

Opdrachtgever:

Milieu- en Natuurplanbureau

## Gevolgen van grote zeespiegelstijging op de Nederlandse zoetwaterhuishouding

Verwachtingen, schattingen en berekeningen voor het MNP-  
project “Nederland later”

rapport

Oktober 2007



Opdrachtgever:

Milieu- en Natuurplanbureau

## Gevolgen van grote zeespiegelstijging op de Nederlandse zoetwaterhuishouding

Verwachtingen, schattingen en berekeningen voor het MNP-  
project “Nederland later”

J. Kwadijk, S. van Vuren, G. Verhoeven (WL | Delft Hydraulics)

G. Oude Essink, J. Snepvangers (TNO)

E. Calle (GeoDelft)

rapport

Oktober 2007

## Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding .....</b>	<b>1—1</b>
<b>2</b>	<b>Aanpak.....</b>	<b>2—1</b>
	<b>2.1 Rivieren .....</b>	<b>2—1</b>
	<b>2.2 Grondwater .....</b>	<b>2—6</b>
	<b>2.3 Opbarstingsrisico .....</b>	<b>2—8</b>
	2.3.1 Opbarstingsindex .....	2—8
	2.3.2 Lithostatische druk ( $P_{\text{lithostatisch}}$ ) .....	2—8
	2.3.3 Waterdruk op de deklaag ( $P_{\text{waterspanning}}$ ) .....	2—9
	2.3.4 Regionale versus lokale processen.....	2—9
	<b>2.4 Drainage van Nederland .....</b>	<b>2—10</b>
	<b>2.5 Drainage poldergebieden .....</b>	<b>2—11</b>
<b>3</b>	<b>Resultaten voor de grote rivieren.....</b>	<b>3—1</b>
	<b>3.1 Maatgevende waterstanden op de rivieren.....</b>	<b>3—1</b>
	<b>3.2 Zoutgehalten in de benedenrivieren.....</b>	<b>3—9</b>
<b>4</b>	<b>Resultaten voor opbarsten van de bodem.....</b>	<b>4—1</b>
	<b>4.1 Globale effecten op opbarstingsrisico .....</b>	<b>4—1</b>
	<b>4.2 Lokale effecten op opbarstingsrisico en mogelijke maatregelen.....</b>	<b>4—1</b>
	4.2.1 Opbarsten van de deklaag van het slappe lagenpakket .....	4—2
	4.2.2 Mogelijke gevolgen voor ondergrondse leiding-infrastructuur (kabels en leidingen) .....	4—2
	4.2.3 Effect van verzilting op grondeigenschappen.....	4—3
	4.2.4 Effecten op funderingen en ondergrondse constructies.....	4—3
	4.2.5 Toename Bouwkosten .....	4—5
	<b>4.3 Opbarsten als gevolg van bodemdaling in veenweidegebieden.....</b>	<b>4—6</b>
	<b>4.4 Gevolgen voor dijken langs de grote rivieren.....</b>	<b>4—8</b>

