0,3d-regel, dan zou het invloedsgebied hierdoor verder beperkt worden.

Bovenstaande analyse is toegesneden op de situatie bij de Grebbedijk. Uit de quickscan areaal (Witteveen+Bos 2015a) blijkt dat regionale kwelstroom ook kan spelen in andere gebieden in Nederland. Deze gebieden hebben andere kenmerken hebben voor bijvoorbeeld de regionale kwelstroom, bodemopbouw en rivierpeilen. De conclusies uit bovenstaande analyse zijn niet zonder meer van toepassing op deze gebieden. Echter, op basis van ervaring wordt verwacht dat de ontlastende functie eenzelfde orde grootte zal hebben en dus een beperkte omvang heeft waardoor een tweede opbarstlocatie die mogelijk tot piping leidt niet kan worden uitgesloten.



# 4

## EFFECT REGIONALE KWELDRUK OP PIPEVORMING

Het effect van de regionale kweldruk op pipevorming wordt geanalyseerd. Daarbij wordt de stromingsrichting naar een wel beschouwd. In dit hoofdstuk wordt hypothese 2 getoetst.

### 4.1 Hypothese 2 (op 10-meterniveau)

De tweede hypothese is: *'De combinatie van de regionale kweldruk van de hoge grond en de kweldruk vanuit de rivier, bepaalt de mogelijke opbarstlocatie en de stroomrichting richting de zandmeevoerende wel. Alleen bij een scheve verhouding (kleine regionale kweldruk) kan 'klassieke' piping optreden'*.

#### Uitleg hypothese 2

In de hypothese wordt gesproken van de 'klassieke' schematisatie van piping. Deze schematisatie betreft het optreden van de verschillende fasen zoals genoemd in de vorige paragraaf. Deze hypothese gaat alleen in op fase 1: het opbarsten van de deklaag (tijdstip, locatie en volgorde van ontstaan van meerdere wellen) en de stroomrichting en snelheid direct na het opbarsten<sup>1</sup>.

Opbarsten treedt op waar de verhouding tussen het gewicht van de deklaag en de potentiaal het kleinste is; dit is veelal de teensloot direct achter de waterkering doordat hier het afsluitende pakket (deels) wordt doorsneden. Door reductie van de potentiaal tot de grenspotentiaal ter plaatse van een opbarstlocatie is het onwaarschijnlijk dat opbarsten optreedt op een locatie dicht bij de waterkering, alhoewel dit niet uitgesloten kan worden.

Door regionale kweldruk is er een hogere potentiaal in het watervoerend pakket aanwezig. Hierdoor kan in het achterland opbarsten optreden op een locatie met een hogere grenspotentiaal, terwijl nabij de waterkering de grenspotentiaal nog niet is overschreden. Na vorming van de eerste wel kan de rivier nog stijgen, waarbij een verhang ontstaat tussen de rivier en de eerst gevonden wel. Indien door dit verhang de stijghoogte bij de dijk lager blijft dan de grenspotentiaal, de wel voldoende ontlastend werkt, kan er geen tweede wel ontstaan nabij de dijk op een kritieke kwelweglengte van het intredepunt. Piping kan daardoor worden uitgesloten: de dijk zal in dit geval niet falen door piping.

### 4.2 Toetsing

De toetsing wordt uitgevoerd met een grondwatermodel. Het model omvat een 3D schematisatie van de Grebbedijk. Aan de linkerrand ligt het achterland met een vaste stijghoogte vanuit het Veluwemassief en aan de rechterrand ligt de Nederrijn met een vast waterpeil. Er is een wel aanwezig onder een van de sloten in de tussenliggende polder op circa 150 m afstand van de dijk (zie afbeelding 4.1 en afbeelding 4.2). De wel is hier geplaatst omdat er bij de Grebbedijk wellen zijn geconstateerd op een vergelijkbare afstand. De

---

<sup>1</sup> De stroomrichting en snelheid zullen naar verwachting voornamelijk invloed hebben op de groeirichting van de pipes na het ontstaan van de wellen. Dit effect is nader beschouwd als onderdeel van Hypothese 1 en is daarom niet verder beschouwd bij deze hypothese.

potentiaal in de wel is gelijkgesteld aan het polderpeil. Er is een uniform slotenpatroon parallel aan de dijk aangenomen.

Er zijn drie scenario's beschouwd voor de verhouding van de kweldruk tussen de hoge grond en de rivier. De stijghoogtes en waterpeilen voor de scenario's zijn samengevat in tabel 4.1. De afleiding van deze parameters en de overige modelparameters zijn in bijlage I opgenomen. In hoofdstuk 5 is een gevoeligheidsanalyse opgenomen.

Tabel 4.1 Modelscenario's

Scenario	Waterpeil Nederrijn (m NAP)	Stijghoogte Grebbeberg (m NAP)	Polder peil (m NAP)
I: laag water	6	7,5	6,0
II: hoog water	10	7,5	6,0
III: verloop van laag naar hoog water	van 6 naar 10	7,5	6,0

#### 4.2.1 Laag water

Afbeelding 4.1 toont de situatie voor een lage rivierwaterstand waarbij de grondwaterstroming geheel richting de rivier is gericht<sup>1</sup>. Bovenaan is schematisch een doorsnede van het gebied weergegeven. In de grafiek daaronder zijn de stijghoogtes weergegeven in verschillende lagen uit het model. In de onderste grafiek zijn stroombanen getekend. Iedere blauwe lijn geeft de stroming van het binnendijkse grondwater weer.

In deze situatie is er uiteraard geen risico op piping. Het berekende debiet door de wel is circa 15 m<sup>3</sup>/dag.

#### 4.2.2 Hoog water

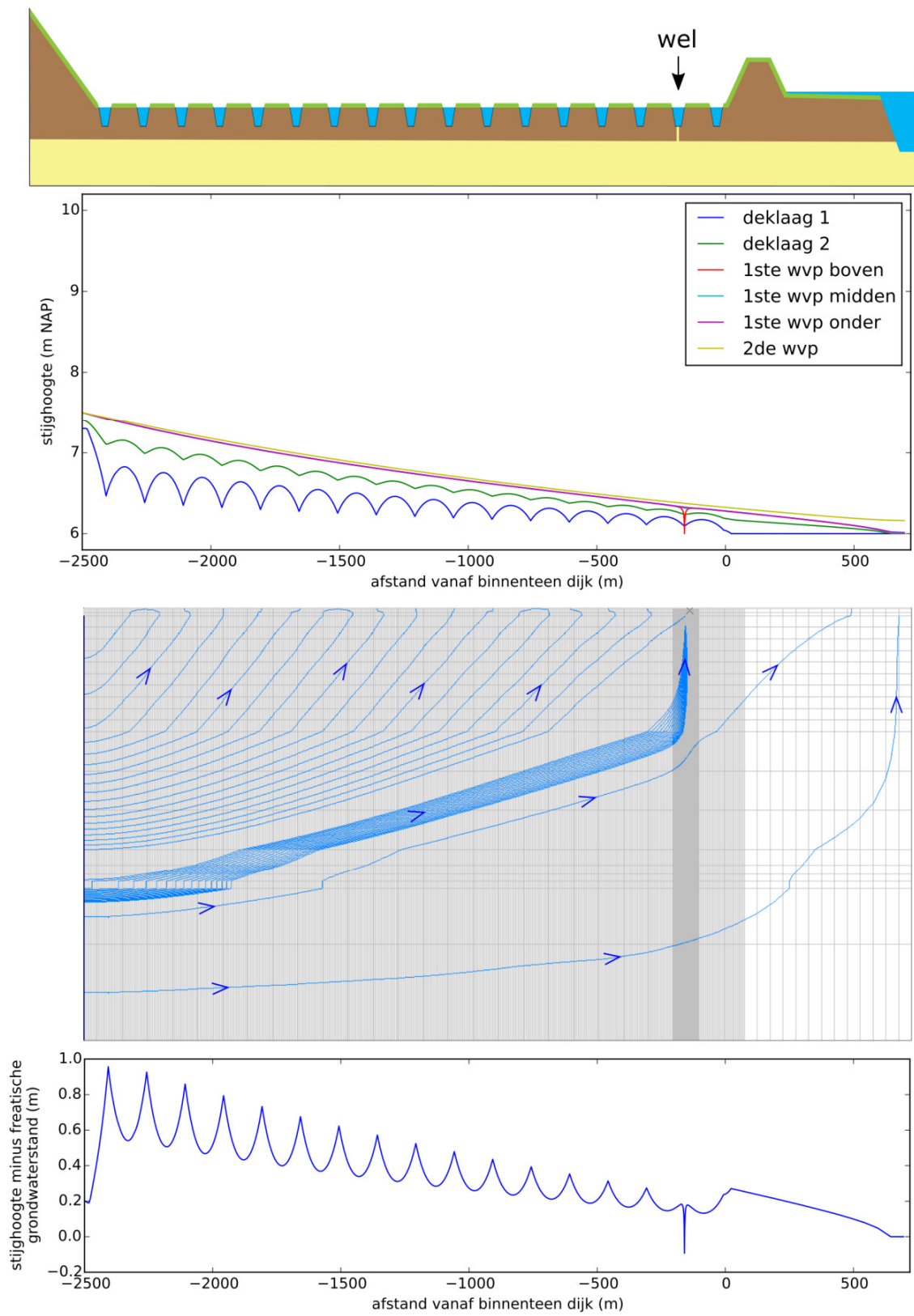
Afbeelding 4.2 toont de situatie voor een hoge waterstand op de rivier. Uit een analyse van metingen in bijlage I blijkt dat als er op de rivier hoogwater optreedt dat het waterpeil op de rivier altijd hoger is dan de stijghoogte bij de Grebbeberg. Dit betekent dat de kwelstroom vanuit de rivier naar het achterland gericht is.

De combinatie van de regionale kweldruk en de hogere waterstand op de rivier geeft een verhoging van de stijghoogte in het watervoerend pakket. Dit betekent dat een groter deel van het achterland gevoelig wordt voor opbarsten omdat de druk aan de onderzijde van de deklaag in een groter gebied toeneemt dan wanneer geen regionale kwelstroom aanwezig is. De stationair berekende stroombanen in afbeelding 4.2 laten zien dat de kwelstroom geheel afkomstig is vanuit de rivier als opbarsten plaatsvindt. Daardoor bestaat het risico op piping als de opbarstlocatie binnen de kritische kwelweglengte ligt. In deze situatie is het berekende debiet door de wel circa 100 m<sup>3</sup>/dag.

