

**TNO-rapport****2007-U-R0357/B****Achtergrondstudie kwelreductietechnieken****Geological Survey of the  
Netherlands**Princetonlaan 6  
Postbus 80015  
3508 TA Utrecht[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

T 030 256 42 56

F 030 256 44 75

[info@tno.nl](mailto:info@tno.nl)

Datum	april 2007
Auteur(s)	Perry de Louw Gualbert Oude Essink Piet Maljaars
Opdrachtgever	Hoogheemraadschap van Rijnland
Projectnummer	034.69235
Goedgekeurd door:	Bennie Minnema

Aantal pagina's 82

Alle rechten voorbehouden. Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.



## Samenvatting

### *Probleemstelling en doelstelling*

Uit de Noordplasstudie is geconcludeerd dat wellen voor meer dan 60% bijdragen aan de huidige verzilting van het oppervlaktewater in Polder de Noordplas, de diffuse kwel draagt voor ongeveer 25% bij. Ook in de Haarlemmermeerpolder dragen de wellen significant bij aan de verzilting.

Ten opzichte van de huidige situatie zal de verzilting tot 2050 nog eens met 30% toenemen als gevolg van het autonome proces van verzilting dat is gestart sinds het droogmaken van de polders.

De komende jaren brengt Rijnland verschillende beleidsopties met betrekking tot watervoorziening (met name verziltingsbestrijding en eutrofiëringsproblematiek) in beeld. De opties lopen uiteen van heroverweging van het huidige inlaat/doorspoelbeleid, het accepteren van optredende verzilting tot aan actieve bestrijding van bronnen. Hiertoe zijn verschillende technieken beschikbaar, waarvan de efficiëntie en de effecten nog onduidelijk zijn.

Het Hoogheemraadschap heeft TNO opdracht gegeven een Achtergrondstudie Kwelreductietechnieken uit te voeren waarin een aantal technieken voor kwelreductie in beeld worden gebracht, met speciale aandacht voor welreductie.

De doelstelling van het onderzoek is het in beeld brengen van de (globale) effecten van diverse methoden om kwel te reduceren. Hierbij worden de volgende methoden behandeld:

- Dichten wellen met bentoniet, uithardende injectievloeistoffen of biosealing;
- Opvangen of oppompen en herinjecteren diepere lagen (monobronnering) of gescheiden afvoeren of ontzilten;
- Peilopzet.

Om de onderzoeksvragen te kunnen beantwoorden, zijn de volgende werkzaamheden uitgevoerd:

- Onderdeel 1: Veldonderzoek wellen
- Onderdeel 2: Geohydrologische modelberekeningen
- Onderdeel 3: Geotechnische analyse
- Onderdeel 4: Inventarisatie kwelreductietechnieken
- Onderdeel 5: Synthese kwelreductietechnieken en effecten

### *Werking en voorkomen van wellen*

Het veldonderzoek en de modelleringen hebben meer inzicht gegeven in de werking van wellen. Dit inzicht is van belang om op een effectieve manier de bijdrage van wellen aan de verzilting te reduceren.

Wellen komen veelvuldig voor in de drie onderzochte polders (Noordplas, Haarlemmermeer en Nieuwkoop). Er is niet bekend hoeveel wellen er voorkomen en er zijn nauwelijks gegevens bekend over de ligging van wellen. Wellen ontstaan op locaties met een groot opbarstingsgevaar. Wellen worden daarom met name in sloten (gering gewicht deklaag), ter hoogte van zandbanen en aan de rand van de polder (hoge kweldruk) aangetroffen. De vier onderzochte wellen in Polder de Noordplas en de Haarlemmermeerpolder komen allemaal in een sloot ter hoogte van een zandbaan voor.

Wellen bestaan uit verschillende uitstroomgaten met een diameter van 1 tot 3 centimeter die met elkaar in verbinding staan. Snelheden in deze uitstroomgaten zijn met 50 tot 800 meter per dag groot. Het hoogste weldebiet dat is gemeten, is ongeveer 18 kuub per dag. Echter, vermoedelijk wordt het debiet onderschat en bestaan de wellen uit meerdere uitstroomgaten die niet zichtbaar zijn. Bij sommige wellen borrelt er af en toe methaangas omhoog waardoor zand wordt meegevoerd dat duidt op een hoog debiet. Door de grote snelheid in wellen, is zand in suspensie en ontstaat er door de lage korrelspanning een onstabiele situatie. Hierdoor zakken slootkanten vaak uit. De snelle stroming in wellen veroorzaakt een verstoring in het temperatuurprofiel van de ondergrond. Het karteren van deze temperatuur (diepte en lengte profielen) met behulp van een prikstok is een goede methode om wellen lokaal in kaart te brengen. De metingen doen vermoeden dat een wel in een zandbaan aan de basis breed is (enkele meters tot misschien wel 20 meter breed) en vanaf een bepaalde diepte (5 tot 3 meter diepte) tentakels van uitstroomgaten naar het oppervlak heeft. Dit bemoeilijkt het dichten van wellen. Een wel in een deklaag zonder zandbaan zal een minder breed front hebben en alleen bestaan uit een smalle pijp naar boven.

Door het geconcentreerde grote debiet in een wel, werkt de wel als een soort grondwateronttrekking waardoor de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket wordt verlaagd en 'upconing' van dieper en vaak zouter grondwater plaats vindt. De verlaging van de stijghoogte door de wel is meetbaar en ook modelberekeningen tonen aan dat deze gemiddeld 10 centimeter is en niet meer bedraagt dan 35 centimeter. De 'upconing' door de wel is heel lokaal zoals de metingen hebben aangetoond. Ter hoogte van zandbanen vindt een meer regionale 'upconing' plaats en in een smal traject rond de wel (vermoedelijk niet meer dan een meter) treedt de lokale door de wel veroorzaakte 'upconing' op. Dit grondwater komt van nog dieper dan het grondwater dat in de zandbanen opkwelt en is daarmee zouter. Het is dan ook heel lastig om het juiste chloridegehalte van een wel te bepalen. Modelberekeningen laten zien dat de wel het grondwater aantrekt dat zich in het eerste watervoerende pakket, direct boven de eerste scheidende laag bevindt.

In Polder de Noordplas zijn chloridegehalten gemeten van het welwater variërend van 900 mg/l tot 2000 mg/l. In de Haarlemmermeer lopen de concentraties op tot 6000 mg/l.

### **Het dichten van wellen**

Door de grote bijdrage van wellen aan de verzilting van het oppervlaktewater ligt de nadruk van deze achtergrondstudie op de mogelijkheid om wellen te dichten.

Het dichten van wellen is de meest kansrijke en goedkoopste methode om de verzilting door brakke kwel te reduceren.

De effectiviteit van de methode per wel is groot, op regionaal niveau hangt de effectiviteit op de reductie van verzilting sterk af van de hoeveelheid wellen die worden gedicht. Eenmaal gedicht, levert een wel geen bijdrage meer aan de verzilting. Het is dan ook sterk aan te raden om te beginnen met de grootste en meest verziltende wellen. Een EC-routing van het oppervlaktewater is geschikt voor het opsporen van de grootste wellen.

Door de toename van de stijghoogte als gevolg van het dichten van wellen (maximaal 5 tot 35 centimeter) neemt het opbarstingsgevaar maximaal 5% toe en is de kans op het ontstaan van nieuwe wellen klein. Het risico op het ontstaan van nieuwe wellen is groter voor situaties waaruit de ondergrond geheel uit zand bestaat zoals in zandbanen en

bijvoorbeeld de oude getijdegeul die in het midden van de Haarlemmermeer van west naar oost loopt. Dit bemoeilijkt waarschijnlijk het dichten van wellen. Het opbarstingsgevaar kan zeer effectief worden verkleind door de slootbodembodem te verzwaren.

De toename van de stijghoogte door het dichten van wellen heeft een significante toename van de diffuse kwel tot gevolg. In infiltratiegebieden leidt het tot een afname van de infiltratie. Dit manifesteert zich zowel in het gebied waar de wellen worden gedicht als in een groot gebied er omheen (uitstraling). Hierdoor lijkt het dichten van wellen niet effectief. Echter, wellen hebben een veel hoger chloridegehalte dan diffuse kwel waardoor de zoutbelasting via wellen groter is en het dichten van wellen dus significant bijdraagt aan de reductie van de verzilting.

Er zijn globaal twee dichtingsmethoden: injectie van uithardende vloeistoffen en biosealing. Beide methoden zijn kansrijk om op grote schaal toe te passen. Bij injectie van uithardende gels wordt geadviseerd een niet milieubelastende gel te gebruiken. Biosealing is per definitie niet milieubelastend.

Er is relatief veel ervaring opgedaan met het dichten van wellen in bouwputten, wellen ontstaan door het trekken van peilfilters of door infrastructurele werken. Er is weinig ervaring met het dichten van zogenaamde spontane, natuurlijke wellen (bijvoorbeeld bij het graven van een sloot). Deze wellen vertonen een grilliger patroon en zijn daardoor lastiger te dichten. Daarnaast bestaat het vermoeden dat wellen in zandbanen moeilijker te dichten zijn en dat de kans op het ontstaan van nieuwe wellen groter is.

Er wordt dan ook geadviseerd om twee weldichtings-pilots te starten om meer inzicht te krijgen in de daadwerkelijk effecten van weldichting:

- Wel dichten met (milieuvriendelijke) uithardende gels;
- Wel dichten met biosealing.

Wel 1 in de sloot bij het perceel van Dhr. Dorrepaal is een geschikte locatie voor de pilot 'biosealing' (voldoende ruimte voor injectie-installatie en enthousiaste medewerking van de dhr. Dorrepaal).

Wel 3 in de waterloop die onder de Provinciale weg (N209) doorgaat is een geschikte locatie voor de pilot 'uithardende gel'. Deze locatie is goed te bereiken en de wel levert een grote bijdrage aan de verzilting.

Het is belangrijk om een uitgebreid monitoringprogramma op te zetten rond de pilots waarbij de stijghoogte, EC-welwater en oppervlaktewater, temperatuurprofielen in en rond de wel en welafvoer worden gemeten. Het is wenselijk om zo spoedig mogelijk met monitoring te beginnen zodat voldoende metingen in de onbeïnvloede situatie worden uitgevoerd en ook de monitoring na weldichting voort te zetten.

#### *Overige kwelreductietechnieken*

##### Peilopzet

Peilopzet draagt alleen significant bij wanneer het peil flink kan worden opgezet zodat het stijghoogteverschil met het eerste watervoerende pakket significant afneemt.

Meestal is dit niet mogelijk in verband met bestaande functies zoals landbouw. Het meest effectief is peilopzet in sloten met veel wellen;

Peilopzet heeft een toename van de kwel in de omgeving tot gevolg, vergelijkbaar met het dichten van wellen. Ter hoogte van het peilopzet neemt het opbarstrisico af.

Het opvangen van het brakke kwelwater op locaties met de grootste verzilting en ontzilten is een effectieve maar dure methode. Een groot voordeel is dat het zoete water

kan worden verkocht voor bijvoorbeeld landbouwdoeleinden waardoor de uiteindelijke kosten lager zijn waardoor de methode als goedkoop kan worden aangemerkt.

Het grootste probleem vormt het restproduct, de brijn. Injectie in het tweede watervoerende pakket is een technische mogelijkheid maar wordt op dit moment als ongewenst beschouwd.

Monobronnering als kwelreductietechniek, d.w.z. onttrekken van grondwater uit het 1<sup>e</sup> watervoerende pakket en herinjecteren in het 2<sup>e</sup> of 3<sup>e</sup> watervoerende pakket, is niet effectief. Om een bepaalde kwelreductie te realiseren dient er ongeveer 10 keer zoveel grondwater te worden onttrokken dan het (k)weldebiet. Herinjectie in diepere lagen van dit water leidt tot een significante toename van de kwel buiten het onttrekkingsgebied (in de kwelgebieden). Alleen in polders die in zijn geheel of voor een groot deel omgeven zijn door infiltratiegebieden of als in alle diepe polders deze techniek wordt toegepast, kan de techniek effectief zijn.

Het opvangen van het brakke kwelwater op locaties met de grootste verzilting en gescheiden afvoeren via persleidingen is een zeer effectieve maatregel met weinig negatieve effecten maar de kosten zijn erg hoog en daardoor niet kansrijk.

# Inhoudsopgave

	<b>Samenvatting.....</b>	<b>3</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding.....</b>	<b>9</b>
1.1	Probleemstelling.....	9
1.2	Doelstelling.....	12
1.3	Plan van aanpak.....	13
<b>2</b>	<b>Veldonderzoek naar wellen.....</b>	<b>17</b>
2.1	Inleiding.....	17
2.2	Beschrijving wellen.....	18
2.3	Veldwerkzaamheden.....	20
2.4	Bespreking resultaten.....	21
<b>3</b>	<b>Modelstudie.....</b>	<b>31</b>
3.1	Inleiding.....	31
3.2	Lokaal grondwatermodel rondom wel.....	32
3.3	Regionaal grondwatermodellering.....	47
3.4	Opbarstingsrisico.....	59
<b>4</b>	<b>Bespreking en discussie kwelreductietechnieken.....</b>	<b>63</b>
4.1	Inleiding.....	63
4.2	Peilopzet.....	63
4.3	Wellen dichten.....	65
4.4	Kwelwater afvangen of oppompen en afvoeren.....	69
4.5	Discussie kwelreductietechnieken.....	74
<b>5</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen.....</b>	<b>77</b>
<b>6</b>	<b>Literatuur.....</b>	<b>81</b>

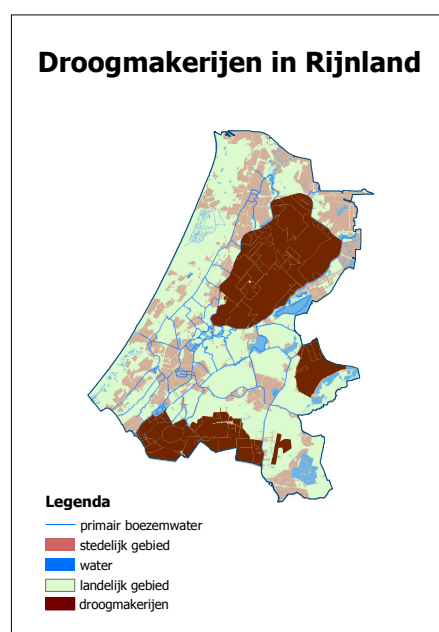




# 1 Inleiding

## 1.1 Probleemstelling

Binnen Rijnland komen diverse droogmakerijen voor (zie figuur 1.1). Tezamen vormen zij één van de grootste bronnen van de chloride-, stikstof- en fosforbelasting van het boezemstelsel. In Polder de Noordplas (één van de droogmakerijen) is gedurende enkele jaren onderzoek uitgevoerd naar de relatie tussen peilbeheer en waterkwaliteit. De uitkomst is dat meer dan 80% van de chloridevracht en 50-75% van de nutriëntenvracht afkomstig is uit kwelwater. Het grootste deel van de kwel wordt veroorzaakt door wellen. De aanwezigheid van wellen is aangetoond in de Haarlemmermeerpolder en enkele droogmakerijen in het zuiden van het beheersgebied, te weten Polder de Noordplas, de Nieuwe Driemanspolder en Polder Middelburg en Tempelpolder. Op basis van de verhouding tussen de lithostatische druk van de deklaag en de kweldruk (het opbarstingsgevaar) zijn ook in de andere droogmakerijen wellen te verwachten, zeker indien de kweldruk de komende decennia verder toeneemt.

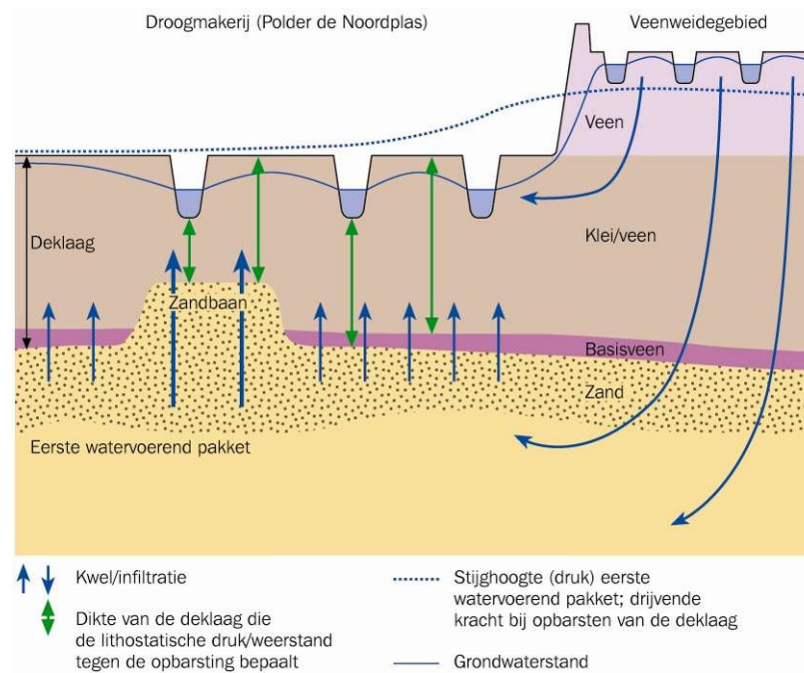


Figuur 1.1 De droogmakerijen van Rijnland.

De grootte van de kwelstroom op locaties met wellen kan behoorlijk variëren. In Polder de Noordplas zijn debieten van 2.000 mm/d vastgesteld (De Louw e.a., 2004). Door deze hoge intensiteit is het zand in suspensie en vormt de wel een min of meer open verbinding met het eerste watervoerende pakket. De wellen zijn niet groot met een oppervlak dat vaak kleiner is dan 1 vierkante meter.

Recentelijk is door TNO de morfologie van wellen in het veld nader onderzocht (figuren 1.3 en 1.4). Daarbij is naar voren gekomen dat een wel vaak bestaat uit meerdere, zeer smalle kanaaltjes (diameter 1-10 cm) die verspreid in de sloot uitkomen. Het afsluiten van één kanaaltje heeft tot gevolg dat het in de andere kanaaltjes zichtbaar harder gaat stromen. De meeste wellen komen voor in het oppervlaktewater, vooral op plaatsen met zandbanen en aan de rand van de polder met de grootste stijghoogtedruk

(Favier e.a., 2006). Op deze locaties is het opbarstingsgevaar van de deklaag het grootst en kunnen gemakkelijk wellen ontstaan (zie figuur 1.2). De kartering van de wellen in 2002 in Polder de Noordplas bevestigt dit beeld (De Louw e.a., 2004). De verhouding tussen de lithostatische druk en de kweldruk geeft de kans op opbarsting van de deklaag weer. Het opbarstingsgevaar is groot wanneer de verhouding kleiner is dan 1,1. Het gewicht van de deklaag bepaalt de lithostatische druk. De kweldruk is het verschil tussen de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket en de hoogte van de onderkant van de deklaag.



Figuur 1.2 Opbarstingsgevaar is het grootst ter plaatse van zandbanen.

In het verleden zijn diverse pogingen ondernomen wellen te dichten. Soms werd getracht de wel te dichten vanaf het maaiveld met bentoniet of ander materiaal. Recent zijn ook methoden toegepast waarbij wellen met een injectietechniek kunnen worden gedicht aan de onderkant van de deklaag. De resultaten van deze pogingen zijn wisselend en mede afhankelijk van de lokale omstandigheden.



Figuur 1.3 Links: zandvulkaan die ontstaat rondom een wel: door de hoge intensiteit van de kwel wordt zand uit het watervoerende pakket naar het oppervlak getransporteerd. Rechts: wellen bevroren door de hoge kwelintensiteit en temperatuur (ongeveer 12 graden) vaak niet dicht.



4A



4B



4C



4D



4E

Figuur 1.4 Foto's van wellen, genomen tijdens het TNO-onderzoek naar wellen (Favier e.a., 2006). 4A: Wel met opborrelend gas. 4B: Grote zandmeevoerende wel, met een zone waar zand in suspensie is (doorsnede = 40 cm). 4C: Zandmeevoerende wel die boven het slootpeil uitkomt en een soort 'puinwaaier' vormt. 4D: Wel met ingezakte slootkant. 4E: Gedraineerde wel: met takkenbossen is een wel in een perceel afgeleid naar de sloot

Naast het dichten van de wel zijn er ook andere methoden om de problemen die samenhangen met de hoge kwelbelasting uit wellen te bestrijden. Te denken valt bijvoorbeeld aan monobronnen, waarbij het zoute kwelwater wordt onttrokken voor het door de deklaag omhoog kwelt en vervolgens wordt geïnfiltreerd in een laag waar het water oorspronkelijk vandaan komt. Een andere mogelijkheid betreft het opvangen (of oppompen) van het kwelwater en het vervolgens afvoeren via een apart stelsel van waterlopen en/of persleidingen, zodat polder- en boezemwateren niet worden belast. Daarnaast is peilopzet een mogelijkheid om het kweldebiet terug te dringen. Deze optie is tot in detail onderzocht voor Polder de Noordplas. Tevens zijn de kosten en baten van deze optie nauwkeurig in beeld gebracht door middel van een MKBA.

## 1.2 Doelstelling

De komende jaren brengt Rijnland verschillende beleidsopties met betrekking tot watervoorziening (met name verziltingsbestrijding en eutrofiëringsproblematiek) in beeld. De opties lopen uiteen van heroverweging van het huidige inlaat/doorspoelbeleid, het accepteren van optredende verzilting tot aan actieve bestrijding van bronnen. Hiertoe zijn verschillende technieken beschikbaar, waarvan de efficiëntie en de effecten nog onduidelijk zijn.

Het Hoogheemraadschap heeft TNO opdracht gegeven een Achtergrondstudie Kwelreductie uit te voeren waarin een aantal technieken voor kwelreductie in beeld worden gebracht, met speciale aandacht voor welreductie.

De doelstelling van het onderzoek is het in beeld brengen van de (globale) effecten van diverse methoden om kwel te reduceren. Hierbij worden de volgende methoden behandeld:

- Dichten wellen met bentoniet, uithardende injectievloeistoffen of biosealing;
- Opvangen of oppompen en herinjecteren diepere lagen (monobronnering) of gescheiden afvoeren of ontzilten;
- Peilopzet.

De inschatting van de (globale) effecten worden uitgesplitst naar de volgende locaties (zie ook figuur 1):

- Haarlemmermeerpolder (grootste en meest noordelijke droogmakerij).
- Polder Nieuwkoop (meest oostelijke droogmakerij).
- Polder de Noordplas (centraal in cluster van zuidelijke droogmakerijen).

Het onderzoek levert antwoord op de volgende vragen:

- Wat zijn de (globale) lokale en regionale effecten van de beschouwde methoden op:
  - de kwelstroom;
  - de freatische grondwaterstand;
  - de stijghoogten in diepere pakketten;
  - het opbarstingsgevaar (inclusief de kans op 'migratie' van wellen);
  - de waterkwaliteit van de kwel (gerelateerd aan 'opkegeling')?
- Wat zijn de globale kosten van de beschouwde methoden?
- Wat is de duurzaamheid van beschouwde methoden?
- Wat zijn de milieuhygiënische effecten van de beschouwde methoden?
- Wat is de invloed van de opbouw van de deklaag (wel of geen oude geulafzettingen) op de toepasbaarheid van de beschouwde methoden?

Naar aanleiding van recent onderzoek is in het waterbeheersplan van Rijnland opgenomen dat in de periode 2007-2009 een pilot welreductie wordt uitgevoerd. De bevindingen uit deze achtergrondstudie worden onder andere gebruikt om een nadere invulling te geven aan het beleid met betrekking tot de watervoorziening en de pilot welreductie.

### 1.3 Plan van aanpak

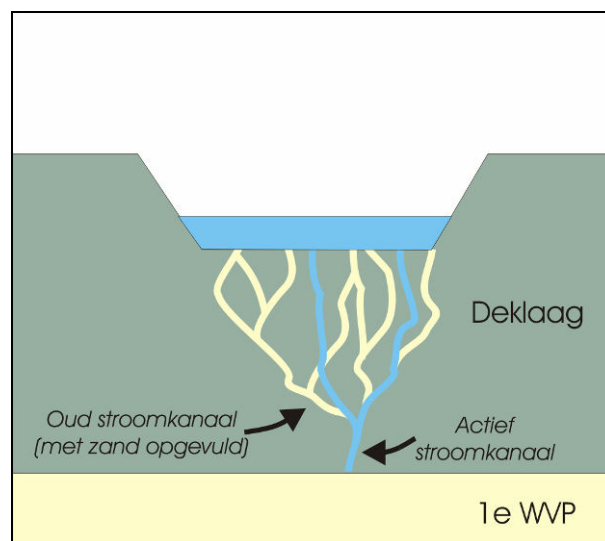
Om de onderzoeksvragen te kunnen beantwoorden, zijn de volgende werkzaamheden uitgevoerd:

- Onderdeel 1: Veldonderzoek wellen
- Onderdeel 2: Geohydrologische modelberekeningen
- Onderdeel 3: Geotechnische analyse
- Onderdeel 4: Inventarisatie kwelreductietechnieken
- Onderdeel 5: Synthese kwelreductietechnieken en effecten

#### 1.3.1 Onderdeel 1: Veldonderzoek wellen

Het belangrijkste onderdeel van deze achtergrondstudie zijn de geohydrologische modelberekeningen waarmee de effecten van de verschillende methodieken in beeld worden gebracht. Echter, voor een goede modellering van wellen is het essentieel de werking, morfologie en eigenschappen van een wel goed in beeld te hebben (figuur 1.5).

TNO heeft eerder veldonderzoek gedaan naar wellen waarbij o.a. een genuanceerd beeld is ontstaan over de werking van wellen. In de onderstaande figuur 1.5 staat weergegeven dat een wel niet uit 1 groot uitstroomkanaal maar juist uit verschillende kleinere uitstroomkanaaltjes bestaat waardoor het water omhoog komt. Intensiteiten in deze kleine stroomkanaaltjes kunnen oplopen tot 800.000 mm/dag (zie tabel 1.1). Deze informatie is niet alleen essentieel voor de geohydrologische modellering maar ook voor de beoordeling van de effectiviteit van de reductietechniek.



Figuur 1.5: Conceptueel model van een zandmeevoerende wel.

Tabel 1.1 Debiet en kwelintensiteit (alleen over het oppervlak van het uitstroomkanaal) van verschillende uitstroomkanalen van 9 wellen in de Polder de Noordplas en Polder de Zuidplas (Bron: TNO-onderzoek naar wellen, Favier e.a., 2006).

Wel nr	Uitstroom kanaal nr	Grootte	Diameter stroomkanaal [m]	Debiet [m3/dag]	Kwelintensiteit [mm/dag]
1	A	Zeer groot	0,04	3,9	776.000
	B	Zeer groot	0,06	7,8	690.000
	C	Middelgroot	0,05	2,2	280.000
	D	Klein	0,05	0,6	76.000
	E	Klein	0,04	1,3	259.000
2	A	Zeer groot	0,05	5,6	713.000
	B	Groot	0,04	3,6	717.000
3		Groot	0,07	4,5	292.000
4		Groot	0,03	1,6	566.000
5		Groot	<i>Onbekend</i>	2,1	<i>Onbekend</i>
6		Middelgroot	0,05	2,6	331.000
7		Middelgroot	<i>Onbekend</i>	0,3	<i>Onbekend</i>
8		Klein	0,04	0,9	179.000
9		Klein	<i>Onbekend</i>	0,2	<i>Onbekend</i>

Ten behoeve van de Achtergrondstudie kweldreductietechnieken is een uitgebreid veldonderzoek uitgevoerd op een locatie in Polder de Noordplas en op een locatie in de Haarlemmermeerpolder. Het veldonderzoek bestond uit de volgende onderdelen:

- Met T-EC prikstok is de EC (Elektrische Geleidbaarheid) en T (Temperatuur) in en rondom de wel nauwkeurig gekarteerd. De prikstok wordt in de bodem gedrukt waarna op elke gewenste diepte een meting van de temperatuur en EC kan worden gedaan. Deze beide parameters geven namelijk veel informatie over de werkelijke vorm van de wel (morfologie) in de deklaag en de stromingspatronen door de deklaag.
- De bodemopbouw in en rond de wel is in kaart gebracht;
- In een raai loodrecht op de wel is de stijghoogte (kweldruk) gemeten;
- De chloride concentratie en macro-ionen van het welwater en het grondwater in het eerste watervoerende pakket (zelfde raai als stijghoogte) is bepaald;
- Indien mogelijk zijn afvoeren van de wel gemeten.



Figuur 1.6 Foto's: EC-T prikstokmetingen (in de sloot en in het perceel)

Het veldwerk is in de zomer en najaar van 2006 uitgevoerd..

### 1.3.2 Onderdeel 2: Geohydrologische modelberekeningen

Om de effecten in beeld te brengen zijn geohydrologische modelberekeningen uitgevoerd met een grondwatermodel, waarbij expliciet aandacht wordt geschonken aan het vóórkomen van zandbanen en wellen. De modellering is op twee schaalniveau's uitgevoerd:

1. Lokaal schaalniveau rondom één wel;
2. Regionaal schaalniveau voor Polder de Noordplas en de provincie Zuid-Holland.

#### Ad 1. Lokaal model rondom één wel

Voor de volgende drie gemiddelde geohydrologische situaties is een lokaal grondwatermodel opgesteld (in Modflow) waarin de werking van één wel wordt gesimuleerd:

- Situatie 1: Polder Noordplas/Haarlemmermeer zonder zandbaan;
- Situatie 2: Polder Noordplas/Haarlemmermeer met zandbaan;
- Situatie 3: Polder Nieuwkoop zonder zandbaan.

De grondwatermodellen in Modflow zijn omgezet naar invoer voor het dichtheidsgedreven grondwaterstromingsmodel MOCDENS3D. Met dit model kan transport van zoet, brak en zout grondwater worden doorgerekend.

Dit lokale model geeft inzicht in het effect van een wel op de stijghoogte (kweldruk), de kwelintensiteit, de grondwaterstand, de zoutbelasting en zoutverdeling van de ondergrond.

Er is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd zodat inzicht ontstaat welke invloed bepaalde parameters (kd, weerstand, kweldruk, welafvoer) hebben op de werking van de wel.

Met het grondwatermodel zijn de verschillende kwelreductietechnieken doorgerekend. Hierdoor ontstaat inzicht in de effectiviteit van de verschillende kwelreductietechnieken en de geohydrologische consequenties.

De volgende effecten van de verschillende methoden zijn berekend (met het grondwatermodel of als nabewerking):

- Kwel;
- freatische grondwaterstand;
- stijghoogte diepere pakketten;
- opbarstingsgevaar (op basis van grondmechanische berekening) en daarmee de kans op migratie van wellen;
- chloridebelasting van het oppervlaktewater;
- verdeling van chloride concentratie van het grondwater (in profiel op verschillende dieptes);
- opkegeling van dieper grondwater (hoeveel, van welke diepten).

Het effect van de verschillende methoden is naast figuren, ook in beeld gebracht met filmpjes waarin de verandering van de chlorideconcentratie in de tijd als gevolg van de maatregel duidelijk wordt (zie bijgevoegde cd-rom).

#### Ad 2. Regionaal Grondwatermodel

Met het bestaande Noordplas-model (eerder gebruikt voor modellering van de Zuidplaspolder) is op regionaal schaalniveau doorgerekend wat het regionaal effect van het dichten van wellen is op de stijghoogte (kweldruk en indirect op opbarstingsgevaar) en de kwel in de polder en de omgeving van de polder.