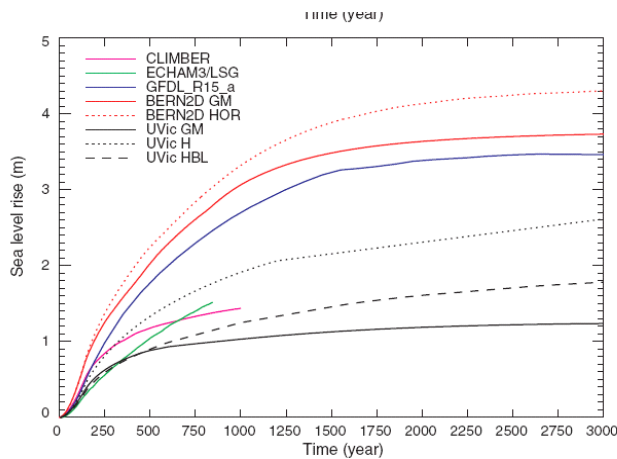
	<b>4.5</b>	<b>Samenvattend.....</b>	<b>4—9</b>
<b>5</b>		<b>Resultaten met betrekking tot drainage en kwel.....</b>	<b>5—1</b>
	<b>5.1</b>	<b>Drainage van Nederland .....</b>	<b>5—1</b>
	5.1.1	Gevolgen van zeespiegelstijging ten opzichte van neerslagtoename .....	5—2
	5.1.2	Maximaal denkbare toename van de gemaalcapaciteit .....	5—3
	5.1.3	Samenvattend.....	5—3
	<b>5.2</b>	<b>Drainage in poldergebieden .....</b>	<b>5—4</b>
	5.2.1	Effecten op stijghoogten.....	5—4
	5.2.2	Effecten op kwelflux .....	5—4
	5.2.3	Effecten op zoutbelasting .....	5—4
	5.2.4	Samenvattend.....	5—5
	<b>5.3</b>	<b>Waterbalans van Polder Duiveland .....</b>	<b>5—5</b>
	5.3.1	Gemalen .....	5—5
	5.3.2	Waterstanden.....	5—6
	5.3.3	Samenvattend.....	5—9
<b>6</b>		<b>Conclusies .....</b>	<b>6—1</b>
	<b>6.1</b>	<b>Conclusies van het onderzoek ten aanzien van de rivieren.....</b>	<b>6—1</b>
	<b>6.2</b>	<b>Conclusies van het onderzoek ten aanzien van de toenemende kwel.....</b>	<b>6—2</b>
	<b>6.3</b>	<b>Interpretatie van resultaten in termen van risico's .....</b>	<b>6—3</b>
	6.3.1	Risico's samenhangend met veranderingen in de rivieren .....	6—3
	6.3.2	Risico's samenhangend grondwater veranderingen .....	6—4
	<b>6.4</b>	<b>Betekenis van de resultaten voor beslissingen in het waterbeheer... </b>	<b>6—5</b>
<b>7</b>		<b>Aanbevelingen.....</b>	<b>7—1</b>
<b>8</b>		<b>Samenvatting .....</b>	<b>8—1</b>
	<b>8.1</b>	<b>Waterstanden op de rivier .....</b>	<b>8—1</b>
	<b>8.2</b>	<b>Zoutgehalte van in het rivierwater .....</b>	<b>8—1</b>
	<b>8.3</b>	<b>Toename van de kwel en drainage capaciteit .....</b>	<b>8—2</b>

8.4	Zoutgehaltes in het grondwater .....	8—2
8.5	Risico van het opbarsten van de bodem .....	8—2
8.6	Aanbevelingen .....	8—3
9	Referenties .....	9—1

**Bijlage A:**  
**Grondwaterkaarten**

## I Inleiding

WL | Delft Hydraulics, TNO Bouw en Ondergrond, GeoDelft hebben in opdracht van het Milieu- en Natuurplanbureau (NMP) een verkennend onderzoek uitgevoerd naar de klimaatbestendigheid van Nederland bij zeer grote zeespiegelstijgingen. Dit onderzoek is uitgevoerd voor het MNP-project “Nederland Later”. Voor het onderzoek is uitgegaan van een stijging van de zeespiegel van respectievelijk 1, 2, 4 en 6 meter. Dergelijke stijgingen zijn weliswaar voor de komende eeuw zeer onwaarschijnlijk maar zijn op de zeer lange termijn (1000 jaar) wel mogelijk. Aan de gehanteerde zeespiegelstijgingen zijn echter geen jaartallen verbonden. Ter illustratie de onderstaande Figuur 1.1 waarin de stijging van de zeespiegel als gevolg van thermische expansie is weergegeven voor de zeer lange termijn. Een versnelde afsmelting van de Groenlandse ijskap zou op kortere termijn (enkele eeuwen) al tot dergelijke omvangrijke stijgingen kunnen leiden.



Figuur 1.1 Wereldwijde zeespiegelstijging als gevolg van thermische expansie volgens verschillende modelexperimenten waarbij een 1% jaarlijkse toename van de CO<sub>2</sub> concentratie is aangenomen over 140 jaar. Na 140 jaar is de concentratie constant gehouden op 4x het pre-industriële niveau (IPCC, 2001).