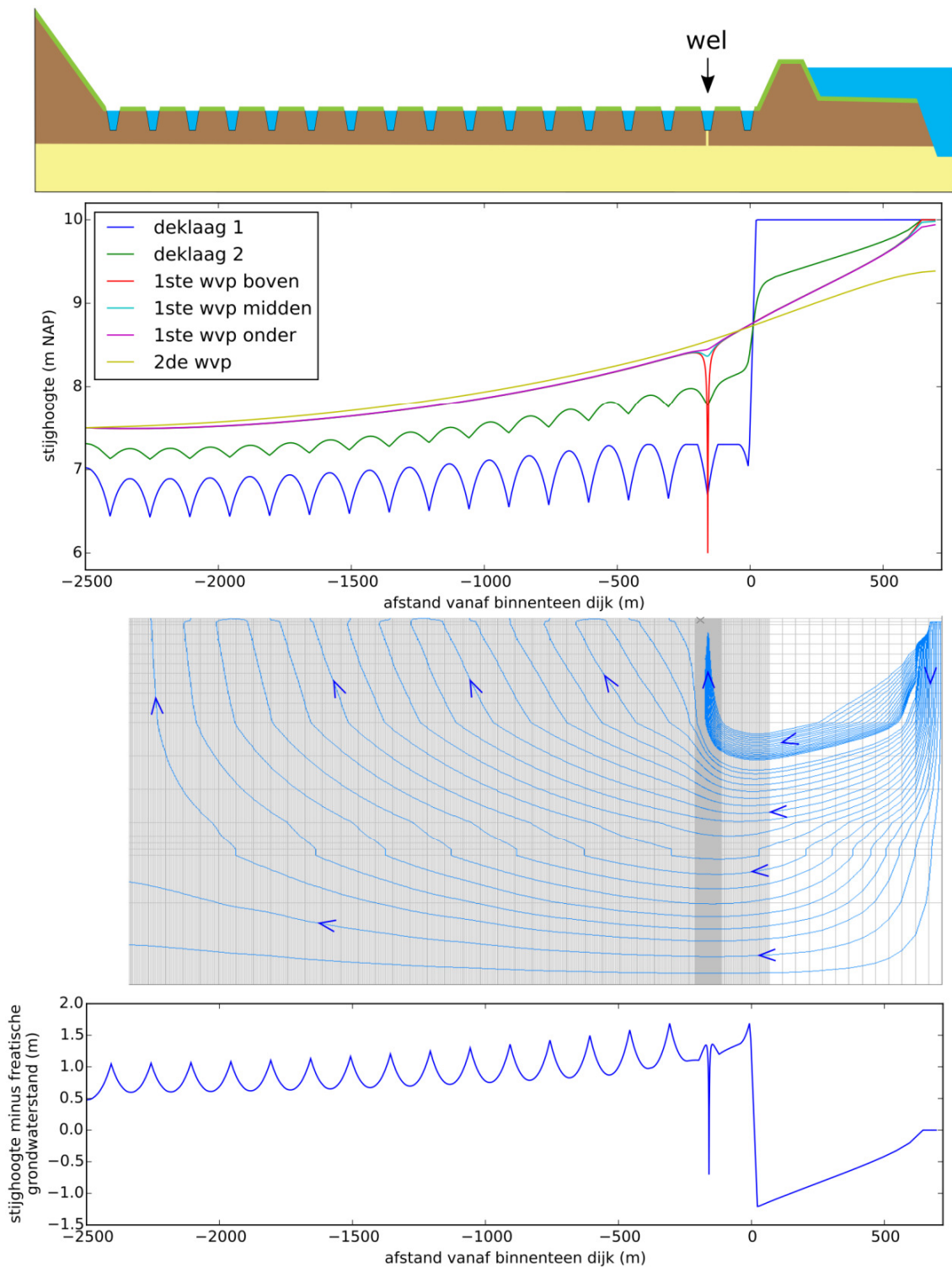
De opbarstlocatie wordt bepaald door het drukverschil tussen de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket en het polderpeil en het verticale evenwicht met de deklaag (via de dikte en volumiek gewicht). Het grootste drukverschil treedt op bij de dijk en neemt af richting het achterland. De opbarstlocatie is dus sterk afhankelijk van de lokale dikte van de deklaag.

<sup>1</sup> Voor deze studie is een drainerende situatie maatgevend boven een infiltrerende situatie.

Afbeelding 4.1 Doorsnede, stijghoogtes en stroomlijnen voor situatie met laag water op de Nederrijn



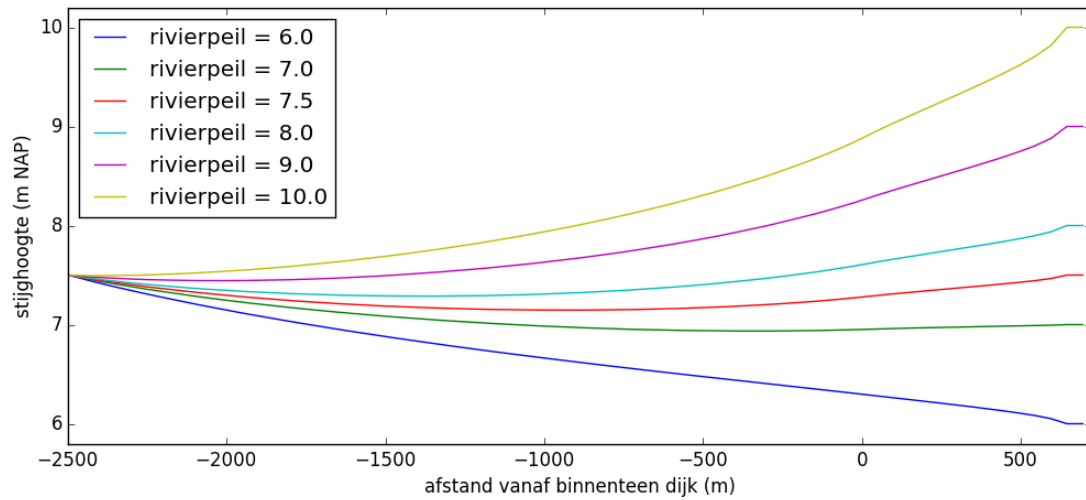
Afbeelding 4.2 Doorsnede, stijghoogtes en stroomlijnen voor situatie met hoogwater op de Nederrijn



### 4.2.3 Van laag naar hoogwater

Wanneer een hoogwatergolf op de rivier optreedt, zal de stijghoogte in de ondergrond stijgen vanuit de laag water situatie (paragraaf 4.2.1, blauwe lijn in afbeelding 4.3) naar de hoog water situatie (paragraaf 4.2.2, gele lijn in afbeelding 4.3). Dit verloop is schematisch geschetst in onderstaande afbeelding via een aantal stationaire modelberekeningen.

Afbeelding 4.3 Verloop stijghoogte bij stijgend peil in Nederrijn



### 4.3 Conclusie

De regionale kwelstroom bepaalt de grondwaterstroming tot het moment dat het peil in de Nederrijn gelijk is aan de stijghoogte in het achterland, in dit geval op circa 2.500 m vanaf de dijk. Wanneer opbarsten plaatsvindt voor dat moment, dan is de beschreven situatie in paragraaf 4.2.1 geldig, daarna geldt de situatie in paragraaf 4.2.2. De situatie in de laatste paragraaf is maatgevend voor de dijkveiligheid.

De regionale kweldruk vergroot dus het gebied waar opbarsten eventueel kan optreden maar de stroming naar de wel die dan ontstaat, komt vanuit de rivier (uit metingen bij de Grebbedijk blijkt dat bij hoogwater het rivierpeil altijd hoger ligt dan de stijghoogte in de hoge grond). Ook treden de grootste stijghoogteverschillen op bij de dijk.

# 5

## GEVOELIGHEIDSANALYSE

Dit hoofdstuk bevat een gevoeligheidsanalyse van het model dat in paragraaf 4.2 is gebruikt.

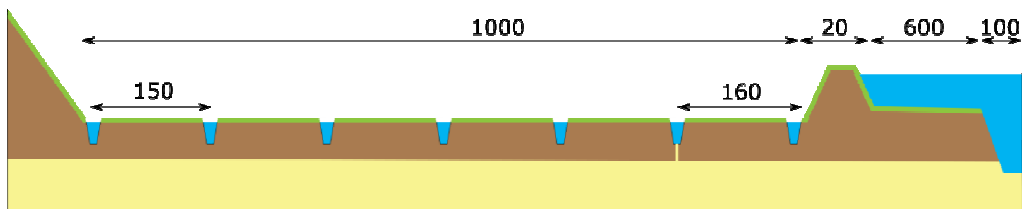
### 5.1 Opzet gevoeligheidsanalyse

Er is onderzocht wat het effect is van de randvoorwaarde ter plaatse van het achterland en ter plaatse van de rivier op stroming nabij de wel. Voor beide randen zijn varianten opgesteld waarmee de gevoeligheid van de randen op de stroming rondom de wel is beschouwd.

#### 5.1.1 Achterland

De rand bij het achterland is in het oorspronkelijke model op circa 2.500 m omdat de geselecteerde peilbuis op die afstand lag. In de gevoeligheidsanalyse is de rand op 1.000 m gelegd om het effect van regionale kweldruk vanuit de Grebbeberg te analyseren. Hiermee worden de effecten van de randen groter vanwege de kleinere omvang van het model. Een schematische doorsnede van het model voor de gevoeligheidsanalyse is weergegeven in afbeelding 5.1.

Afbeelding 5.1 Dimensies doorsnede model voor de gevoeligheidsanalyse (niet op schaal)



Aan de linkerrand wordt de stijghoogte gevarieerd. In het referentiemodel werd een waarde van NAP +7,5 m opgelegd. In de gevoeligheidsanalyse is de stijghoogte in het achterland per m verhoogd van NAP +6,5 m tot NAP +11,5 m. Ter vergelijking is de maximaal gemeten grondwaterstand in de beschouwde peilbuizen circa NAP +8 m. Waardes boven dit peil zijn zeer onwaarschijnlijk bij de Grebbedijk, maar zouden op andere plaatsen mogelijk kunnen voorkomen en worden daarom beschouwd in deze analyse.

#### 5.1.2 Rivier

Bij de rivier is de bodemweerstand gevarieerd. In het huidige model is een waarde van 5 dagen aangenomen. Voor de gevoeligheidsanalyse zijn aanvullend een hogere en een lagere waarde van respectievelijk 10 dagen en 1 dag doorgerekend.

Tevens is gekeken wat de invloed is als het type randvoorwaarde (vaste stijghoogte in plaats van ondoorlatend) varieert. Als op de rand (gedeeltelijk) een vaste stijghoogte wordt ingesteld zijn de onderstaande situaties te onderscheiden. De effecten van de laatste twee situaties zijn meegenomen in de gevoeligheidsanalyse.

- indien op de rand een stijghoogte wordt opgelegd hoger dan het waterpeil in de rivier wordt een fysisch irreële situatie gemodelleerd. Deze situatie is niet verder beschouwd;
- bij een stijghoogte gelijk aan het rivierwaterpeil wordt een situatie gemodelleerd waarbij de bodemweerstand van de rivier en van ondergrond nul is. Dit is een fysisch irreële situatie en is niet verder beschouwd.
- als er een stijghoogte wordt opgelegd tussen het rivierpeil en de regionale stijghoogte zal afhankelijk van de weerstand van de slecht doorlatende lagen een deel van het water dat uit de rivier infiltreert naar deze rand toestromen of zal de rand het model voeden. Het effect hiervan is nader onderzocht (scenario 2a in tabel 5.1);
- indien een lagere stijghoogte dan in het achterland wordt opgelegd zal tijdens een hoogwater een deel van het water dat uit de rivier infiltreert naar deze rand toestromen. Afhankelijk van de weerstand van de slecht doorlatende lagen in de ondergrond kan er een stroming ontstaan vanuit het achterland onder de rivier door. Het effect hiervan is nader beschouwd (scenario 2b in tabel 5.1).

### 5.1.3 Scenario's

In onderstaande tabel zijn de resulterende scenario's opgenomen waarvan scenario 2 het huidige model beschrijft. Op basis van deze scenario's is geanalyseerd wat de invloed is van de randen op de stroming naar de wel.

Tabel 5.1 Scenario's gevoeligheidsanalyse

Scenario	Stijghoogte achterland (m NAP)	Bodemweerstand rivier (dagen)	Schematisatie rand onder rivier
1: maximaal verschil stijghoogte achterland en stijghoogte bij rivier	6,5	1, 5, 10 <sup>1</sup>	dicht
2: basismodel	7,5	1, 5, 10	dicht
2a	7,5	5	vaste stijghoogte NAP +8,0 m
2b	7,5	5	vaste stijghoogte NAP +6,5 m
3	8,5	1, 5, 10	dicht
4	9,5	1, 5, 10	dicht
5	10,5	1, 5, 10	dicht
6	11,5	1, 5, 10	dicht

<sup>1</sup> Ieder scenario is driemaal afzonderlijk berekend met 1, 5 en 10 dagen bodemweerstand.