Met het bestaand grondwatermodel van de provincie Zuid-Holland (inclusief Haarlemmermeerpolder) zijn de regionale effecten doorgerekend van monobronnering.

#### *1.3.3 Onderdeel 3: Geotechnische analyse*

Voor de drie geohydrologische situaties die met het lokale model zijn doorgerekend, is middels een eenvoudig geotechnisch model het opbarstingsgevaar berekend. Het effect van de verschillende kwelreductietechnieken op het opbarstingsgevaar is hiermee in beeld gebracht. Zo wordt onder andere duidelijk of bijvoorbeeld het dichten van wellen leidt tot een groter opbarstingsgevaar in de omgeving en daardoor tot migratie van wellen.

#### *1.3.4 Onderdeel 4: Inventarisatie kwelreductietechnieken*

Er is een inventarisatie verricht naar verschillende technieken voor het reduceren van kwel. Speciale aandacht gaat daarbij uit naar het dichten van wellen.

De inventarisatie is uitgevoerd op basis van beschikbare literatuur en informatie en interviews met personen van bedrijven, waterschappen of instituten die op de een of andere manier met kwelreductie te maken hebben (gehad). Tijdens het interview is o.a. gevraagd naar de volgende eigenschappen van de kwelreductietechnieken: de methodiek, praktische uitvoerbaarheid, ervaringen met de techniek, kosten, effectiviteit en neven- en milieuhygiënische effecten.

#### *1.3.5 Onderdeel 5: Synthese kwelreductietechnieken en effecten*

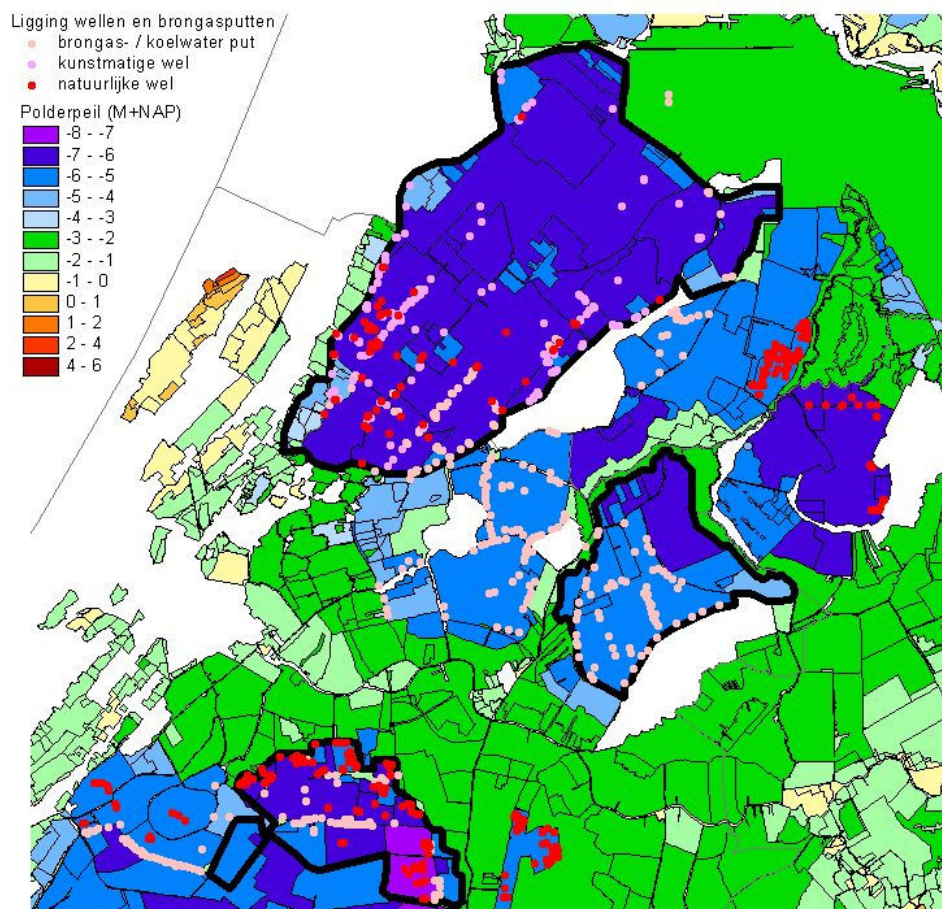
Een synthese van de kwelreductietechnieken en effecten is gemaakt op basis van het veldonderzoek naar wellen, de geohydrologische berekeningen, de opbarstingsberekeningen en de inventarisatie van de verschillende kwelreductietechnieken. De verschillende kwelreductietechnieken worden onderling met elkaar vergeleken.



## 2 Veldonderzoek naar wellen

### 2.1 Inleiding

In de maanden oktober tot en met december van 2006 is een veldonderzoek verricht rond een aantal wellen in Noord- en Zuid-Holland. Het veldonderzoek geeft meer inzicht in de werking, morfologie en eigenschappen van een wel. Dit helpt ons de problematiek rond wellen in diepe polders efficiënter aan te pakken.



Figuur 2.1 De ligging van (oude) brongasputten en wellen in de drie polders gebaseerd op literatuur, interviews waterschappen en veldbezoek. De informatie geeft geen volledig beeld.

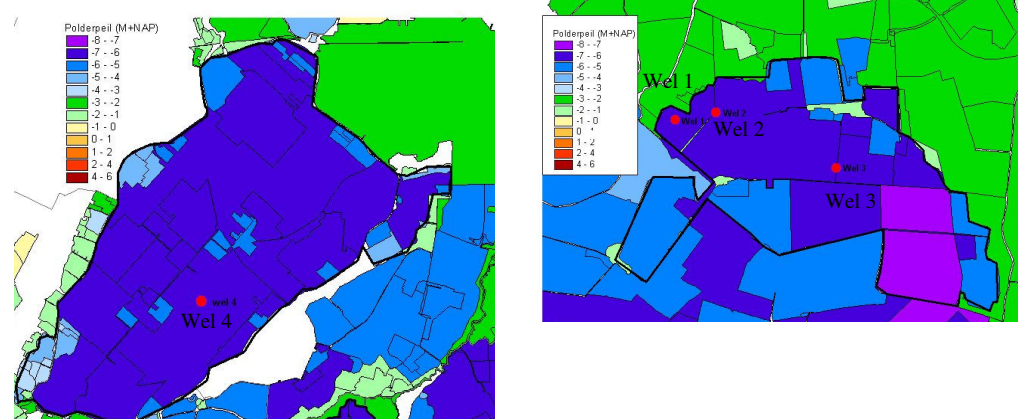
Op basis van interviews met boeren en waterschappen, veelal oude literatuur en veldbezoeken is een kaart samengesteld met de ligging van wellen en gasbronnen (figuur 2.1). De informatie is zeer onvolledig van aard en de kaart geeft dan ook een onvolledig beeld. Maar het geeft wel aan dat er veel wellen voorkomen in de diepe polders, veelal aan de rand van de polders.

De achtergrondstudie richt zich met name op drie gebieden: Polder de Noordplas, de Haarlemmermeerpolder en Polder Nieuwkoop. Het was de bedoeling om in elke polder één wel nader te onderzoeken. Helaas is de wel in polder Nieuwkoop afgefallen omdat door de eigenaren van de betreffende percelen geen toestemming verleend werd om te meten. Dit in verband met mogelijk gevaar op het creëren van nieuwe

uitstroomopeningen in de wel. In plaats daarvan zijn aanvullend met de prikstok nog 2 wellen in Polder de Noordplas in kaart gebracht. De vier onderzochte wellen liggen allemaal in een sloot.

In figuur 2.2 staan de locaties weergegeven van de vier in het veld onderzochte wellen.

- Wel 1: Noordplas, peilvak 25V: perceel Dhr. Dorrepaal
- Wel 2: Noordplas, peilvak 25V
- Wel 3: Noordplas, peilvak 25B, nabij meetpunt 6 (Noordplas-studie)
- Wel 4: Haarlemmermeerpolder



Figuur 2.2 De locaties van de vier onderzochte wellen

## 2.2 Beschrijving wellen

### Polder de Noordplas

Twee van de drie wellen zijn direct te herkennen aan de uitgezakte slootkant (wel 1 en 2). Als gevolg van het opwellende water verliest de grond zijn draagkracht, worden de slootkanten onstabiel en zakken ze uit.

Bij wel 1 in de Noordplaspolder waren enkele uitstroomopeningen zichtbaar. In de zijkant van de sloot trad het kwelwater zichtbaar uit. In de sloot zijn af en toe gasbellen zichtbaar waarbij zand mee naar boven komt. Door een prikstokmeting in de wel (sloot) is een extra uitstroomopening gecreëerd met een hoge afvoer waardoor veel zand in de sloot werd afgezet (zie onderstaande foto). Hierna is besloten om de prikstokmetingen niet meer tot 4 meter diepte uit te voeren maar tot een diepte van maximaal 2 meter om het risico op het ontstaan van nieuwe uitstroomopeningen te voorkomen.

Bij de wellen 2 en 3 in Polder de Noordplas was geen stroming waarneembaar.



Foto's: Wel 1 in Polder de Noordplas. De zandophoping in de sloot is ontstaan na het uitvoeren van een prikstokmeting waardoor een nieuwe uitstroomgat van de wel is ontstaan

### Haarlemmermeerpolder

In tegenstelling tot de Noordplaspolder is ter plaatse van de wel in de Haarlemmermeerpolder geen echte deklaag aanwezig. De wel ligt in een oude zandige getijdegeul die de Haarlemmermeerpolder doorsnijdt. In deze getijdegeul is tot op zo'n 30 meter diepte nauwelijks klei of veen aanwezig waardoor nauwelijks weerstand aanwezig is tussen het eerste watervoerende pakket en het oppervlak waardoor hoge kwelintensiteiten kunnen worden verwacht. Gesprekken met landbouwers in dit gebied doen ook vermoeden dat in de zandbaan een sterke kwel plaatsvindt. De drains lopen het hele jaar door, er is zeer veel neergeslagen ijzer aanwezig in drain- en oppervlaktewater en de chlorideconcentraties van het water zijn hoog.

De locatie van de uitstroomgaten verschilt bij deze wel in de Haarlemmermeerpolder per dag, in tegenstelling tot de wellen in Polder de Noordplas. Bovendien kent deze wel in tegenstelling tot de andere wellen soms meer dan tien uitstroomgaten, voornamelijk in de sloot. Deze wel heeft hiermee een grotere dynamiek dan de andere wellen.



Foto's: Wel 4 in de Haarlemmermeerpolder.

### Polder Nieuwkoop

Aan de oostrand van Polder Nieuwkoop, grenzend aan de hogergelegen Nieuwkoopse Plassen zijn veel wellen aanwezig. De wellen zijn zoet te noemen met EC-waarden kleiner dan 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . In de sloot zijn duidelijke uitstroomopeningen te zien waar af en toe gas omhoog borrelt.



Foto's: Wel in de Polder Nieuwkoop. Rechts zijn twee uitstroomopeningen te zien.

De deklaag is met 5 meter dun te noemen. De kweldruk is met 0.5-0.9m (stijghoogteverschil) echter veel kleiner dan in Polder de Noordplas en de Haarlemmermeerpolder (1.5m tot 3.5m).

Helaas is er geen toestemming gegeven voor het uitvoeren van metingen in Polder de Nieuwkoop.

### 2.3 Veldwerkzaamheden

Twee wellen (wel 1 en 4, zie figuur 2.2) zijn in detail onderzocht waar de volgende metingen zijn uitgevoerd:

- 1 Plaatsen peilbuizen eerste watervoerend pakket loodrecht op wel;
- 2 Stijghoogtemetingen in peilbuizen;
- 3 Analyse grondwatermonsters peilbuizen en welwater;
- 4 Prikstokmetingen (diepteprofiel EC en Temperatuur) in en rond de wel;
- 5 Afvoermetingen wel (indien mogelijk);

Voor wellen 2 en 3 zijn alleen prikstokmetingen uitgevoerd.

Ad 1. Om een idee te krijgen van hoe de stijghoogte beïnvloed wordt door het omhoog stromende water in de wel, zijn peilbuizen geplaatst in het eerste watervoerende pakket. Deze buizen zijn geplaatst in de slootkant op afstanden van 0 tot 75 meter van de wel. Bij de wel in de Noordplaspolder is het filter van de peilbuis net onder de deklaag in het eerste watervoerende pakket geplaatst op een diepte van 7 meter beneden maaiveld. Bij wel 4 in de Haarlemmermeerpolder zijn de peilbuizen met filterlengte van 0,5 meter geplaatst op een diepte van ongeveer 3 meter onder slootpeil omdat door het zandige materiaal niet dieper kon worden geboord. Door het ontbreken van een weerstands biedende deklaag bij wel 4, wordt verondersteld dat de stijghoogte op drie meter diepte overeenkomt met de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket. Bij het plaatsen van de meetpunten is een boorbeschrijving gemaakt.

Ad 2. De peilbuizen, het maaiveld en het waterpeil zijn ten opzichte van elkaar ingemeten. In de peilbuizen zijn op twee verschillende momenten stijghoogtemetingen uitgevoerd.

Ad 3. Het grondwater in de peilbuizen is bemonsterd. In het veld is de pH, de EC en het bicarbonaat bepaald en in het lab zijn de monsters vervolgens geanalyseerd op macro-ionen. Er is ook een monster genomen van het uitstromend welwater. Ook zijn monsters genomen van oppervlaktewater stroomopwaarts en stroomafwaarts van de wel. Dit om vast te kunnen stellen of de wel daadwerkelijk bijdraagt aan de verzilting van het oppervlaktewatersysteem.

Ad 4. Met de prikstok zijn diepteprofielen gemaakt van de elektrische geleiding (EC) en temperatuur van de bodem. Beide kunnen informatie geven over stroming van het grondwater die naar verwachting sterk afwijkt in de wellen. Bij de EC-metingen dient te worden opgemerkt dat dit het gezamenlijke geleidingsvermogen is van het water en de bodem omdat wordt gemeten over een traject van ongeveer 10cm. De gemeten waarden dienen dus nog te worden gecorrigeerd voor de zogenaamde formatieconstante. Deze kan variëren van 1-2 (veen), 2 (klei), 3 (zavel) tot 4-5 (zand). Tevens dient te worden gecorrigeerd voor de celconstante van de prikstok. Om te komen tot de EC van het grondwater wordt de volgende formule gebruikt:

$$EC_{\text{water}} = EC_{\text{prikstokmeting}} * C_{\text{formatie}} * C_{\text{celconstante}}$$

$C_{\text{formatie}}$  = formatiefactor (1-5)

$C_{\text{celconstante}}$  = celconstante (0.4-0.5)

De prikstokmetingen zijn echter niet gecorrigeerd omdat de lokale geologische opbouw in en rond de wel ruimtelijk zo sterk varieert dat het vinden van de juiste formatieconstante per prikstokmeting niet mogelijk is. Hiermee dient bij de interpretatie van de EC-prikstokmetingen rekening te worden gehouden.

Met de prikstok is rond alle vier de wellen zeer gedetailleerd gemeten (over traject van 8 tot 15 meter). Meestal gebeurde dit in drie meetraaien in de lengterichting van de wel, in de sloot of net op de slootkant. De afstand tussen de raaien onderling lag altijd rond één meter en binnen de raaien werd om de halve meter een prikstokmeting uitgevoerd. De diepte van de metingen varieerde van een halve meter tot bijna 4 meter; deze is vooral afhankelijk van de weerstand die de grond biedt tegen het prikken. Om een vergelijking te kunnen maken tussen de situatie in de wel en buiten de wel (tot afstand van 150 meter) zijn ook op grotere afstanden van de wel prikstokmetingen uitgevoerd (onderlinge afstand 25m).

Ad 6. Voor twee uitstroomopeningen in wel 1 was het mogelijk om de intensiteit te meten door het uitstromende water op te vangen in een maatbeker. Ook kon een meting worden uitgevoerd van de uitstroomopening van de nieuw ontstane uitstroomopening omdat deze boven slootpeil uitstak. De overige uitstroomgaten (bij wellen 1 t/m 4) lagen onder water waardoor een meting niet mogelijk was.

## 2.4 Bespreking resultaten

### 2.4.1 Wel 1: Polder de Noordplas

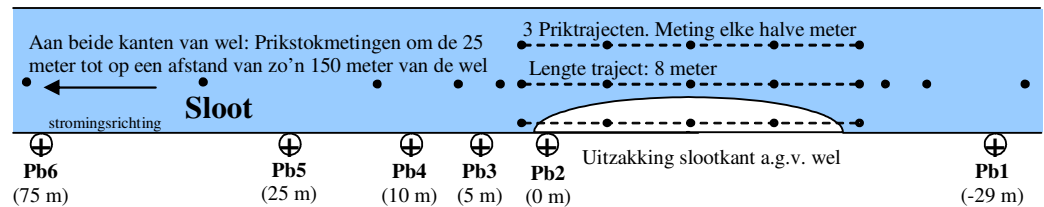
#### Bodemopbouw

Tijdens het plaatsen van de peilbuizen viel op dat de bodemopbouw rond de wel vrij sterk verschilt. In de wel zelf (Pb2) bestaat de deklaag uit zandige klei met rietresten. De grond is daar slap en weinig draagkrachtig. Dit is ook het geval bij Pb3, 5 meter oostelijk van de wel die een zelfde bodemopbouw laat zien als Pb2. Het meest afwijkende bodemprofiel wordt gevonden bij peilbuis 1. Hier is de deklaag over de hele diepte sterk zandig en vanaf zo'n 3 meter onder maaiveld zeer slap. Het plaatsen van de peilbuis was hier moeilijk vanwege het instorten van het boorgat bij het verwijderen van de boor uit het gat

Ter plaatse van de peilbuizen op 10, 25 en 75 meter is de bodem minder zandig en steviger. Op een diepte van ongeveer 6.5 meter onder maaiveld wordt de bodem plotseling sterk zandig. Er is verondersteld dat we hier te maken hebben met zand uit het eerste watervoerende pakket. Het blijft echter vreemd dat er geen basisveen is aangetroffen. Dit komt in vrijwel de gehele polder voor behalve ter hoogte van zandbanen waar het basisveen is weggeërodeerd.

Ter hoogte van de wel hebben we in ieder geval te maken met een oude stroomgeul die ook in het landschap te vervolgen is. De slappe klei en het zandige karakter van de boringen Pb1, Pb2 en Pb3 geven hier ook aanwijzingen voor. Het is onduidelijk of deze oude stroomgeul ook ter hoogte van Pb4, Pb5 en Pb6 voorkomt. Het niet aantreffen van het basisveen en het grote verschil met de gemiddelde opbouw van de deklaag doen dit echter wel vermoeden. Ter vergelijking wordt het bodemprofiel van meetpunt 13 uit het

Noordplas-onderzoek (De Louw e.a., 2004) op ongeveer 500 meter van de wellocatie gegeven. Tot op 4 meter diepte wordt hier zavelige klei aangetroffen, daaronder 3 meter kleilig veen en daaronder ongeveer 70 centimeter basisveen. Het eerste watervoerende pakket wordt op 7.60m onder maaiveld aangetroffen.



Figuur 2.3 Ligging wel, peilbuizen en prikstokmetingen voor Wel 1

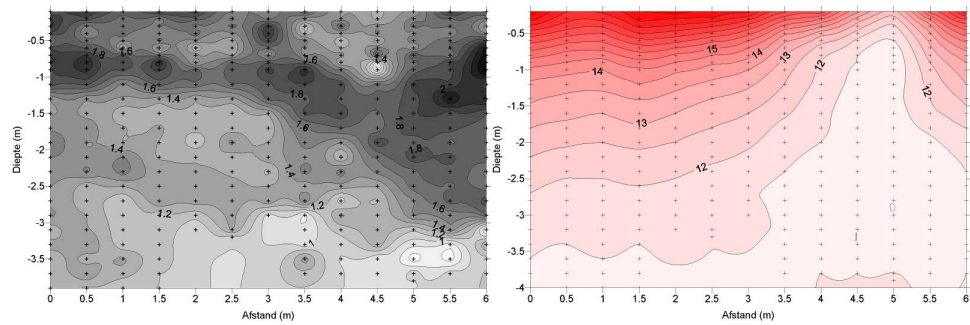
### EC- en T-profielen

De gemeten temperatuur en EC zijn geïnterpoleerd en in twee profielen weergegeven: een gedetailleerd profiel (in de sloot parallel aan de sloot) ter hoogte van de wel over een afstand van 6 meter (traject over uitzakking) en een profiel over een veel grotere afstand (ongeveer 200m) (figuur 2.4 en 2.5).

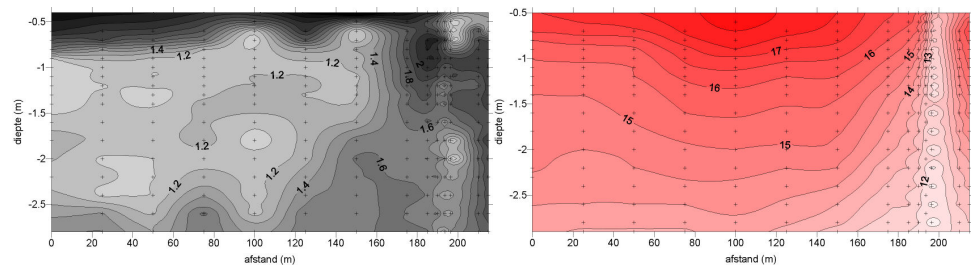
Een verstoring van het temperatuurprofiel is in beide profielen duidelijk te zien ter hoogte van de uitstroomgaten van de wel. De verstoring wordt veroorzaakt door de grote grondwaterflux in de wel richting sloot. Het grondwater stroomt zo snel naar boven dat de atmosferische temperatuur nauwelijks invloed heeft op de temperatuur van het kwellende grondwater in de wel (zie ook figuur 2.6). Bij het proces diffuse kwel, dat in de rest van het profiel optreedt, is de invloed van de atmosferische temperatuur duidelijk te zien. Deze neemt uiteraard met de diepte af. De prikstokmetingen zijn aan het eind van de zomer, op 14 en 15 september uitgevoerd.

Opmerkelijk is dat op grote afstand van de wel de temperatuur verstoord lijkt door het kwelproces in de wel. Op 80 meter afstand is nog een lichte verstoring te zien. De afstand is te groot om dit puur alleen via warmtetransport te verklaren. Een andere verklaring zou kunnen zijn dat over een breed front, grondwater met groter intensiteit door de deklaag stroomt als gevolg van de aanwezigheid van de zandbaan (lagere weerstand). De gedetailleerde metingen in en rond de wel doen vermoeden dat de basis van de wel waar het grondwater met grote snelheid stroomt op 4 meter diepte ongeveer 3 meter breed is. Mogelijk ontspringen vanuit deze bredere basis op ongeveer 2 meter diepte de verschillende uitstroomgaten met een veel smallere diameter die aan het maaiveld te zien zijn.

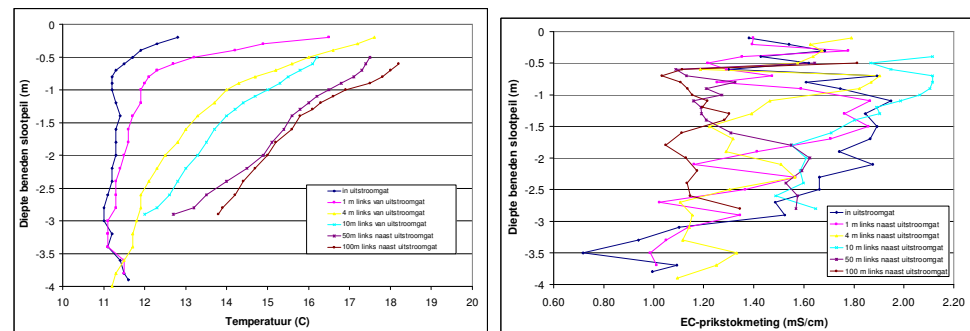
In het regionale profiel is duidelijk te zien dat de EC in een zone van ongeveer 80 meter breed ter hoogte van de wel significant hoger ligt dan op grotere afstand van de wel. Dit kan ook weer duiden op de aanwezigheid van de zandbaan. In de wel zelf worden iets lagere EC's gemeten. Dit wordt vermoedelijk veroorzaakt door de grotere hoeveelheid zand in de wel. Zand heeft een lage geleidbaarheid, de EC-metingen zijn namelijk een combinatie van de EC van het water en de formatie.



Figuur 2.4 Lokaal EC- en temperatuurprofiel in en rondom wel 1 (de kruisjes geven de locatie van een meting weer, metingen op 14 en 15 september 2006).



Figuur 2.5 Regionaal EC- en temperatuurprofiel in sloot van wel 1, ter hoogte van de 200m is de wel zichtbaar (de kruisjes geven de locatie van een meting weer, metingen op 14 en 15 september 2006.)

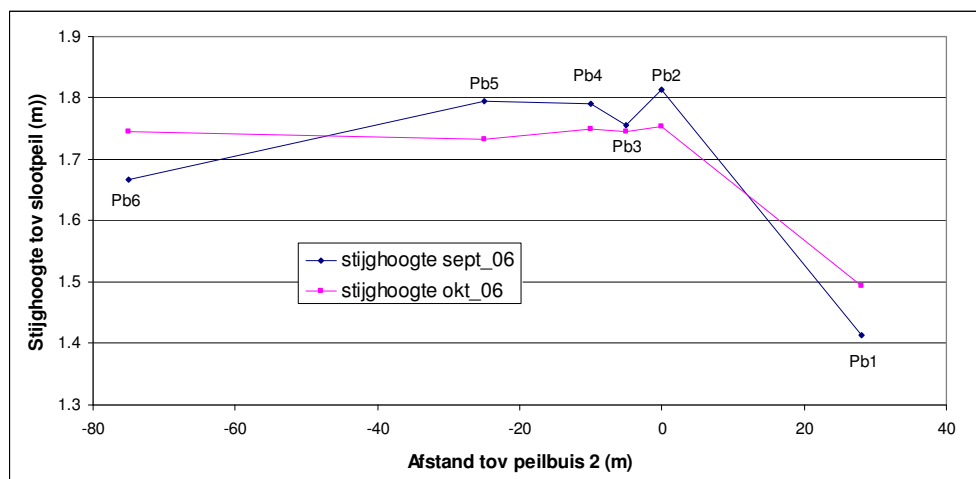


Figuur 2.6 Diepteprofielen voor temperatuur en EC-prikstok voor 6 locaties in de sloot

### Stijghoogte eerste watervoerend pakket

Op twee momenten is in de peilbuizen de stijghoogte gemeten. In figuur 2.7 is het resultaat hiervan te zien. Op de x-as van de figuur staat de afstand aangegeven ten opzichte van peilbuis 2 die in de wel geplaatst is.

Direct valt op dat in de wel de grootste stijghoogte wordt gemeten terwijl hier juist door de sterke opwaartse stroming een lagere stijghoogte wordt verwacht. De metingen ondersteunen deze gedachtegang dus niet. Een mogelijke verklaring voor deze metingen zou de invloed van de zandbaan kunnen zijn. Ter hoogte van de zandbaan is de weerstand grotendeels verdwenen waardoor de stijghoogte tot hoog in het bodemprofiel kan doordringen. Dit is bijvoorbeeld goed te zien aan de modelresultaten van de situatie met zandbaan (zie figuur 3.3). Dit zou dan voor de peilbuizen 2,3,4 en 5 gelden. Voor peilbuis 6 en 1 zou dan gelden dat de peilbuizen niet helemaal in het eerste watervoerende pakket staan en dat er nog enige weerstand aanwezig is tussen het filter en het eerste watervoerende pakket. Echter, tijdens beide meetmomenten is de stijghoogte in de eerste peilbuis duidelijk het laagst terwijl deze het meest zandige profiel liet zien.



Figuur 2.7 De gemeten stijghoogte van het eerste watervoerende pakket op verschillende afstanden van de wel

### Chloridegehalte grond- en oppervlaktewater

In de onderstaande tabel staan de analysesresultaten van het grond- oppervlakte- en welwater weergegeven. In figuur 2.8 staan de chloridegehalten in een profiel weergegeven.

Duidelijk is te zien dat het chloridegehalte van het grondwater uit het eerste watervoerende pakket in en rond de wel hoger is dan op grotere afstand van de wel. De wel trekt als het ware dieper en brakker grondwater aan ('upconingseffect').

Opmerkelijk is dat het welwater (bemonsterd boven het slootpeil op ongeveer 5 meter afstand van Pb2) zelfs nog een veel hogere chlorideconcentratie bevat dan het bemonsterde grondwater uit het eerste watervoerende pakket. Het 'upconingseffect' lijkt daarmee een heel lokaal fenomeen te zijn.

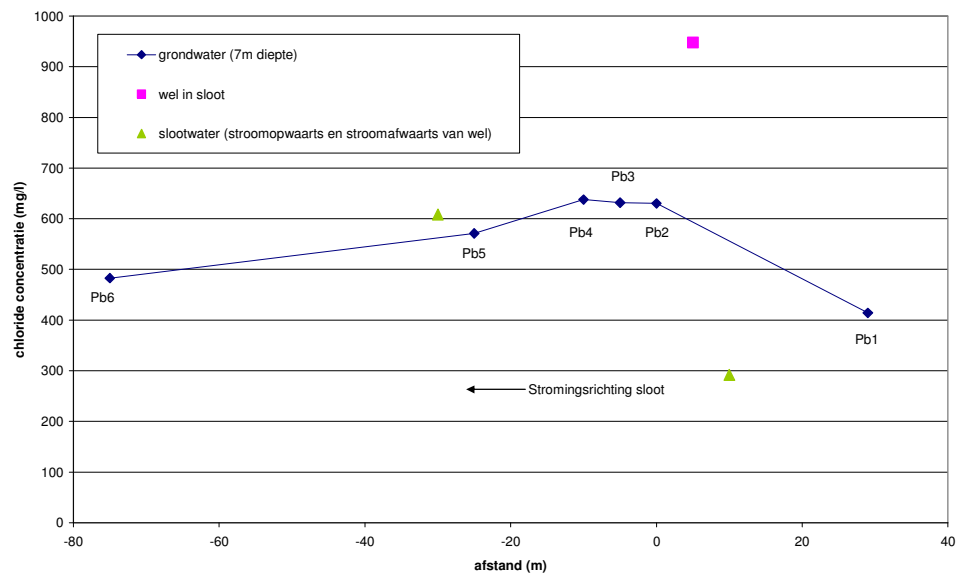
Ter vergelijking: Tijdens de Noordplasstudie is in het eerste watervoerende pakket op 500 meter afstand van de wel (meetpunt 13) een chloridegehalte gemeten van gemiddeld 250 mg/l.

Het slootwater wordt duidelijk beïnvloed door de wel. Stroomopwaarts van de wel bevat het slootwater ongeveer 300 mg/l chloride en stroomafwaarts van de wel is deze twee keer zo hoog geworden (600 mg/l).