Aan de hand van de resultaten van het project worden de volgende in de offerteaanvraag gestelde vragen beantwoord:

- *Wanneer (op welke termijn) gaat de stagnatie van de rivierafvoeren daadwerkelijk tot problemen leiden, ervan uitgaande dat het riviersysteem niet wordt afgesloten van zee?;*
- *wat betekent deze stagnatie voor de waterhuishouding van Nederland? Niet alleen voor de afvoerende rivieren, maar ook de regionale watersystemen?;*
- *hoe zal de benodigde inzet (capaciteit en kosten) van gemalen zich ontwikkelen om de afvoer van de rivieren en regionale systemen (zie ook hieronder) zeker te stellen?;*
- *en in hoeverre kan afleiding van de (piek)afvoer via IJssel en IJsselmeer de inzet van gemalen verminderen?;*

Belangrijke vragen rond de toenemende kwel als gevolg van zeespiegelstijging zijn:

- *Hoe zit de problematiek van het “opbarsten van de bodem” in elkaar, waarbij aandacht voor de situatie in diepe droogmakerijen, in de veengebieden en in het rivierengebied. Speelt deze problematiek in zowel Noord- als West-Nederland?;*
- *wanneer (op welke termijn) gaat het opbarsten van de bodem als gevolg van zeespiegelstijging en bodemdaling (veengebieden; zoutwinning?) en de hieraan gekoppelde toename van de kweldruk op grotere schaal voorkomen en wat betekent dit voor gebruiksfuncties? Worden er gebruiksfuncties onmogelijk vanwege fysieke omstandigheden cq. grote schades?*
- *welke gebieden vormen de belangrijkste risicogebieden voor het opbarsten van de bodem;*
- *wat zijn de consequenties van de toenemende kweldruk in laag Nederland (afvoer van brak water, pompcapaciteit, functies, etc) bij een zeespiegelstijging van 1, 2, 4 en 6 m.;*
- *wat zijn mogelijke maatregelen om opbarstproblemen te voorkomen en de orde grootte kosten daarvan;*
- *is er een zeespiegelstijging aan te geven waarbij laag Nederland vrijwel niet meer houdbaar is vanwege de stagnerende rivierafvoeren en/of vanwege de toegenomen kweldruk?*