## 5.2 Resultaat gevoeligheidsanalyse

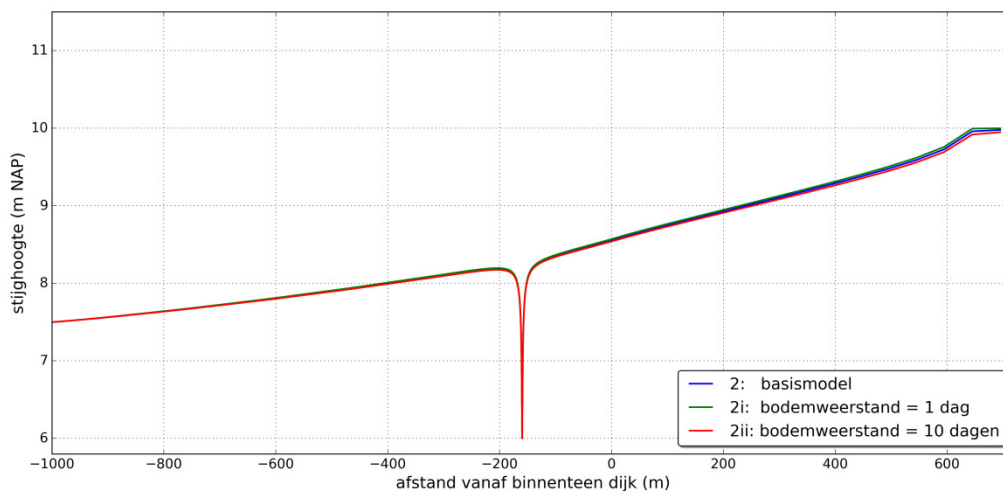
In deze paragraaf zijn de resultaten van de gevoeligheidsanalyse gepresenteerd. Er is onderzocht wat de invloed van de randen is op de stroming naar de wel. Hierbij is gekeken naar het variëren van de bodemweerstand van de rivier, het effect van verschillende stijghoogtes in het achterland, en de invloed van een gedeeltelijk open rand onder de rivier.

### 5.2.1 Bodemweerstand van de rivier

De bodemweerstand van de rivier is gevarieerd tussen 1, 5 en 10 dagen voor alle scenario's met een dichte rand. Een waarde van 1 dag is een relatief lage waarde voor de bodemweerstand. Hiermee werkt de waterstand in de rivier snel door in de ondergrond. Een waarde van 10 dagen vormt een relatief hoge waarde, waarbij er grotere verschillen werden verwacht tussen de waterstand op de rivier en de stijghoogte onder de rivier.

Uit de uitgevoerde analyse kan geconcludeerd worden dat de bodemweerstand een klein effect heeft op de stroming naar de wel. In afbeelding 5.2 is de stijghoogte boven in het 1<sup>ste</sup> watervoerende pakket weergegeven voor het basismodel, met een stijghoogte van NAP +7,5 m in het achterland. Het verloop van de stijghoogte verschilt enkele centimeters nabij de rivier. Vergeleken met het verschil tussen de waterstand op de rivier en de stijghoogte in het achterland is dit effect verwaarloosbaar. Om deze reden zijn de resultaten van de variatie in bodemweerstand van de overige modellen niet opgenomen.

Afbeelding 5.2 Stijghoogte boven in het 1<sup>ste</sup> watervoerende pakket voor verschillende waarden voor de bodemweerstand van de rivier (scenario 2).



### 5.2.2 Stijghoogte achterland

De gevoeligheid is getoetst door de stijghoogte in het achterland te variëren, omdat hiervoor een vaste waarde is gehanteerd in de eerdere berekeningen terwijl deze kan worden beïnvloed door het hoge water op de rivier. De stijghoogte in het achterland is gevarieerd tussen NAP +6,5 m en NAP +11,5 m.

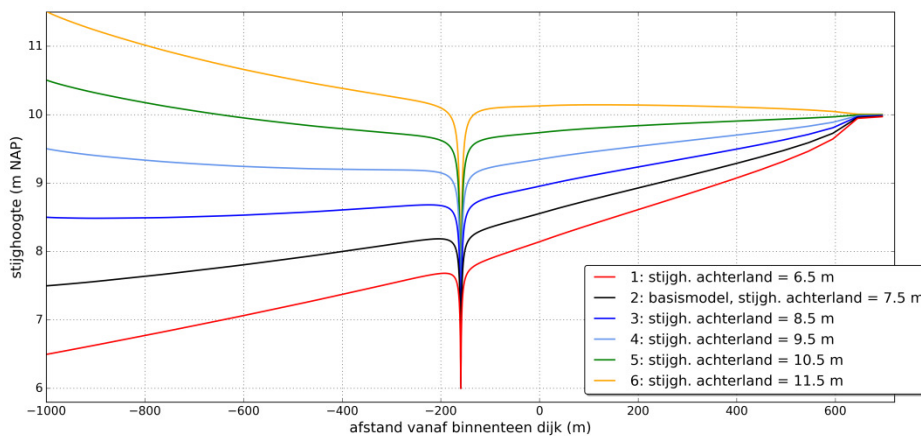
Afbeelding 5.3 toont het verloop van de stijghoogte boven in het watervoerende pakket. De helling van het stijghoogteverloop bepaalt de richting en de snelheid van de grondwaterstroming in het 1<sup>ste</sup> watervoerende pakket. Het effect van de stijghoogte aan de rand in het achterland is duidelijk zichtbaar. Een verhoging van de stijghoogte aan die rand met 1 m zorgt voor een verhoging van ca. 0,4 m bij de dijk. Daarmee is de druk onder de deklaag ter plaatse van de wel erg gevoelig voor de stijghoogte aan de rand. Een hogere



stijg­hoogte in het achterland veroorzaakt een groter risico op opbarsten van de dek­laag. De invloed van de rand ter plaatse van de dijk is een functie van de afstand tussen de dijk en de rand.

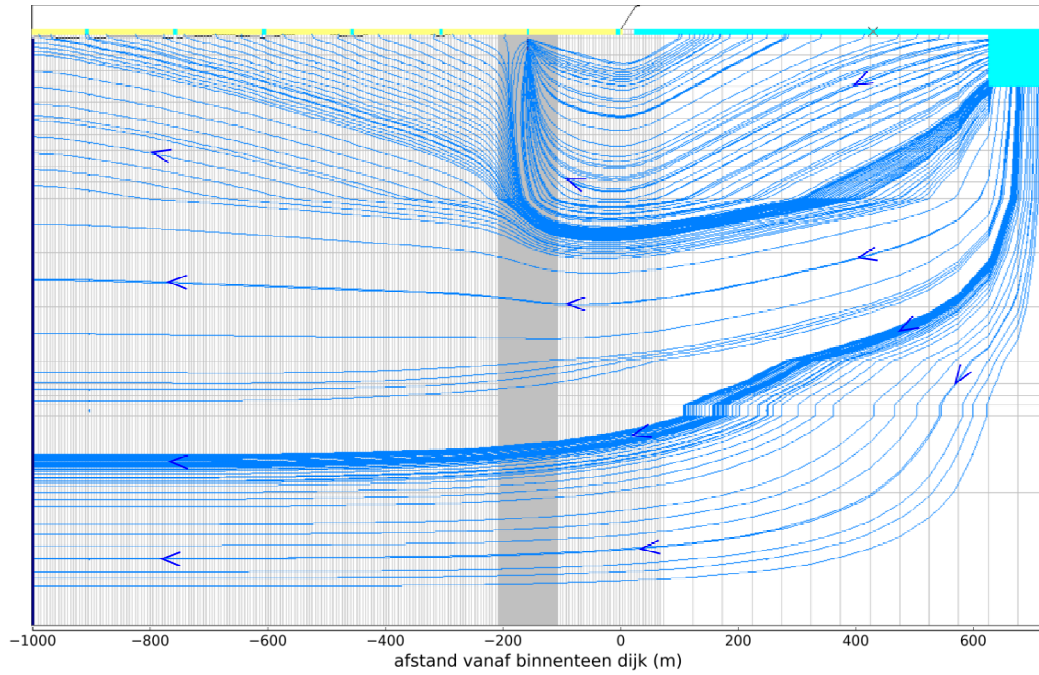
Als opbarsten een­maal is opgetreden is de vraag of erosie van zand plaats zal vinden. Dit is sterk afhankelijk van de stroomsnelheid nabij de wel, hetgeen niet nauwkeurig berekend kan worden met dit model. Wel kan de invloed van de stijg­hoogte in het achterland beschouwd worden. Het debiet door de wel is een functie van het drukverschil tussen de stijg­hoogte in het 1<sup>ste</sup> watervoerende pakket en het uit­stroom­punt van de wel. Een verhoging van de stijg­hoogte in het achterland leidt tot een groter drukverschil bij de wel en daarmee tot een hoger debiet. Een hoger debiet betekent hogere stroomsnelheden en dus een groter risico op pipe­vorming. Deze pipe vormt pas een gevaar voor de waterkering als deze in de richting van de rivier groeit. Dit is het geval als het water­peil in de rivier hoger is dan de regionale stijg­hoogte.

Afbeelding 5.3 Stijg­hoogte boven in het 1<sup>ste</sup> watervoerende pakket voor verschillende scenario's.

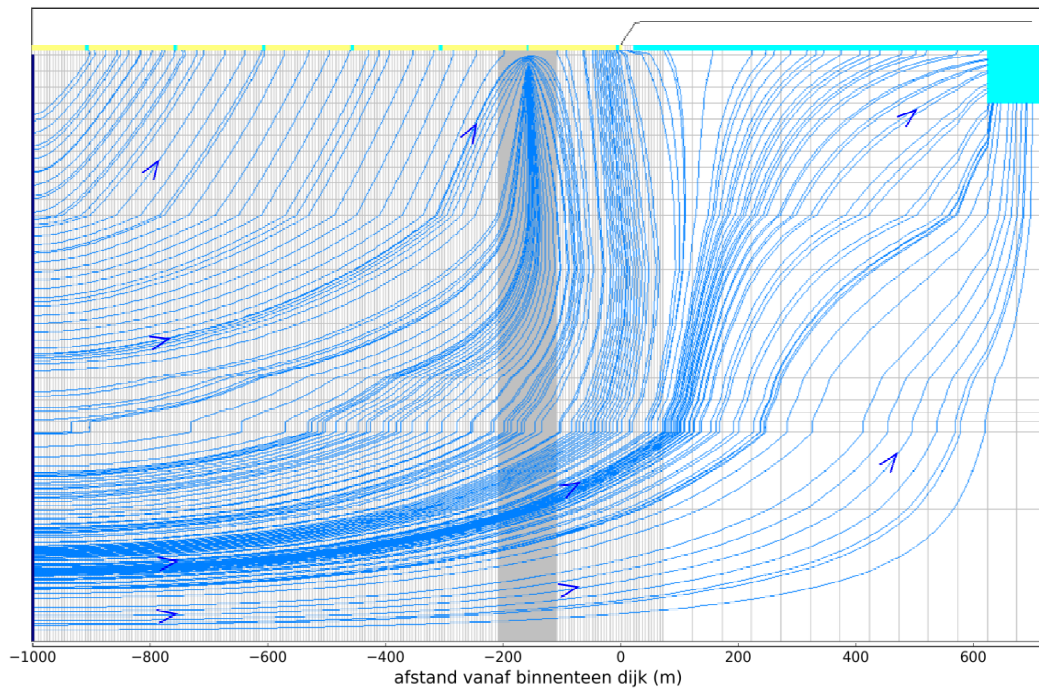


In afbeelding 5.4 en afbeelding 5.5 zijn stroom­paden getekend door het afgelegde pad te berekenen van fictieve deeltjes die in het model zijn geplaatst voor scenario 1 en scenario 6. Hierin is te zien dat in scenario 1 de stroming naar de wel geheel vanuit de rivier afkomstig is. In scenario 6 is de situatie omgekeerd en is alle stroming vanuit het achterland afkomstig. In scenario 6 is er geen risico op piping omdat alle stroming richting de wel vanuit het achterland afkomstig is.

Afbeelding 5.4 Stroompaden<sup>1</sup> in doorsnede<sup>2</sup> scenario 1, stijghoogte achterland NAP 6,5 m (Scenario 1)



Afbeelding 5.5 Stroompaden in doorsnede<sup>2</sup> scenario 6, stijghoogte achterland NAP 11,5 m (Scenario 6).