Tabel 2.1 De analysesresultaten van grond- oppervlakte- en welwater

	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mS/cm)
	Cl	Br	SO4	HCO3	Na	Mg	K	Ca	Fe	P	pH	EC
pb1	414	1.6	< 0.12	1258	276	78	37	123	8	1.9	6.86	3.03
pb2	630	2.5	< 0.12	1311	386	74	33	135	21	2.0	6.77	3.72
pb3	632	2.5	< 0.12	1290	363	74	35	135	19	1.6	6.74	3.7
pb4	638	2.3	< 0.12	1294	367	75	34	136	19	1.5	6.67	3.71
pb5	571	2.2	< 0.12	1286	371	86	41	147	29	3.0	6.66	3.53
pb6	483	1.8	< 0.12	1238	265	77	35	118	4	4.1	6.52	3.17
plasje op uitzakking	509	2.2	108	1084	302	64	32	118	7	0.3	7.03	3.26
wel in sloot	948	3.6	< 0.12	1176	439	84	40	176	3	0.2	6.67	4.44
sloot 1 (na wel)	608	2.3	236	843	234	53	20	180	3	0.0	7.08	2.96
sloot 2 (voor wel)	292	1.0	416	608	140	44	13	219	3	0.9	7.23	2.11





Figuur 2.8 De chlorideconcentratie van het grond- oppervlaktewater en welwater in een profiel

### Welintensiteit

Voor 2 uitstroomgaten op de slootuitzakking zijn 2 afvoermetingen uitgevoerd. De gemiddelde intensiteit van deze twee uitstroomgaten is  $6.6 \text{ m}^3/\text{dag}$  (zie tabel 2.2). De wel telde op het moment van meten twee zichtbare uitstroomgaten op de slootuitzakking. In de sloot werd regelmatig opborrelend methaangas waargenomen waar zand werd meegevoerd. Deze slecht zichtbare uitstroomgaten konden niet worden bemeten. De  $6.6 \text{ m}^3/\text{dag}$  is dus een onderschatting van het totale weldebiet.

Tabel 2.2 De gemeten afvoeren in twee uitstroomgaten van wel 1

		Intensiteit ( $\text{m}^3/\text{dag}$ )	Gemiddelde ( $\text{m}^3/\text{dag}$ )
<b>Uitstroomgat 1</b>	Meting 1	4,5	4,7
	Meting 2	4,9	
<b>Uitstroomgat 2</b>	Meting 1	2,0	1,9
	Meting 2	1,9	
		<b>Totaal:</b>	<b>6,6</b>

Door een prikstokmeting is een nieuw groot uitstroomgat ontstaan in de sloot. Ook hiervan is de intensiteit gemeten volgens bovenstaande methode. Dit was mogelijk omdat door het meevoeren van een grote hoeveelheid zand, het uitstroomgat boven het slootpeil uit kwam. De afvoer die in dit uitstroomgat werd gemeten, bedroeg  $15,2 \text{ m}^3/\text{dag}$ .

Door het ontstaan van dit nieuwe uitstroomgat is gat 2 gestopt met lopen. In gat 1 was slechts nog een kleine stroming zichtbaar. Dit doet vermoeden dat de uitstroomgaten met elkaar in verbinding staan zoals ook al eerder aangetoond in het onderzoek van Favier e.a. (2006).

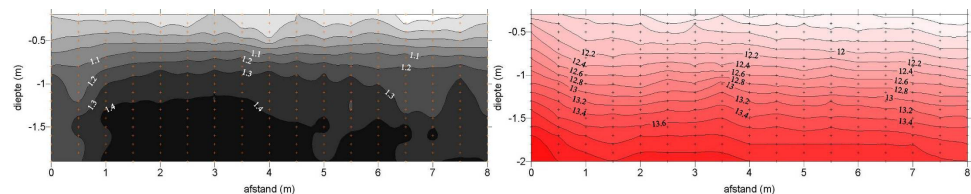
#### 2.4.2 Wel 2: Polder de Noordplas

In de waterloop waarin het water peilvak 25V uitstroomt, liggen drie wellen, twee in peilvak 25V en één stroomafwaarts. Meetpunt 11 uit de Noordplasstudie ligt op ongeveer 200 meter afstand. In dit deel van peilvak 25V ligt een brede zandbaan die de

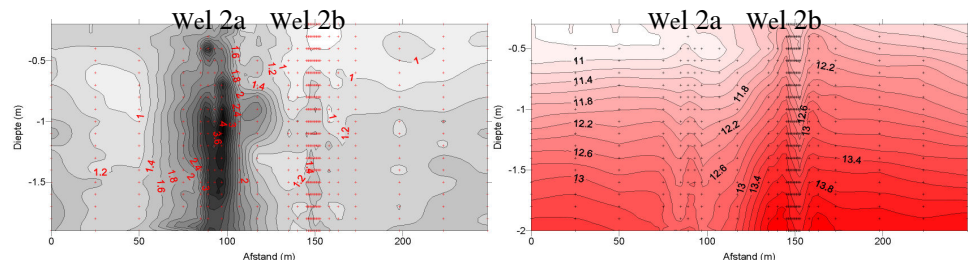
deklaag doorsnijdt. De concentratie aan wellen is hier ook hoger dan elders in de omgeving. Het chloridegehalte van 675 mg/l dat in meetpunt 11 in het eerste watervoerende pakket is gemeten, laat een regionale 'upconing' zien ter hoogte van de zandbaan. Lokale 'upconing' met hogere chlorideconcentraties zijn te verwachten ter hoogte van de wellen.

Een regionaal profiel is geprikt door twee wellen (in peilvak 25V aangeduid als 2a en de wel in peilvak 25B als 2b (zie figuur 2.10). Bij beide wellen is de slootkant uitgezakt. De slootkant bij wel 2a is enigszins hersteld. Strooming is op beide meetdagen nauwelijks waar te nemen voor wel 2b, bij wel 2a is het uittreden van grondwater in de slootkant zichtbaar.

Het lokale profiel rond wel 2b (zie figuur 2.9) laat een constant beeld zien wat betreft de temperatuur en EC. Er zijn aanwijzingen dat lokale strooming dit beeld verstoort. Het regionale profiel laat een iets genuanceerder beeld zien van een mogelijke verstoring van het temperatuurveld ter hoogte van de slootuitzakking (wel 2b) waar de temperatuur iets lager ligt. Voor wel 2a daarentegen is duidelijk een veel hogere EC gemeten in en rond de wel, 3 tot 4 zo groot dan in de rest van de sloot. Ook hier ligt de temperatuur van het grondwater in de wel iets lager dan vergeleken met de omgeving.



Figuur 2.9 Lokaal EC- en temperatuurprofiel in en rondom wel 2b (de kruisjes geven de locatie van een meting weer, metingen op 27 en 28 november 2006).



Figuur 2.10 Regionaal EC- en temperatuurprofiel in sloot van wel 2a en 2b (de kruisjes geven de locatie van een meting weer, metingen op 27 en 28 november 2006)

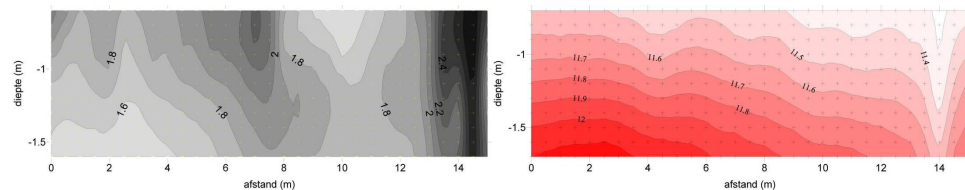
### 2.4.3 Wel 3: Polder de Noordplas

Figuren 2.11 en 2.12 laten het T- en EC-profiel zien van een meettraject door wel 3. De wel grenst direct aan de brug waar de Provinciale weg (N209) over heen gaat. Bij het plaatsten van de brug is mogelijk de wel ontstaan. Echter, op deze locatie is ook een zandbaan aanwezig dat leidt in de richting van een natuurlijke oorzaak. Ter hoogte van de brug scheidt een dam het westelijke van het oostelijke oppervlaktewater. Het water dat naar het westen stroomt is relatief zoet terwijl het oppervlaktewater dat oostwaarts stroomt, één van de zoutste locaties in de polder is als gevolg van de wel bij de weg. Dit blijkt duidelijk uit de chloride-routig die tijdens de Noordplas-studie is uitgevoerd (zie De Louw e.a., 2004). Op ongeveer 200 meter afstand ligt meetpunt 6 van de Noordplasstudie. Het gemeten chloridegehalte ligt met gemiddeld 800 mg/l in het eerste watervoerende pakket ook hier veel hoger dan het gemiddelde in de polder. Dit duidt ook weer op 'upconing' van dieper en brakker grondwater.

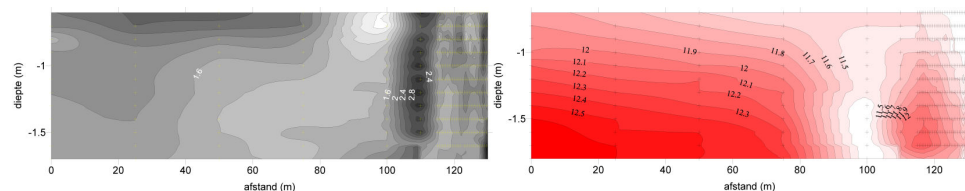
De metingen in en rond de wel laten ter hoogte van de wel (rechts in lokale profiel) duidelijk een verstoring van het T en EC-veld zien. Er kan verwarring ontstaan doordat de temperatuurlijnen op dit punt naar beneden lopen in plaats van naar boven. Dit komt doordat het temperatuur/diepteprofiel hier anders is dan bij bijvoorbeeld wel 1. Dit komt omdat op een ander moment in het jaar is gemeten (begin winter voor wel 3 en eind zomer voor wel 1). Door de gemiddeld lagere atmosferische temperaturen worden oppervlakkig in het bodemprofiel lagere temperaturen aangetroffen. Met de diepte neemt de temperatuur nog toe als gevolg van naijling van de warmere zomerperiode. Het koelere kwelwater verstoort dit beeld.

Gelet op het lokale EC-profiel lijkt de opwaartse stroming zich te concentreren op 1 punt. De EC ligt hier duidelijk hoger dan in de rest van het traject. Dit wordt veroorzaakt door een relatief hoog chloridegehalte van het omhoog stromende grondwater.

In het regionale profiel is de wel (meest rechts in profiel) ook duidelijk te zien. Echter, er valt op dat direct naast de eigenlijke wel twee locaties zijn waarin de temperatuur relatief laag is en de EC hoog. Waarschijnlijk is ook op deze locaties een uitstroomopening van de wel aanwezig.



Figuur 2.11 Lokaal EC- en temperatuurprofiel in en rondom wel 3 (de kruisjes geven de locatie van een meting weer, metingen op 16 november 2006).



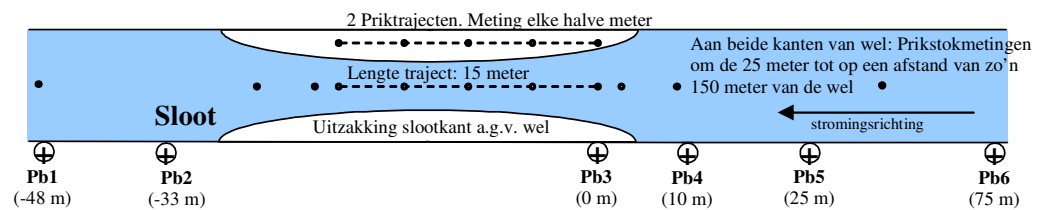
Figuur 2.12 Regionaal EC- en temperatuurprofiel in sloot van wel 3 zichtbaar (de kruisjes geven de locatie van een meting weer, metingen op 16 november 2006.)

#### 2.4.4 Wel 4: Haarlemmermeerpolder

##### Bodemopbouw

In dit deel van de Haarlemmermeerpolder is geen deklaag van klei- en veen aanwezig en er bestaat dus een directe verbinding met het eerste watervoerende pakket. Af en toe wordt wel een klei- of veenlaag aangetroffen. Op de wellocatie is voor alle meetpunten tot een diepte van 3 meter zand aangetroffen met uitzondering van locatie Pb6 waar een kleilaagje op ongeveer 2.5m is aangetroffen.

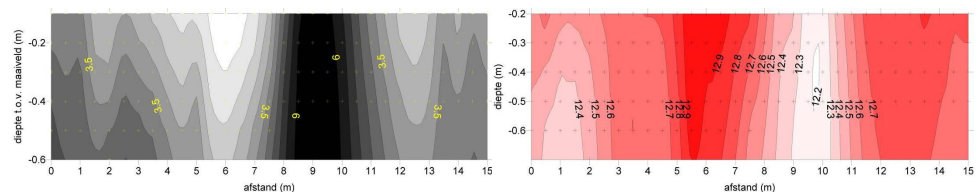
De zandige bodem verhinderde het met de hand dieper te boren dan 3 meter. Echter, voor deze locatie was dit gezien de geohydrologische opbouw voldoende diep. De peilbuizen hebben hun filter dan ook op 3 meter diepte.



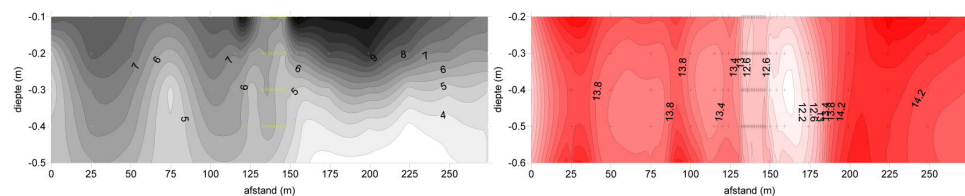
Figuur 2.13 Ligging wel, peilbuizen en prikstokmetingen voor Wel 4

##### EC- en T-profielen

Vanwege de zandbodem was het niet mogelijk om met de prikstok dieper te komen dan 0,7m. Figuren 2.14 en 2.15 laten zien dat ook hier sprake is van een punt waar EC hoog en T laag is. Het regionale temperatuurprofiel van de wel laat zien dat de temperatuur in de wel lager ligt dan in de omgeving. Ook valt op dat de laagste temperaturen gemeten zijn net ten oosten (rechts) van de wel. Op dit punt is ook de laagste stijghoogte gemeten in de peilbuizen. Mogelijk vindt hier de sterkste opwaartse waterstroming plaats maar was dit niet in het veld zichtbaar.



Figuur 2.14 Lokaal EC- en temperatuurprofiel in en rondom wel 4 (de kruisjes geven de locatie van een meting weer, metingen op 26 oktober 2006).

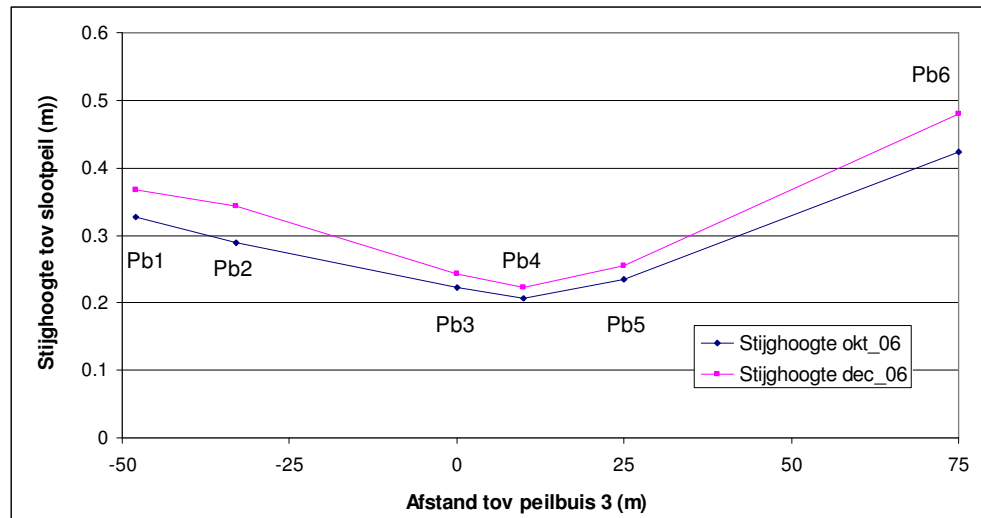


Figuur 2.15 Regionaal EC- en temperatuurprofiel in sloot van wel 4 (de kruisjes geven de locatie van een meting weer, metingen op 26 oktober 2006.)

##### Stijghoogte eerste watervoerend pakket

De stijghoogte laat een duidelijke daling zien ter hoogte van peilbuis 3 en 4, ter hoogte van de wel. Het verschil tussen de laagste en hoogste waarden bedraagt zo'n 25

centimeter. Peilbuis 6 laat een hogere stijghoogte zien, mogelijk veroorzaakt door het kleiige laagje direct boven het filter.



Figuur 2.16 De gemeten stijghoogte van het eerste watervoerende pakket op verschillende afstanden van de wel

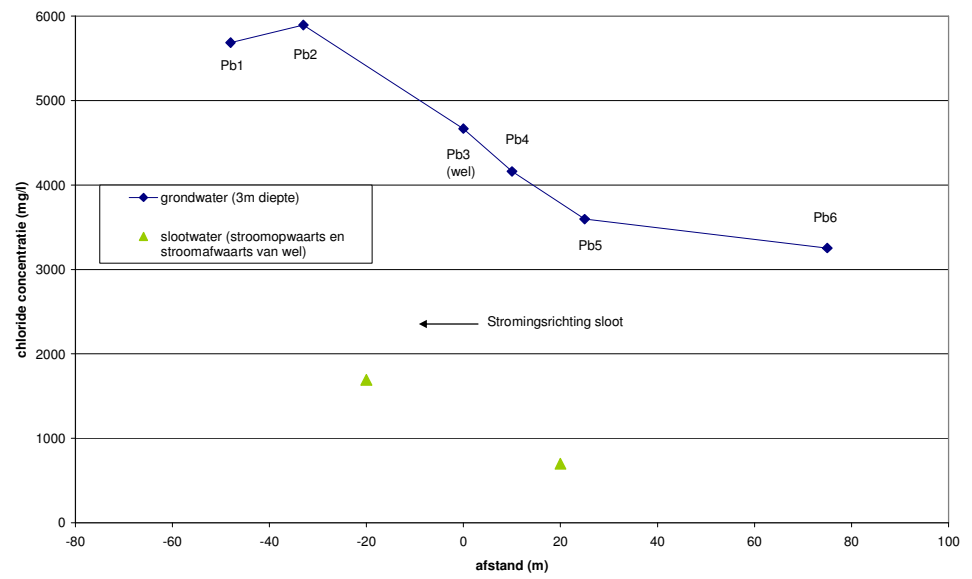
#### Chloridegehalte grond- en oppervlaktewater

Het chloridegehalte van het grondwater varieert tussen de 3000 en 6000 mg/l en is daarmee veel hoger dan het grondwater bij wellocatie 1 in Polder de Noordplas. Vanuit peilbuis 6 richting de wel (Pb3) is duidelijk een toename van het chloridegehalte zichtbaar, vermoedelijk door 'upconing' van dieper en brakker grondwater als gevolg van de wel. Echter, nog hogere waarden worden aangetroffen in Pb 1 en 2 op grotere afstand van de wel. Uit gesprekken met de perceelseigenaar is naar voren gekomen dat in dit deel van de sloot ook regelmatig uitstroomgaten zichtbaar zijn. Deze hebben echter niet geleid tot het uitzakken van de slootkant en zijn minder zichtbaar.

Tabel 2.3 De analysesresultaten van grond- en oppervlaktewater

Monstercode	EC ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	pH	mg/l Alkaliteit	mg/l Cl	mg/l NO3	mg/l SO4	mg/l Ca	mg/l Fe	mg/l K	mg/l Mg	mg/l Na
Pb1	18070	6.8	667	5685	< 0.06	387	895	39	27	241	2574
Pb2	18880	6.9	590	5895	< 0.06	469	861	38	21	256	2678
Pb3	15440	6.9	584	4667	< 0.06	494	839	-	15	210	1876
Pb4	14130	6.9	582	4160	< 0.06	193	815	42	14	188	1656
Pb5	12220	6.9	556	3595	< 0.06	116	813	-	14	157	1357
Pb6	11180	6.8	543	3254	< 0.06	69	710	-	16	-	1204
Pbwit	17400	6.9	573	5307	< 0.06	464	869	40	15	239	2460
Slootwater voor wel	3380	7.4	448	701	13	137	306	-	-	-	285
Slootwater na wel	6640	7.3	501	1693	9	171	466	-	-	-	713

De metingen van het slootwater laten goed zien dat de wel een grote invloed heeft de verzilting van het oppervlaktewater. De chlorideconcentratie wordt ruim twee keer zo groot als gevolg van de wel.



Figuur 2.17 De chlorideconcentratie van het grond- en oppervlaktewater en welwater in een profiel

## 3 Modelstudie

### 3.1 Inleiding

Om de effecten in beeld te brengen zijn geohydrologische modelberekeningen uitgevoerd met een grondwatermodel, waarbij expliciet aandacht wordt geschonken aan het vóórkomen van zandbanen en wellen.

Met de modelberekeningen wordt getracht meer inzicht te krijgen in de effecten van wellen op het grondwatersysteem en de effecten van verschillende kweldreductietechnieken.

De modellering is op twee schaalniveau's uitgevoerd:

1. Lokaal schaalniveau rondom één wel;
2. Regionaal schaalniveau.

#### Ad 1. Lokaal model rondom één wel

Voor drie gemiddelde geohydrologische situaties (Polder Noordplas/Haarlemmermeer zonder zandbaan en met zandbaan en Polder Nieuwkoop zonder zandbaan) is een lokaal grondwatermodel opgesteld (in Modflow) waarin de werking van één wel wordt gesimuleerd.

Dit model geeft inzicht in het effect van een wel op de stijghoogte (kweldruk), de kwelintensiteit, de grondwaterstand en de zoutbelasting. Er is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd zodat inzicht ontstaat welke invloed bepaalde parameters (kd, weerstand, kweldruk, welafvoer) hebben op de werking van de wel.

Met het grondwatermodel zijn de verschillende kweldreductietechnieken doorgerekend. Hierdoor ontstaat inzicht in de effectiviteit van de verschillende kweldreductietechnieken en de geohydrologische consequenties.

De grondwatermodellen in Modflow zijn omgezet naar invoer voor het dichtheidsgedreven grondwaterstromingsmodel MOCDENS3D. Met dit model kan transport van zoet, brak en zout grondwater worden doorgerekend. De verschillende scenario's zijn ook met dit model doorgerekend.

#### Ad 2. Regionaal Grondwatermodellering

Twee bestaande regionale grondwatermodellen zijn gebruikt om regionale effecten in beeld te brengen van het dichten van wellen en het gebruik van monobronnering.

Effecten op de stijghoogte (kweldruk en indirect op opbarstingsgevaar) en de kwel in de polder en de omgeving van de polder worden berekend.

De twee modellen zijn:

1. het TNO-grondwatermodel van de Zuidplas (Van der Linden en Gehrels, 2001) dat ook is ingezet voor de Noordplasstudie (De Louw e.a., 2004);
2. het regionale model van de gehele provincie Zuid-Holland, inclusief Haarlemmermeer (Minnema e.a., 2004).

Effecten van peilopzet zijn eerder uitgebreid tijdens de Noordplasstudie onderzocht waarvan de resultaten in dit hoofdstuk zijn samengevat.

## 3.2 Lokaal grondwatermodel rondom wel

### 3.2.1 Modelopbouw

Voor drie representatieve situaties is een lokaal gedetailleerd grondwatermodel opgezet rondom een wel:

- A. Polder Noordplas – Haarlemmermeer zonder zandbaan
- B. Polder Noordplas – Haarlemmermeer met zandbaan
- C. Polder Nieuwkoop

De volgende modelparameters zijn van belang voor het lokale model en variëren per locatie:

- Geohydrologische opbouw (met name opbouw en weerstand deklaag);
- Stijghoogte onder de deklaag;
- Polderpeil;
- Slootdichtheid;
- Drainagesituatie.

Hieronder worden ze kort besproken.

#### Modeldiscretisatie

Het standaardmodel heeft 65 modellagen en per laag  $100 \times 100 = 10.000$  cellen. De celgrootte is 4x4 meter.

Er is gekozen om de wel met een ruimtelijk model te simuleren omdat een profielmodel niet voldoet in verband met de radiale stroming naar de wel.

#### Geohydrologische opbouw

TNO is op dit moment bezig met een nieuwe kartering van het topsysteem op basis van alle beschikbare geologische boringen en nieuwe interpolatietechnieken en gegevens zoals de doorlatendheid. In figuur 3.1 staat de weerstand van de deklaag weergegeven (TNO, 2006: in concept).

Ondanks de dünnere deklaag is de weerstand van de deklaag in Polder Nieuwkoop groter. Dit komt omdat het basisveen in Polder Nieuwkoop veel dikker is dan in de Haarlemmermeerpolder en Polder Noordplas (zie figuur 3.1). Het basisveen is een compact veen aan de basis van de Holocene deklaag en vormt een grote weerstand voor grondwaterstroming. De grote weerstand van het basisveen wordt voor een deel veroorzaakt door compactie van het veen als gevolg van het gewicht van het bovenliggende pakket. Dit pakket is dunner bij Polder Nieuwkoop waardoor wellicht de doorlatendheid van het veen hier onderschat is. Er wordt dan ook een iets lagere weerstand in het model ingevoerd dan op je op basis van de onderstaande tabel zou berekenen (2200 i.p.v. 2900 dagen).

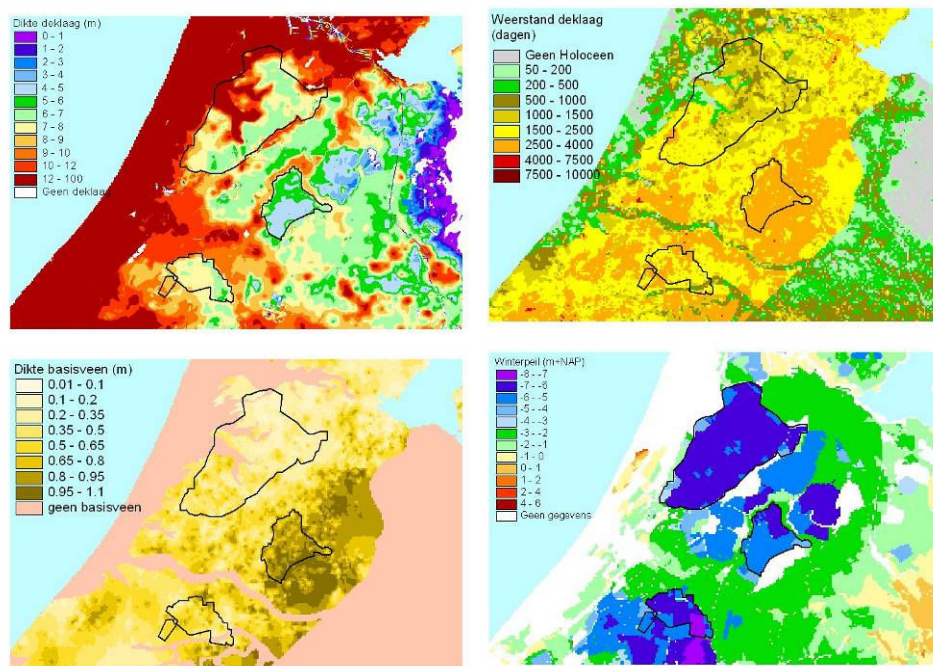
In de tabel 3.1 staat per lithologische klasse de verticale doorlatendheid weergegeven die gebruikt is bij de bepaling van de weerstand van de deklaag.

Tabel 3.1 De verticale doorlatendheid per lithoklasse die gebruikt is voor de bepaling van de weerstand van de deklaag (Bron: TNO, 2006)

Lithoklasse	Verticale doorlatendheid (m/d)	Weerstand per meter dikte (d)
Klei, niet zandig	0.0046	217
Klei, zandig	0.04	25
Zand, fijn (63-150 $\mu\text{m}$ )	4.4	0.23



Zand, middel fijn (150-300 $\mu\text{m}$ )	16.2	0.06
Zand, grof (> 300 $\mu\text{m}$ )	21.6	0.05
Veen	0.049	20
Basisveen	0.0004	2500



Figuur 3.1 Dikte en weerstand van de deklaag, dikte van het basisveen (bron: TNO-kartering Topsysteem, in concept) en het winterpeil (bron: Griffioen e.a., 2002)

Tijdens het Holocene hebben zich krekken en stroomgeulen door de deklaag gesneden waardoor het deklaagmateriaal werd vervangen door zavel en zand en dus een reductie van de weerstand van de deklaag hebben veroorzaakt. De zandbanen die gefundeerd zijn tot op het Pleistocene hebben het basisveen opgeruimd en hebben de grootste reductie van de weerstand te weeg gebracht.

Tabel 3.2 Per polder de gemiddelde dikte van deklaag en basisveen en de gemiddelde weerstand van de deklaag (alleen bepaald voor het gebied met basisveen). Daarnaast staat de gemiddelde opbouw van de deklaag weergegeven.

	Haarlemmermeer	Noordplas	Nieuwkoop
Dikte deklaag	9.2 m	7.6 m	5.2 m
Dikte basisveen	0.34 m	0.54 m	0.87 m
Weerstand	1500 d	2400 d	2900 d
<i>Lithokasse</i>			
klei	2.5 m	4.4m	3.1 m
Klei, zandig	2.6 m	1.2 m	0.6 m
Veen	0.5 m	1.0 m	1.4 m
Zand, fijn	1.4 m	0.3 m	0 m
Zand, middel fijn	2.0 m	0.6 m	0.1 m
Zand, grof en grind	0.2 m	0 m	0 m

In tabel 3.2 en 3.3 staat de opbouw van de deklaag weergegeven voor de drie te modelleren situaties op basis van bovenstaande gegevens. Het zuidelijke deel van de Haarlemmermeerpolder lijkt wat betreft geohydrologische opbouw het meest op Polder de Noordplas. Situatie A en B worden daarom zo gekozen dat ze representatief zijn voor het zuidelijke deel van de Haarlemmermeer polder en Polder de Noordplas. Bovendien komen in het zuidelijke deel van de Haarlemmermeerpolder de meeste zoute wellen voor.

Tabel 3.3 De gemiddelde opbouw van de deklaag voor polder de Noordplas en zuidelijk deel van Haarlemmermeerpolder

zonder zandbaan					met zandbaan				
Dikte (m)	Lithoklasse	Kv (m/d)	Kh (m/d)	Weerstand (d)	Dikte (m)	Lithoklasse	Kv (m/d)	Kh (m/d)	Weerstand (d)
1.5	Klei, zandig	0.04	0.4	37	1.5	Klei, zandig	0.04	0.04	37
3.0	Klei	0.0046	0.046	652	3.0	Klei	0.0046	0.0046	652
0.4	Veen	0.049	0.49	8	3.1	Zand, middel fijn	13.2	20	0.3
1.0	Klei	0.0046	0.046	217					
0.4	Veen	0.049	0.49	8					
0.8	Klei	0.0046	0.046	174					
0.5	Basisveen	0.0004	0.004	1250					
7.6	Totaal			2346	7.6				689

Tabel 3.4 De gemiddelde opbouw van de deklaag voor polder Nieuwkoop zonder zandbanen

Nieuwkoop zonder zandbaan				
Dikte (m)	Lithoklasse	Kv (m/d)	Kh (m/d)	Weerstand (d)
0.6	Klei, zandig	0.04	0.4	15
2.1	Klei	0.0046	0.046	457
0.5	Veen	0.049	0.49	10
1.0	Klei	0.0046	0.046	217
0.9	Basisveen	0.0006	0.006	1500
5.1	Totaal			2199

Uit REGIS is een gemiddelde geohydrologische opbouw onder de deklaag per polder samengesteld. Voor de Haarlemmerpolder en Polder Nieuwkoop gaat het daarbij om het zuidelijke deel van de polder.