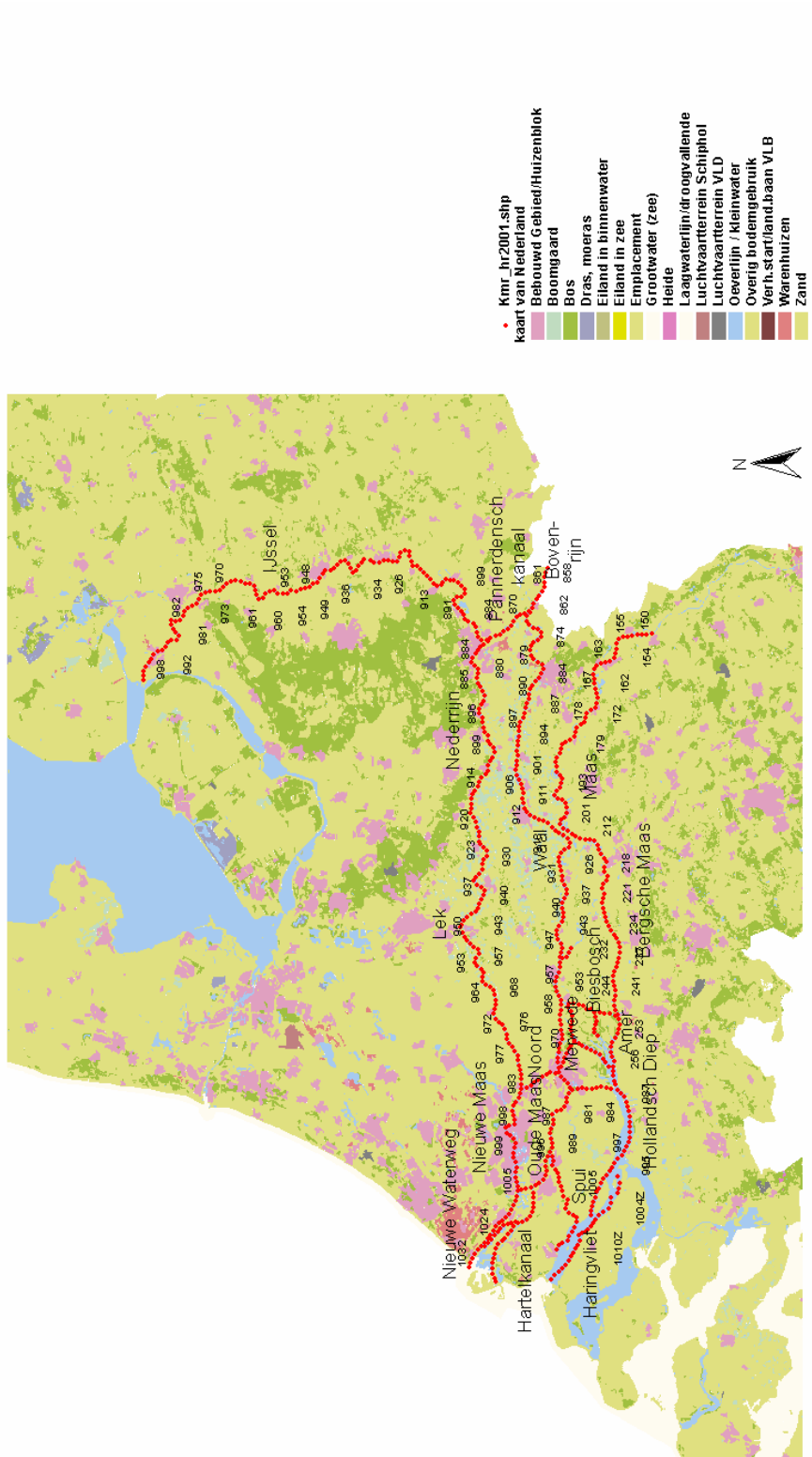
## 2 Aanpak

In het onderzoek zijn de gevolgen van zeer grote zeespiegelstijgingen onderzocht voor de waterstanden in de rivieren en de zoutgehaltes in de benedenrivieren; voor de stijghoogtes van het grondwater en de daarmee samenhangende toename van kwel, grondwaterdruk op de deklaag en zoutgehalte van het grondwater; en voor de drainage van de poldergebieden als gevolg van de toename van de kwel. In de studie is gebruik gemaakt van een analyse met bestaande numerieke modellen. Vervolgens zijn de resultaten in een expertbijeenkomst besproken. De zeespiegelstijgingen vormen de randvoorwaarden van de numerieke modellen. De stijgingen zijn zo groot dat ze ver buiten het traject vallen waarvoor de modellen gevalideerd zijn. De kwantitatieve resultaten moeten dan ook met de nodige voorzichtigheid worden geïnterpreteerd. Dit geldt bijvoorbeeld voor de waterstanden langs de grote rivieren, waarbij in de modelschematisatie is aangenomen dat de dijken altijd voldoende hoog zijn om de het water te keren. In mindere mate geldt dit voor de schattingen omtrent de veranderde stijghoogtes in het grondwater. Voor de stijghoogtes in het grondwater zijn interpretaties van de resultaten naar de lokale schaal erg lastig met name voor die plaatsen die dicht langs gebieden met hoge waterstanden liggen.

### 2.1 Rivieren

Om de effecten van zeespiegelstijging en afvoerveranderingen op de waterstanden langs en zoutindringing in de Nederlandse rivieren te onderzoeken is een aantal berekeningen uitgevoerd met het Nationaal SOBEK modelinstrumentarium. Het model is opgebouwd uit hydraulische modellen die voor het bovenrivierengebied, het Noordelijk Deltabekken en de Maas zijn ontwikkeld. Een overzicht van het studiegebied en de modelschematisatie in de vorm van takken in SOBEK is te zien in Figuur 2.2.