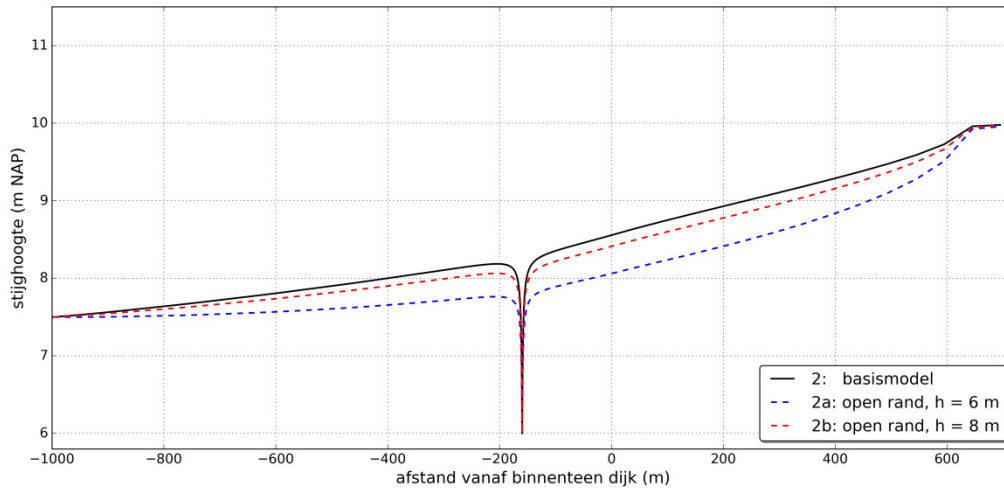
<sup>1</sup> Let op! Dit zijn geen stroombanen die een indicatie geven van de stroomsnelheid in de ondergrond. Voor deze plaatjes zijn de stroompaden van fictieve deeltjes berekend die op verschillende locaties in het model zijn geplaatst.

<sup>2</sup> Verticale schaal is van maaiveld tot NAP - 60 m, rond NAP - 35 m is een scheidende laag aanwezig

### 5.2.3 Gedeeltelijk open rand bij de rivier

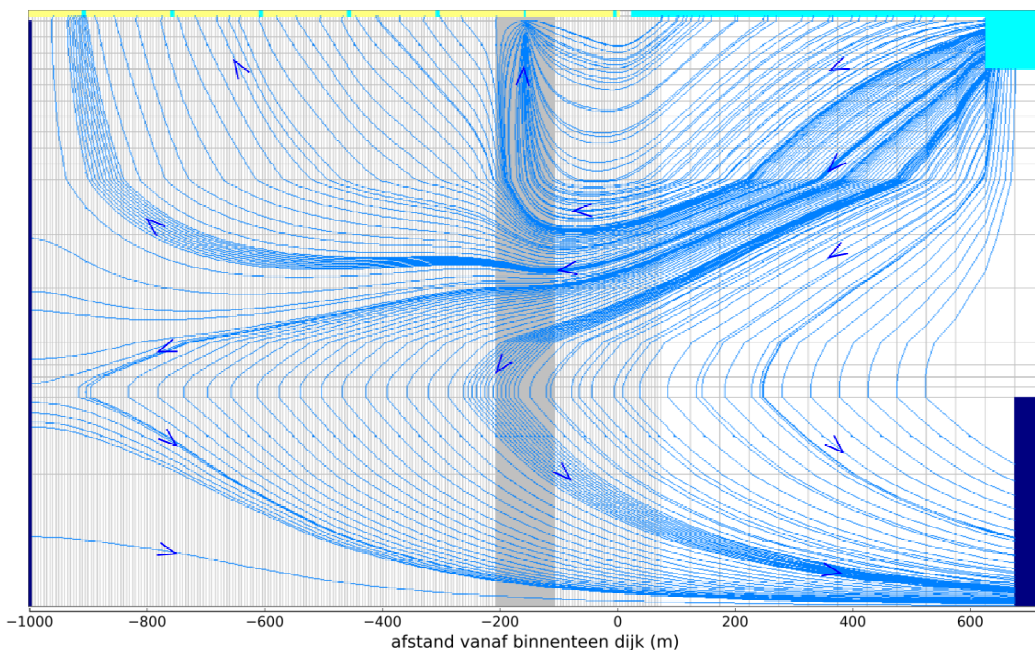
Er zijn twee scenario's beschouwd waarbij de rand in het diepste watervoerende pakket bij de rivier een vaste stijghoogte heeft. Er zijn twee waarden voor de vaste stijghoogte beschouwd: NAP +6 m, waarbij er een regionale grondwaterstroming onder de rivier door kan plaatsvinden, en NAP +8 m waarbij er geen regionale stroming kan ontstaan. De stijghoogte in het 1<sup>ste</sup> watervoerende pakket voor deze scenario's en voor het basismodel is opgenomen in afbeelding 5.6. Hierin is zichtbaar dat een open rand een ontlastende functie heeft op de druk onder de deklaag. Dit komt omdat een deel van het water dat infiltreert uit de rivier naar deze rand toestroomt.

Afbeelding 5.6 Stijghoogte bovenin 1<sup>ste</sup> watervoerende pakket voor basismodel en met gedeeltelijke open rand (Scenario 2a,b).

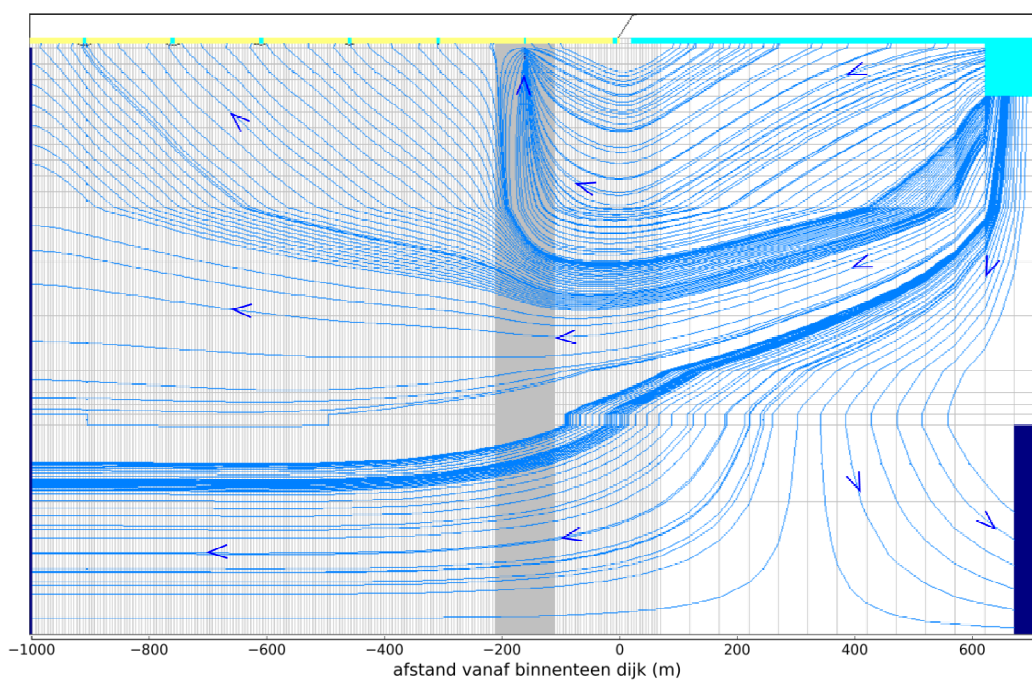


In afbeelding 5.7 en afbeelding 5.8 zijn de stroompaden van fictieve deeltjes die in het model zijn geplaatst, weergegeven. Hierin is zichtbaar dat in scenario 2a er een regionale stroming vanuit het achterland onder de rivier door plaatsvindt. In beide scenario's is ondanks de open rand de stroming naar de wel afkomstig uit de rivier. Door de ontlastende functie van de vaste stijghoogte rand ter plaatse van de rivier zal het totale debiet naar de wel toe iets afnemen, maar het risico op opbarsten van de deklaag en het ontstaan van een pipe blijft bestaan.

Afbeelding 5.7 Stroompaden in doorsnede<sup>2</sup> scenario 2a, rand met stijghoogte NAP +6 m



Afbeelding 5.8 Stroompaden in doorsnede<sup>2</sup> scenario 2b, rand met stijghoogte NAP +8 m



### 5.3 Conclusies

De gevoeligheidsanalyse toont aan dat de keuze van de modelranden niet gevoelig is voor de stroming nabij een wel wat betreft de bodemweerstand van de rivier en het type randvoorwaarde onder de rivier. De keuze van de stijghoogte in het achterland is wel gevoelig voor de stroming bij de wel: de toestroming is geheel vanuit het achterland wanneer de stijghoogte in het achterland hoger is de waterstand op de rivier, dan is er geen risico op piping richting de rivier. Op basis van een analyse van de waarnemingen wordt deze situatie bij de Grebbedijk tijdens de MHW-situatie niet verwacht, omdat de MHW-golf op de rivier hoger ligt dan de verwachte stijghoogte in het achterland.

# 6

## EROSIE

### 6.1 Hypothese 3 (op m niveau)

De derde hypothese is: 'Het zand onder de deklaag wordt door de kwelwaterstroom slechts plaatselijk rondom het opbarstkanaal meegevoerd, waarna de stroomsnelheid vervolgens in 3D snel afneemt. Onder het diepste punt van het opbarstkanaal neemt het zandtransport aan de buitenranden van de met watergevulde holle ruimte snel af vanwege de vergroting van het geërodeerd oppervlak.'

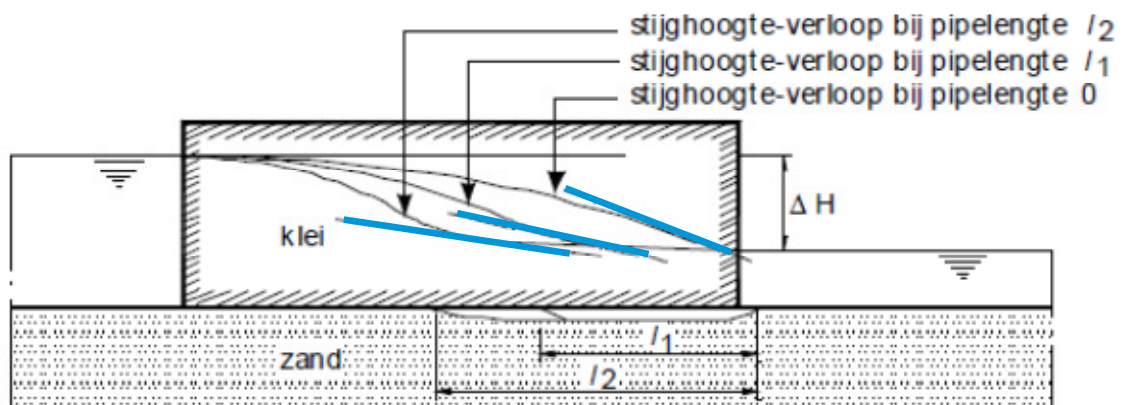
#### Uitleg hypothese

Uitgaande van het optreden van opbarsten (hypothese 1) op een bepaalde afstand (hypothese 2) zal grondwaterstroming optreden in de richting van de wel of wellen op de opbarstlocatie. Ten gevolge van deze grondwaterstroming kan zand worden meegevoerd waardoor er sprake is van zandmeevoerende wellen en de vorming van 'pipes'.

In het geval van 'klassieke' piping zal bij een verval over de 'constructie' dat kleiner is dan het kritieke verval, door erosie een pipe ontstaan, die net zolang doorgroeit tot de met dit verval corresponderende pipelengte is bereikt. De stromingsgradiënten zijn dan zodanig afgezwakt dat de zandkorrels op de rand van de pipe weerstand kunnen bieden aan de aanstroomkrachten. Dit is weergegeven in afbeelding 6.1. De helling van de blauwe lijn geeft de stromingsgradiënt weer. Deze neemt af als de pipe groter wordt en is in de afbeelding het laagst bij lengte  $l_2$ .

Wordt het verval opgevoerd, dan zal de pipe weer gaan groeien, tot een nieuw evenwicht wordt bereikt. Het erosieproces stopt, zolang het verval niet groter is dan het kritieke verval. Wordt het verval wel groter dan zal de pipe door blijven groeien, omdat het verval waarbij evenwicht mogelijk is, kleiner is dan het aanwezige verval. De pipe groeit dan uit tot een doorgaande pipe tussen boven- en benedenstroomse kant van de constructie; piping is daarmee een feit.