In de onderstaande tabel staat deze geohydrologische opbouw per polder weergegeven. Voor de te modelleren situaties A en B worden de parameters van Polder de Noordplas gebruikt, die slechts in geringe mate afwijken van de parameters van de Haarlemmermeer. Voor de watervoerende pakketten (aangeduid met wvp) wordt een kd-waarde ingevoerd (eenheid m<sup>2</sup>/d) en voor de slechtdoorlatende laag (aangeduid met sdl) wordt een weerstand ingevoerd (eenheid dagen).

Tabel 3.5 De geohydrologische opbouw onder de deklaag

	Haarlemmerpolder	basis	Noordplas	basis	Nieuwkoop	basis
wvp1	650 m <sup>2</sup> /d	-55 m+NAP	535 m <sup>2</sup> /d	-45 m+NAP	525 m <sup>2</sup> /d	-40 m+NAP
sd11	2500 d	-70 m+NAP	2100 d	-55 m+NAP	2850 d	-60 m+NAP
wvp2+3	1150 m <sup>2</sup> /d	-150 m+NAP	950 m <sup>2</sup> /d	-130 m+NAP	1350 m <sup>2</sup> /d	-160 m+NAP

### Stijghoogte eerste watervoerend pakket en polderpeil

Tijdens de Noordplas-studie (Bardoel e.a., 2003) zijn op 14 locaties in de polder stijghoogtemetingen en peilmetingen uitgevoerd voor een periode van drie jaar. In de onderstaande tabel zijn de resultaten samengevat. Gemiddeld wordt er een stijghoogteverschil tussen de stijghoogte van het eerste watervoerend pakket en het oppervlaktewaterpeil gevonden van 1.50 meter, maar verschillen van 2.0 meter komen voor.

Tabel 3.6 Gemiddelde gemeten verschil tussen stijghoogte en peil/grondwaterstand in meters (Bardoel e.a., 2003)

Meet- punt	Maai- veld (m+NAP)	Stijg- hoogte (m)	Opp- peil (m)	b (m)	d (m)	e (m)	f (m)	g (m)	h (m)	I (m)	j (m)
1	-5.11										
2	-4.70	-5.15	1.45	1.04	1.18						
3	-5.23	-5.20	1.30	1.07	1.09	1.18	1.10	1.02			
4	-4.54	-4.85	1.52	1.37	1.40	1.21	1.12	1.06			
5	-5.16	-4.95	1.53	0.48	0.49	0.56	0.45	0.41			
6	-4.72	-5.00	1.42	-0.02	0.69	0.58	1.09	0.60			
7	-4.61	-4.20	1.67	1.49	1.46	1.44	1.57	1.49	1.34	1.23	1.27
8	-4.40	-4.60	1.77	1.66	1.70	1.09	0.81				
9	-4.69	-4.55	1.97	1.78	1.77	1.63	1.61	1.65			
10	-4.50	-4.90	0.99	0.69	0.72	0.65	0.51				
11	-4.94	-4.40	1.50	1.55	1.61	1.46	1.32	1.07	1.56		
12	-5.44	-4.20	2.16	1.26	1.17			1.25	1.06		
13	-5.00	-4.55	1.61	1.35	1.45	1.38	1.36	1.26	1.38		
14	-5.06	-5.40	1.06	0.70	0.81	0.57	0.59	0.62	0.97	1.10	1.17
Min	-5.44	-5.40	0.99	-0.02	0.17	-0.04	0.26	0.26	0.97	1.10	
Mean	-4.86	-4.77	1.50	1.04	1.12	0.98	0.98	0.97	1.26	1.17	
Max	-4.40	-4.20	2.16	1.78	1.77	1.63	1.61	1.65	1.56	1.23	

Voor het bepalen van een representatieve stijghoogte voor de Haarlemmermeerpolder en Polder Nieuwkoop zijn metingen uit de DINO-database geanalyseerd. Voor beide polders is het zuidelijke deel geanalyseerd. In tabel 3.7 staan de resultaten weergegeven.

Aan de rand van de Haarlemmermeer worden stijghoogteverschillen met het oppervlaktewaterpeil gevonden van 2.35 tot 3.35 meter, in het oostelijke deel van de polder 1.5 tot 2.0 meter. Het gemiddelde stijghoogteverschil is 2.3 meter. In Polder Nieuwkoop is het gemiddelde gemeten stijghoogteverschil 0.63m, variërend tussen 0.4 en 0.8 meter.

Tabel 3.7 Stijghoogtemetingen van het eerste watervoerende pakket en het stijghoogteverschil met het oppervlaktewaterpeil (Haarlemmermeerpolder en Polder Nieuwkoop)

Meetpunt	x	y	Polder	Maai-	Filter-	Gem.	winter-	zomer-	stijghoogteverschil met		
				veld m+NAP	diepte m	Stijghoogte m+NAP	peil m+NAP	peil m+NAP	winterpeil m	zomerpeil m	maaiveld m
B24H0600	99400	475150	Haarlemmermeer	-3.64	-21	-3.05	-6.40	-6.15	3.35	3.10	0.59
B25C0371	102850	476120	Haarlemmermeer	-4.07	-17	-4.05	-6.40	-6.15	2.35	2.10	0.02
B25C0400	101691	477120	Haarlemmermeer	-7.83	-18	-3.65	-6.40	-6.15	2.75	2.50	4.18
B30F0332	99420	473180	Haarlemmermeer	-4.12	-31	-3.26	-6.00	-5.85	2.74	2.59	0.86
B30F0403	98840	470770	Haarlemmermeer	-4.01	-18	-3.50	-6.00	-5.85	2.50	2.35	0.51
B31A0103	105430	473770	Haarlemmermeer	-4.64	-32	-4.78	-6.25	-6.05	1.47	1.27	-0.14
B31A0111	105141	474059	Haarlemmermeer	-4.61	-13	-4.78	-6.25	-6.05	1.47	1.27	-0.17
B31A0113	103070	471850	Haarlemmermeer	-4.21	-18	-4.29	-6.25	-6.05	1.96	1.76	-0.08
B31D0168	111590	462140	Nieuwkoop	-5.36	-12	-5.47	-5.90	-5.90	0.43	0.43	-0.11
B31B0129	110340	465230	Nieuwkoop	-4.53	-15	-5.10	-5.90	-5.90	0.80	0.80	-0.57
B31D0123	111479	462312	Nieuwkoop	-4.72	-12	-5.43	-5.90	-5.90	0.47	0.47	-0.71
B31D0166	112630	465560	Nieuwkoop	-4.61	-24	-5.09	-5.90	-5.90	0.81	0.81	-0.48

Voor de modelschematisatie wordt voor situatie A en B (Noordplas-Haarlemmermeer) een stijghoogteverschil van 1.90 meter ingevoerd (zie onderstaande tabel).

Voor Polder Nieuwkoop wordt een hogere waarde in het model ingevoerd dan de metingen aangegeven, namelijk 0.9 meter. Dit wordt gedaan omdat in Polder Nieuwkoop de meeste wellen voorkomen aan de rand van de polder, grenzend aan de Nieuwkoopse Plassen. Voor dit deel zijn geen metingen beschikbaar maar op basis van interpolatie en oude grondwaterkaarten mag hier een stijghoogteverschil worden verwacht van 0.9m.

Tabel 3.8 Modelinvoer van stijghoogte, polderpeil en maaiveld.

	Situatie A en B (Haarlemmermeer- en Noordplas Polder)	Situatie C (Nieuwkoop)
Stijghoogte eerste watervoerend pakket	-4.60 m+NAP	-5.00 m+NAP
Polderpeil	-6.50 m+NAP	-5.90 m+NAP
Stijghoogteverschil	1.90 m	0.9 m
Maaiveld	-4.4 m+NAP	-4.7 m+NAP

### Ontwatering

De ontwateringsmiddelen die in het model worden ingevoerd, zijn sloten en drainagebuizen.

De gemiddelde slootafstand die voor de Haarlemmermeerpolder en Polder de Noordplas wordt gehanteerd, is 200 meter. Voor Polder Nieuwkoop is deze beduidend kleiner (zuidwestelijke deel), namelijk 40 meter.

Er mag dan ook worden verondersteld dat Polder Nieuwkoop niet gedraineerd is. Het veldbezoek bevestigde dit beeld.

Bij een slootafstand van 200m is drainage noodzakelijk in de polder. De drainageafstand die wordt gehanteerd is 10m, als drainagediepte wordt 10cm boven het oppervlaktewaterpeil aangehouden, dus -6.40m+NAP ofwel 2 meter onder maaiveld.

### Wellen

In het midden van het modelgebied (kolom=50, rij=50) is een gat in de deklaag (kleine weerstand) gemaakt die de wel representeert. Bij een weerstand van 15 dagen wordt een kwelintensiteit van 15.7 m<sup>3</sup>/dag berekend, overeenkomstig met gemeten waarden van wellen in Polder de Noordplas.

### 3.2.2 Gevoeligheidsanalyse

Er worden 3 verschillende situaties gemodelleerd die representatief zijn voor Polder de Noordplas en Haarlemmermeer met en zonder zandbaan en Polder Nieuwkoop. Echter, de variatie van de parameters binnen een polder is groot. Daarom is voor de belangrijkste parameters een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd om inzicht te krijgen wat deze variatie voor invloed heeft op de effecten.

De parameters waarvoor de gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd zijn:

- KD van het eerste watervoerende pakket;
- weerstand van de deklaag;
- stijghoogteverschil tussen de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket en het oppervlaktewaterpeil;
- debiet van wel.

Als uitgangsmodel wordt het lokale model van Polder de Noordplas zonder zandbaan gebruikt waarvoor de volgende parameters gelden:

- KD wvp1 = 528m<sup>2</sup>/d
- Weerstand deklaag = 2346 dagen
- Stijghoogteverschil wvp1 en oppervlaktewaterpeil = 1.90m
- Debiet wel = 15 m<sup>3</sup>/d

Bij de gevoeligheidsanalyse wordt gekeken naar de invloed van de parameters op het effect dat de wel heeft op de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket en op het debiet van de wel. In de onderstaande tabel staan de resultaten samengevat. Het maximale effect op de stijghoogte wordt op de wellocatie bepaald. Met het uitstralingseffect wordt bedoeld de afstand waarop het effect op de stijghoogte nog 1 of 5 cm is.

Tabel 3.9 Resultaten van de gevoeligheidsanalyse.

Parameter variatie	Max. effect op stijghoogte (m)	Uitstralingseffect (m)		Debiet in wel (m <sup>3</sup> /d)
		Effect op stijghoogte		
		1 cm	5 cm	
Nulmodel	0.15	36	2	15.0
KD-wvp1 * 2	0.10	14	1	15.6
KD-wvp1 * 0,5	0.21	100	6	14.1
Weerstand deklaag * 2	0.15	38	2	15.0
Weerstand deklaag * 0,5	0.15	34	2	14.9
Stijghoogte verschil = 0.95m	0.07	10	1	7.3
Stijghoogte verschil = 2.85m	0.22	73	5	22.7
Debiet wel: 5 m <sup>3</sup> /d	0.05	6	0	5
Debiet wel: 15 m <sup>3</sup> /d	0.15	36	2	15
Debiet wel: 30 m <sup>3</sup> /d	0.28	175	10	30
Debiet wel: 50 m <sup>3</sup> /d	0.47	540	22	50
Debiet wel: 100 m <sup>3</sup> /d	0.94	1000	60	100
Debiet wel: 1000 m <sup>3</sup> /d	>3m	>2000	>1000	1000

De grootste invloed op de stijghoogteverlaging is het debiet van de wel. Hoe groter de hoeveelheid kwel, hoe groter het effect op de stijghoogte. De wel werkt als het ware als een soort grondwateronttrekking en de onttrekkingskegel wordt groter en dieper met toenemend debiet. Het weldebiet is gemeten, echter, het totale weldebiet wordt

waarschijnlijk onderschat omdat niet alle uitstroomopeningen zichtbaar zijn of gemeten kunnen worden. Het is dus een onzekere parameter en de gevoeligheidsanalyse geeft min of meer de bandbreedte van de effecten weer.

Voor de weldebieten van 30 m<sup>3</sup>/d en groter was een groter modelgebied nodig omdat de stijghoogteverlaging werd beïnvloed door de modelrand. Voor deze berekeningen is het modelgebied vergroot van 400x400 meter naar 2000x2000 meter.

De KD van het eerste watervoerende pakket heeft een significant effect op de stijghoogteverlaging. Een grotere KD leidt tot een kleinere stijghoogteverlaging, een kleinere KD tot een grotere stijghoogteverlaging. Bij een kleinere KD is namelijk een grotere stijghoogtegradient nodig om de stroming naar de wel te kunnen realiseren. De weerstand van de deklaag heeft nauwelijks een invloed op de stijghoogteverlaging. Een grotere of kleinere stijghoogtegradient heeft een directe invloed op het debiet van de wel en daarmee op de stijghoogteverlaging in het eerste watervoerende pakket.

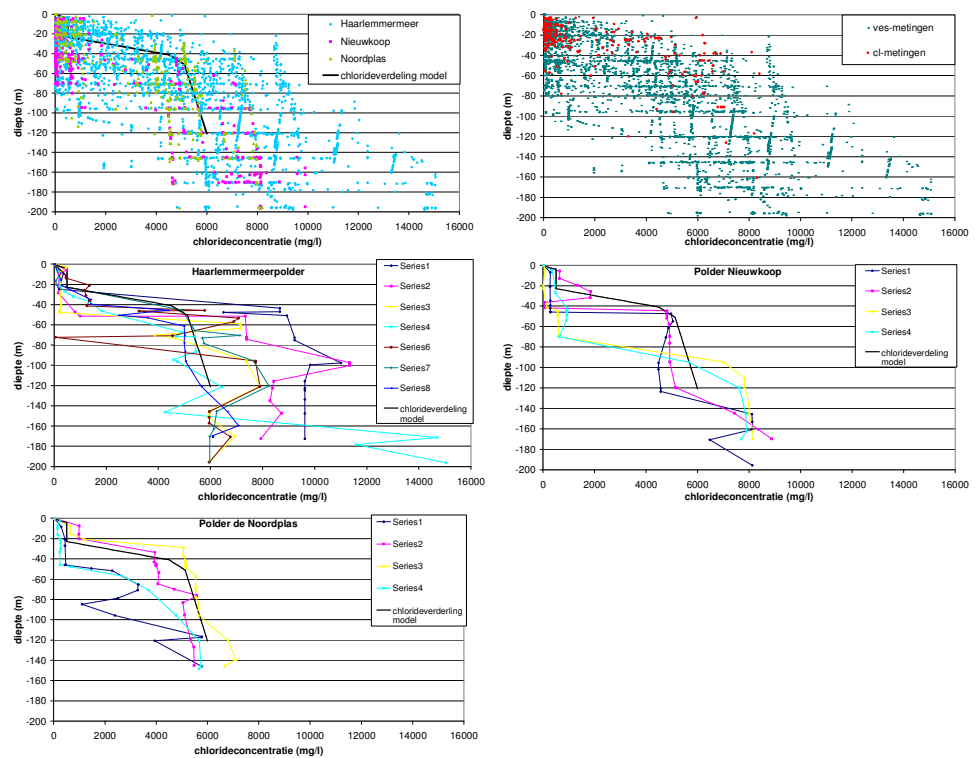
### 3.2.3 *Dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming*

De chlorideverdeling in de ondergrond heeft invloed op de grondwaterstroming en de grondwaterstroming heeft weer effect op de chlorideverdeling. Om beide effecten mee te nemen, is gebruik gemaakt van het dichtheidsafhankelijk grondwaterstromingsmodel MOCDENS3D. Voor dit model is een initiële chlorideverdeling van de ondergrond vereist.

#### *Beschrijving MOCDENS3D*

De softwarecode die gebruikt wordt voor dichtheidsgedreven grondwaterstroming en het transport van zoet, brak en zout grondwater is MOCDENS3D (Oude Essink, 2000; Vugt *et al.*, 2003). De code is gebaseerd op de volgende twee codes, die volledig zijn geïntegreerd: 1. MODFLOW (McDonald en Harbaugh, 1988), en 2. MOC3D (Konikow *et al.*, 1996) voor de verplaatsing van zoet, brak en zout grondwater. Er zijn verschillende redenen waarom gekozen is voor de deze code: 1. er wordt rekening gehouden met dichtheidsverschillen in het grondwater die de grondwaterstroming in belangrijke mate kunnen beïnvloeden; 2. hydrodynamische dispersie (viz. menging) van zoet, brak en zout grondwater die optreedt tijdens het opkegelingsproces naar de wellen kan goed worden meegenomen; 3. de gedetailleerde gedistribueerde schematisatie (t.w. veel modellagen en in 3D) van de ondergrond maakt het mogelijk de opkegeling van brak en zout grondwater nauwkeurig na te bootsten.

Op basis van chloridemetingen (uit DINO) en VES-metingen (TNO, 2006) wordt de chlorideverdeling in de ondergrond in Polder de Noordplas, Haarlemmermeerpolder en Polder Nieuwkoop verder onderzocht. VES-metingen zijn Verticale Electriche Sonderingen waaruit het chloridegehalte van het grondwater kan worden bepaald. Echter, het is een indirecte meting waarbij de betrouwbaarheid van de geschatte chlorideconcentratie sterk afhankelijk is van hoe goed de opbouw van de ondergrond en het bi-carbonaatgehalte van het grondwater bekend is. Daarnaast neemt de betrouwbaarheid af met de diepte. In figuur 3.2 staan de chloridegehalten voor deze drie polder tegen de diepte uitgezet. De variatie is groot maar de grafieken laten duidelijk zien dat het chloridegehalte met de diepte toeneemt. Per polder zijn een aantal VES-metingen tegen de diepte uitgezet. Op basis van deze metingen is een gemiddelde chlorideverdeling in de ondergrond bepaald (dikke lijn in grafieken). Voor alle drie de polders wordt een zelfde chlorideverdeling toegepast zodat de modelresultaten beter met elkaar te vergelijken zijn. Deze gemiddelde chlorideverdeling past bij de metingen.



Figuur 3.2 Chlorideconcentratie met de diepte voor drie polders: bovenste 2 grafieken laten alle chloride- en VES-metingen zien, de onderste 3 grafieken laten per polder een aantal VES-metingen zien

### 3.2.4 Scenario-berekeningen

Voor de drie verschillende geohydrologische situaties zijn de volgende zes scenario's doorgerekend:

- Scenario 1: Welafdichting onder in deklaag
- Scenario 2: Welafdichting boven in deklaag
- Scenario 3: Welafdichting gehele deklaag
- Scenario 4: Monobronnen, onttrekken boven in WVP1
- Scenario 5: Monobronnen, onttrekken midden in WVP1
- Scenario 6: Peilopzet sloot van 1 meter

In scenario 1 wordt de wel gedicht onder in de deklaag. Modelmatig worden voor dit scenario de onderste drie meters ondoorlatend gemaakt. Voor scenario 2 worden de bovenste drie meter ondoorlatend gemaakt en voor scenario 3 wordt de gehele wel ondoorlatend gemaakt.

Het debiet van de wel voor de situatie zonder zandbaan is  $15.6 \text{ m}^3/\text{d}$ , met zandbaan  $17.6 \text{ m}^3/\text{d}$  en voor Polder Nieuwkoop  $9.5 \text{ m}^3/\text{d}$ . In scenario 4 en 5 wordt monobronnering toegepast. Met scenario 4 wordt iets meer dan het weldebiet (namelijk  $20 \text{ m}^3/\text{d}$ ) ter plaatse van de wel boven in het eerste watervoerende pakket direct onder de deklaag (9 meter diepte) onttrokken en in het midden van het tweede watervoerende pakket geïnjecteerd. In scenario 5 wordt dezelfde hoeveelheid onttrokken maar niet direct onder de deklaag maar in het midden van het eerste watervoerende pakket (25 meter diepte).

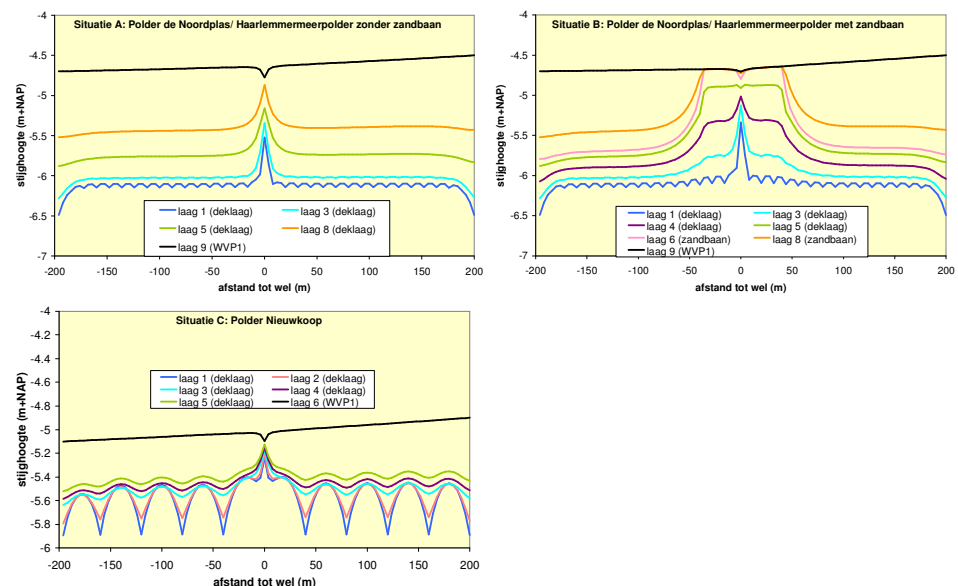
In scenario 6 wordt het peil in de sloot waar de wel uitkomt met 1.0 meter opgezet, in de andere sloten wordt het peil niet verhoogd.

### Bespreking huidige situatie

In figuur 3.3 staat in een dwarsprofiel loodrecht op de wel, de berekende stijghoogte weergegeven voor enkele modellen in de deklaag en het eerste watervoerende pakket. Voor de situatie Noordplas/Haarlemmermeer is voor modellaag 1 duidelijk het effect van de sloten en drainage op de grondwaterstand te zien (figuur 3.3). De opbolling tussen de sloten (slootafstand 200m) is ongeveer 40 cm en tussen de drains ongeveer 5 cm. Met de diepte verdwijnt de invloed van de drains snel als gevolg van de weerstand van de deklaag.

Het grootste stijghoogteverschil buiten de zandbanen is die tussen modellaag 8 (iets boven het basisveen) en modellaag 9 (het eerste watervoerende pakket) door de aanwezigheid van het zeer slechtdoorlatende basisveen. De zandbaan heeft een grote invloed op de stijghoogte. In de zandbaan (modellaag 6, 7 en 8) wordt de stijghoogte gelijk aan die van het eerste watervoerende pakket door de afwezigheid van een weerstandslaag.

Voor Polder Nieuwkoop is het effect van de sloten (slootafstand 40m) duidelijk zichtbaar (geen drainage aanwezig). Het effect werkt in de gehele deklaag door. Het grootste stijghoogteverschil wordt gevonden tussen modellaag 5 (boven basisveen) en modellaag 6 (WVP1) door de aanwezigheid van de grote weerstand van het basisveen.



Figuur 3.3 De berekende stijghoogte voor verschillende modellen (in deklaag, zandbaan en WVP1), weergegeven in een dwarsprofiel loodrecht op de wel voor de verschillende geohydrologische situaties. De zwarte lijn geeft de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket weer.

Voor alle drie de situaties is het verlagende effect van de wel op de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket zichtbaar. Deze is voor Polder de Noordplas/Haarlemmermeer zonder zandbaan het grootst (15 cm), dan Polder Nieuwkoop (9 cm) en het kleinst voor Noordplas/Haarlemmermeer met zandbaan (6 cm). Het debiet van de wel is het grootst voor de situatie met zandbaan ( $17.6 \text{ m}^3/\text{d}$ ) en het kleinst voor Polder Nieuwkoop ( $9.5 \text{ m}^3/\text{d}$ ). De wel in Polder de Noordplas heeft een debiet van  $15.7 \text{ m}^3/\text{d}$ .

### Bespreking scenario's

De resultaten van de scenarioberekeningen voor de drie geohydrologische situaties staan samengevat in tabel 3.10. Voor het model Polder de Noordplas/



Haarlemmermeerpolder zonder zandbaan staan de resultaten ook in figuren 3.4 t/m 3.6 samengevat.

Tabel 3.10 Resultaten scenarioberekeningen. Toename/afname totale kwel, diffuse kwel en kwel in wel (grootte modelgebied = 1.6 ha). Geohydr. situatie A: scenario 1-6; geohydr. situatie B: scenario 11-16; geohydr. situatie C: scenario 21-26.

		afname kwel in wel (m3/d)	af/toename diffuse kwel (m3/d)	afname tot. kwel (m3/d)	maximale af/toename stijghoogte (m)
scenario 1	Weldichting onder in deklaag	-15.7	0.7	-15.0	0.15
scenario 2	Weldichting boven in deklaag	-14.0	0.1	-13.9	0.13
scenario 3	Weldichting gehele deklaag	-15.7	0.6	-15.1	0.15
scenario 4	Monobronnering, onttrekking boven in WVP1	-1.7	-0.2	-1.9	-0.17
scenario 5	Monobronnering, onttrekking midden in WVP1	-0.2	-0.3	-0.5	-0.02
scenario 6	Peilopzet sloot van 1m	-7.3	-1.8	-9.1	0.07
		afname kwel in wel (m3/d)	af/toename diffuse kwel (m3/d)	afname tot. kwel (m3/d)	maximale af/toename stijghoogte (m)
scenario 11	Weldichting onder in deklaag	-17.6	0.8	-16.8	0.06
scenario 12	Weldichting boven in deklaag	-17.4	0.6	-16.8	0.06
scenario 13	Weldichting gehele deklaag	-17.6	0.7	-16.9	0.06
scenario 14	Monobronnering, onttrekking boven in WVP1	-0.6	-0.6	-1.2	-0.12
scenario 15	Monobronnering, onttrekking midden in WVP1	-0.2	-0.6	-0.8	-0.02
scenario 16	Peilopzet sloot van 1m	-8.8	-5.5	-14.2	0.03
		afname kwel in wel (m3/d)	af/toename diffuse kwel (m3/d)	afname tot. kwel (m3/d)	maximale af/toename stijghoogte (m)
scenario 21	Weldichting onder in deklaag	-9.5	0.3	-9.2	0.09
scenario 22	Weldichting boven in deklaag	-9.4	0.2	-9.1	0.08
scenario 23	Weldichting gehele deklaag	-9.5	0.3	-9.2	0.09
scenario 24	Monobronnering, onttrekking boven in WVP1	-2.0	-0.2	-2.2	-0.16
scenario 25	Monobronnering, onttrekking midden in WVP1	-0.2	-0.3	-0.5	-0.02
scenario 26	Peilopzet sloot van 1m	-10.7	-6.2	-16.9	0.10

### Weldichting (scenario 1, 2 en 3)

De weldichting onder en in de gehele deklaag zijn modelmatig 100% effectief in het reduceren van het weldebiet. Het dichten van de wel boven in de deklaag is iets minder effectief. In de praktijk zal de effectiviteit afhangen van de mate waarin het gat gedicht kan worden.

De toename van de stijghoogte is niet groot en varieert van 6 tot 15 cm. Deze maximale stijging geldt voor de wellocatie. Binnen 4 meter is het effect al minder dan 5 cm en op 50 meter afstand is het effect minder dan 1 cm.

Door deze geringe toename van de stijghoogte neemt de diffuse kwel in de directe omgeving ook iets toe, variërend van 0.2 tot 0.8 m<sup>3</sup>/d. Mogelijk ligt de rand toch te dicht bij om deze fluxbalans goed te kunnen maken. Immers, de afname van kwel in de wel wordt gecompenseerd door de toename van diffuse kwel en de toename van de modelrandstroming, anders klopt de waterbalans niet. Deze toename van de modelrandstroming ligt in de orde van 9 tot 17 m<sup>3</sup>/d. Voor uitspraken voor de toename van de diffuse kwel wordt dan ook meer waarde gehecht aan de resultaten van de regionale modellen.

De freatische grondwaterstand neemt als gevolg van het dichten van de wel licht af zoals in figuur 3.4 te zien is.

### Peilopzet 1m (scenario 6)

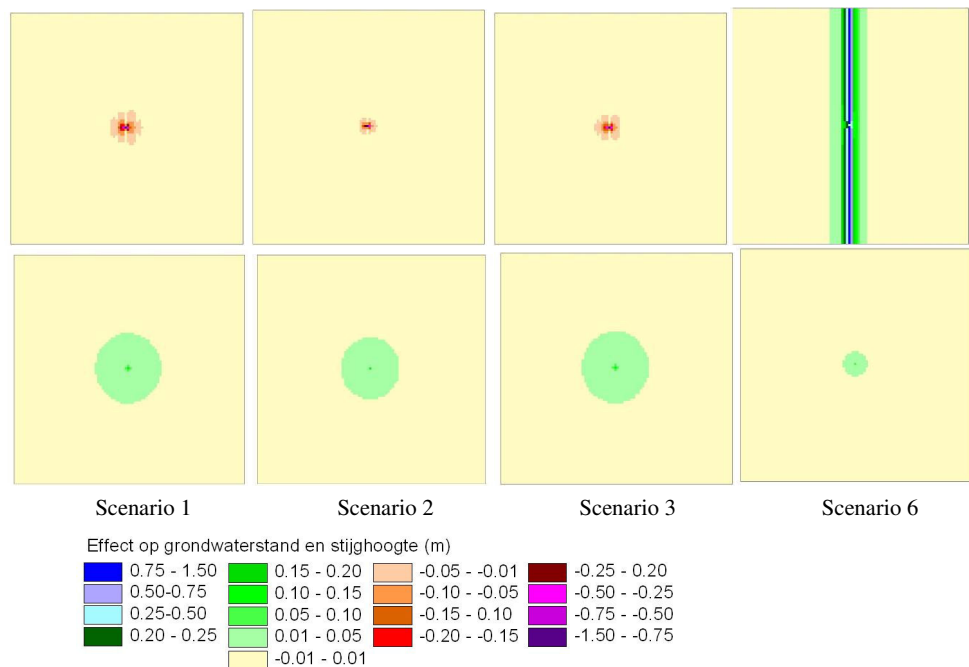
Door de peilverhoging neemt het stijghoogteverschil in de wel af en daardoor het weldebiet. Voor de situatie zonder zandbaan neemt het stijghoogteverschil in de wel af van 1.75m tot 0.85m, een reductie van ongeveer 50%. Het weldebiet neemt daardoor ongeveer 50% af. Voor de situatie met de zandbaan is de kwelreductie ongeveer gelijk.

Voor Polder Nieuwkoop ontstaat een andere situatie namelijk door de peilverhoging van 1 meter slaat de kwel om in infiltratie (stijghoogteverschil ter hoogte van de wel was namelijk ongeveer 0.81m).