Figuur 2.1 Studieggebied met de geschematiseerde riviertakken en kilometrage



Figuur 2.2 Modelschematisatie in SOBEK

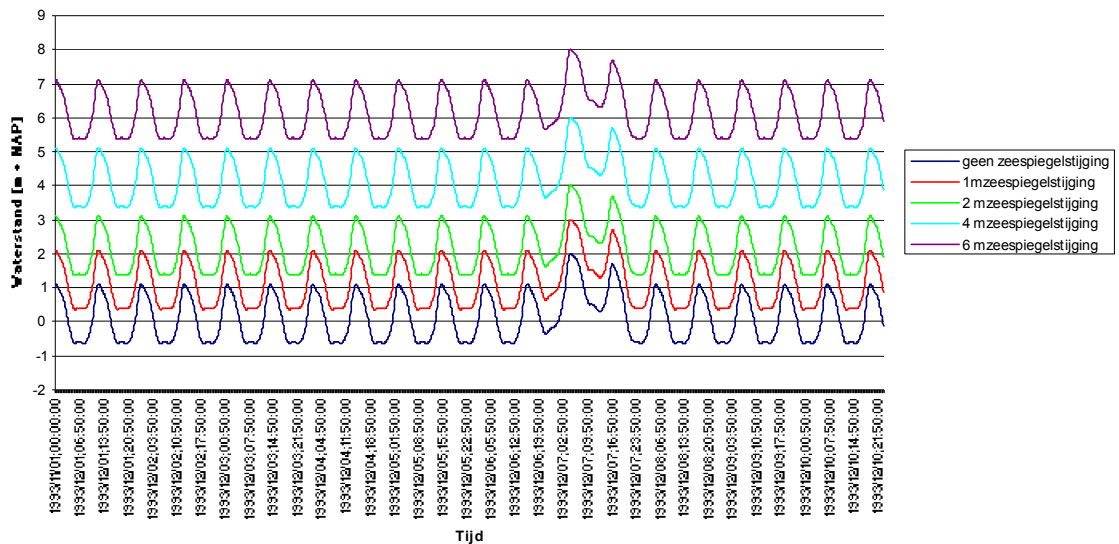
In de modelberekeningen is de mate van zeespiegelstijging gevarieerd tussen 0 en 6 m en is onderscheid gemaakt tussen laagwater-, hoogwater- en gemiddelde afvoercondities. De modelberekeningen zijn in Tabel 2.1 samengevat.

Tabel 2.1 Modelberekeningen met het Nationaal SOBEK model instrumentarium.

Zeespiegelstijging	Hoogwater		gemiddelde afvoer				Laagwater			
	Rijn	Maas	Rijn		Maas		Rijn		Maas	
			huidig	toekomst	huidig	toekomst	huidig	toekomst	huidig	toekomst
• geen	16,000	3,800	2,000	4,000	230	460	1,000	700	100	70
• 1 m										
• 2 m										
• 4 m										
• 6 m										