Afbeelding 6.1 Afzwakken stromingsgradiënten bij ontstaan van een 'pipe', stromingsgradiënt met blauw geaccentueerd



Wanneer er sprake is van een regionale kwelstroom zal (in het 2-dimensionale vlak gezien) water van weerszijden toestromen. Door deze alzijdige toestroming kan mogelijk de vorm van de pipe anders zijn. De vorm van de pipe heeft invloed op de afzwakking van de stromingsgradiënten (rode stippellijnen in afbeelding 3.2) en daarmee invloed op de evenwichtslengte<sup>1</sup>. Daarnaast kan door alzijdige toestroming het debiet door het opbarstkanaal toenemen, wat het verval over het opbarstkanaal kan beïnvloeden.

## 6.2 Methodiek

Om deze hypothese te toetsen is er een schaalmodelonderzoek uitgevoerd (S. van den Broek, O. Kuypers, 2015). Het doel van het onderzoek was om de invloed van regionale kweldruk op piping te bestuderen.

## 6.3 Conclusie uit labonderzoek

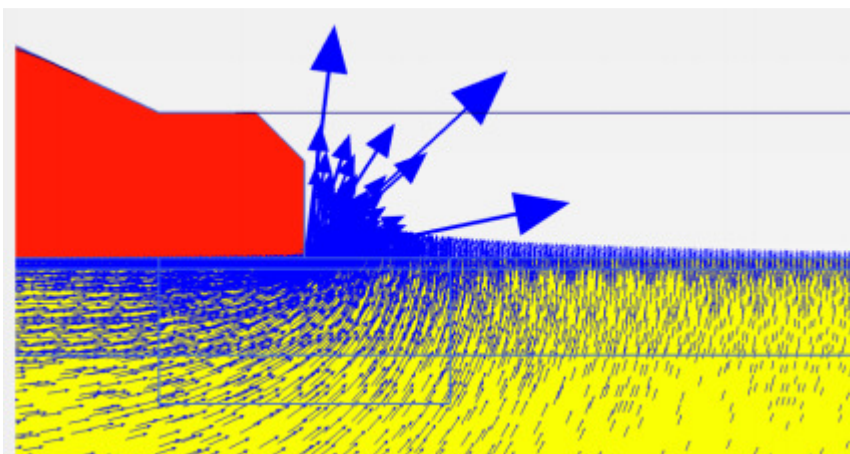
De belangrijkste conclusies van het onderzoek zijn dat:

- het kritieke verval voor het optreden piping (doorgaande erosie) wijzigt niet bij meerszijdige aanvoer. Dit lijken zelfs iets af te nemen wat suggereert dat bij tweezijdige toestroming piping juist sneller kan optreden en de kritieke kwelweglengte bijgevolg toeneemt. Een verklaring hiervoor kan zijn dat bij tweezijdige toestroming het debiet door de pipe toeneemt en daarmee de zand transport capaciteit. Het verval over het uitstroomkanaal neemt hierdoor af;
- doorgaande erosie treedt op bij het overschrijden van het kritiek verhang, onafhankelijk van aanvoer van 1 of van 2 kanten. Bij aanvoer van 2 kanten, treedt erosie op in beide richtingen.

## 6.4 Toetsing hypothese

De hypothese stelt dat door de uitholling onder de deklaag het effectieve oppervlak waardoor grondwater stroomt toeneemt. Het verhang blijft echter gelijk, dit is de drijvende kracht voor piping. Daarom neemt door de uitholling onder de deklaag het risico op piping niet af. In het numerieke model is er sprake van alzijdige toestroming naar de wel toe waarbij alle stroming afkomstig is van de rivier. Ondanks de alzijdige toestroming zullen de stroombanen zich concentreren op het punt van de uitholling dat het dichtst bij de rivier ligt. Daar is het pad het kortste. Hierdoor kan er op dat punt toch een hoog verhang plaatsvinden die voor terugschrijdende erosie zorgt. Verhang is het drijvende kracht achter piping. Ondanks de afname van stroomsnelheid direct onder het opbarstkanaal kan er toch piping optreden.

Afbeelding 6.2 Verhang bij uittredepunt



<sup>1</sup> Evenwichtslengte is de lengte van de 'pipe' in het geval van een bepaald verval over de waterkering. Illustratief:  $l_2$  is de evenwichtslengte bij een verval  $\Delta H$  in afbeelding 6.1.

### Geldigheid hypothese op basis van studie

Onderdeel van taak D was het uitvoeren van labonderzoek waarbij piping is beproefd met tweezijdige toestroming. Dit onderzoek laat zien dat doorgaande erosie optreedt bij overschrijden van kritiek verhang, onafhankelijk van aanvoer van één of van twee kanten. Bij aanvoer van twee kanten, treedt erosie op in beide richtingen.

Bolvormige erosie met sterke vergroting van het uittredeoppervlak zoals benoemd in de hypothese treedt niet op. De kritieke waterspanningsgradiënten voor het optreden van piping (doorgaande erosie) wijzigt niet bij meerzijdige aanvoer. Deze lijken zelfs iets af te nemen wat suggereert dat bij tweezijdige toestroming piping juist sneller kan optreden en de kritieke kwelweglengte bijgevolg toeneemt.

De hypothese is bijgevolg niet waar.

# 7

## CONCLUSIES

De conclusies worden per hypothese gepresenteerd.

### Hypothese 1 (op kilometer niveau)

De hypothese luidt: '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 gronden met hogere grondwaterstanden die gedraineerd worden door de rivier'.

Uit een analyse volgen 2 situaties wat betreft de mogelijkheden voor opbarsten: met een potentiaal hoger of lager dan de rivier. De maatgevende situatie ontstaat wanneer het potentiaal in de wel lager is dan in de rivier. Doordat de wel bij grote drukverschillen erodeert zal de potentiaal in de wel afnemen tot hoogte waarop het water vrij afstroomt (een worst case aanname is hoogteligging maaiveld of peil in de sloot plus de weerstand in het opbarstkanaal). De gradiënt in de stijghoogte, de drijvende kracht achter piping, tussen de wel en de rivier, is gelijk aan of groter dan in de situatie zonder regionale kwelstroom. Regionale kwelstroom heeft voor dat scenario dus geen remmend effect op het ontstaan van pipes.

### Hypothese 2 (op 10-meter niveau)

De hypothese luidt: 'De verhouding tussen de regionale kweldruk van de hoge grond en de kweldruk vanuit de rivier, bepaalt de mogelijke opbarstlocatie, stroomrichting en stroomsnelheid richting de zandmeevoerende wel. Alleen bij een scheve verhouding (kleine regionale kweldruk) kan 'klassieke' piping optreden'.

Het ontlastende effect van een wel is beschouwd met een analytische formule met een bodemopbouw uit het AZURE model. Een significante verlaging (gesteld op 0,5 m of meer) is berekend binnen een zone van 17 en 50 m, daarbij treedt een debiet op van 4 tot 20 m<sup>3</sup>/dag/m. De ontlastende functie wordt groter als het debiet door de wel groter wordt, of als het watervoerende pakket een groter doorlaatvermogen heeft. Of deze verlaging opbarsten dicht bij de dijk kan voorkomen is sterk afhankelijk van de lokale dikte van de deklaag. Ter indicatie is de verlaging op circa een slootafstand (circa 75 m bij de Grebbedijk) geschat op orde grootte 0,1 m. Er kan gesteld worden dat deze verlaging relatief klein ten opzichte van het aanwezige stijghoogteverschil en dat daarmee de ontlastende functie van een wel beperkt is.

De invloed van regionale kweldruk op de stromingsrichting naar een wel is onderzocht met een driedimensionaal numeriek model. In een situatie met laag water op de rivier, heeft de rivier een drainerende werking en is de grondwaterstroming vanuit de hoge grond naar de rivier gericht. In deze situatie is er uiteraard geen risico op piping.

In een situatie met hoog water op de rivier is er een kwelstroom vanuit de rivier richting het achterland. De aanwezige regionale kweldruk verhoogt de stijghoogte in het watervoerend pakket waardoor een groter deel van het achterland mogelijk gevoelig wordt voor opbarsten. De opbarstlocatie is echter niet alleen een functie van het verschil in stijghoogte tussen het watervoerend pakket en de deklaag maar ook de dikte van de deklaag. De regionale kweldruk vergroot dus het gebied waar opbarsten eventueel kan optreden maar de stroming naar de wel die dan ontstaat, komt vanuit de rivier. Ook treden de grootste stijghoogteverschillen op bij de dijk.



De stroming naar een wel wijzigt naar een toestroming geheel uit het achterland wanneer de stijghoogte in het achterland hoger is dan het hoogwater op de rivier. Dit is relevant voor de veiligheid voor piping tijdens de MHW-situatie. Echter, bij de Grebbedijk is de waargenomen stijghoogte in het achterland altijd lager dan het hoogwater op de rivier. Verwacht wordt dat deze situatie ook optreedt tijdens een MHW-golf.

De locatie van de eerste wel in het achterland is niet of zeer lastig te bepalen in verband met de grote afhankelijkheid van deklaagdikte die veel variatie kent. Dit zet grote vraagtekens bij de haalbaarheid van een toetsplan. Kan met zekerheid worden gezegd dat de eerste wel optreedt op een afstand die ver genoeg is van de dijk om geen piping tot gevolg te hebben (buiten de kritieke kwelweglengte), maar dichtbij genoeg om de stijghoogtes nabij de dijk te verlagen en een tweede wel daar te voorkomen?

Indien de eerste wel binnen de kritische kwelweglengte van de dijk ligt verandert het potentiaalverloop tussen de wel en de dijk niet positief ten opzichte van klassieke pipingsituatie (scenario A2 bij hypothese 1). Regionale kwelstroom beïnvloedt in dat geval het pipingoordeel niet.

In taak D hebben we onderzocht wat er gebeurt met de stijghoogtes in de nabijheid van een wel. Uit geohydrologische modellen blijkt dat een wel onvoldoende ontlastend werkt (<5 cm stijghoogteverschil op 100 m tot maximaal 50 cm op circa 30 m) om het ontstaan van nieuwe wellen dichterbij de dijk te voorkomen.

De hypothese is theoretisch mogelijk, maar het ontlastend effect is beperkt. In theoretische gevallen (kleine overschrijding van de grenspotentiaal en zeer homogene, volledig bekende deklaag) kan het ontlastend effect het verschil maken tussen wel of geen opbarsten binnen de kritieke kwelweglengte. Variatie van en onzekerheid over de dikte van een natuurlijk aanwezige deklaag maakt dat de hypothese in de praktijk niet toepasbaar is voor het verkleinen van het pipingareaal. De natuurlijke variatie in deklaagdikte maakt dat het verschil in grenspotentiaal al snel 0,5 m of meer is, afhankelijk van de spreiding en de dikte van de deklaag.

### Hypothese 3 (op m niveau)

De hypothese luidt: 'Het zand onder de deklaag wordt door de kwelwaterstroom slechts plaatselijk rondom het opbarstkanaal meegevoerd, waarna de stroomsnelheid vervolgens in 3D snel afneemt. Onder het diepste punt van het opbarstkanaal neemt het zandtransport aan de buitenranden van de met watergevulde holle ruimte snel af vanwege de vergroting van het geërodeerd oppervlak'.

De hypothese stelt dat door de uitholling onder de deklaag het effectieve oppervlak waardoor grondwater stroomt toeneemt. Het verhang blijft echter gelijk, dit is de drijvende kracht voor piping. Daarom neemt door de uitholling onder de deklaag het risico op piping niet af.