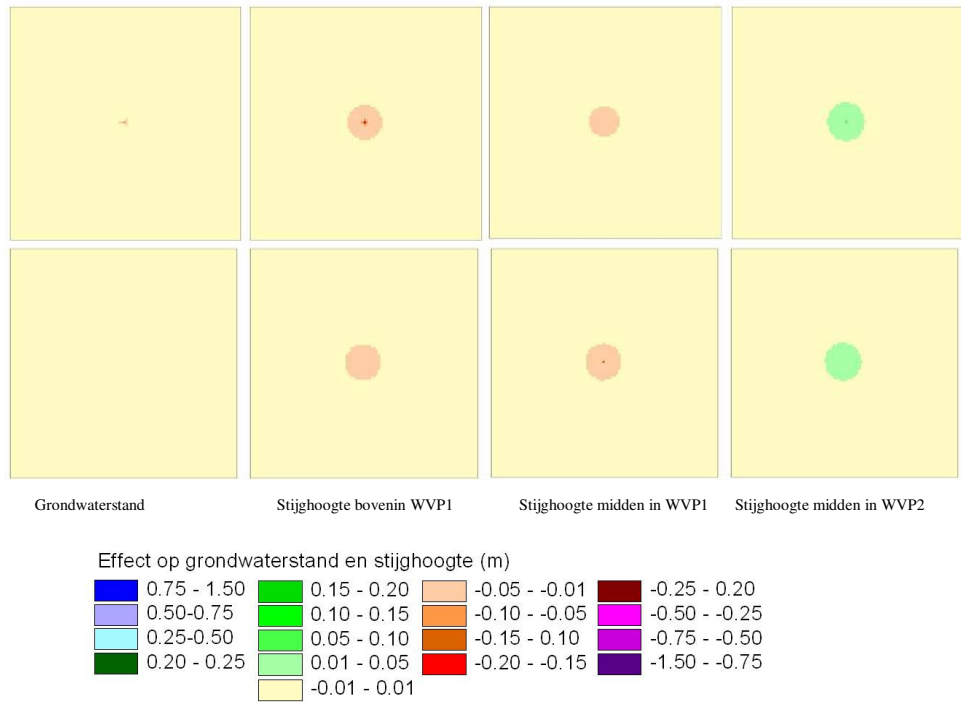
De freatische grondwaterstand stijgt significant als gevolg van de peilverhoging van 1 m voor een smalle zone langs de sloot (zie figuur 3.4). Hierdoor wordt ook de diffuse kwel tegengehouden (zie figuur 3.6). De afname is groot voor Polder Nieuwkoop en de situatie met zandbaan. Voor Polder Nieuwkoop wordt dit veroorzaakt door het geringe stijghoogteverschil waardoor grondwaterstandsverhogingen relatief een groter effect hebben. Bij de zandbaan is de diffuse kwel ter plaatse van de zandbaan veel hoger (geringe weerstand) waardoor een peilverhoging ook meer kwel tegenhoudt.

#### Monobronnering (scenario 4 en 5)

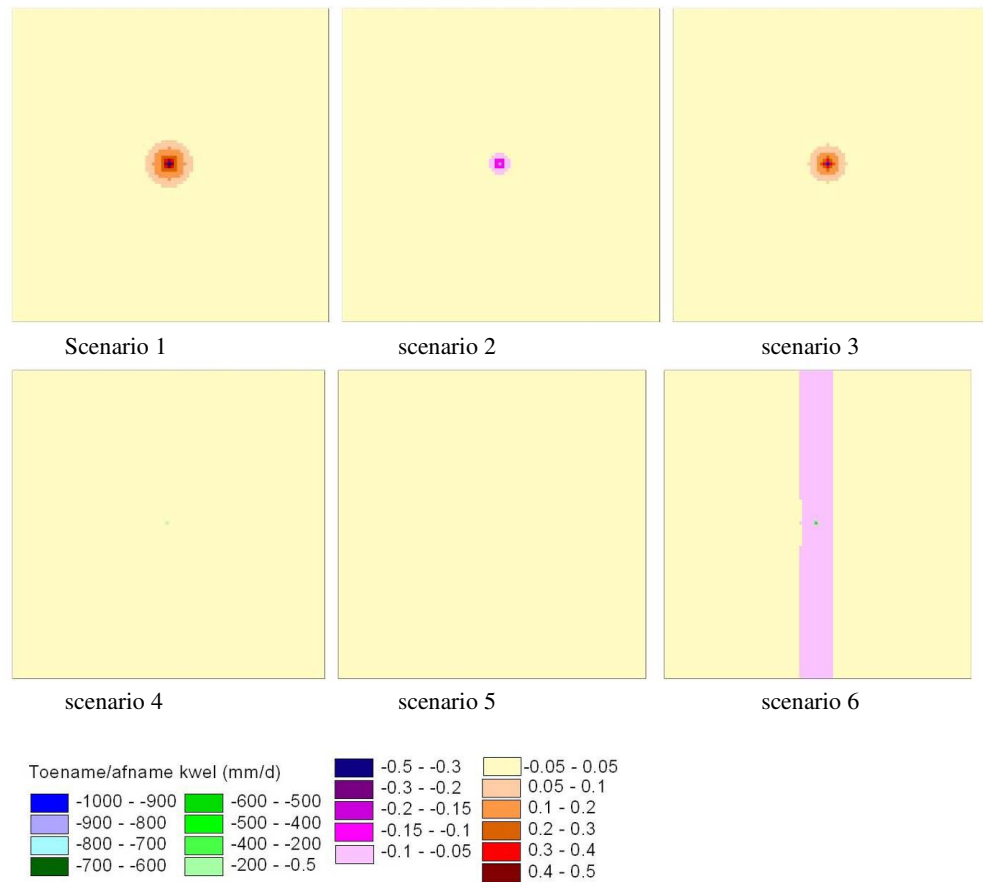
Het weldebiet varieert voor de drie geohydrologische situaties van 9.5 tot 17.6 m<sup>3</sup>/d. De gedachtegang bij deze scenario's was dat door het onttrekken van een hoeveelheid iets groter dan het weldebiet (uit het eerste watervoerende pakket ter plaatse van de wel) een significante reductie van het weldebiet wordt gerealiseerd. Deze gedachtegang bleek na modellering fout te zijn. Namelijk, door deze geringe onttrekking wordt de kweldruk (stijghoogte WVP1) slechts in geringe mate verlaagd, namelijk 12 tot 17 cm (t.o.v. van 90-190 cm stijghoogteverschil) met als gevolg een zeer geringe reductie van het weldebiet. Wanneer niet direct onder deklaag (scenario 4) maar in het midden van WVP1 (scenario 5) wordt onttrokken is het effect nog veel kleiner (zie tabel 3.10). Injectie in het tweede watervoerende pakket geeft een stijging van de stijghoogte aldaar. Onttrekkingsdebieten dienen veel groter te zijn om het stijghoogteverschil significant te verkleinen. Voor grotere onttrekkingsdebieten is het modelgebied te klein in verband met randeffecten. Daarom worden de effecten van monobronnering met een groter onttrekkingsdebiet met het regionale grondwatermodel doorgerekend.



Figuur 3.4 Effect op freatische grondwaterstand (boven) en stijghoogte WVP1 (onder) voor scenario 1, 2, 3 en 6



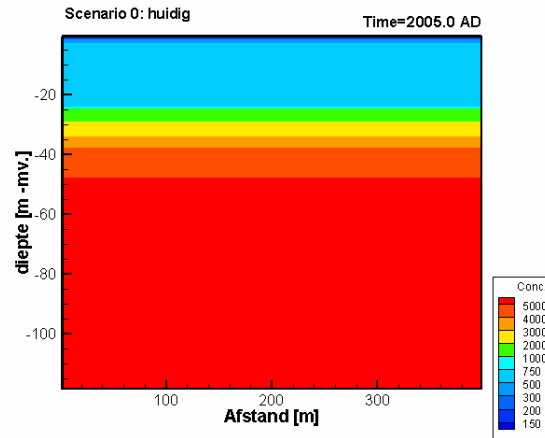
Figuur 3.5 Effect op grondwaterstand en stijghoogte (verschillende dieptes) voor scenario 4 (boven) en scenario 5 (onder).



Figuur 3.6 Effect op de kwelintensiteit (van WVP1 naar deklaag) als gevolg van scenario 1-6

### Effecten op de chlorideverdeling van het grondwater in de ondergrond

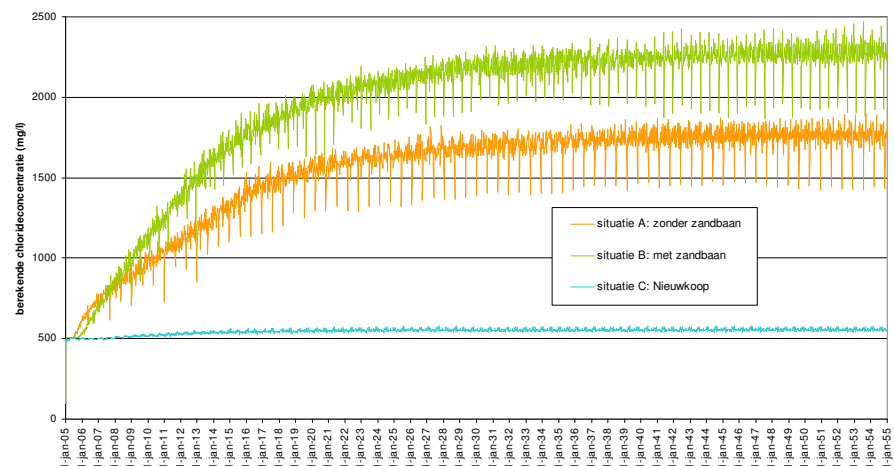
Vanuit een initiële chlorideverdeling van het grondwater, zoals bepaald in paragraaf 3.2.3 (figuur 3.7), wordt het model 50 jaar doorgerekend. Op deze manier ontstaat inzicht in het effect van de wel en de geohydrologische situatie op de chlorideverdeling.



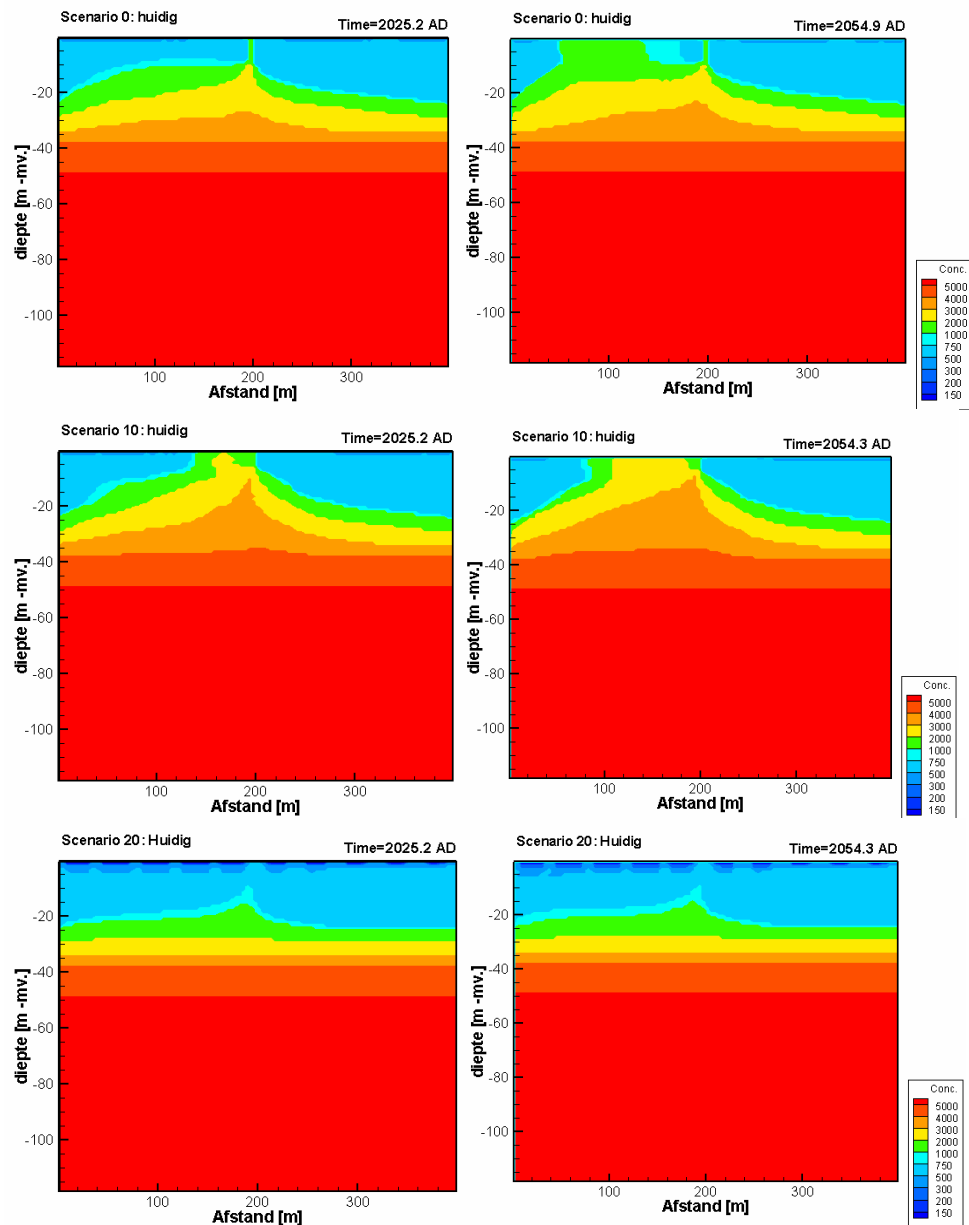
Figuur 3.7 De initiële chlorideverdeling van het grondwater in de ondergrond die voor alle drie de geohydrologische situaties is toegepast.

Op de cd-rom die bij het rapport is bijgevoegd, is de ontwikkeling van de chlorideverdeling in de tijd in een filmpje te zien. In figuur 3.9 is de chlorideverdeling voor de drie geohydrologische situaties op twee tijdstippen weergegeven, na 20 jaar en na 50 jaar. Voor alle drie de situaties treedt als gevolg van de wel 'upconing' van dieper en brakker grondwater (zie figuur 3.9). Echter, er zijn duidelijke verschillen zichtbaar. Voor situatie A zonder zandbaan is de uiteindelijke concentratie in de wel 1700 mg/l terwijl voor situatie B met zandbaan chlorideconcentraties van 2300 mg/l worden berekend (zie figuur 3.8). Ter hoogte van de zandbaan is de kwelintensiteit namelijk hoger waardoor over een breed front dieper en brakker grondwater wordt aangetrokken. Ter hoogte van de wel wordt door het hogere debiet, nog dieper en brakker grondwater aangetrokken.

Voor beide situaties is te zien dat stroomafwaarts van de wel de concentraties in de deklaag oplopen. De wel (en zandbaan) trekt dieper grondwater omhoog dat door de regionale grondwaterstroming stroomafwaarts wordt verplaatst.



Figuur 3.8 De berekende chlorideconcentratie in de wel, boven in de deklaag (modellaag 1) voor de drie geohydrologische situaties



Figuur 3.9 De berekende chlorideverdeling van het grondwater in de ondergrond na 20 jaar (links) en na 50 jaar (rechts) voor de drie geohydrologische situaties (scenario 0 = situatie A zonder zandbaan, scenario 10 = situatie B met zandbaan, scenario 20 = situatie C Nieuwkoop).

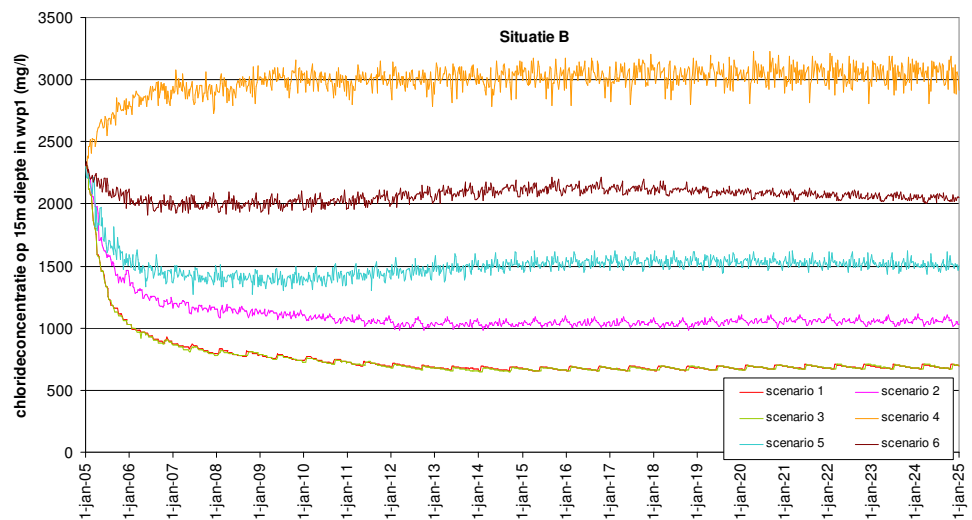
Voor Polder Nieuwkoop (situatie C) blijft de chlorideconcentratie in de wel laag (550 mg/l). Dit heeft twee oorzaken, in vergelijking tot situatie A en B is, (1) de welintensiteit lager en (2) ligt de eerste scheidende laag ondieper. Uit de berekeningen blijkt dat door de wel voornamelijk grondwater uit het eerste watervoerende pakket wordt aangetrokken. De scheidende laag verhindert dat (veel) grondwater uit het tweede watervoerende pakket naar het eerste watervoerende pakket stroomt. Door de ondiepere ligging van de scheidende laag is dus het grondwater in het eerste watervoerende pakket voor situatie C minder brak dan voor situatie A en B.

De berekende chlorideconcentraties van het welwater voor situatie A en B van 1700 en 2300 mg/l komen overeen met waarden die in Polder de Noordplas zijn gemeten. De

wellen in Polder Nieuwkoop aan de rand van de polder vertonen zoete tot licht brakke chlorideconcentraties. De modelberekeningen onderbouwen dit.

Voor de drie geohydrologische situaties is tevens berekend wat het effect van de verschillende maatregelen is op de chlorideverdeling. De berekende chlorideverdeling na 20 jaar (zie figuur 3.9) wordt als initiële chlorideverdeling (uitgangssituatie) gebruikt. Op de bijgevoegde cd-rom zijn filmpjes te zien van de ontwikkeling van de chlorideverdeling in de tijd als gevolg van de verschillende scenario's. In de onderstaande figuur staat voor situatie B met zandbaan de chlorideconcentratie in het eerste watervoerende pakket weergegeven als gevolg van de verschillende maatregelen. De 'upconing' van het diepere grondwater verdwijnt binnen enkele jaren door het dichtten van de wel (scenario 1,2 en 3). Voor situatie B blijft door de aanwezigheid van de zandbaan de regionale 'upconing' bestaan.

Scenario 4 en 5 hebben (door de geringe onttrekking) nauwelijks een effect op de chlorideverdeling in het eerste watervoerend pakket. In de filmpjes is duidelijk het effect van injectie van brak water in het tweede watervoerende pakket te zien. Peilverhoging (scenario 6) heeft voor situatie A en B een zichtbaar maar minder groot effect op de chlorideverdeling in het eerste watervoerende pakket en deklaag. Voor situatie C (Polder Nieuwkoop) is duidelijk zichtbaar dat er infiltratie van zoet oppervlaktewater gaat optreden als gevolg van de peilverhoging.



Figuur 3.10 De berekende chlorideconcentratie in het eerste watervoerende voor situatie B met zandbaan als gevolg van de verschillende scenario's.

### 3.3 Regionaal grondwatermodellering

#### 3.3.1 Inleiding

Twee bestaande regionale grondwatermodellen zijn gebruikt om regionale effecten in beeld te brengen van het dichten van wellen en het gebruik van monobronnering op de stijghoogte (kweldruk en indirect op opbarstingsgevaar) en de kwel in de polder en de omgeving van de polder.

De twee modellen zijn:

1. het TNO-grondwatermodel van de Zuidplaspolder (Van der Linden en Gehrels, 2001) dat ook is ingezet voor de Noordplasstudie (De Louw e.a., 2004);
2. het regionale grondwatermodel van de gehele provincie Zuid-Holland, inclusief Haarlemmermeerpolder (Minnema e.a., 2004).

Effecten van peilopzet zijn eerder uitgebreid onderzocht tijdens de Noordplasstudie waarvan de resultaten tevens in deze paragraaf zijn samengevat.

#### 3.3.2 Beschrijving regionale grondwatermodellen

Voor een uitgebreide beschrijving van het grondwatermodel van de Zuidplaspolder wordt verwezen naar Van der Linden en Gehrels, 2001 en het syntheserapport van de Noordplas-studie (De Louw e.a., 2004). Het modelgebied is 19 bij 20 kilometer groot en heeft een celgrootte van 100 bij 100 meter. Dit model wordt ingezet voor de berekening van de effecten van het dichten van wellen op regionaal schaalniveau.

Het Zuid-Holland grondwatermodel omvat de gehele provincie inclusief de Haarlemmermeerpolder. De celgrootte is ook 100 bij 100 meter. Voor een uitgebreide beschrijving van dit grondwatermodel wordt verwezen naar Minnema e.a., 2004. Dit model wordt gebruikt voor het berekenen van effecten van monobronnering op regionale schaal. Hiervoor is het grondwatermodel van de Zuidplaspolder te klein omdat de modelranden te dicht bij liggen en ze een te grote invloed hebben op de modelresultaten. Het Zuid-Holland grondwatermodel is omvat de gehele provincie waardoor randeffecten geen rol spelen.

Beide grondwatermodellen zijn tijdens een uitgebreide studie opgezet in Modflow en gecalibreerd met behulp van alle beschikbare stijghoogtemetingen. De schematisatie, invoergegevens, nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van de modellen zijn goed en van dien aard dat de modellen kunnen worden gebruikt voor het doorrekenen van de genoemde maatregelen.

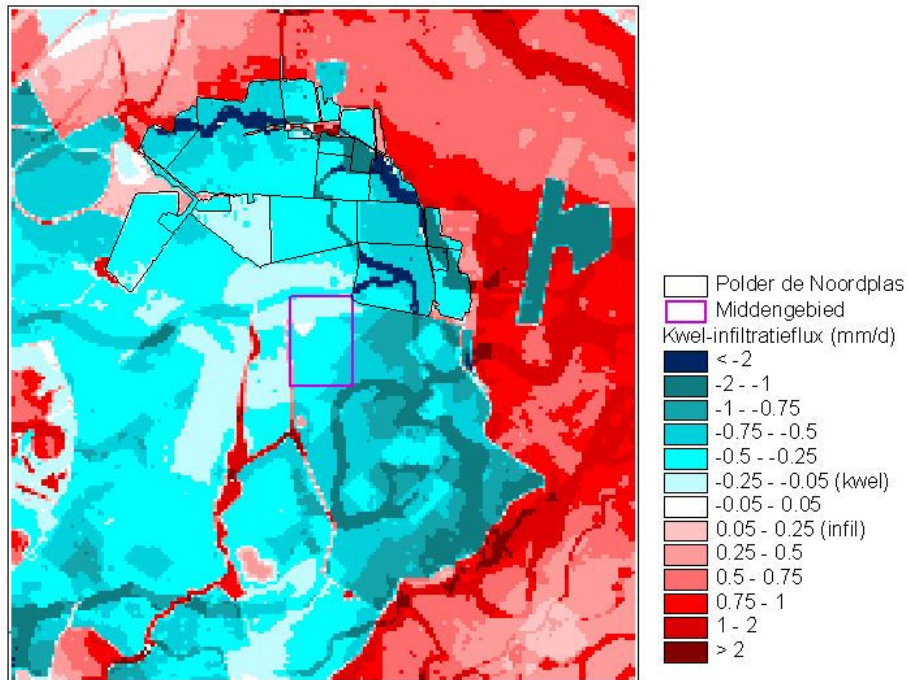
#### 3.3.3 Dichten van wellen

Met grondwatermodel van de Zuidplas is het regionale effect van het dichten van wellen berekend. Voor Polder de Noordplas is in 15 modelcellen, overeenkomstig met de locatie van grotere wellen of grote concentraties aan wellen, de weerstand van de deklaag verlaagd naar 15 dagen. Het totale weldebiet kwam met deze weerstand het dichtst in de buurt van het totale weldebiet dat met de water- en stoffenbalansmethode tijdens de Noordplas-studie is bepaald.

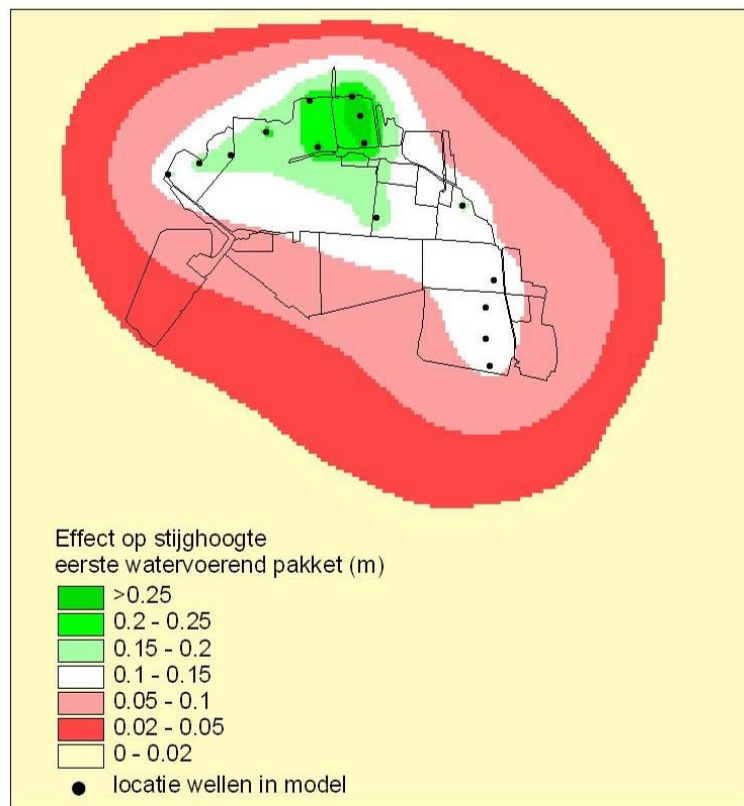
#### Huidige situatie

Met het grondwatermodel wordt een totale kwelflux voor alleen de wellen berekend van 3.1 miljoen kuub per jaar. In de Noordplas-studie wordt een waarde gevonden van 3.8 miljoen kuub kwel dat via wellen per jaar uittreedt. De totale kwel die diffuus via de

deklaag in het oppervlaktewatersysteem uittreedt, is met het model berekend op 9.6 miljoen kuub per jaar.



Figuur 3.11 De kwel- en infiltratieflux berekend met het Zuidplas-model



Figuur 3.12 Effect op de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket als gevolg van het dichtn van alle wellen in Polder de Noordplas (scenario 1). De zwarte lijnen geven de peilvakken van Polder de Noordplas aan.



*Scenario 1: Wellen Noordplas dichten*

In scenario 1 worden alle wellen gedicht in Polder de Noordplas en het regionale effect op de kwel en de stijghoogte is berekend. In figuur 3.12 staat het effect op de stijghoogte weergegeven. In tabel 3.11 en 3.12 staan de resultaten samengevat.

Als gevolg van het dichten van de wellen neemt de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket significant toe (zie figuur 3.12). De maximale stijging van de stijghoogte als gevolg van het dichten van alle wellen is 0.31m. In de figuur is tevens duidelijk zichtbaar dat de modelrand in het noorden, oosten en westen te dicht bij ligt en invloed heeft op het berekende effect. Het uitstralingseffect in zuidelijke richting wordt niet gehinderd door randeffecten. Bij de bepaling van de uitstraling wordt dan ook alleen naar het zuidelijke gebied gekeken.

In zuidelijke richting wordt op 4000 tot 6500 meter een stijging van de stijghoogte van 1 centimeter berekend. Een toename van 5 centimeter vindt plaats op een kortere afstand, 2000-4000 meter. Door de grote concentratie aan wellen in het noordelijke deel is te verwachten dat hier de uitstraling groter zal zijn.

Als gevolg van het dichten van wellen treedt er dus 3.1 miljoen m<sup>3</sup>/jaar minder kwel op via de wellen. Door de stijging van de kweldruk in de omgeving neemt de diffuse kwel echter toe. In Polder de Noordplas neemt de diffuse kwel toe met 0.8 miljoen m<sup>3</sup>/jaar en buiten Polder de Noordplas neemt de kwel toe met 0.5 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. De totale toename van de diffuse kwel is dus 1.3 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. De totale afname van de infiltratie in de polder en er buiten is 0.7 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. Echter, door de dichtbij gelegen noordelijk modelrand is de randstroming toegenomen. De toename van de diffuse kwel of afname van de infiltratie wordt hierdoor iets onderschat.

Tabel 3.11 Regionale effecten (op stijghoogte WVP1) als gevolg van het dichten van een groot aantal wellen. Uitstralingseffect is de afstand vanaf de wellen tot waar nog een effect op de stijghoogte gemeten wordt.

	Polder	Max. effect op	Uitstralingseffect (m)	
		stijghoogte (m)	Effect op stijghoogte =1 cm	Effect op stijghoogte = 5 cm
		m	M	m
Scen.1	Noordplas	0.31	6500	4200
Scen.2	Middengebied	0.05	1200	0
Scen.3	Middengebied	0.16	3200	1500
Scen.4	Middengebied	0.27	5700	4300

Tabel 3.12 Regionale effecten (kwel-infiltratie) als gevolg van het dichten van een groot aantal wellen (Mm<sup>3</sup>/jaar=miljoen m<sup>3</sup>/jaar).

	Totale kwel in wellen		Totale diffuse kwel		Grootte polder hectaren	Toename diffuse kwel in polder Mm <sup>3</sup> /j	Totale Toename diffuse kwel Mm <sup>3</sup> /j	Totale afname infiltratie Mm <sup>3</sup> /j
	Mm <sup>3</sup> /j	mm/d	Mm <sup>3</sup> /j	mm/d				
Scen.1	3.1	0.20	9.6	0.61	4281	0.77	1.34	0.71
Scen.2	0.36	0.19	0.65	0.35	513	0.02	0.26	0.02
Scen.3	1.1	0.59	0.57	0.30	513	0.09	0.77	0.10
Scen.4	1.8	0.96	0.50	0.27	513	0.17	1.29	0.22

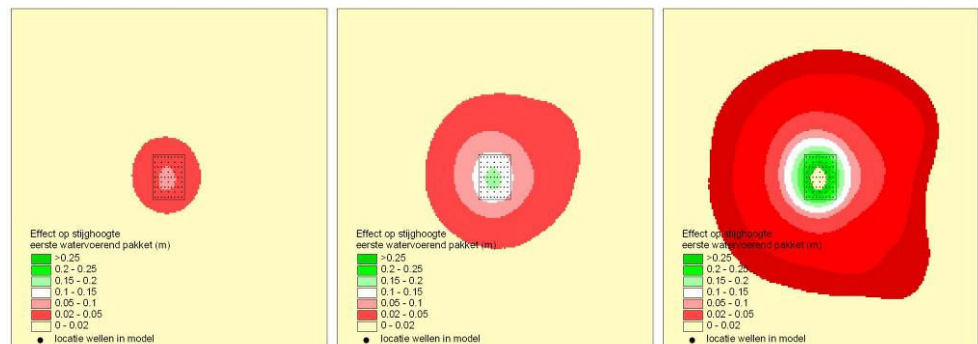
### Scenario 2: Wellen middengebied dichten

Om meer inzicht te krijgen in het regionale effect van het dichtens van wellen en randeffecten zoveel mogelijk uit te sluiten, zijn in het midden van het modelgebied fictieve wellen ingevoerd (zie figuren 3.11 en 3.13 voor de ligging van het middengebied).

Voor een gebied van 513 hectaren groot (ongeveer 13% van totale Noordplaspoppervlak) zijn 65 wellen ingevoerd met een individuele kwelintensiteit van 15 m<sup>3</sup>/dag (zie figuur 3.13). 15 m<sup>3</sup>/dag zijn realistische waarden voor individuele wellen die in het veld zijn gemeten (de grotere wellen). Het totale weldebiet van deze 65 wellen bedraagt 0.36 miljoen kuub per jaar. De concentratie aan wellen (totale welafvoer) in dit middengebied is even groot als de concentratie aan wellen in het Noordplasegebied.