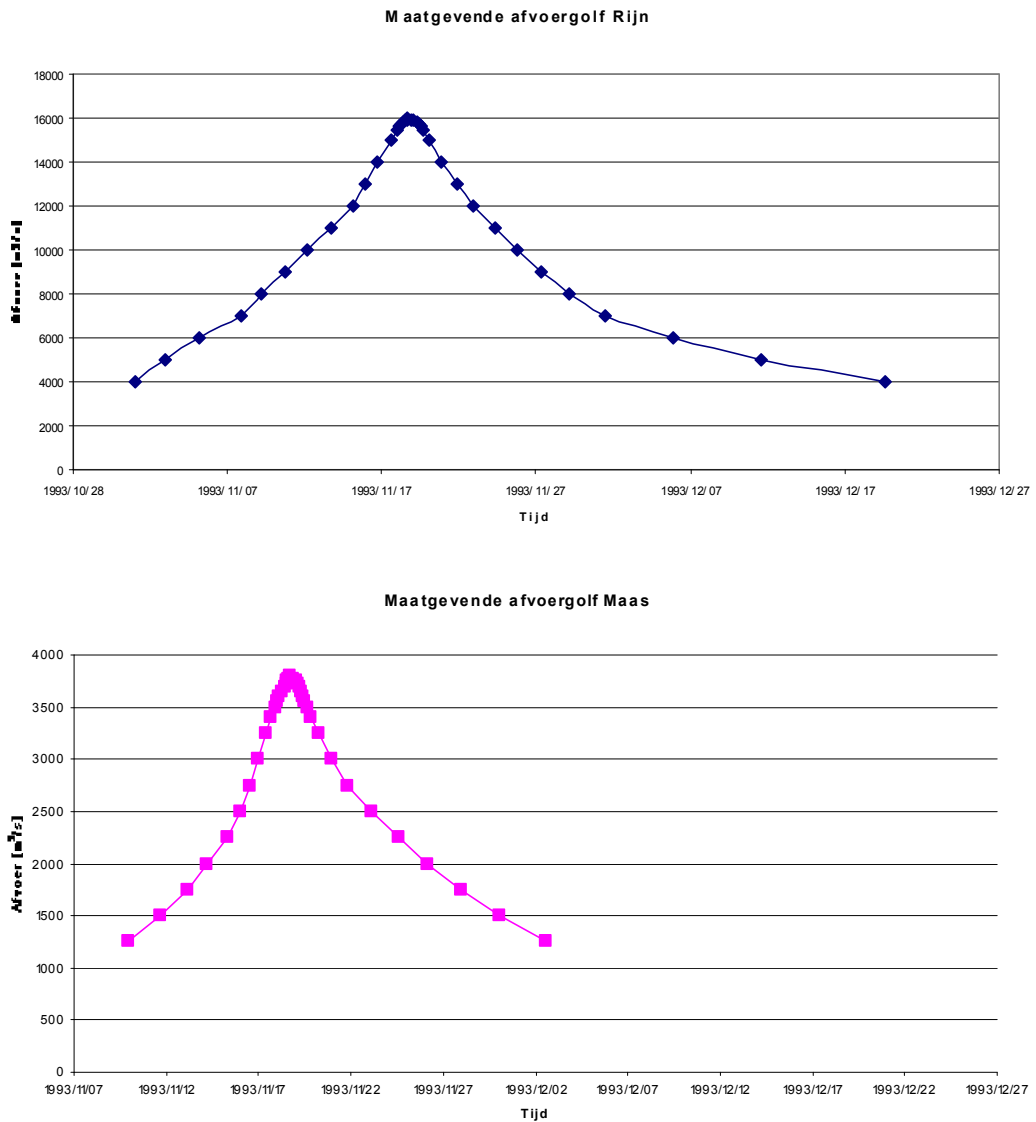
De condities in Tabel 2.1 zijn in de randvoorwaarden van het Nationaal SOBEK model verwerkt. De zeespiegelstijging is daartoe op het jaargemiddelde harmonisch getij op de benedenranden in het model ter plaatse van de Maasmond (zie Figuur 2.3) en het Haringvliet geprojecteerd. Er is hierbij geen rekening gehouden met mogelijke veranderingen in de vorm van het harmonisch getij. Geen informatie is gevonden omtrent de veranderingen in het harmonische getij bij extreme zeespiegelstijgingen. In de hoogwaterberekeningen is rekening gehouden met een extra stormopzet door NW-wind. Deze extra stormopzet is in Figuur 2.3 voor elk van de zeespiegelstijgingsscenario's te zien in de hogere uitslag van het getij. Voor het IJsselmeer is aangenomen dat de pompcapaciteit bij de Afsluitdijk groot genoeg is om het zeewater weg te pompen, zodat de zeespiegelstijging geen effect heeft het waterpeil van het IJsselmeer.

Harmonisch getij ter plaatse van de Maasmond



Figuur 2.3 Harmonisch getij en de projectie van zeespiegelstijging ter plaatse van de Maasmond.

Op de instroomranden is in de berekeningen met een gemiddelde en laagwaterafvoer een constante afvoer opgelegd. In de hoogwaterberekeningen zijn de maatgevende afvoergolven van de Rijn en de Maas op de bovenranden gespecificeerd (Figuur 2.4). De pieken van de afvoergolf op de Maas en de Rijn vallen in de berekeningen samen. Gekozen is voor een afvoergolf van 16.000 m<sup>3</sup>/s voor de Rijn en 3.800 m<sup>3</sup>/s voor de Maas. In het rivierbeheer wordt momenteel al rekening gehouden met hogere afvoeren die in de toekomst zouden kunnen optreden als gevolg van het veranderende klimaat. De onderliggende studie beperkt zich echter tot de gevolgen van veranderende zeespiegelstanden op de lange termijn. Op dergelijke termijn zijn geen scenario's omtrent klimaatverandering beschikbaar.