Uit het uitgevoerde schaalmodelonderzoek kan geconcludeerd worden dat de kritieke waterspanningsgradiënten voor het optreden piping (doorgaande erosie) niet wijzigen bij meezijdige aanvoer. Deze lijken zelfs iets af te nemen wat suggereert dat bij tweezijdige toestroming piping juist sneller kan optreden en de kritieke kwelweglengte bijgevolg toeneemt. Een verklaring hiervoor kan zijn dat bij tweezijdige toestroming het debiet door de pipe toeneemt en daarmee de zandtransportcapaciteit. Het verval over het uitstroomkanaal neemt hierdoor af. Verder werd gevonden dat doorgaande erosie treedt op bij het overschrijden van het kritiek verhang, onafhankelijk van aanvoer van 1 of van 2 kanten. In het numerieke model is er sprake van alzijdige toestroming naar de wel toe waarbij alle stroming afkomstig is van de rivier. Ondanks de alzijdige toestroming zullen de stroombanen zich concentreren op het punt van de uitholling dat het dichtst bij de rivier ligt. Daar is het pad het kortste. Hierdoor kan er op dat punt toch een hoge stroomsnelheid plaatsvinden die voor terugschrijdende erosie zorgt. Ondanks de afname van stroomsnelheid direct onder het opbarstkanaal kan er toch piping optreden.

De hypothese is bijgevolg niet waar.



## REFERENTIES

- Bruggeman(1999), Analytical solutions of geohydrological problems, Elsevier, ISBN 0-444-81829-4.
- De Louw (2013), Saline seepage in deltaic areas.
- Deltares (2012). Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen. Kenmerk: 1202123-003-GEO-0002.
- Deltares (2013), Jaaroverzicht monitoring Grebbedijk.
- Deltares (2015), AZURE grondwatermodel, aangeleverd in juni 2015 versie azure\_modelversie1.0\_update.zip en oplevering\_101.zip.
- Dinoloket (2015), gegevens van Regis, boringen en waargenomen grondwaterstanden, gedownload in mei 2015 via <http://www.dinoloket.nl>.
- Van den Broek, S., Kuypers, O., 2015, Positieve kwel? Hogeschool van Arnhem en Nijmegen.
- Witteveen+Bos (2014a). POV Piping regionale kwelstroom - plan van aanpak. definitief. 30 oktober 2014. AP539-7/14-020.541.
- Witteveen+Bos (2014). POV Piping regionale kwelstroom - theoretische beschrijving. concept 02. 2 december 2014. AP539-7/14.022.734.
- Witteveen+Bos (2015b). POV Piping regionale kwelstroom - werkwijzer piping bij regionale kwelstroom;
- Witteveen+Bos (2015c). POV Piping regionale kwelstroom - stappenplan beheerdersoordeel piping bij regionale kwelstroom;
- Witteveen+Bos (2015d). POV Piping Eindrapport regionale kwelstroom. Kenmerk:
- Witteveen+Bos (2015a). POV Piping regionale kwelstroom - quickscan areaal. definitief. 27 augustus 2015. AP539-7/15-013.866.

# Bijlage(n)

## I

**BIJLAGE: RANDVOORWAARDEN EN UITGANGSPUNTEN GREBBEDIJK**



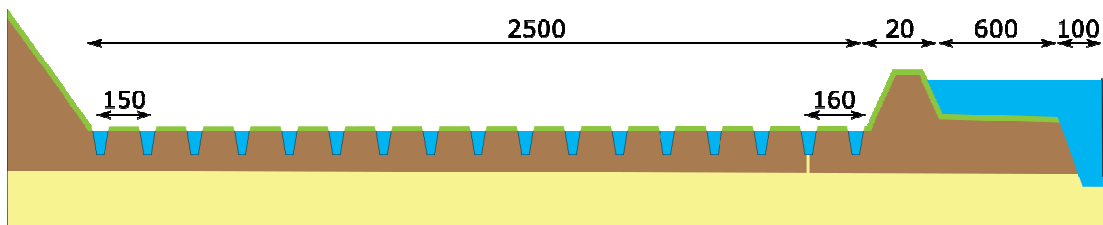
Deze bijlage bevat de opzet van een grondwatermodel voor de toetsing van de theoretische onderbouwing. De invoer parameters hiervoor worden afgeleid via een eerste geohydrologische analyse van de Grebbedijk. Per paragraaf is aangegeven welke parameters in het model worden opgenomen.

## I.1 Opzet grondwatermodel

Het model omvat een 3D schematisatie van de Grebbedijk. Het model is gemaakt met MODFLOW. De basiskenmerken zijn:

- het model wordt stationair doorgerekend omdat in het zandige watervoerende pakket een snelle interactie met de waterstand op de Nederrijn verwacht wordt;
- het modelgrid verloopt binnen het modelgebied. In een zone van 100 m rondom de wel een grid van  $1 \times 1 \text{ m}^2$  toegepast. Daarbuiten is het grid  $5 \times 1 \text{ m}^2$  en bij de rivier  $50 \times 1 \text{ m}^2$ . Hierdoor wordt ter plaatse van de wel een hoge ruimtelijke resolutie bereikt, terwijl de rekentijd en modelomvang beperkt blijft;
- de geometrie van het model is in afbeelding i.1 opgenomen;
- aan het model wordt geen neerslag opgelegd, omdat de nadruk ligt op de effecten in het watervoerende pakket.

Afbeelding I.1 Dimensies model (in m)



## I.2 Bodemopbouw

De bodemopbouw is geanalyseerd via:

- het AZURE-grondwatermodel (Deltares, 2015), de parameter waarden ter plaatse van de Grebbedijk zijn in tabel I.1 opgenomen;
- Regis en lokale boringen (Dinoloket, 2015), afbeelding I.2, afbeelding I.3 en afbeelding I.4 tonen doorsnedes vanuit Regis met de filterstelling van recent bemeten peilbuizen.

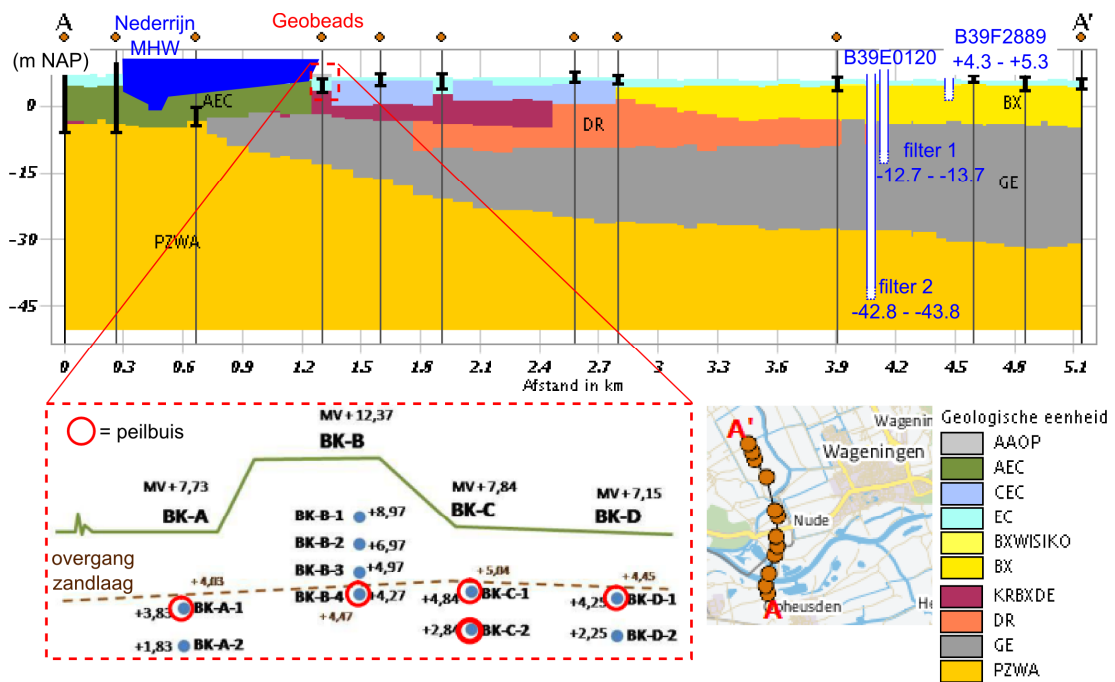
Tabel I.1 Parameter waarden ter plaatse van de Grebbedijk in AZURE

Model-laag	Bovenkant laag WVP (m NAP)	Onderkant laag WVP (m NAP)	Bovenkant SDL (m NAP)	Onderkant SDL (m NAP)	kD (m <sup>2</sup> /d)	Verticale weerstand (dagen)	k <sub>n</sub> <sup>1</sup> (m/d)	k <sub>v</sub> <sup>4</sup> (m/d)
1	7,2	6,2	-	-	2	2.115	1,6	4,7E-04
2	6,2	- 11,9	-	-	228	72	13	2,5E-01
3	- 11,9	- 30,3	-	-	665	83	36	2,2E-01
4	- 30,3	- 32,8	-	-	45	86	18	2,9E-02

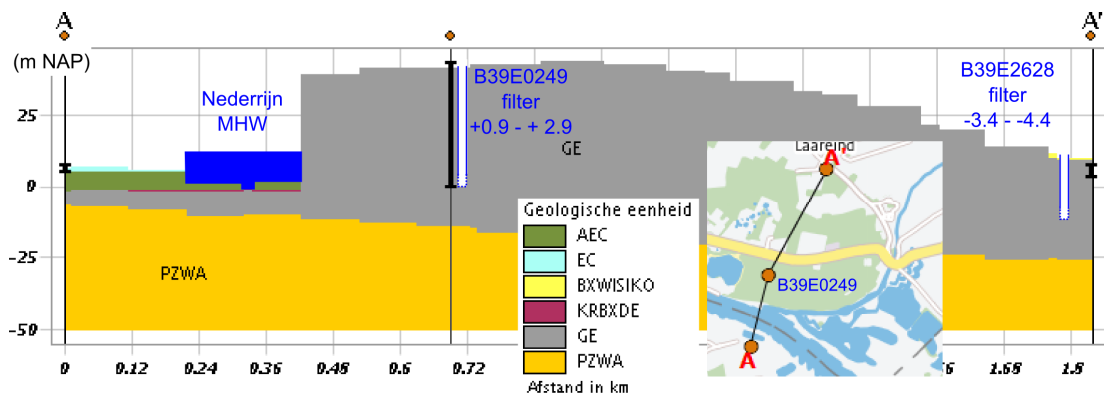
<sup>1</sup> De k<sub>n</sub> en k<sub>v</sub> zijn berekend op basis van de laagdikte en respectievelijk de kD en verticale weerstand uit het model.

Model- laag	Bovenkant laag WVP (m NAP)	Onderkant laag WVP (m NAP)	Bovenkant SDL (m NAP)	Onderkant SDL (m NAP)	kD (m <sup>2</sup> /d)	Verticale weerstand (dagen)	k <sub>n</sub> <sup>1</sup> (m/d)	k <sub>v</sub> <sup>4</sup> (m/d)
5	- 32,8	- 34,2	-	-	33	100	23	1,4E-02
6	- 34,2	- 35,3	- 35,3	- 36,5	19	220	17	5,4E-03
7	- 36,5	- 45,2	-	-	318	1	36	8,7E+00
8	- 45,2	- 60,2	- 60,2	- 63,3	612	3.347	41	9,3E-04
9	- 63,3	- 85,3	- 85,3	- 100,6	841	0	38	

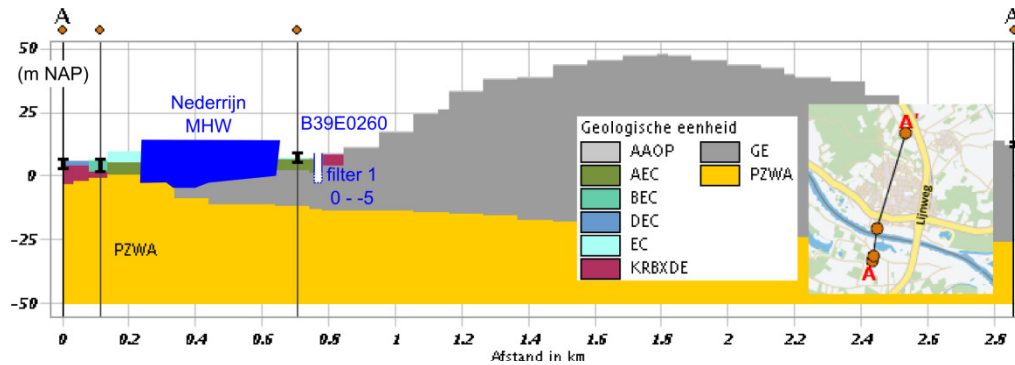
Afbeelding I.2 Doorsnede case studie gebied en peilbuis B39E0120 en B39F2889



Afbeelding I.3 Doorsnede peilbuis B39E0249 en B39E2628



Afbeelding I.4 Doorsnede peilbuis B39E0260



Zowel het AZURE model als Regis en lokale boringen laten zien dat dikke watervoerende lagen aanwezig zijn met kleilagen. Boringen geven aan dat de gestuwde afzettingen uit Regis bestaan uit matig fijn zand en siltig materiaal. Tot circa NAP -60 m in AZURE watervoerende pakketten met tussenliggende lagen met een verticale weerstand van circa 100 dagen. Onder NAP -60 m is een scheidende laag gemodelleerd in AZURE, met daaronder het 2<sup>e</sup> watervoerende pakket.