Het effect op de stijghoogte als gevolg van het dichtens van de 65 fictieve wellen staat weergegeven in figuur 3.13. Het effect is veel kleiner omdat de totale hoeveelheid kwelwater dat via de wellen uittreedt kleiner is dan in Polder de Noordplas. Een derde en vierde scenario is uitgevoerd waarbij de intensiteit van de wellen respectievelijk drie en vijf keer zo groot is gemaakt (zie onder).

De afname van het weldebiet als gevolg van scenario 2 neemt af met 0.36 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. Maar de totale diffuse kwel neemt toe met 0.26 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. Echter, de diffuse kwel heeft veelal een lager zoutgehalte dan het welwater (zie zoutbelasting). De infiltratie neemt slechts in geringe mate af.



Figuur 3.13 Effect op de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket als gevolg van het dichtens van alle wellen in het middengebied (van links naar rechts: scenario 2,3 en 4)

### Scenario 3 en 4: Wellen middengebied met grote intensiteit dichtens

Voor dezelfde wellen als in scenario 2 wordt de kwelintensiteit vergroot van 15 naar 45 m<sup>3</sup>/d (scenario 3) en 75 m<sup>3</sup>/d (scenario 4). Het effect is daardoor velen malen groter. De maximale toename van de stijghoogte voor scenario 4 is 0.27m.

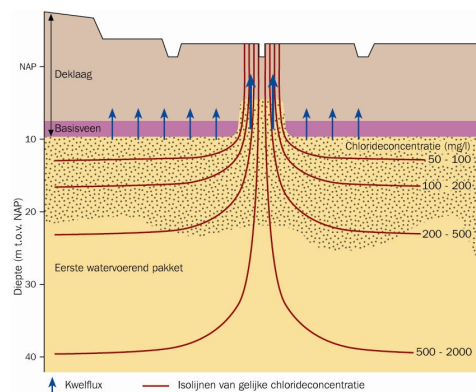
Als gevolg van scenario 3 neemt het totale weldebiet af met 1.1 miljoen m<sup>3</sup>/jaar terwijl de totale diffuse kwel toe neemt met ongeveer 0.8 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. De totale infiltratie neemt af met 0.1 miljoen m<sup>3</sup>/jaar.

Als gevolg van scenario 4 neemt het totale weldebiet af met 1.8 miljoen m<sup>3</sup>/jaar terwijl de totale diffuse kwel toe neemt met ongeveer 1.3 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. De totale infiltratie neemt af met 0.2 miljoen m<sup>3</sup>/jaar.

### Effecten op de zoutbelasting

Alle scenario's laten zien dat het dichtens van wellen een toename van de diffuse kwel tot gevolg heeft. Voor scenario 2, 3 en 4 is de effectiviteit in reductie van kwel slechts 27-30% (afname totale kwel ten opzichte van afname weldebiet).

Echter, over het algemeen heeft diffuse kwel een lager chloridegehalte dan het kwelwater in wellen. Door de grote flux in wellen wordt dieper en daardoor brakker, zouter grondwater aangetroffen met als gevolg een hoger zoutgehalte van het kwelwater (De Louw e.a., 2004). Dit is in het onderstaande figuurtje schematisch aangegeven.



Figuur 3.14 Het 'upconingseffect' rond wellen en zandbanen. Als gevolg van de grotere flux wordt dieper en daardoor brakker grondwater aangetrokken (De Louw e.a., 2004).

Per eenheid kwelwater is de zoutbelasting door wellen dan ook veel groter dan door diffuse kwel. Een reductie van het weldebiet heeft dan ook een veel groter reducerend effect op de zoutbelasting dan de afname van diffuse kwel.

Om effecten op de zoutbelasting aan het oppervlak in beeld te brengen zijn enkele eenvoudige berekeningen uitgevoerd. Daarbij zijn twee scenario's gehanteerd om een bandbreedte van de zoutbelasting te kunnen aangeven. Het eerste gaat uit van de meest realistische schatting van het chloridegehalte in wellen en van diffuse kwel, respectievelijk 2000 mg/l en 300 mg/l voor Polder de Noordplaspolder. Deze schatting is gebaseerd op het uitgebreide kwelonderzoek in Polder de Noordplaspolder. Het tweede scenario gaat uit van een minder groot verschil tussen de twee typen kwel, respectievelijk 1500 mg/l en 700 mg/l waardoor wellen een minder grote bijdrage hebben aan de zoutbelasting.

In tabel 3.13 en 3.14 staan de resultaten samengevat waarin te zien is dat ondanks de toename van de diffuse kwel, er een significante reductie is van de totale netto zoutbelasting. Voor scenario 3 bijvoorbeeld (realistische schatting zoutconcentraties, bovenste tabel) neemt de netto chloridebelasting in het gebied waar de wellen zijn gedicht af met 2170 ton/jaar. Buiten dit gebied neemt door de toename van de diffuse kwel de zoutbelasting slechts toe met 170 ton/jaar en dit resulteert in een netto afname van 2000 ton/jaar voor het gehele gebied.

Bij een lagere chlorideconcentratie voor wellen en een hogere concentratie voor diffuse kwel (tabel 3.14), wordt een kleiner effect op de zoutbelasting berekend. De bijdrage van de wellen aan de zoutbelasting is in deze situatie immers minder groot.

Tabel 3.13 Regionale effecten op chloridebelasting als gevolg van het dichten van een groot aantal wellen (ton chloride /jaar). Aanname: Cl wellen = 2000 mg/l; Cl-diffuus = 300 mg/l.

	Polder de Noordplas (scen. 1) of middengebied (scen. 2-4)							Totale gebied
	Cl-belasting (ton / jaar )			Toename/ afname Cl-belasting (ton / jaar )				Netto afname gehele gebied
	Wellen	Diffuse kwel	Totaal kwel	Wellen	Diffuse kwel	Netto afname	% van tot. Zout-belasting	Cl-belasting (ton / jaar )
Scen.1	6200	2900	9100	-6200	+230	-5970	66	-5800
Scen.2	700	200	900	-700	+10	-690	78	-600
Scen.3	2200	200	2400	-2200	+30	-2170	92	-2000
Scen.4	3600	200	3800	-3600	+50	-3550	95	-3200

Tabel 3.14 Regionale effecten op chloridebelasting als gevolg van het dichten van een groot aantal wellen (ton chloride /jaar). Aanname: Cl wellen = 1500 mg/l; Cl-diffuus = 700 mg/l.

	Polder de Noordplas (scen. 1) of middengebied (scen. 2-4)							Totale gebied
	Cl-belasting (ton / jaar )			Toename/ afname Cl-belasting (ton / jaar )				Netto afname gehele gebied
	Wellen	Diffuse kwel	Totaal kwel	Wellen	Diffuse kwel	Netto afname	% van tot. Zout-belasting	Cl-belasting (ton / jaar )
Scen.1	4700	6700	11400	-4700	+540	-4160	36	-3700
Scen.2	500	500	1000	-500	+20	-480	53	-360
Scen.3	1700	400	2100	-1700	+70	-1630	77	-1100
Scen.4	2700	400	3100	-2700	+120	-2580	85	-1800

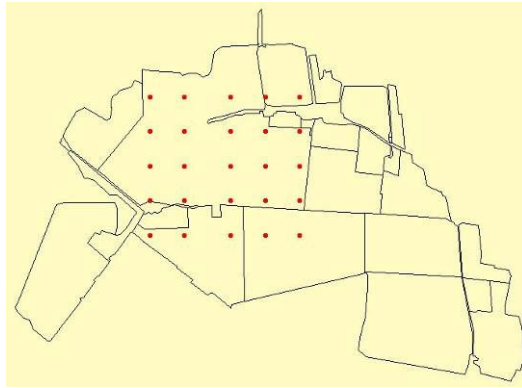
### 3.3.4 Effect van grondwateronttrekkingen en verzoeting door monobronnering

In de vorige paragraaf is het regionale effect van het dichten van wellen berekend met het Zuidplas-model. Met name bij het Noordplas-scenario (scenario 1) bleek de modelrand te dicht bij te liggen. Effecten als gevolg van grondwateronttrekkingen werken nog verder door zodat voor scenario's 4 tot en met 8 een nog groter modelgebied nodig was. Daarom is het grondwatermodel van de gehele provincie Zuid-Holland dat TNO in opdracht van de provincie heeft gemaakt (Minnema e.a., 2004) gebruikt voor het berekenen van de effecten.

In scenario 5 tot en met 7 wordt het effect berekend van het onttrekken van het brakke grondwater uit het eerste watervoerende pakket waarna het wordt geïnjecteerd in een dieper watervoerend pakket (WVP 2 of 3): het principe van verzoeting door monobronnering.

In scenario 8 wordt alleen grondwater uit het eerste watervoerende pakket onttrokken en dus niet geïnjecteerd. Het opgepompte grondwater kan gescheiden worden afgevoerd of worden ontzilt om de zoutbelasting van het oppervlaktewater tegen te gaan.

Voor de onttrekkingen en injectie worden 25 putten gebruikt, verspreid over een deel van Polder de Noordplas (zie figuur 3.15).



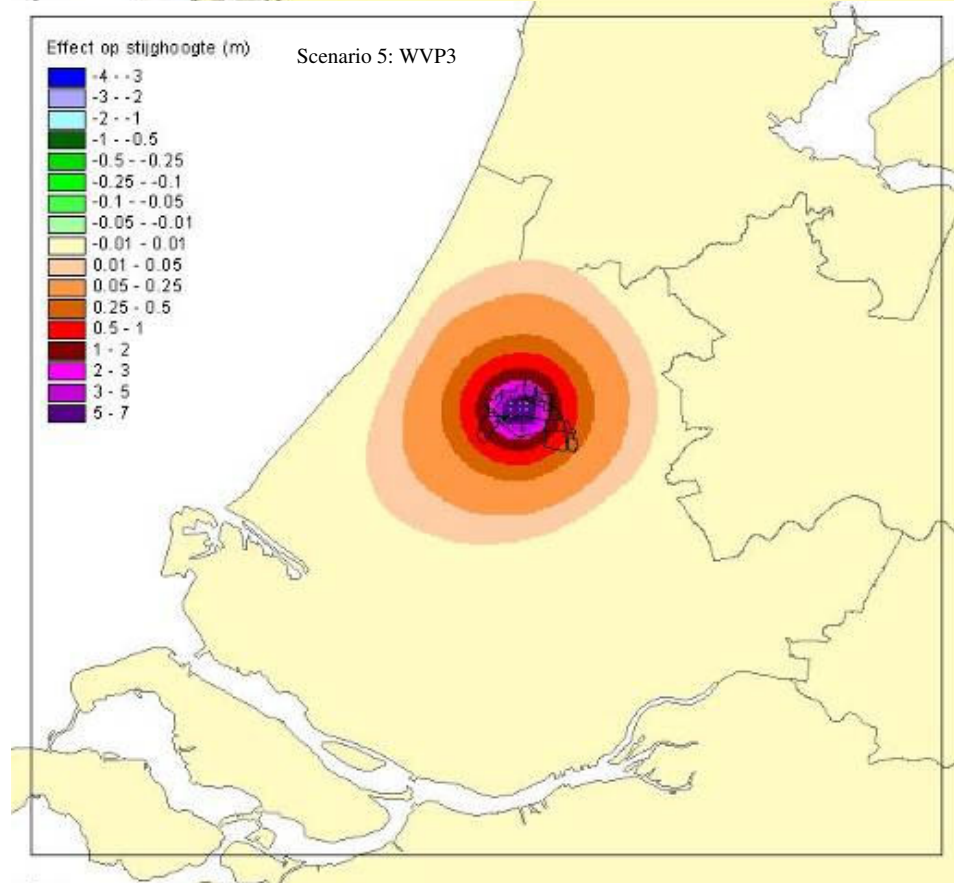
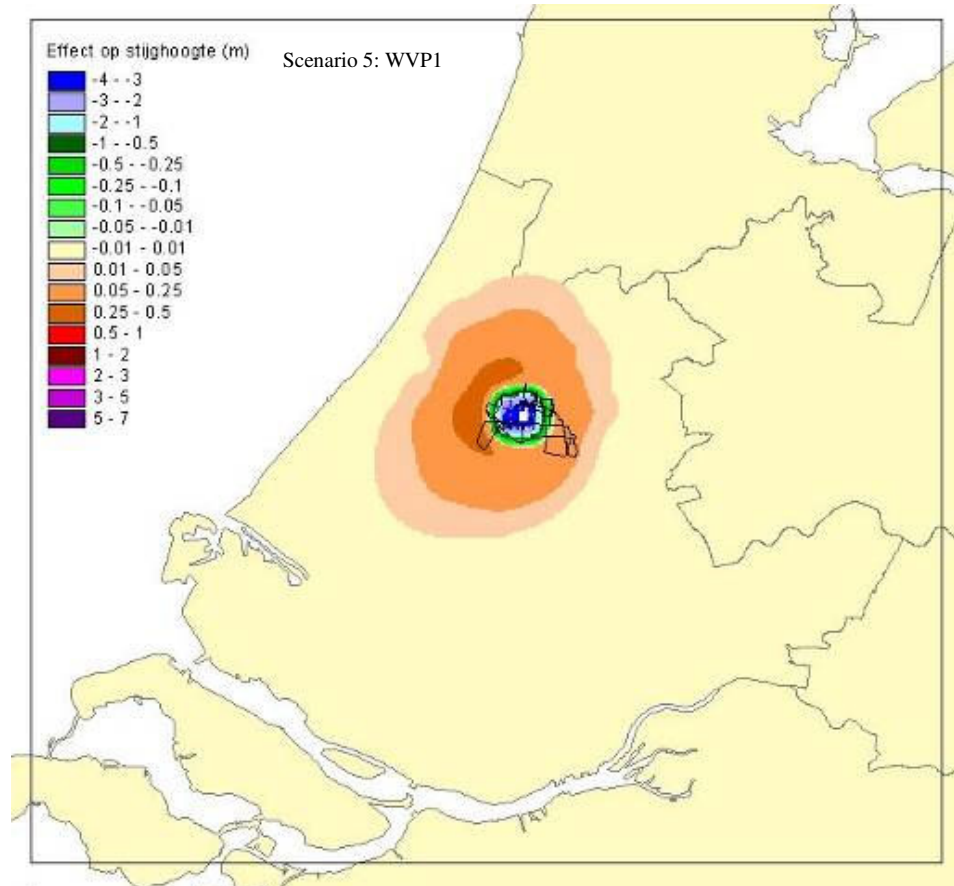
Figuur 3.15 De locatie van de 25 onttrekkings- en injectieputten

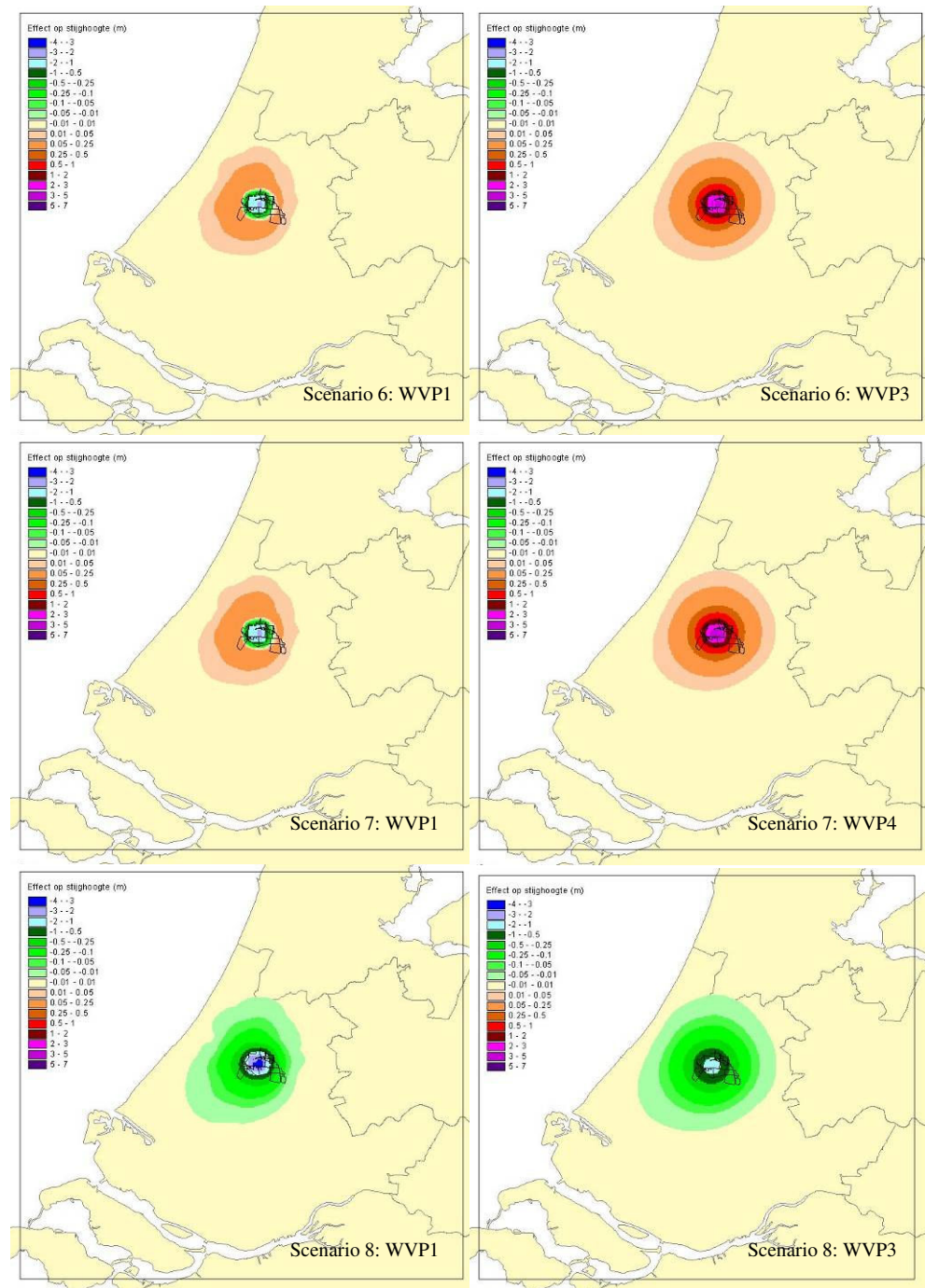
De volgende scenario's zijn doorgerekend:

- Scenario 4: onttrekking uit WVP1 van 50 miljoen m<sup>3</sup>/j en herinjectie WVP3;
- Scenario 5: onttrekking uit WVP1 van 25 miljoen m<sup>3</sup>/j en herinjectie WVP3;
- Scenario 6: onttrekking uit WVP1 van 25 miljoen m<sup>3</sup>/j en herinjectie WVP4;
- Scenario 7: onttrekking uit WVP1 van 25 miljoen m<sup>3</sup>/j en geen herinjectie.

Met WVP1 wordt het eerste watervoerende pakket bedoeld direct onder de deklaag. WVP3 het is derde watervoerende pakket onder de Formatie van Tegelen /Belfelt op ongeveer 100-130m diepte. WVP4 is het vierde en diepste watervoerende pakket op een diepte van 140-220m diepte.

In de onderstaande figuren staat het effect op de stijghoogte weergegeven voor de verschillende watervoerende pakketten.





Figuur 3.16 Het effect op de stijghoogte in de verschillende watervoerende pakketten als gevolg van scenario 5 t/m 8

Binnen het gebied waar grondwater onttrokken en geïnjecteerd wordt, neemt de stijghoogte significant af zoals verwacht mag worden. Het meest opvallende voor de drie monobronnering-scenario's is dat de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket buiten dat gebied toeneemt. Door injectie in het derde of vierde watervoerende pakket neemt de stijghoogte toe in de diepere pakketten en werkt dit effect sterk door naar het eerste watervoerende pakket. Het beïnvloede gebied is groot, tot op 7 km afstand neemt de kweldruk toe met 5 centimeter. Hierdoor neemt buiten het monobronneringsgebied de kwel toe en de infiltratie af.

Scenario 5 is een zeer ineffectief scenario. Met 50 miljoen m<sup>3</sup>/jaar grondwater dat onttrokken wordt, neemt de kwel in de polder met slechts 3 miljoen m<sup>3</sup>/jaar af en buiten de polder neemt de diffuse kwel toe met 2.7 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. Buiten de polder verandert 1956 hectaren van infiltratie naar kwelgebied.

Met het onttrekken van de helft (scenario 6 en 7), 25 miljoen m<sup>3</sup>/jaar is de effectiviteit groter. Er wordt 2.4 miljoen m<sup>3</sup>/jaar kwel in de polder weggevangen en buiten de polder neemt de kwel toe met 1.3 miljoen m<sup>3</sup>/jaar toe. In het totaal neemt de kwel dus 1.1 miljoen m<sup>3</sup>/jaar af, de infiltratie neemt in het totaal af met 0.9 miljoen m<sup>3</sup>/jaar.

Er is nauwelijks een verschil tussen het injecteren in het derde of het diepere vierde watervoerende pakket (scenario 6 versus scenario 7).

Met scenario 8 wordt alleen grondwater uit het eerste watervoerende pakket onttrokken en niet geherinjecteerd. Er is dan ook nergens sprake van een toename van de kwel. In Polder de Noordplas treedt 4.3 miljoen m<sup>3</sup>/jaar minder kwel uit en buiten de polder is dit zelfs 20.5 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. In het totaal verandert ruim 4400 hectaren van een kwel in een infiltratiegebied.

Tabel 3.15 Regionale effecten (op stijghoogte WVP1) als gevolg van monobronnering en grondwateronttrekkingen. Uitstralingseffect is de afstand vanaf de rand van de polder tot waar nog een effect op de stijghoogte gemeten wordt.

	Uitstralingseffect: Daling of stijging stijghoogte WVP1	Uitstralingseffect (m)	Uitstralingseffect (m)	Max. effect op stijghoogte (m)
		Effect op stijghoogte = 1 cm	Effect op stijghoogte = 5 cm	
		m	m	m
Scen.5	Stijging	13000	9500	-4.33
Scen.6	Stijging	13000	7000	-2.16
Scen. 7	Stijging	10500	7000	-2.22
Scen. 8	Daling	12500	7500	-3.37

Tabel 3.16 Regionale effecten (kwel-infiltratie) als gevolg van monobronnering en grondwateronttrekkingen. (Mm<sup>3</sup>/jaar=miljoen m<sup>3</sup>/jaar). Afname kwelgebied is gelijk aan toename infiltratiegebied en vice versa.

	Totale kwel in polder	Afname kwel in polder	Afname kwelgebied in polder	Toename /afname kwel buiten polder	Toename /afname kwelgebied buiten polder
	Mm <sup>3</sup> /j	Mm <sup>3</sup> /j	Ha	Mm <sup>3</sup> /j	Ha
Scen.5	8.1	-3.0	-1631 (39%)	2.7	1956
Scen.6	8.1	-2.4	-1056 (25%)	1.3	912
Scen. 7	8.1	-2.4	-1081 (26%)	1.3	931
Scen. 8	8.1	-4.3	-1838 (44%)	-20.5	-1618

Bij de modelresultaten dienen de volgende opmerkingen te worden gemaakt:

- Door injectie in het derde of vierde watervoerende pakket neemt verticale stroming van de diepe pakketten naar het eerste watervoerende pakket toe. Het diepere en dus zoutere grondwater stroomt versneld naar het ondiepe systeem. Hoe snel deze processen plaatsvinden is niet berekend.



- De afname van infiltratie als gevolg van monobronnering kan als positief worden ervaren. Minder oppervlaktewater verdwijnt naar het eerste watervoerende pakket en er hoeft dus minder water te worden ingelaten om bijvoorbeeld het peil in de veenweidegebieden te handhaven.
- Monobronnering is niet effectief in gebieden zoals Polder de Noordplas maar kan effectiever zijn naarmate de polder meer wordt omgeven door infiltratiegebieden.
- Een toename van infiltratie als gevolg van scenario 8, het alleen wegpompen van grondwater, kan als negatief worden ervaren omdat wegzijging vanuit het oppervlaktewater en freatisch grondwater toeneemt en er extra aanvoer van oppervlaktewater nodig is om dit te compenseren.
- Het verlagen van de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket kan leiden tot zettingsproblemen waardoor bodemdaling optreedt.
- Mogelijk ondergaat het grondwater een kwaliteitsverandering bij het terugpompen in een ander watervoerend pakket met een andere bodemsamenstelling, waar menging met een ander type grondwater optreedt en waar andere redox- en temperatuurcondities heersen.

### 3.3.5 *Effecten van peilmaatregelen*

Tijdens de Noordplasstudie is uitgebreid onderzoek gedaan naar de effecten van peilopzet op de water- en stoffenbalans van de polder. Het onderzoek bestond uit een uitgebreid monitoringprogramma, modelberekeningen met regionale (Zuidplas-grondwatermodel) en lokale grondwatermodellen en een peilexperiment waarvoor peilvak 25V gedurende een jaar het peil 0.5 meter is opgezet. De belangrijkste resultaten met betrekking tot peilopzet zijn in tabel 3.17 samengevat. Voor een uitgebreide bespreking van de resultaten wordt verwezen naar De Louw e.a. (2004).

Tijdens de Noordplasstudie zijn voor de volgende maatregelen de effecten op de water- en chloridebalans van de polder bepaald (zie tabel 3.17):

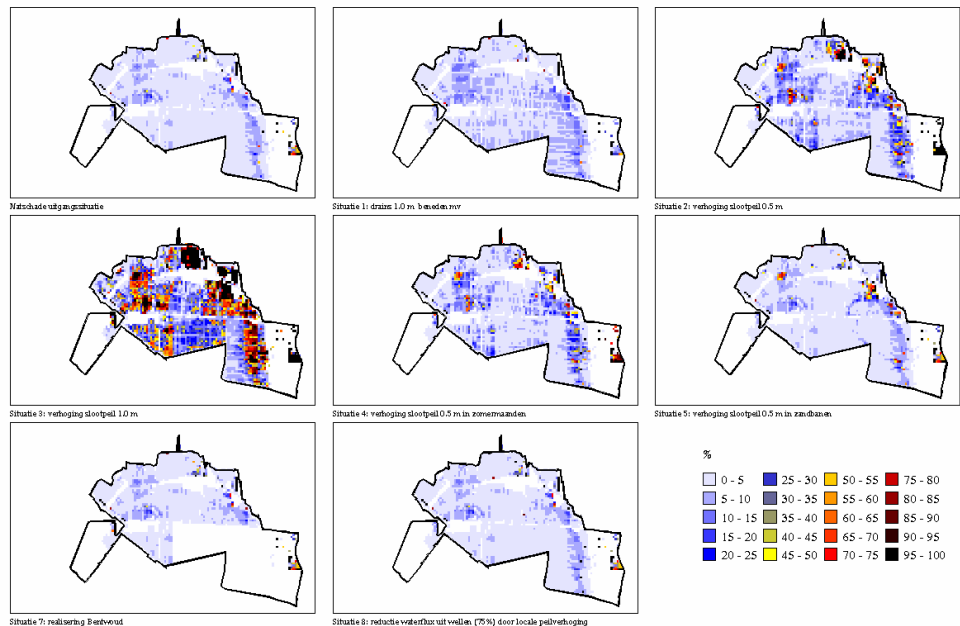
- 0) De huidige situatie (als referentie);
- 1) Verhoging van de drainagebuizen tot 1 meter beneden maaiveld;
- 2) Verhoging van het waterpeil met 0,5 meter in de gehele polder;
- 3) Verhoging van het waterpeil met 1,0 meter in de gehele polder;
- 4) Verhoging van het waterpeil met 0,5 meter in de gehele polder gedurende de zomermaanden;
- 5) Verhoging van het waterpeil met 0,5 meter in de zandbanen;
- 6) Huidige situatie, zonder inlaat van water;
- 7) Huidige situatie, plus de realisering van het Bentwoud;
- 8) 75% reductie welflux, als gevolg van lokale maatregelen.

Tabel 3.17 Berekende effecten op water- en chloridebalans van Polder de Noordplas als gevolg van verschillende scenario's

	Water uitgemaken	Chloride uitgemalen	Gem. cl-conc. oppervlaktewater
	miljoen m <sup>3</sup> /jaar	Ton/jaar	mg/l
0: referentie	35.4	12432	364
1: Drains 1m	34.8 (-2%)	11737 (-6%)	350 (-4%)
2: peilverhoging 0.5m	31.3 (-12%)	8313 (-33%)	277 (-24%)
3: peilverhoging 1.0m	27.0 (-24%)	4012 (-68%)	156 (-57%)
4: peilverhoging 0.5m in zomer	33.9 (-4%)	10621 (-15%)	327 (-10%)
5: peilverhoging 0.5m in zandbanen	33.0 (-7%)	9284 (-25%)	293 (-20%)
6: Inlaat stoppen	29.0 (-18%)	12173 (-2%)	454 (+25%)
7: +Bentwoud	32.8 (-7%)	9414 (-24%)	298 (-18%)
8: reductie weldebiet 75%	32.6 (-8%)	6419 (-48%)	206 (-43%)

In de huidige situatie wordt per jaar 35,4 miljoen kuub water en 12.432 ton chloride afgevoerd. De gemiddelde chlorideconcentratie van dit water is 364 mg per liter. Het opzetten van het peil met een halve meter in elke waterloop in de polder leidt tot een reductie van 33% in de chloridebelasting. Het opzetten van het peil met één meter leidt tot de grootste reductie, maar een dergelijke maatregel is met het huidige grondgebruik niet mogelijk. In een deel van de polder (708 ha) zal in de toekomst het peil wel daadwerkelijk met 1,20 m worden opgezet. Dit deel valt namelijk binnen het toekomstige Bentwoud, een recreatiebos dat zo'n 1.458 ha groot wordt. Door alleen uit te gaan van deze maatregel wordt al zo'n 24% van de chloridereductie gerealiseerd. Door de welflux met 75% te reduceren neemt de chloridebelasting met ongeveer de helft af. Door de afname van de welflux trekt de wel ook nog eens minder diep, chloriderijk grondwater aan. Dit positieve effect is echter niet meegenomen in de berekening. Daardoor wordt het effect van deze maatregel onderschat. Er dient te worden opgemerkt dat de effecten buiten de polder niet zijn meegenomen bij de Noordplasstudie.

Bij het beschouwen van de effecten van de verschillende peilmaatregelen dienen de onderstaande aspecten te worden meegenomen. Zo vermindert peilverhoging de waterbergingscapaciteit van een gebied. Om dit te compenseren dient extra open water te worden gegraven. Ook is het nodig om de beschoeiing van de waterlopen aan te passen om de stabiliteit van de oevers te garanderen. Daarnaast heeft peilverhoging een stijging van de grondwaterstand als gevolg. Landbouwgewassen kunnen daardoor natschade oplopen. In Figuur 3.17 is voor de verschillende scenario's de opbrengstderving in beeld gebracht. In de huidige situatie is de opbrengstderving klein omdat het gebied ontwaterd is met het oog op de landbouw. De grootste toename van de opbrengstderving laat de peilverhoging van 1m zien. Intensivering van het drainagesysteem kan die extra schade helpen voorkomen. Voor het Bentwoud-scenario is voor het zuidelijk deel geen opbrengstderving te zien omdat dit deel verandert van een landbouw naar een natuur-cultuur situatie. Per maatregel is een maatschappelijke kosten en baten analyse uitgevoerd om een beste afweging te maken in de strijd tegen de verzilting en eutrofiëring van het oppervlaktewater (Uran e.a., 2006).