Figuur 2.4 Maatgevende afvoergolven op de Maas en de Rijn.

## 2.2 Grondwater

Om de invloed van zeespiegelstijging op het grondwatersysteem te schatten is gebruik gemaakt van een 3D numeriek grondwaterstromings- en stoftransportmodel. Het model is gebaseerd op de softwarecode MODFLOW (McDonald en Harbaugh, 1988). Deze code, ontwikkeld door de U.S. Geological Survey, is aangepast voor grondwaterstroming in zoute watersystemen. Het is de meest gebruikte code ter wereld om grondwaterstroming in poreuze media te simuleren. De parametrisering van dit model is zoveel mogelijk gedaan vanuit bestaande landsdekkende bronnen:

- Hydrogeologische parametrisering:
  - REGIS (<http://www.dinoloket.nl/>), aangevuld met:
  - MIPWA<sup>1</sup> parametrisering uit Snepvangers et al. (2007);
- Landelijk beeld 3D zoutconcentraties grondwater uit Zoet-Zout REGIS (Kloosterman, 2007);
- Maaiveldhoogtebestand en inschattingen van drooglegging uit REGIS;
- Bodemdalingschattingen voor het jaar 2050 van RIZA;

Er is gerekend met een dichtheidsafhankelijk 3D-grondwaterstroming- en gekoppeld stoftransportmodel. Het model is in het horizontaal opgedeeld in cellen van 1000x1000 m. In het verticaal beslaat het model 290 m: van +10 m N.A.P. tot -280 m N.A.P. In de diepte zijn 31 modellagen aangebracht met dikten van ondiep naar diep: 2 lagen van 5 m; 10 lagen van 2 m; 8 lagen van 5 m en 11 lagen van 20 m.

Er is stationair gerekend. Dit wil zeggen dat er qua stijghoogteverdeling gerekend is naar een stabiele, min of meer gemiddelde, situatie waarin de stijghoogten in evenwicht zijn met de zeespiegelstijging. De zoutconcentraties zijn in dit stationaire model echter niet in evenwicht. Omdat het doorrekenen van een niet-stationair model (bijv. m.b.v. de code MOCDENS3D) niet binnen het project mogelijk was gezien de grote rekeninspanning hiervoor, is een (grove) inschatting gemaakt van de verandering van de zoutconcentraties over de tijd door op verschillende diepten de zoutconcentraties te gebruiken in de analyse. Dieper zout grondwater komt in West-Nederland immers over tijd langzaam omhoog.

In totaal zijn 11 scenario's berekend:

- Huidige situatie = referentie
- zeespiegelstijgingsvarianten: +1, +2, +4 en +6 meter;
  - *Naast een stijging van de Noordzee en Waddenzee zijn hierbij ook stijgingen van de gemiddelde rivierstanden en een stijging van het IJsselmeerpeil doorgevoerd. Het IJsselmeerpeil stijgt maximaal tot +4 m mee, dit betekent dat ook in het scenario +6 meter het IJsselmeerpeil slechts met 4 meter stijgt.*

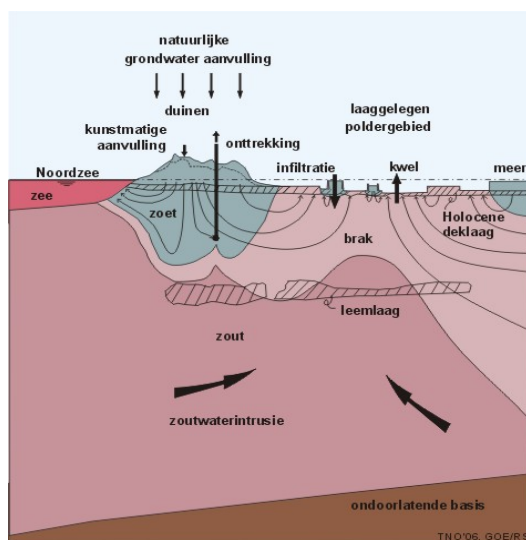
<sup>1</sup> In het MIPWA project - 'Methodiekontwikkeling Interactieve Planvorming ten behoeve van het Waterbeheer' - wordt onder regie van TNO Bouw en Ondergrond een gedetailleerd, innovatief, interactief modelinstrumentarium voor de ondergrond ontwikkeld voor Noord-Nederland.