#### Invoer voor grondwatermodel

In het grondwater model wordt als basis waarde de bodemopbouw opgenomen zoals deze is weergegeven in tabel I.1. Daarbij is het niveau van NAP -60 m beschouwd als geohydrologische basis. De weergegeven parameter waarden wordt met een factor 2 gevarieerd.

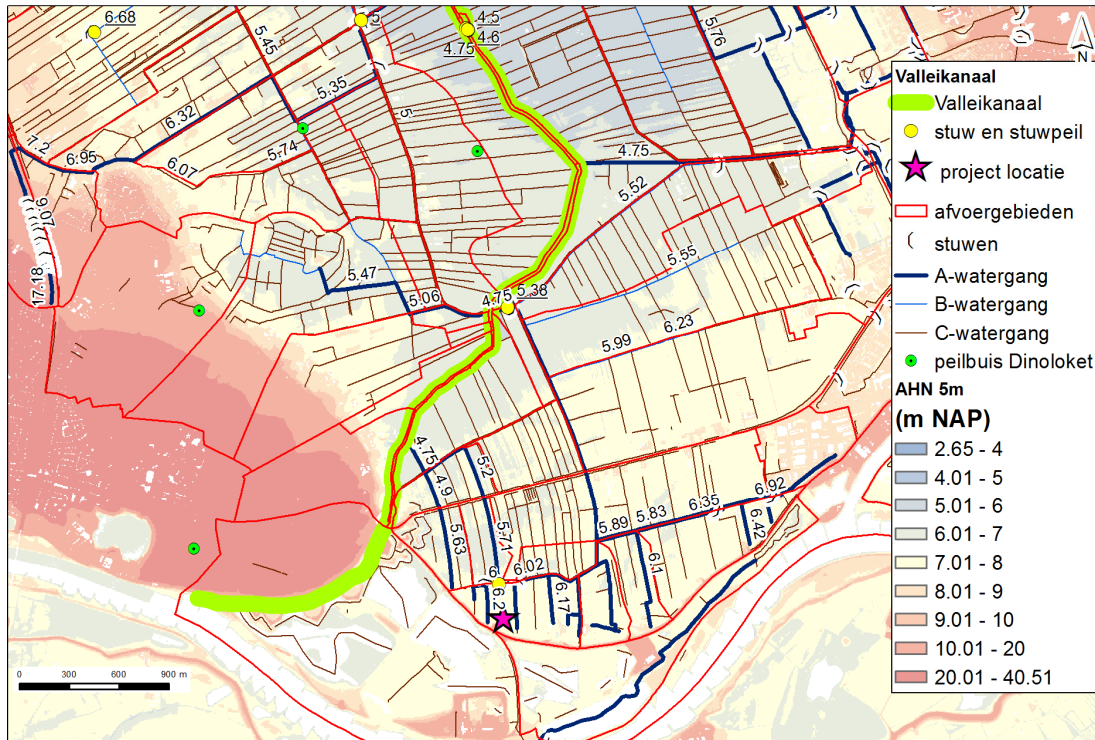
### I.3 Oppervlaktewater

Afbeelding I.5 geeft het binnendijkse oppervlaktewatersysteem weer. Ter plaatse van de Grebbedijk geldt een winterpeil van circa NAP +6 m. Het gebied watert af naar het Valleikanaal. In het grondwatermodel is een polderpeil van NAP +6 m aangehouden.

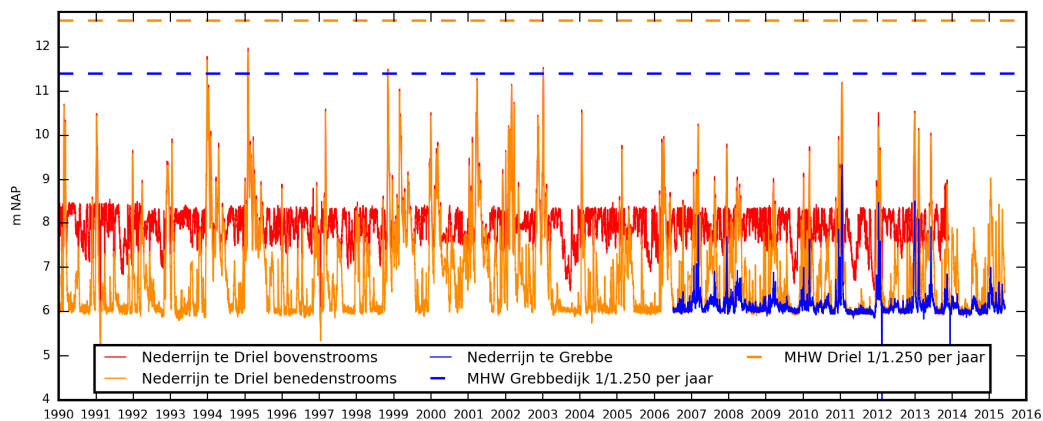
De oppervlaktewaterstand op de Nederrijn wordt door Rijkswaterstaat waargenomen voor de locaties Grebbe en Driel (Waterbase 2015). De locaties zijn in Afbeelding I.7 weergegeven. De waarnemingen zijn sinds 1990 zijn in Afbeelding I.6 opgenomen. De waarnemingen voor de locatie Grebbe starten in 2006. Sinds 2013 zijn de waarnemingen niet beschikbaar via waterbase.nl, voor de meetpunten Driel benedenstrooms en Grebbe zijn de reeksen aanvullend door Rijkswaterstaat aangeleverd. De waarnemingen liggen tussen circa NAP +6 en +12 m. De MHW-golf 1:1.250 jaar heeft ter plaatse van Driel een niveau van NAP +12,6 de Grebbedijk een hoogte van NAP +11,4 m.

De weerstand van de bodem van de Nederrijn is niet bekend. Verwacht wordt dat deze beperkt is, omdat het water enige stroomsnelheid heeft doordat de rivier stroomt en de Grebbedijk niet direct bovenstrooms van een stuw ligt. Dit wordt bevestigd door de snelle reactie van de grondwaterstand op hoge waterstanden in bijvoorbeeld peilbuis B39E0260, zie afbeelding i.8.

Afbeelding I.5 Binnendijks oppervlaktewatersysteem



Afbeelding I.6 Waargenomen waterstanden en MHW te Driel en Grebbe



Tabel I.2 Kenmerken peil Nederrijn (m NAP)

Hoogwater	Driel	Grebbe
MHW 1/1.250 per jaar	+12,6	+11,4
piek januari 2011	+11,0	+9,3
piek februari 1995	+11,9	geen meting, +10,2 m afgeleid uit waargenomen peil verschil januari 2011



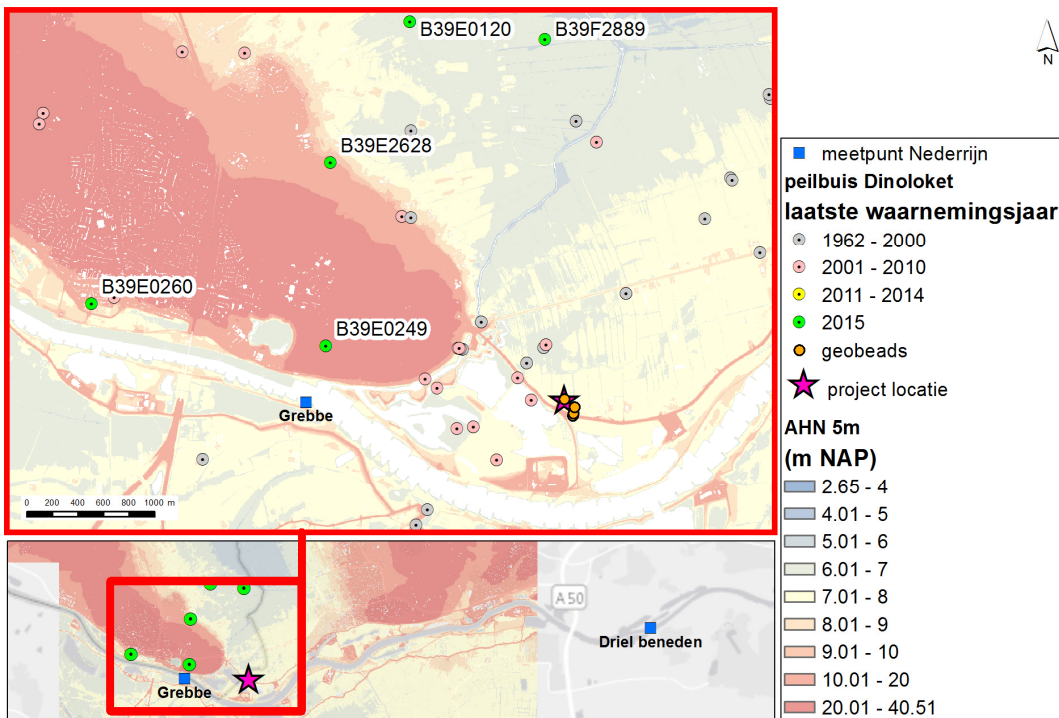
## Invoer voor grondwatermodel

In het grondwater model wordt voor het binnendijkse oppervlaktewater een vlakdekkend peil van NAP +6 m opgelegd, dit is ongeveer het gemiddelde peil in de watergangen. Voor de Nederrijn wordt het hoogwater van 1995 (circa NAP +10 m) in het model opgenomen. De weerstand van de bodem van de Nederrijn wordt op 5 dagen ingesteld, op basis van de waargenomen snelle reactie in het grondwater.

## I.4 Freatische grondwaterstand en stijghoogte

De freatische grondwaterstand en stijghoogte zijn waargenomen in het monitoringsnetwerk dat door Deltares (2013) is opgezet en regionaal via verschillende peilbuizen (Dinoloket 2015). De regionale situatie is beschouwd aan de hand van peilbuizen waarvan de waarnemingen tot en met 2015 in Dinoloket beschikbaar zijn. Afbeelding 1.7 geeft de waarnemingslocaties weer. De filterstelling van de peilbuizen is opgenomen in de doorsneden in afbeelding I.2, afbeelding I.3 en afbeelding i.8.