Figuur 3.17 De berekende toename van de opbrengstderving als gevolg van de verschillende maatregelen

### 3.4 Opbarstingsrisico

#### Theorie

Opbarsten van de deklaag treedt op bij verticaal-evenwichtsverlies, dat wil zeggen zodra de waterdruk in het eerste watervoerende pakket onder de deklaag gelijk wordt aan het gewicht van het bovenliggende grondpakket. De korrelspanning op het scheidingsvlak is dan juist nul.

Het opbarstingsgevaar kan worden berekend met de volgende formule:

Opbarstingsindex op grensvlak  $i = y_g / y_w$

$Y_g$  = gewicht grondpakket (inclusief water) bovenop grensvlak  $i$  ( $\text{kN/m}^2$ )

$Y_w$  = waterdruk op grensvlak  $i$  ( $\text{kN/m}^2$ )

Op grensvlak  $i$ , de locatie waarvoor de opbarstingsindex wordt berekend, wordt het gewicht van het bovenliggende pakket, inclusief het water bepaald. In onderstaande tabel staat per grondsoort het volumiek gewicht weergegeven. Tevens wordt de waterdruk op deze locatie bepaald. Dit is de stijghoogte op grensvlak  $i$ , uitgedrukt ten opzichte van grensvlak  $i$ , vermenigvuldigd met het volumiek gewicht van water.

Theoretisch vindt er opbarsting plaats wanneer de opbarstingsindex kleiner wordt dan 1. Echter, omdat de opbouw van de ondergrond met bijbehorende gewichten nooit precies kan worden bepaald, wordt er een extra veiligheidsmarge ingebouwd en praat men over opbarstingsgevaar bij een index die kleiner is dan 1.1.

Tabel 3.18 Het verzadigd volumiek gewicht van verschillende grondsoorten (CUR)

Grondsoort	Verzadigd volumiek gewicht (kN/m <sup>3</sup> )
Lucht	0
Water	10
Veen	12
Klei	17
Zandige klei	18
Zand	20

### Berekeningen

Voor de drie geohydrologische situaties en de bijbehorende scenario-berekeningen, zijn opbarstingsberekeningen uitgevoerd. In tabel 3.19 staan de resultaten weergegeven.

Voor elke scenario is voor modellaag een stijghoogte berekend. De meest relevante stijghoogte voor de opbarstingsberekeningen is die onder de deklaag in het eerste watervoerende pakket of waar een zandbaan aanwezig, in de zandbaan.

De opbarstingsberekeningen zijn voor een aantal situaties doorgerekend (zie ook tabel).

De eerste drie kolommen geven het opbarstingsgevaar voor de gehele deklaag zonder sloot en twee situaties met een sloot, respectievelijk 1.5m en 2.5m diep.

De laatste twee kolommen geven aan wat er gebeurt wanneer de 2.5m diepe sloot met 0.30m wordt verdiept (kolom 4) of de stijghoogte met 0.30m wordt verhoogd (kolom 5).

Tabel 3.19 Opbarstingsindex voor de drie geohydrologische situaties (Noordplas zonder zandbaan: scenario 0-6; Noordplas met zandbaan 10-16; Nieuwkoop 20-26). Scenario 0, 10 en 20 staan voor de nul-situatie zonder maatregelen voor de desbetreffende geohydr. situatie.

	deklaag	sloot 1.5m diep	sloot 2.5m diep	sloot 2.8m diep	sloot 2.5m diep stijghoogte +0.3m
scenario 0	1.70	1.30	1.08	1.01	1.04
scenario 1	1.67	1.28	1.06	1.00	1.02
scenario 2	1.67	1.28	1.06	1.00	1.02
scenario 3	1.67	1.28	1.06	1.00	1.02
scenario 4	1.74	1.33	1.11	1.04	1.06
scenario 5	1.70	1.31	1.08	1.02	1.04
scenario 6	1.68	1.29	1.07	1.01	1.03
scenario regionaal	1.63	1.25	1.04	0.98	1.00
	deklaag	sloot 1.5m diep	sloot 2.5m diep	sloot 2.8m diep	sloot 2.5m diep stijghoogte +0.3m
scenario 10	1.81	1.16	0.79	0.68	0.74
scenario 11	1.76	1.13	0.77	0.66	0.72
scenario 12	1.76	1.13	0.77	0.66	0.72
scenario 13	1.76	1.13	0.77	0.66	0.72
scenario 14	1.84	1.18	0.80	0.69	0.75
scenario 15	1.82	1.17	0.80	0.68	0.75
scenario 16	1.78	1.14	0.78	0.67	0.73
scenario regionaal	1.70	1.09	0.74	0.64	0.70

	deklaag	sloot 1.5m diep	sloot 2.5m diep	sloot 2.8m diep	sloot 2.5m diep stijghoogte +0.3m
scenario 20	1.81	1.16	0.79	0.68	0.74
scenario 21	1.78	1.14	0.78	0.67	0.73
scenario 22	1.78	1.14	0.78	0.67	0.73
scenario 23	1.78	1.14	0.78	0.67	0.73
scenario 24	1.88	1.20	0.82	0.71	0.77
scenario 25	1.82	1.17	0.80	0.68	0.75
scenario 26	1.78	1.14	0.78	0.67	0.73
scenario 27	1.80	1.23	0.79	0.68	0.74

Voor alledrie de situaties is er geen opbarstingsgevaar voor de situatie zonder sloten. Wanneer sloten worden gegraven dan neemt het opbarstingsgevaar sterk af voor de situatie met zandbaan en Polder Nieuwkoop. Voor de situatie zonder zandbaan blijft de opbarstingsindex groter dan 1.

Er is nauwelijks verschil tussen de verschillende scenario's. Voor scenario 1,2,3 en 6 neemt de stijghoogte toe als gevolg van het dichten van wellen en peilopzet. Deze toename van de stijghoogte geeft slechts een beperkte toename van het opbarstrisico, namelijk ongeveer 2% voor de situatie met een 2.5m diepe sloot. Vanuit de regionale modelleringen is een maximale stijging van de stijghoogte van ongeveer 30 centimeter berekend. Het opbarstingsrisico neemt hierdoor iets meer toe, met ongeveer 4%. De scenario's 4 en 5 (monobronnering) laten een afname van het opbarstrisico zien als gevolg van de afname van de stijghoogte door de grondwateronttrekking

De berekende toename van de stijghoogte/kweldruk als gevolg van het dichten van wellen heeft een beperkt invloed op het opbarstrisico. Het opbarstingsgevaar neemt wel toe maar minimaal. Dit kan in werkelijkheid uiteraard net genoeg zijn om de deklaag te doen opbarsten. Echter, de kans op migratie van wellen als gevolg van het dichten van wellen (mits goed vanaf de onderkant van de deklaag gedicht) is daarmee klein te noemen.

Het iets uitdiepen van een sloot heeft veel meer invloed zoals in de tabel is te zien. Vanuit de uitgangssituatie met een 2.5m diepe sloot wordt de sloot met 0.30cm verdiept naar 2.8m diepte (4<sup>e</sup> kolom). Wanneer dit wordt vergeleken met een stijghoogtetoename van 0.30m is in de tabel te zien dat het verdiepen van de sloot een ongeveer twee keer zo groot effect heeft.

Een zeer effectieve maatregel om het opbarstgevaar te verkleinen, is het verondiepen van sloten. Bij aanleg van nieuwe sloten zou zeer ernstig moeten worden overwogen om de sloten zo ondiep mogelijk aan te leggen. Dit verkleint de toename van het opbarstrisico aanzienlijk.



## 4 Bespreking en discussie kwelreductietechnieken

### 4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de verschillende kwelreductietechnieken besproken waarbij de volgende aspecten aan de orde komen:

- Beschrijving methodiek;
- Ervaring met de techniek;
- Effectiviteit;
- Milieuhygiënische en andere neveneffecten;
- Duurzaamheid;
- Kosten.

Er zijn verschillende interviews afgenomen om een beter beeld te krijgen van de verschillende kwelreductietechnieken. De meeste interviews zijn gehouden bij bedrijven en onderzoeksinstituten die wellen dichten met injectietechnieken. Daarnaast zijn waterschappen benaderd om naar hun ervaringen te vragen wat betreft het optreden van brakke-zoute kwel en het nemen van maatregelen daartegen.

Tevens is literatuur en internet geraadpleegd voor meer informatie omtrent de kwelreductietechnieken. Daarnaast zijn verschillende modelberekeningen uitgevoerd waarbij effecten in beeld zijn gebracht. Deze zijn beschreven in het vorige hoofdstuk.

De bovengenoemde informatie is gebruikt voor de beschrijving en discussie van de verschillende kwelreductietechnieken. Er worden drie groepen van kwelreductietechnieken onderscheiden:

- 1) Peilopzet;
- 2) Dichten van wellen;
- 3) Kwelwater opvangen of wegpompen en afvoeren.

Ad 3. Voor het afvoeren van het brakke kwelwater worden drie mogelijkheden besproken.

1. Verzoeting door monobronnering (injectie in tweede of dieper watervoerend pakket);
2. Brak kwelwater gescheiden afvoeren;
3. Ontzilting van het brakke kwelwater.

### 4.2 Peilopzet

#### Algemene beschrijving methodiek

Het verhogen van het polderpeil verkleint het stijghoogteverschil met het eerste watervoerende pakket en daarmee de kwelintensiteit. Een peilverhoging kan eenvoudig worden gerealiseerd met behulp van stuwtdjes.

#### Ervaring met de techniek

De waterschappen voeren al jarenlang peilbeheer in de polders voor een optimale waterhuishoudkundige situatie. Peilverhogingen worden voornamelijk toegepast om bodemdaling tegen te gaan (veenweidegebieden) of om natuur te vernatten. Pas recentelijk worden peilen verhoogd om verzilting door kwel te reduceren. Tijdens de

Noordplasstudie heeft een peilexperiment plaatsgevonden ter reductie van de brakke kwel waarbij de effecten zijn gemeten.

#### Effectiviteit

De effectiviteit van peilverhogingen hangt sterk af van de mate waarin het peil wordt verhoogd en de heersende kweldruk. Hoe groter het stijghoogteverschil (verschil polderpeil en stijghoogte eerste watervoerende pakket) hoe kleiner de kwelreductie als gevolg van een bepaalde peilverhoging.

Bijvoorbeeld in Polder de Noordplas is het gemiddelde stijghoogteverschil 1.5m. Een peilverhoging van 0.5m reduceert dit stijghoogteverschil maar met 33% en de kwelreductie daarmee ook ongeveer 33%. Voor een groot deel van Polder de Noordplas is het waterschap volgens het nieuwe peilbesluit van plan het polderpeil met 0.3m te verhogen. Ter reductie van de kwel zal dit een steentje bijdragen maar grote effecten kunnen niet worden verwacht, 0.3m is namelijk maar slechts 20% van het heersende stijghoogteverschil. In de Haarlemmermeerpolder komen gebieden voor met een stijghoogteverschil van 3.0m waar een peilverhoging van 0.5m slechts 16% effectief is. In Polder Nieuwkoop is het gemiddelde stijghoogteverschil 0.6m waar de reductie van de kwel door een peilverhoging van 0.5m zeer effectief is. Echter, de droogleggingen in Polder Nieuwkoop zijn erg klein zodat er nauwelijks ruimte is om het peil met een 0.5m te verhogen.

De effectiviteit van peilverhogingen is het grootst in gebieden met de grootste kwelfluxen door een lage weerstand van de deklaag. Bijvoorbeeld op locaties met zandbanen in de ondergrond en op locaties met een grote concentratie aan wellen.

De effectiviteit hangt ook sterk af van het aantal drainagebuizen, sloten en watergangen die worden beïnvloed door de peilverhoging. Wanneer alleen in de hoofdwatgang het peil wordt opgezet en de overige 80% van de sloten blijven onbeïnvloed dan is de maatregel weinig effectief. Dit was onder andere het geval bij het peilexperiment tijdens de Noordplasstudie.

Als drainagebuizen niet worden beïnvloed door de peilmaatregel dan zal de grondwaterstand niet significant stijgen als gevolg van de peilverhoging. Er vindt dan alleen reductie van de kwel in de sloot plaats en niet van de kwel die in het perceel via drains uittreedt.

#### Milieuhygiënische en andere neveneffecten

Peilverhogingen leiden tot hogere grondwaterstanden. Dit kan een probleem zijn voor de landbouw die meer natschade ervaart of bebouwing waar de kans op natschade kan toenemen. Vernatting kan ook leiden tot een andere oppervlaktewaterkwaliteit. Een groter deel van de ondiepe bodem raakt verzadigd waardoor zware metalen en fosfaat mobieler worden en denitrificatie toeneemt.

De peilverhogingen hebben een toename van de kweldruk in de omgeving tot gevolg waardoor de kwel toeneemt of de infiltratie afneemt.

Peilverhoging is gunstig in gebieden waar bodemdaling door veenoxidatie optreedt en waar natuurontwikkeling gewenst is. Een goed voorbeeld is de realisatie van het Bentwoud in het zuidelijke deel van Polder de Noordplas, een recreatiebos. Peilen gaan significant omhoog (0.5 tot 1.2 meter) met een gunstig effect op de verziltingsreductie. Een belangrijk ander neveneffect is de vermindering van de bergingscapaciteit dat tot meer wateroverlast kan leiden in natte perioden.



### Duurzaamheid

Peilverhoging is net zo duurzaam als het huidige peilbeheer. Met stuwen kan eenvoudig het peil worden gehandhaafd. Mogelijk dat er meer inlaatwater in de zomer nodig is om het peil te kunnen handhaven. Voor het doorspoelen is juist weer minder inlaatwater nodig.

### Kosten

Voor de beoogde peilverhogingen in Polder de Noordplas is een zeer uitgebreide maatschappelijke kosten en baten analyse uitgevoerd (Uran e.a., 2006). Een samenvatting van de belangrijkste conclusies wordt hieronder gegeven.

Er zijn twee peilvarianten beschouwd:

1. Peilopzet: tot de droogleggingsnorm worden peilen opgezet;
2. Extra Peilopzet: peilverhoging tot norm gedraineerd bouwland en niet-gedraineerd grasland.

Bij peilverhoging spelen inrichtingskosten een belangrijke rol die vooral bestaan uit het leggen van tussendrainen om natschade in de landbouw te voorkomen en het vervangen van beschoeiing. Door de verminderde bergingscapaciteit moet meer berging worden gerealiseerd. De globale inrichtingskosten bedragen 2.2 miljoen Euro voor de variant 'peilopzet' en 7.2 miljoen Euro voor de variant 'extra peilopzet'.

Baten zijn er vooral voor de polder zelf en niet voor de boezem. Deze baten bestaan uit een hogere gewasopbrengst en een mogelijke omschakeling op meer winstgevende teelten zoals boomteelt. Een zeer globale schatting van de totale baten geeft voor de variant 'peilopzet' 2.2 miljoen Euro en 3.0 miljoen Euro voor de variant 'extra peilopzet'.

Uit de MKBA concludeert het Hoogheemraadschap van Rijnland dat bij de variant 'peilopzet' de kosten ongeveer gelijk zijn aan de baten. Bij 'extra peilopzet' zijn de kosten beduidend hoger. Echter, bij de MKBA is de toename van de brakke kwel buiten de polder als gevolg van de peilverhogingen in Polder de Noordplas niet meegenomen. De modelberekeningen (zie hoofdstuk 3) laten zien dat dit een belangrijk, niet te verwaarlozen effect is.

## **4.3 Wellen dichten**

Wellen dragen volgens De Louw e.a. (2004) voor ongeveer 60% bij aan de verzilting van het oppervlaktewater. Het lijkt dus erg effectief om de bijdrage van wellen te verminderen. Dit kan bijvoorbeeld door peilopzet ter hoogte van de wellen (zie vorige paragraaf) of het welwater opvangen en afvoeren, ontzilten of herinjecteren (zie volgende paragraaf) of wellen kunnen worden gedicht (deze paragraaf).

Het dichten van wellen wordt uitgevoerd door injectie van een vloeistof onder de deklaag ter hoogte van de wel. Bij de bespreking wordt onderscheid gemaakt in:

- Uithardende of expanderende injectievloeistoffen;
- Biosealing: injectie van voedingsstoffen ter stimulatie van de groei van bacteriën die processen in gang zetten waardoor verstopping optreedt.

Er zijn verschillende bedrijven die wellen in de praktijk dichten zoals bijvoorbeeld B&W Vochtwering, B&P Bodeminjectie, BAM-De Ruiters Boringen en Bemalingen. Geodelft heeft het principe van Biosealing ontwikkeld. De beschrijving van de methoden is met name gebaseerd op interviews van deze en enkele andere bedrijven en onderzoeksinstituten.

## Algemene beschrijving methodiek

### *Diepte van injectie*

Het is van belang dat het dichten aan de onderkant van de wel plaatsvindt, meestal aan de onderkant van de deklaag in het eerste watervoerende pakket of in een zandbaan. Het zwakste punt zit namelijk onder in de deklaag. In het verleden is getracht wellen vanaf het maaiveld te dichten, waardoor vaak nieuwe wellen (lees uitstroomgaten van de hoofdwel) in de directe omgeving ontstonden. In de huidige praktijk worden de wellen vanaf de onderkant van de wel gedicht, zoals uit de interviews is gebleken.

### *Opbouw deklaag*

Sommige bedrijven zetten eerst een sondering om de opbouw van de deklaag in beeld te brengen waardoor de positie van de spuitlans beter kan worden vastgesteld. Inzicht in de opbouw van de deklaag ter plaatse van de wel is belangrijk. Soms kunnen bestaande boringen uit bijvoorbeeld de DINO-database voldoende informatie verschaffen en soms zal er een extra boring of sondering moeten plaatsvinden.

### *Lokaliseren wel*

Alle geïnterviewde bedrijven hebben detectiemethoden tot hun beschikking om de lekkage/wel te lokaliseren. De methoden zijn er op gericht om de stroomsnelheid van het injectiepunt tot de wel (punt waar het water in de wel uittreedt) te bepalen waarmee de reactiesnelheid van de injectievloeistof kan worden vastgesteld (reactiesnelheid tot uitharding, expansie, verstopping). Bij de meeste injectievloeistoffen kan deze reactiesnelheid worden ingesteld.

Er zijn verschillende detectiemethoden beschikbaar:

- 1) Kleurstof-tracerproeven;
- 2) Warmte tracer-proeven;
- 3) ECR-EFT-metingen (Texplor-methode).

Ad 1. Met kleurstof-tracerproeven wordt een kleurstof via de injectielans in de bodem gebracht en er wordt bepaald wanneer de kleurstof via de wel weer uittreedt. Deze methode wordt het meeste toegepast.

Ad 2. B&P Bodeminjectie injecteert warm water en monitort met een warmte-detector waar en wanneer het warme water weer uittreedt. Met deze methode is het ook mogelijk de hoeveelheid warm water dat uittreedt te bepalen.

Ad 3. ECR staat voor Electrical Chemical Response waarbij gebruik wordt gemaakt van stromingspotentialen die ontstaan door het stromen van water door poreuze media. Bij lekken en wellen wordt daardoor een grotere potentiaal gemeten. EFT staat voor Electrical Flux Tracking die gebaseerd is op het principe dat stroom altijd de weg van de minste weerstand tussen twee elektroden zoekt. Deze geofysische methoden worden al geruime tijd ingezet en zijn verder ontwikkeld door het Duitse Texplor GmbH.

### *Injectievloeistoffen*

Er zijn verschillende uithardende en expanderende injectievloeistoffen voor het dichten van wellen beschikbaar, onder te verdelen in:

- A) Expanderende polyethaan;
- B) Uithardende gels;
- C) Bentoniet/ Dammer.

Ad. A: De reactiesnelheid van deze injectievloeistof is traag (ongeveer 1.5 min.) en bij hoge stroomsnelheden komt er veel injectievloeistof buiten de lekkage terecht. De niet uitgeharde vloeistof is milieubelastend.

Ad. B: Er zijn verschillende typen gels beschikbaar waarmee de reactiesnelheid kan worden afgesteld, variërend van minder dan 1 seconden tot langer dan 1 dag. De meeste gels zijn na uitharding niet milieubelastend. Volgens een bodeminjectiebedrijf zijn er echter duurere gels beschikbaar die beter voor het milieu zijn.

Ad. C: Dammer is een mengsel van klei-cement-kalk dat bij contact met water uithard. Het mengsel vult holle ruimtes. Bentoniet zijn kleikorrels die zwellen bij contact met water.

Sommige bedrijven hebben alle drie de typen injectievloeistoffen in hun pakket zitten en kiezen de vloeistof die het beste past bij de aangetroffen situatie.

### *Biosealing*

Biosealing is een proces waarbij voedingsstoffen (melasse, stroopachtig) in de bodem worden geïnjecteerd waardoor bacteriën gaan groeien die chemische, biologische en mechanische processen in gang zetten. De opeenhoping van chemische verbindingen zoals o.a. ijzersulfiden, Al-verbindingen maar ook kleimineralen zorgen voor verstopping en reduceren de doorlatendheid.

### *Praktische uitvoering*

De spuitlans wordt door de deklaag (of andere slechtdoorlatende laag) gedrukt tot de gewenste diepte en locatie is bereikt. Met een spuitlans wordt de injectievloeistof geïnjecteerd. De sterke stroming van het grondwater naar het lek c.q. wel zorgt ervoor dat de injectievloeistof op de juiste locatie terecht komt. Met behulp van detectiemethoden kan de reistijd worden bepaald en daarmee de gewenste reactietijd van de injectievloeistof.

De bodeminjectiebedrijven hebben aangegeven door te gaan met injecteren tot dat het lek c.q. de wel zichtbaar is gestopt met afvoeren. Dit kan worden gecontroleerd middels de verschillende detectietechnieken. Dit kan binnen een uur zijn maar er zijn voorbeelden van injectietijden van enkele dagen.

### *Praktische uitvoering Biosealing*

De voedingsstoffen worden onder de slechtdoorlatende laag waar het lek zit geïnjecteerd. De stroming naar het lek zorgt ervoor dat de voedingsstoffen op de juiste plek komen. Belangrijk is hierbij om een goed beeld te hebben van waar het lek precies zit en wat de reistijden naar het lek zijn.

De reactietijd van de injectievloeistof, dat wil zeggen de tijd dat verstopping gaat plaatsvinden, is ongeveer 1 dag. Het is daarom van belang dat de injectie plaatsvindt op 1 á 2 dagen reistijd van het grondwater naar het lek. Na 1 dag tot 2 weken is de verstopping meetbaar. Dit betekent dat de injectie gedurende ongeveer 2 weken (of langer) dient plaats te vinden voor het uiteindelijk gewenste resultaat.

### Ervaring met de techniek

Met bodeminjectie met uithardende of expanderende vloeistoffen is veel ervaring opgedaan in bouwputten. Het komt regelmatig voor dat er een lek in een bouwput ontstaat die moet worden gedicht om de bouwwerkzaamheden te kunnen voortzetten. Meestal zijn de lekken c.q. wellen die in een bouwput ontstaan goed zichtbaar.

Met het dichten van wellen in het landelijke gebied is veel ervaring opgedaan in de Haarlemmermeerpolder. Het betreffen voornamelijk wellen die zijn ontstaan bij het

plaatsen van kunstwerken, aan te leggen infrastructuur (bijv. HSL) of het trekken van peilfilters. Met het dichten van natuurlijke wellen is veel minder ervaring opgedaan. Een enkel bodeminjectiebedrijf zegt dagelijks wellen met succes te dichten.

Met Biosealing is minder praktische ervaring opgedaan. Twee voorbeelden zijn hierover bekend: een veldexperiment met containers op de Maasvlakte en het dichten van een lek bij het HSL-aquaduct hebben aangetoond dat de methode werkt. Daarnaast zijn een groot aantal kolomproeven uitgevoerd op basis waarvan de methodiek verder is ontwikkeld. Ook de kolomproeven toonde de werking van het concept aan.

#### Effectiviteit

De effectiviteit van het dichten van wellen met behulp van bodeminjectietechnieken is groot. Sommige bedrijfjes zeggen alle wellen en lekken te dichten, men gaat door met injecteren (eventueel andere locatie) totdat het lek is gedicht. Andere noemen dat in 90% van de gevallen de wellen worden gedicht.

Migratie van wellen vindt volgens de geïnterviewden nooit plaats. Echter, er is bijna nooit nacontrole dus dit punt is discutabel.

De effectiviteit van Biosealing is middels kolomproeven en twee praktische uitvoeringen in het veld aangetoond. Echter, gezien de geringe veldervaringen wordt gepleit voor het uitvoeren van een veldproef rondom een wel.

Wellen komen veel voor in zandbanen. Uit het veldonderzoek blijkt dat de wellen in zandbanen aan de basis veel breder kunnen zijn dan de uitstroomgaten doen vermoeden (bijv. wel 1 in Polder de Noordplas). Bij het dichten van een wel bestaat dan de kans dat alleen de uitstroomgaten worden gedicht en dat er ondiep in het profiel de basis van de wel blijft bestaan. De kans op het ontstaan van nieuwe wellen is dan vermoedelijk groter. Hierover is nog weinig bekend en er wordt aangeraden om hier tijdens een pilot-weldichting de nodige aandacht aan te besteden en dit goed in beeld brengen. De wel die in de Haarlemmermeerpolder is onderzocht, ligt in een brede, oude getijdegeul waar zand tot bovenin het profiel wordt aangetroffen. Het dichten van wellen in dit soort situaties is vermoedelijk nog moeilijker. Situaties waarin de wel in een deklaag van klei en veen zonder zandbaan heeft ontwikkeld, is het dichten waarschijnlijk makkelijker.

#### Milieuhygiënische en andere neveneffecten

Het dichten van wellen heeft nauwelijks een toename van het opbarstingsgevaar tot gevolg (zie hoofdstuk 3). De kans op migratie van wellen na dichten is daardoor klein. Het is wel van belang dat de wellen vanaf de onderkant worden gedicht.

Het dichten van wellen op een regionaal schaalniveau heeft een significante stijging van de stijghoogte tot gevolg in het gebied waar de wellen worden gedicht en in het gebied daarbuiten. Daardoor neemt de diffuse kwel toe en de infiltratie af. Door het hogere zoutgehalte in wellen ('upconing') in vergelijking tot diffuse kwel, leidt het dichten van wellen tot een significante reductie van de zoutbelasting.

De voedingstoffen die met Biosealing in de bodem worden geïnjecteerd, zijn natuurlijke stoffen en derhalve niet milieubelastend.

Wat betreft de andere injectievloeistoffen worden er altijd stoffen in de grond geïnjecteerd die van nature niet in de ondergrond thuis horen. Uit de interviews kwam naar voren dat er speciale (vaak duurder) milieuvriendelijke injectievloeistoffen bestaan. Dit betekent tevens dat er dus ook niet of minder milieuvriendelijke

injectievloeistoffen bestaan. Voordat bodeminjectie plaatsvindt, dient dit aspect goed bekend te zijn.

Eenmaal uitgehard zijn de injectievloeistoffen meestal niet meer milieubelastend. Voor expanderende polyethaan wordt aangegeven dat deze in niet uitgeharde vorm milieubelastend is.

#### Duurzaamheid

Over het algemeen zijn verschillende dichtingstechnieken nog niet lang geleden uitgevoerd waardoor feitelijk geen informatie beschikbaar is over de duurzaamheid. Desondanks kunnen de volgende opmerkingen over de duurzaamheid worden gemaakt. De uitgeharde vloeistoffen gaan een lange tijd mee maar mogelijk dat in de loop van tijd oplossing van het materiaal plaatsvindt. Volgens één van de geïnterviewde personen gaat men uit van een houdbaarheidsduur van 100 jaar.

De dichting die door Biosealing is veroorzaakt zijn chemische en mechanische verbindingen die bij blijvende redoxtoestand (anoxisch) in tact blijven. Verandering naar een zuurstofrijkere omgeving, bijvoorbeeld door infiltratie van zuurstofrijk grondwater, kunnen de verbindingen oplossen. Dit laatste is alleen mogelijk bij verandering in een infiltratiesituatie of bij injectie van ondiep grondwater (Koude Warmte Opslag).

#### Kosten

Navraag bij de verschillende bodeminjectiebedrijven leert dat de prijs sterk afhangt van de lokale omstandigheden en de wel. Elke wel is anders. Het dichten van wellen gebeurt dan ook altijd op basis van nacalculatie.

Voor het dichten van (grote) wellen door injectie van uithardende vloeistoffen in normale omstandigheden, lopen de bedragen uiteen van 1000 tot 6000 Euro. Deze kosten zijn ook mede afhankelijk van het type injectievloeistof en de hoeveelheid injectievloeistof. De prijs voor de uithardende gels lopen uiteen van 2 tot 4 Euro per liter en de benodigde hoeveelheid van 300 tot 2000 liter. Voor gecompliceerde wellen kunnen de kosten oplopen tot 35.000 Euro.

Uitgaande van een gemiddelde prijs van 2500 Euro per wel, kunnen de 200 grootste en meest verziltende wellen worden gedicht voor 0.5 miljoen Euro.

De kosten voor de benodigde voedingstoffen die bij Biosealing in de bodem worden geïnjecteerd, liggen veel lager dan de dure synthetische vloeistoffen. Echter, de injectieduur is veel langer (ongeveer 2 weken). Op dit moment dient de locatie nog elke dag te worden bezocht voor een visuele controle. Deze dagelijkse controle maakt de methode nog relatief duur. Echter, na verbetering van de techniek en vergroting van de ervaring is dit waarschijnlijk niet meer nodig en gaan de kosten omlaag.

#### **4.4 Kwelwater afvangen of oppompen en afvoeren**

Kwelwater kan uit het eerste watervoerende pakket worden weggepompt of worden afgevangen alvorens het oppervlaktewatersysteem wordt bereikt. Voor het afvoeren van het brakke kwelwater worden drie mogelijkheden besproken.

- Verzoeting door monobronnering (injectie in tweede of dieper watervoerend pakket);
- Brak kwelwater gescheiden afvoeren;
- Ontzilting van het brakke kwelwater.

#### 4.4.1 Verzoeting door monobronnering

##### Algemene beschrijving methodiek

If—technology heeft een het concept ‘Verzoeting met monobronnen’ bedacht om verzilting van polders te voorkomen. Het principe van monobronnen is dat het brakke grondwater uit het eerste watervoerende pakket (het grondwater dat in de polders kwelt) wordt opgepompt en op dezelfde locatie in het tweede watervoerende pakket of dieper wordt geïnjecteerd. Het zoute water bereikt dus het oppervlaktewater niet waardoor het niet hoeft worden uitgemalen.

##### Ervaring met techniek

De ervaring met de techniek monobronnering is veelvuldig opgedaan bij koude-warmte-opslag systemen. Monobronnering ter reducering van de brakke kwel is nog niet toegepast.

##### Effectiviteit monobronnering

In de diepe polders met brakke kwel is veelal een groot stijghoogteverschil aanwezig. De techniek kan alleen effectief zijn als dit stijghoogteverschil door de onttrekking wordt geminimaliseerd. Uit de modelberekeningen (paragraaf 3.3) blijkt dat hiervoor een veel grotere onttrekking nodig is dan de hoeveelheid kwel die in de polder uittreedt.

De methode is weinig effectief omdat buiten het bronneringsgebied (daar waar de onttrekkingen en herinjectie plaatsvinden), de kwel significant toeneemt (zie hieronder).

De methode wordt effectiever naar mate het kwelgebied meer wordt omgeven door infiltratiegebieden zodat niet de diffuse kwel in de omgeving toeneemt maar juist de infiltratie afneemt.

Ook neemt de effectiviteit toe als in alle diepe polders de methode wordt toegepast.

##### Milieuhygiënische en andere neveneffecten

De injectie van deze hoeveelheid in de diepere watervoerende pakketten heeft buiten het bronneringsgebied een significante stijging van de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket tot gevolg. Hierdoor neemt de kwel toe, neemt de infiltratie af en een deel van het gebied slaat om van infiltratie naar kwel. Een ander nadeel is dat door de injectie in de diepere pakketten, de stroming van het veel zoutere grondwater naar het oppervlak toeneemt.

De berekeningen voor Polder de Noordplas laten zien dat deze techniek voor gebieden zoals Polder de Noordplas niet effectief is. Zo laat het model zien dat er in het totaal 8.1 miljoen m<sup>3</sup> kwel per jaar in Polder de Noordplas uittreedt. Een grondwateronttrekking van 25 miljoen m<sup>3</sup>/jaar heeft in de polder een kwelreductie van 2.4 miljoen kuub per jaar tot gevolg. Buiten de polder neemt de kwel met 1.3 miljoen kuub toe.

De stijghoogteverlaging heeft mogelijk effect op de zetting van de ondergrond maar hoeveel is niet bekend.

Het is tevens niet bekend welke kwaliteitsverandering het grondwater ondergaat bij het terugpompen in een ander watervoerend pakket met een andere bodemsamenstelling, waar menging met een ander type grondwater optreedt en waar andere redox- en temperatuurcondities heersen.

### Duurzaamheid

Het monobronnensysteem zal altijd moeten blijven werken om de gewenste effecten te handhaven. Wat dat betreft is het gelijk aan een poldersysteem waar continu oppervlaktewater moet worden uitgemalen.

### Kosten

De aanlegkosten zijn relatief hoog. Voor één monobronstelsel moet al gauw aan 50.000 tot 100.000 Euro worden gedacht. Het is op dit moment niet te zeggen hoeveel systemen nodig zijn om het gewenste effect te bereiken. Daarnaast zijn er structurele kosten om het systeem draaiende te houden.

#### 4.4.2 *Brak kwelwater gescheiden afvoeren*

### Algemene beschrijving methodiek

Uit de vorige paragraaf en uit de modelberekeningen blijkt dat onevenredig grote hoeveelheden brak grondwater uit het eerste watervoerend pakket moeten worden opgepompt, wil het effectief zijn in het reduceren van brakke kwel. Wanneer gedacht wordt aan het gescheiden afvoeren van polderwater is het effectiever om het brakke kwelwater op de één of andere manier op te vangen in plaats van het op te pompen uit het eerste watervoerende pakket. Het zoete regenwater dient zoveel mogelijk van het brakke kwelwater te worden gescheiden. Er zijn verschillende methoden denkbaar:

1. Er kan worden gedacht aan een damwandconstructie in de grotere sloten waarbij het kwelwater in het midden van de sloot wordt verzameld en het perceelswater (regenwater dat op de percelen valt en dat o.a. via drains in de sloot terecht komt) aan de zijkanten van de sloot wordt verzameld.
2. Een tweede mogelijkheid is het plaatsen van een drainerende buis in het midden van de sloot, ongeveer 0.5m onder de slootbodem, waaruit licht onttrokken wordt.
3. Een grovere maar de meest praktische manier is het gemengde water dat in de sloten uittreedt op te vangen. Dit water bestaat dan uit zowel het brakke kwelwater als het lokale (door landbouw beïnvloede) grondwater.

Voor alle methoden geldt dat het water naar de rand van de polder moet worden vervoerd. De meest praktische oplossing hiervoor is gebruik te maken van bestaande of te graven sloten.

Het is het meest kosteneffectief om zich te beperken tot de sloten/regio's die de grootste bijdrage leveren aan de verzilting van de polder. Het is dan ook van groot belang dat er inzicht wordt verkregen in de ruimtelijke variabiliteit van de brakke kwel. Voor Polder de Noordplas is dit voor de grotere waterlopen en tochten in kaart gebracht door middel van een chloride-routing.

Uiteindelijk dient het (gescheiden) brakke water dat middels de verschillende methoden is verzameld, niet op de boezem te worden uitgeslagen want het was juist de bedoeling om de verzilting van het boezemsysteem te verminderen.

Er kan voor de verschillende polders worden gedacht aan transport via pijpleidingen richting de zee. Voor Polder de Noordplas zou dit brakke water kunnen worden uitgeslagen op de Oude Rijn, zoveel mogelijk westwaarts, richting de Noordzee. Voor de Haarlemmermeer biedt het Noordzeekanaal mogelijkheden, ook zoveel mogelijk westwaarts, richting de Noordzee. Het overige polderwater kan via de bestaande gemalen op de boezem worden geloosd.

Ervaring met techniek

Er zijn nauwelijks ervaringen met deze techniek opgedaan. Er bestaan echter wel (veelal oude) rioolleidingen die in de Noordzee uitkomen. Ook het opgepompte grondwater van DSM te Delft werd via een pijpleiding richting de Noordzee afgevoerd.

Effectiviteit

De effectiviteit hangt sterk af van (de ligging en grootte van) het gebied waar het kwelwater wordt afgevangen. Net als het voor peilopzet niet realistisch is om overal een peilverhoging van 1 meter door te voeren, is het niet realistisch om het kwelwater in de gehele polder af te vangen en gescheiden af te voeren.

Milieuhygiënische en andere neveneffecten

Er zijn geen negatieve milieuhygiënische of neveneffecten te verwachten.

Duurzaamheid

De pompen dienen altijd te draaien voor de afvoer van het brakke kwelwater. Controle en onderhoud aan het gescheiden afvoersysteem zal nodig.

Kosten

Voor Polder de Noordplas wordt een zeer globale inschatting van de kosten gegeven. In de onderstaande box staan de globale gegevens weergegeven op basis waarvan de kosten zijn berekend.

**Situatie/ gegevens**

Voor Polder de Noordplas treedt de meeste brakke kwel uit in het westen, noorden en oosten van de polder. Vanuit deze gebieden wordt het opgevangen kwelwater naar 2 locaties aan de rand van de polder geleid van waaruit het via pijpleidingen de polder wordt uitgemalen en richting de zee wordt afgevoerd via persleidingen.

Voor dit rekenvoorbeeld wordt er van uitgegaan dat er 5 miljoen kuub kwelwater per jaar (gemiddeld 570 kuub/uur) kan worden opgevangen en worden afgevoerd.

Persleiding 1: De persleiding gaat van het dorpje Bent (noordrand van Polder) via de kortste route naar de Oude Rijn. Totale lengte 3 km, 1 pomp en lozing op Oude Rijn.

Persleiding 2: De persleiding gaat vanaf de westzijde van Polder de Noordplas naar Katwijk. Totale lengte 27 km, 3 pompen met 1<sup>e</sup> en 2<sup>e</sup> booster pomp, lozing bij boezemgemaal Katwijk.

**Kosten**

De totale kosten voor persleiding 1 bedragen ongeveer 1 miljoen Euro (+/- 40%) en voor persleiding 2 ongeveer 9.0 miljoen Euro (+/-40%).

De totale aanlegkosten komen hiermee op 10 miljoen Euro (+/-40%).

De kosten zijn inclusief het transport in de polder naar de rand van de polder. Er wordt daarbij uitgegaan van transport van gemengd water (kwel + lokaal grondwater) en transport via sloten.

*4.4.3 Ontziltling van het brakke kwelwater*Algemene beschrijving methodiek

Voor een groot deel kan worden aangesloten bij het gescheiden afvoeren van kwelwater (gemengd met lokaal grondwater) alleen wordt het verzamelde water niet via pijpleidingen de polder uit vervoerd maar wordt het water gezuiverd.



Er zijn verschillende methoden beschikbaar voor het ontzilten/zuiveren van water. Een nieuwe en kansrijke zuiveringstechniek is MEMSTILL (ontwikkeld door TNO). Deze methode is op dit moment de goedkoopste met een groot rendement maar nog niet op grote schaal toegepast. Met MEMSTILL worden vrijwel alle ionen uit het water gehaald middels een combinatie membraan-destillatie techniek. Zowel het zout als de nutriënten maar ook zware metalen en bestrijdingsmiddelen worden met deze methode uit het water gehaald zodat een ionenarm water en een geconcentreerde vloeistof (brijn) overblijft. MEMSTILL maakt gebruik van restwarmte van aanwezige industrie waardoor de energiekosten beperkt kunnen blijven.

#### Ervaring met techniek

In Singapore draait een MEMSTILL-zuiveringsinstallatie en onlangs zijn proeven gedaan op de Maasvlakte. Het gaat nog om betrekkelijk kleine hoeveelheden (25-50 m<sup>3</sup>/dag). Er mag verwacht worden dat binnen 2-3 jaar grote hoeveelheden met deze techniek kunnen worden gezuiverd. Er is alleen nog ervaring opgedaan met het zuiveren van zeewater en niet met het zuiveren van brak kwelwater.

#### Effectiviteit

Van zeewater kan men 30-40% gezuiverd water maken en waardoor er dus 60-70% afvalproduct (brijn) overblijft. Een grotere 'recovery' kan worden behaald met water met lagere concentraties aan opgeloste stoffen, hoeveel is op dit moment nog niet bekend.

#### Milieuhygiënische en andere neveneffecten

Het grootste bezwaar is het restproduct, de brijn. Injectie van de brijn in diepere watervoerende pakketten is een mogelijkheid die op kleine schaal al veelvuldig in de provincie Zuid-Holland wordt toegepast. Echter, dit brengt bezwaren met zich mee en de provincie is voornemens deze brijninjectie zoveel mogelijk te beperken. Injectie van de brijn heeft een toename van de kwel in de omgeving tot gevolg. Zo lang de hoeveelheden van de geïnjecteerde vloeistof beperkt blijven, zal deze toename gering blijven.

Voor het gescheiden afvoeren van de brijn zal eenzelfde infrastructuur moeten worden aangelegd als voor het gescheiden afvoeren van brak kwelwater (zie vorige paragraaf), en is daarmee niet kosteneffectief. Bovendien hebben voorbeelden in het Middellandse Zeegebied aangetoond dat het lozen van brijn in de zee lokaal het vernietigen van een ecosysteem tot gevolg kan hebben.

#### Duurzaamheid

Het ontziltingsstelsel zal altijd moeten blijven werken om de gewenste effecten te handhaven. Wat dat betreft is het gelijk aan een poldersysteem waar continu oppervlaktewater moet worden uitgemalen.

#### Kosten

Voor het zuiveren van 5 miljoen m<sup>3</sup>/jaar gemengd kwel en lokaal grondwater m<sup>3</sup>/jaar bedragen de zuiveringskosten 0.4 Euro per m<sup>3</sup> waarmee de totale zuiveringskosten 2 miljoen Euro per jaar kosten. Echter, dit water zou verkocht kunnen worden aan landbouwers als giet- of beregeningswater.

Daarnaast zijn er kosten om het gemengde kwel- en lokaal grondwater op te vangen en te vervoeren naar de ontziltingsinstallaties.

#### 4.5 Discussie kwelreductietechnieken

Van de drie diepe polders die tijdens deze studie nader zijn bekeken, treedt er significante brakke kwel op in de Haarlemmermeerpolder en Polder de Noordplas met verzilting van het oppervlaktewater in de polder en de boezem tot gevolg. De kwel in Polder Nieuwkoop is zoet tot licht brak en van verzilting van het oppervlaktewater is nauwelijks sprake. De kwelreductietechnieken dienen dan ook voornamelijk te worden toegepast in Polder de Noordplas en de Haarlemmermeerpolder.

##### *Effectieve methoden*

Wellen hebben een grote bijdrage aan de verzilting van het oppervlaktewater en het is daarom ook het meest effectief om maatregelen te treffen die de bijdrage van wellen reduceert. Dit kan op drie manieren:

- 1) het dichten van wellen;
- 2) peilopzet in waterlopen met veel wellen;
- 3) welwater opvangen en gescheiden afvoeren, herinjecteren of zuiveren.

Een combinatie van de genoemde maatregelen is denkbaar, afhankelijk van de situatie is de ene methode effectiever of goedkoper dan de andere.

Wellen dichten is een relatief eenvoudige methode. Met het dichten van wellen die op 'natuurlijke' wijze zijn ontstaan (meestal in sloten) is minder ervaring opgedaan dan het dichten van wellen die ontstaan bij infrastructurele werken, trekken van peilfilters en in bouwputten. De 'natuurlijke' wellen hebben vaak een grilliger patroon, bestaande uit meerdere uitstroombaten.

De effectiviteit per wel is groot, op regionaal niveau hangt de effectiviteit sterk af van de hoeveelheid wellen die worden gedicht. Het is dan ook sterk aan te raden om te beginnen met de grootste en meest verziltende wellen.

Er zijn globaal twee dichtingsmethoden: injectie van uithardende en expanderende vloeistoffen en bioealing. Er wordt aanbevolen om voor beide methoden een pilot te starten om ervaring op te doen en waarbij de effecten intensief worden gemonitord.

Peilopzet draagt alleen significant bij wanneer het peil flink kan worden opgezet zodat het stijghoogteverschil met het eerste watervoerende pakket significant afneemt. Als vuistregel geldt, een reductie van het stijghoogteverschil met x% veroorzaakt een kwelreductie van ongeveer x%. Flinke peilopzet in sloten waar veel wellen voorkomen kan daarmee kosteneffectiever zijn dan het afzonderlijk dichten van alle wellen in de sloot.

Het opvangen van het brak kwelwater op locaties met de grootste verzilting en gescheiden afvoeren, herinjecteren of ontzilten is een derde kansrijke maatregel. Het is technisch mogelijk om het kwelwater gescheiden van het ondiepe door landbouw beïnvloede grondwater op te vangen. Echter, dit vergt (veelal ongewenste) complexe constructies zoals bijvoorbeeld damwanden in waterlopen. Eenvoudiger is het gemengd in de sloot verzamelen en middels pompen en pijpleidingen afvoeren.

Wanneer het water wordt ontzilt en wordt ontdaan van zijn nutriënten, kan het zoete water gebruikt worden voor landbouwdoeleinden of zelfs drinkwater. De brijn die overblijft na zuivering is op dit moment nog een op te lossen probleem. Injectie in het tweede watervoerende pakket stuit inmiddels op bezwaren.

Het gescheiden afvoeren van het brakke water dient te gebeuren met behulp van persleidingen naar een locatie waar het geloosd kan worden en dit is in alle gevallen niet de dichtstbijzijnde boezem. Voor Polder de Noordplas zou dit een totale lengte aan

pijpleiding van 30 kilometer betekenen met allerlei infrastructurele obstakels die dienen te worden overwonnen.

Het water zou ook kunnen worden geïnjecteerd in het tweede watervoerende pakket. Echter, gezien de oxische toestand van het (oppervlakte)water leidt injectie tot ongewenste redoreacties en kwaliteitsverandering. Bovendien laten de modelberekeningen zien dat injectie van grote hoeveelheden grondwater in het tweede of diepere watervoerende pakket (bijvoorbeeld 25 miljoen m<sup>3</sup>/jaar voor Noordplaspolder) een significante stijging van de kwel met zich meebrengt over een groot gebied (25-75 km<sup>2</sup>). En daarmee niet effectief is. Injectie van kleinere hoeveelheden water (opgevangen kwelwater of brijn) kan wel effectief zijn.

#### *Neveneffecten*

Bij het dichten van wellen neemt de stijghoogte 5 tot 35 centimeter toe waardoor het opbarstingsgevaar maximaal 5% groter wordt (situatie Haarlemmermeer en Polder de Noordplaspolder). Het risico op het ontstaan van wellen na het dichten is klein te noemen. Om het risico te verkleinen is het gunstig om de slootbodem in de sloot te verhogen met bijvoorbeeld 20 tot 30 centimeter. Het risico op het ontstaan van nieuwe wellen is groter voor situaties waaruit de ondergrond geheel uit zand bestaat.

De stijging van de kweldruk als het gevolg van het dichten van wellen heeft een toename van de diffuse kwel tot gevolg in kwelgebieden en een afname van de infiltratie.

Voor peilopzet geldt ongeveer dezelfde toename van de kweldruk en diffuse kwel. Het stijghoogteverschil neemt ter plaatse van de peilverhoging af door de stijging van het peil en toename van de grondwaterstand. Op deze locaties neemt het opbarstingsgevaar iets af. Buiten de freatische beïnvloeding van peilopzet neemt het opbarstingsgevaar evenals voor het dichten van wellen licht toe.

Het opvangen van kwelwater heeft geen invloed op het grondwatersysteem, de kwel buiten het gebied neemt niet toe en het opbarstingsgevaar neemt niet toe. Herinjectie van het opgevangen water of van de brijn heeft wel een toename van de kwel en het opbarstingsgevaar tot gevolg, afhankelijk van de hoeveelheid die wordt geïnjecteerd.

#### *Ineffectieve methoden*

Het onttrekken van grondwater uit het eerste watervoerende pakket (daar waar de kwel vandaan komt) om de kwel richting de polder te reduceren, is een niet effectieve methode. Om een bepaalde kwelreductie te realiseren dient er ongeveer 10 keer zoveel grondwater te worden onttrokken.

Herinjectie in diepere lagen van dit water (principe verzoeting door monobronnering) leidt tot een significante toename van de kwel buiten het onttrekkingsgebied (in de kwelgebieden). Alleen in polders die in zijn geheel of voor een groot deel omgeven zijn door infiltratiegebieden of als in alle diepe polders deze techniek wordt toegepast, kunnen deze neveneffecten positief uitwerken. Daarnaast is het niet bekend welke kwaliteitsverandering het grondwater ondergaat bij injectie.

Voor een kosteneffectieve zuivering van het opgepompte grondwater, is de hoeveelheid te groot. Daarnaast neemt het waterbezwaar van de polder toe terwijl er in deze tijden bergingscapaciteit moet worden gezocht en gecreëerd.

Door de flinke stijghoogteverlaging in het eerste watervoerende pakket kan er zetting optreden en kunnen gebieden verdrogen. Het opbarstingsgevaar neemt sterk af.

#### *Kosten*

Er is geen uitgebreide kosten-baten analyse uitgevoerd maar een zeer globale schatting van de kosten van de vier meest kansrijke methoden zijn voor Polder de Noordplaspolder

uitgewerkt en in onderstaande tabel samengevat.

Tabel 4.1 Globale kosten voor de vier meest kansrijke methoden om de brakke kwel te reduceren, uitgewerkt voor Polder de Noordplas

	Kosten (Euro)	Effectiviteit (verziltingsreductie in de polder)	Toename kwel buiten polder
Weldichting	0.5 miljoen	35%	Ja
Scenario 'Extra peilopzet'	7.2 miljoen	19%	Ja
Opvangen en gescheiden afvoeren	10 miljoen	35%	Nee
Opvangen en ontzilten	2 miljoen per jaar	35%	Minimaal

De kosten voor het dichten van wellen bedragen ongeveer 2500 Euro per wel. Wanneer wordt uitgegaan van het dichten van de 200 meest verziltende wellen, dan komen de totale kosten op 0.5 miljoen Euro. Er zijn geen structurele kosten.

Er wordt geschat dat met het dichten van de 200 meest verziltende wellen het mogelijk moet zijn om meer dan 60% van de bijdrage van de wellen aan de verzilting te reduceren. Uitgaande van het feit dat wellen voor meer dan 60% bijdragen aan de verzilting van de polder, dan komt de verziltingsreductie neer op ongeveer 35%.

Peilopzet is eenvoudig te realiseren door het plaatsen van een stuw. Wanneer wordt uitgegaan van het scenario 'Extra peilopzet' (MKBA van Polder de Noordplas) zijn er 7.2 miljoen aan kosten en 3 miljoen aan directe baten voor de polder.

De structurele kosten bestaan uit onderhoud aan stuwen en sloten.

In de MKBA is berekend dat het chloridegehalte van het uitgemalen polderwater (bij Palenstein) afneemt van gemiddeld 561 mg/l naar 472 mg/l, een verziltingsreductie van 19%.

Het kwelwater opvangen en gescheiden afvoeren, is een dure optie. De kosten om het water vanaf de rand van de polder via persleidingen naar de locatie te transporteren waar het kan worden geloosd, bedragen 10 miljoen Euro.

De structurele kosten bestaan uit onderhoud van de pijpleidingen en pompen en brandstofkosten.

Er wordt er van uitgegaan dat 5 miljoen m<sup>3</sup> water (gemengd) wordt opgevangen en gescheiden wordt afgevoerd. Ervan uitgaande dat daarvan ongeveer 2 miljoen m<sup>3</sup> welwater is, 1 miljoen m<sup>3</sup> diffuse kwelwater en 2 miljoen m<sup>3</sup> lokaal grondwater, dan wordt een verziltingsreductie gerealiseerd van ongeveer 35%.

Het kwelwater opvangen en ontzilten is een tevens een dure optie. De prijs voor het zuiveren van 1 m<sup>3</sup> grondwater bedraagt ongeveer 0.4 Euro. Hierin zitten de energiekosten en bouw van de zuiveringsinstallatie bij inbegrepen. Voor het zuiveren van 5 miljoen kuub per jaar komen de jaarlijkse kosten op 2 miljoen kuub per jaar. Het gezuiverde water kan echter worden verkocht waardoor de totale kosten omlaag gaan.

Een goede oplossing voor de verwerking van de brijn is nog niet voor handen.

Daarnaast zijn er kosten om het kwelwater op te vangen en naar de ontziltingsinstallaties te transporteren.

Er wordt er van uitgegaan dat er 5 miljoen m<sup>3</sup> water (gemengd) opgevangen ontzilt wordt. Uitgaande dat daarvan ongeveer 2 miljoen welwater, 1 miljoen diffuse kwelwater en 2 miljoen lokaal grondwater is, dan wordt een verziltingsreductie gerealiseerd van ongeveer 35%.

## 5 Conclusies en aanbevelingen

### Verzilting

Uit de Noordplasstudie is geconcludeerd dat wellen voor meer dan 60% bijdragen aan de huidige verzilting van het oppervlaktewater in Polder de Noordplas, de diffuse kwel draagt voor ongeveer 25% bij. Ook in de Haarlemmermeerpolder dragen de wellen significant bij aan de verzilting.

De grote bijdrage van wellen in deze diepe droogmakerijen wordt veroorzaakt door een combinatie van hoge kwelintensiteiten en hoge zoutgehaltes (900-6000 mg/l) als gevolg van 'upconing' van dieper en vaak zouter grondwater. Diffuse kwel heeft gemiddeld veel lagere zoutgehaltes.

Ten opzichte van de huidige situatie zal de verzilting tot 2050 met 30% toenemen als gevolg van het autonome proces van verzilting dat is gestart sinds het droogmaken van de polders. Dieper en zouter grondwater stroomt gestaag naar het oppervlak.

Om de huidige en autonome verzilting tegen te gaan wordt geadviseerd om maatregelen te treffen die de bijdrage van wellen reduceert. Polder Nieuwkoop kent veel wellen maar met een zoete samenstelling waardoor kweldreductie in deze polder, in tegenstelling tot Polder de Noordplas en de Haarlemmermeerpolder, niet zinvol is.

### Het dichten van wellen

Het dichten van wellen is de meest kansrijke en goedkoopste methode om de verzilting door brakke kwel te reduceren.

De effectiviteit van de methode per wel is groot, op regionaal niveau hangt de effectiviteit op de reductie van verzilting sterk af van de hoeveelheid wellen die worden gedicht. Eenmaal gedicht, levert een wel geen bijdrage meer aan de verzilting. Het is dan ook sterk aan te raden om te beginnen met de grootste en meest verziltende wellen. Een EC-routing van het oppervlaktewater is geschikt voor het opsporen van de grootste wellen.

Door de toename van de stijghoogte als gevolg van het dichten van wellen (maximaal 5 tot 35 centimeter) neemt het opbarstingsgevaar maximaal 5% toe en is de kans op het ontstaan van nieuwe wellen klein. De kans op het ontstaan van wellen ter hoogte van zandbanen is echter groter en dit bemoeilijkt waarschijnlijk het dichten van die wellen. Het opbarstingsgevaar kan zeer effectief worden verkleind door de slootbodembodem te verzwaren.

De toename van de stijghoogte heeft een significante toename van de diffuse kwel en verzilting in de omgeving tot gevolg. Echter, door het hogere zoutgehalte in wellen neemt de totale (netto) zoutbelasting over de gehele omgeving af.

Er zijn globaal twee dichtingsmethoden: injectie van uithardende vloeistoffen en biosealing. Beide methoden zijn kansrijk om op grote schaal toe te passen. Bij injectie van uithardende gels wordt geadviseerd een niet milieubelastende gel te gebruiken. Biosealing is per definitie niet milieubelastend.

Er is relatief veel ervaring opgedaan met het dichten van wellen in bouwputten, wellen ontstaan door het trekken van peilfilters of door infrastructurele werken. Er is weinig ervaring met het dichten van zogenaamde spontane, natuurlijke wellen (bijvoorbeeld bij het graven van een sloot). Deze wellen vertonen een grilliger patroon en zijn daardoor lastiger te dichten. Daarnaast bestaat het vermoeden dat wellen in zandbanen moeilijker te dichten zijn en dat de kans op het ontstaan van nieuwe wellen groter is.

Er wordt dan ook geadviseerd om twee weldichtings-pilots te starten om meer inzicht te krijgen in de daadwerkelijk effecten van weldichting:

- Wel dichten met (milieuvriendelijke) uithardende gels;
- Wel dichten met biosealing.

Wel 1 in de sloot bij het perceel van Dhr. Dorrepaal is een geschikte locatie voor de pilot 'biosealing' (voldoende ruimte voor injectieinstallatie en enthousiaste medewerking van de dhr. Dorrepaal).

Wel 3 in de waterloop die onder de Provinciale weg (N209) doorgaat is een geschikte locatie voor de pilot 'uithardende gel'. Deze locatie is goed te bereiken en de wel levert een grote bijdrage aan de verzilting.

Het is belangrijk om een uitgebreid monitoringprogramma op te zetten rond de pilots waarbij de stijghoogte, EC-welwater en oppervlaktewater, temperatuurprofielen in en rond de wel en welafvoer worden gemeten. Het is wenselijk om zo spoedig mogelijk met monitoring te beginnen zodat voldoende metingen in de onbeïnvloede situatie worden uitgevoerd en ook de monitoring na weldichting voort te zetten.

### **Overige kwelreductietechnieken**

#### *Matig kansrijk*

##### Peilopzet

Peilopzet draagt alleen significant bij wanneer het peil flink kan worden opgezet zodat het stijghoogteverschil met het eerste watervoerende pakket significant afneemt.

Meestal is dit niet mogelijk in verband met bestaande functies zoals landbouw. Het meest effectief is peilopzet in sloten met veel wellen;

Peilopzet heeft een toename van de kwel en de verzilting in de omgeving tot gevolg, vergelijkbaar met het dichten van wellen. Ter hoogte van het peilopzet neemt het opbarstrisico af.

##### Kwelwater opvangen en ontzilten.

Het opvangen van het brakke kwelwater op locaties met de grootste verzilting en ontzilten is een effectieve maar dure methode. Een groot voordeel is dat het zoete water kan worden verkocht voor bijvoorbeeld landbouwdoeleinden waardoor de uiteindelijke kosten lager zijn waardoor de methode als goedkoop kan worden aangemerkt.

Het grootste probleem vormt het restproduct, de brijn. Injectie in het tweede watervoerende pakket is een technische mogelijkheid maar wordt op dit moment als ongewenst beschouwd.

#### *Niet kansrijk*

Monobronnering als kwelreductietechniek, d.w.z. onttrekken van grondwater uit het 1<sup>e</sup> watervoerende pakket en herinjecteren in het 2<sup>e</sup> of 3<sup>e</sup> watervoerende pakket, is niet effectief. Om een bepaalde kwelreductie te realiseren dient er ongeveer 10 keer zoveel grondwater te worden onttrokken dan het (k)weldebiet. Herinjectie in diepere lagen van

dit water leidt tot een significante toename van de kwel buiten het onttrekkingsgebied (in de kwelgebieden). Alleen in polders die in zijn geheel of voor een groot deel omgeven zijn door infiltratiegebieden of als in alle diepe polders deze techniek wordt toegepast, kan de techniek effectief zijn.

Het opvangen van het brakke kwelwater op locaties met de grootste verzilting en gescheiden afvoeren via persleidingen is een zeer effectieve maatregel met weinig negatieve effecten maar de kosten zijn erg hoog en daardoor niet kansrijk.





## 6 Literatuur

- Bardoel, T., de Louw, P.G.B., van den Eertwegh, G., Folkerts, H., Griffioen, J., Janssen, H., Schaminee, J., Schraven, P., juni 2003. Het effect van waterbeheer op de chloride- en nutriëntenbelasting van het oppervlaktewater in Polder de Noordplas – Datarapport: uitwerking van verzamelde gegevens en eerste water- en stoffenbalans. TNO-rapport NITG 03-098-B.
- De Louw, P.G.B. de, R. Bakkum, H. Folkerts, H. van Hardeveld (2004). Het effect van waterbeheer op de chloride- en nutriëntenbelasting van het oppervlaktewater in Polder de Noordplas. Syntheserapport: Definitieve water- en stoffenbalans en effecten van verschillende waterbeheersscenario's. TNO-rapport NITG 04-241-B1213.
- Favier, T., P.G.B. de Louw en R. Stuurman (2006). De morfologie en werking van wellen. H<sub>2</sub>O-20-2006-pag 40-42.
- Griffioen, J, P.G.B. de Louw, H.L. Boogaard en R.F.A. Hendriks (2002). De achtergrondbelasting van het oppervlaktewatersysteem met N, P en Cl en enkele ecohydrologische parameters in West-Nederland. TNO-rapport NITG 02-166-A.
- Konikow, L.F., D.J. Goode & G.Z. Hornberger (1996), A three-dimensional method-of-characteristics solute-transport model (MOC3D); U.S.G.S. Water-Resources Investigations Report 96-4267, 87 pp.
- McDonald, M.G. & A.W. Harbaugh (1988), A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model; U.S.G.S. Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, Chapter A1, 586 pp.
- Minnema, B., Kuijper, B., & Oude Essink, G.H.P (2004). Bepaling van de toekomstige verzilting van het grondwater in Zuid-Holland, NITG 04-189-B, 86 p., Utrecht, TNO Bouw en Ondergrond
- Oude Essink, G.H.P. (1998), Simuleren van 3D dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming: MOCDENS3D. Stromingen 4(1): 5-23.
- Oude Essink, G.H.P. (2000), Zoutwaterintrusie in het grondwatersysteem van de Kop van Noord-Holland, Een toepassing van de drie-dimensionale computer code MOCDENS3D, Stromingen, 6(3), 9-21.
- Uran, O, H.A. van Hardeveld, H. Nederend, D. Malschaert, L. Vuister, R. Bakkum (2006). Maatschappelijke kosten en baten van peilverhoging in Polder de Noordplas. Hoogheemraadschap van Rijnland.
- Van der Linden, W en J.C. Gehrels (2001). Hydrologisch Model Zoetermeer-Zuidplas Model t.b.v. raamplan voor het strategisch groenproject van het gebied Zoetermeer Zuidplas. TBO-rapport NITG 01-203-B.
- Vugt, A, van, Oude Essink, G.H.P. & Biesheuvel, A. (2003), Modelleren van het zoet-zout grondwatersysteem op Texel, Stromingen, 9(1), 33-46.