Afbeelding I.7 Locatie peilbuizen



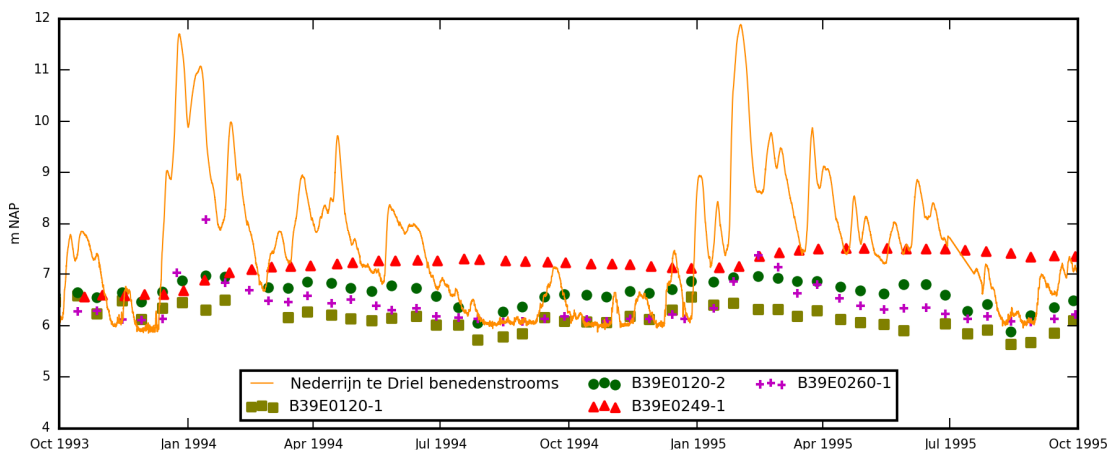
De waarnemingen zijn weergegeven voor 2 hoogwaterperiodes:

- afbeelding i.8 voor de hoogwaterperiodes van 1994 en 1995. In deze periode is de grondwaterstand handmatig waargenomen en daarom niet als lijn weergegeven. Niet alle peilbuizen waren tot actief, het meetpunt Grebbe in de Nederrijn was ook nog niet actief;
- afbeelding i.9 geeft de periode oktober 2010 - 2014 weer. In deze periode zijn lagere waterstanden op de Nederrijn opgetreden dan in de eerdere periode, maar is de grondwaterstand wel dagelijks en op meerdere locaties waargenomen. Hierdoor kan in deze periode de reactie van het grondwater op de Nederrijn beter worden geanalyseerd dan in de hoogwaterperiodes van 1994 en 1995. Ook is meetpunt Grebbe actief in de Nederrijn. Tabel I.3 geeft een eerste analyse van de tijdreeksen om zo een eerste inschatting van de lokale geohydrologie te maken. De stijghoogte ligt boven het niveau van de Nederrijn en de freatische peilbuis. Er vindt dus jaarrond kwel plaats vanuit het 1<sup>e</sup> watervoerende pakket naar het polderwater en de Nederrijn. De invloed van het hoogwater op de Nederrijn is zichtbaar in alle beschouwde peilbuizen. In de peilbuizen ten noorden van de beschouwde peilbuizen is dit effect ook zichtbaar. Bekend is dat op de stuwwal sprengen gaan lopen bij hoogwater.

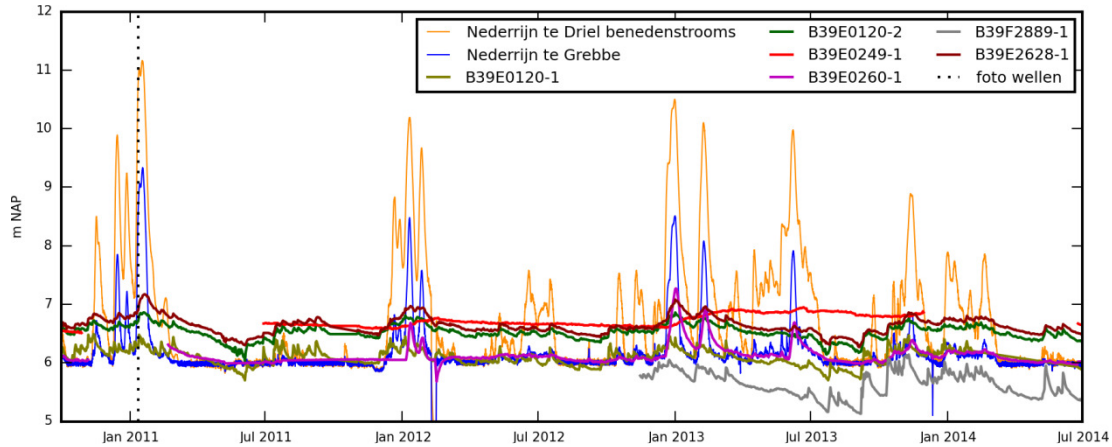
Tabel I.3 Beoordeling meetreeksen

peilbuis	maaiveld (m NAP)	pakket filterstelling	afstand tot Nederrijn (m)	korte beschrijving meetreeks
B39E0260-1	+10	gestuwd	circa 250	reageert snel op hoogwater Nederrijn, zakt na hoogwaterpiek snel uit naar basisniveau dat gelijk is aan peil in Nederrijn
B39E0249-1	+43	gestuwd	circa 350	reageert traag op hoogwater en zakt heel langzaam uit. Bijvoorbeeld na het hoogwater van 1994 en 1995 zakt de grondwaterstand tot aan het hoogwater van 1999, zie Afbeelding I.10. Het basisniveau is circa 0,5 m boven het peil in Nederrijn
B39E2628-1	+11	gestuwd	circa 1.700	waarnemingen sinds 2008. Reageert snel op hoogwater Nederrijn, reactie is kleiner dan peilbuizen op kortere afstand. Basisniveau circa 0,5 m boven het peil in Nederrijn
B39E0120-1	+6	gestuwd	circa 3.000	waarneming reageert snel en licht op hoogwater Nederrijn. Basis niveau rond of onder peil in Nederrijn
B39E0120-2	+6	watervoeren d pakket	circa 3.000	waarneming reageert snel en zeer licht op hoogwater Nederrijn. Basis niveau circa 0,5 m boven peil in Nederrijn
B39F2889-1	+6	deklaag	circa 3.200	waarneming sinds najaar 2012. Reageert snel en licht op hoogwater Nederrijn. Basis niveau circa 0,5 m onder peil in Nederrijn. De locatie wordt gedraineerd door het Valleikanaal met zomerpeil/ winterpeil NAP +4,85/ + 4,75 m

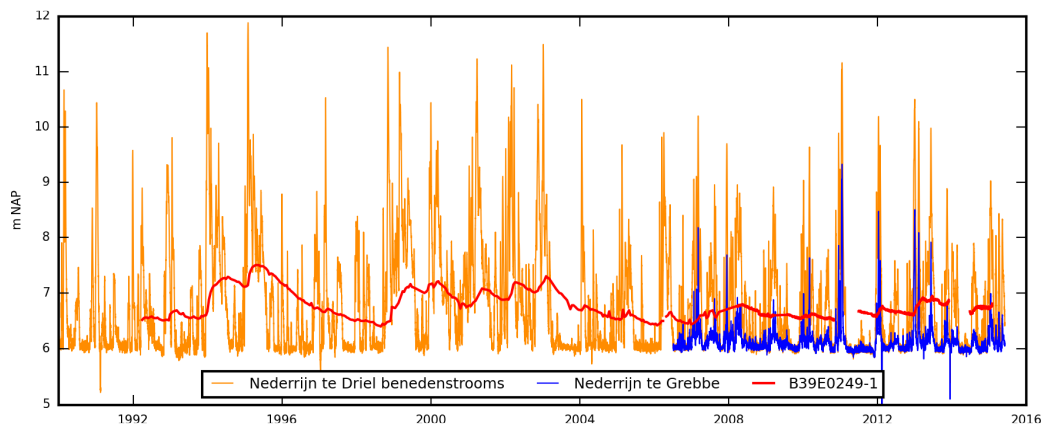
Afbeelding I.8 Waarneming Nederrijn en recente peilbuizen oktober 1993 - 1995



Afbeelding I.9 Waarneming Nederrijn en recente peilbuizen oktober 2010 - juli 2014



Afbeelding I.10 Waarneming Nederrijn en peilbuis B39E0249-1 1990 - 2015



### Invoer voor grondwatermodel

Bovenstaande analyse laat zien dat de stijghoogte afhankelijk is van de waterstand in de Nederrijn. Het invloedsgebied is in deze eerste analyse nog niet vastgelegd. Daarom kan niet zonder meer een vaste stijghoogte voor het hoogwater van 1995 worden opgelegd. Vooral nog wordt ter hoogte van peilbuis B39E0120-1 een stijghoogte van NAP +7,5 m opgelegd aan het model. Dit is gebaseerd op:

- de hoogst gemeten grondwaterstand in 1995 van NAP +6,95 m;
- waarnemingen op de 14e en 28e van iedere maand, waardoor is aangenomen dat een 0,55 m hogere waarde de maximale stijghoogte is.

## I.1 Wellen

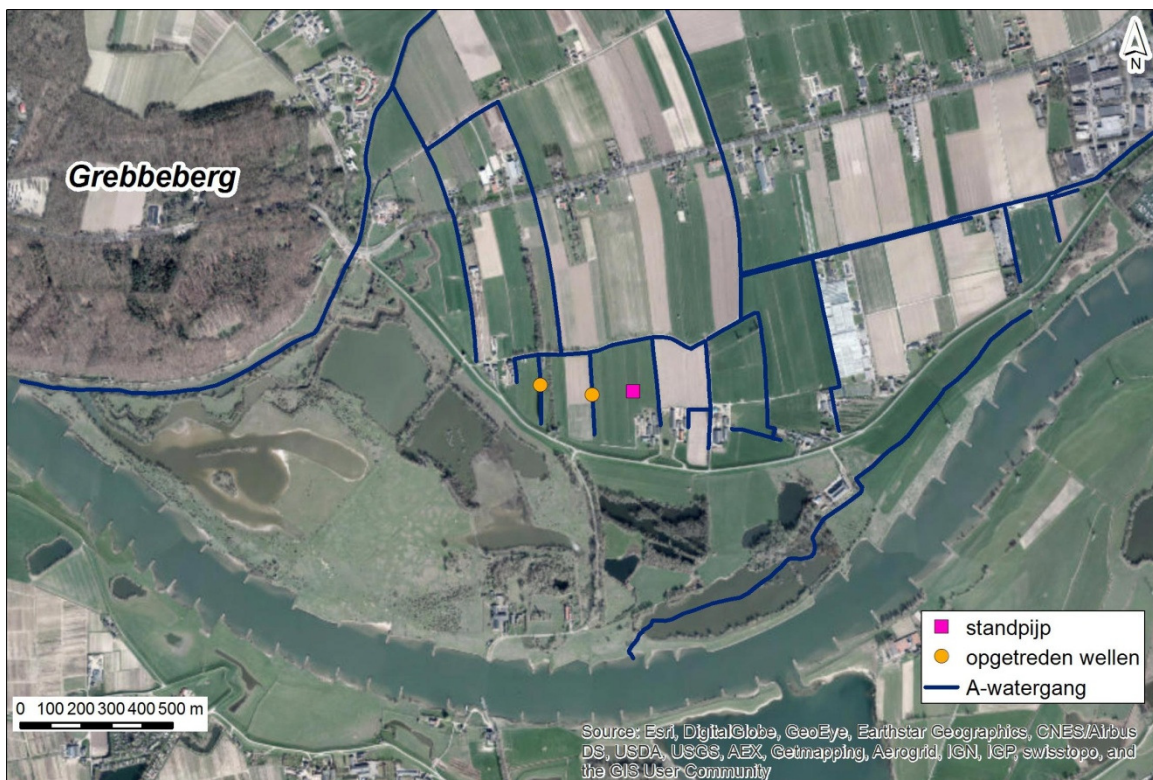
Afbeelding I.11 geeft de wellen weer die tijdens hoogwater op 12 januari 2011 zijn waargenomen ter hoogte van dijkpaal 43,5. De watergang ligt circa 150 m binnendijks (Afbeelding I.1).

Circa 150 m ten oosten van de wellen is in een standpijp iets na de piek in de hoogwatergolf van 1995 een waterstand van mv + 1,6 m waargenomen (Afbeelding I.1)

Afbeelding I.11 Foto wellen bij Grebbedijk (foto: Waterschap Vallei en Veluwe)



Afbeelding I.1 Locatie opgetreden wellen op 12 januari 2011 en locatie meting standpijp van stijghoogte in de wel na hoogwater in 1995.



### Invoer voor grondwatermodel

In het grondwater model wordt een wel gesimuleerd als een 'constant head' cel waarbij de stijghoogte gelijk gesteld is aan het polderpeil. Hiermee wordt het debiet door de wel bepaald door het stijghoogteverschil en de doorlatendheid ('conductance') van de cel. Dit betekent dat er geen weerstand aan de stroming door de wel wordt opgelegd. Hierdoor kan het optredende debiet door de wel worden overschat, echter dit heeft geen effect op de stromingsrichting naar de wel. Dat laatste is het doel van dit deel van het onderzoek.