- Voor zeespiegel +1 m en zeespiegel +2 m zijn elk 2 extra bodemdalingsvarianten berekend. Bij variant zeespiegel +1 m zijn één en twee keer het bodemdaling-WB21-hoog-scenario van 2050 genomen (Haasnoot et al., 1999) en bij variant zeespiegel +2 m anderhalf en drie keer het bodemdaling-WB21-hoog scenario van 2050<sup>2</sup>;
- Voor zeespiegel + 4 m en zeespiegel + 6 m is 1 extra bodemdalingsvariant berekend. Bij variant zeespiegel +4 m is twee keer het bodemdaling-WB21-hoog-scenario van 2050 genomen en bij variant zeespiegel +6 m drie keer het bodemdaling-WB21-hoog scenario van 2050.

Voor deze scenario's zijn telkens vier effecten in beeld gebracht:

- Effect op stijghoogten;
- Effect op kwelflux;
- Effect op zoutbelasting;
- Effect op opbarstingsrisico.

Het gebruikte model geeft een beste **eerste schatting** van deze effecten. Met name doordat het een grof model is (1000x1000 m cellen), doordat de reactie van het grondwater erg gevoelig is voor de gekozen ondergrond en bodemdalingsparameters, en zoet-zout grondwater niet verplaatst wordt als een functie van de tijd (bekend is dat juist het niet-stationaire proces van 'autonome' verzilting van laag Nederland (zie Figuur 2.5), de grootste bijdrage aan de zoutbelastingstoename levert). Er heeft bovendien geen ijking van stijghoogten, kwelfluxen en zoutbelastingen naar diepe polders plaatsgevonden; slechts op expert-judgement is het verkregen resultaat beoordeeld (Figuur 2.5).



Figuur 2.5 Concept verzilting van het Nederlandse grondwatersysteem.

<sup>2</sup> Het probleem doet zich voor dat de zeespiegelstijgingsvarianten absolute waarden zijn, terwijl bij bodemdaling gerekend wordt met een snelheid (bijv cm per eeuw). Er zijn daarom in deze studie meerdere bodemdalings-scenario's bekeken: bijv. 2 keer de waarde van het bodemdaling-WB21-hoog-scenario van 2050. De absolute bodemdaling hangt uiteindelijk dus af van de tijdsperiode dat de zeespiegel +1, +2, +4 en +6 m is gestegen.

## 2.3 Opbarstingsrisico

In de studie Nederland Later en Water (WL | Delft Hydraulics, 2007) werd het opbarstingsrisico van de deklaag geïdentificeerd als een tot nog toe weinig onderzocht fenomeen met mogelijk grote gevolgen. In verband met het BSIK-project ‘Waarheen met het Veen’ is in opdracht van RIZA een oriënterende kaart gemaakt van het opbarsten van de bodem in het westelijk veenweidegebied in de periode 2000-2100. De kaart laat zien dat in de huidige situatie op enkele locaties (bijvoorbeeld in de polder Groot Mijdrecht Noord) opbarsten van de bodem voorkomt. Voor het jaar 2100 zijn echter grote gebieden in het westelijk veenweidegebied geïdentificeerd als gevoelig voor opbarsten van de bodem. Naar aanleiding van deze resultaten is in de huidige studie dit opbarstingsrisico nader onderzocht.

### 2.3.1 Opbarstingsindex

Om het voorgaande te kwantificeren is een opbarstingsindex opgesteld. De opbarstingsindex is een maat voor de kans dat de weerstandslaag opbarst doordat de kweldruk groter is dan de tegendruk die de bodemlagen erboven, inclusief de weerstandslaag, kunnen leveren. Bij opbarsting ontstaat een open verbinding in de weerstandslaag doordat de weerstandslaag omhoog wordt gedrukt door het grondwater in het onderliggende watervoerende pakket. Dit leidt tot extra kwel ter plaatse van de scheur of zogenaamde wel. Conform de NEN 6740 (1991) is de opbarstingsindex gedefinieerd als de verhouding tussen de lithostatische druk die door de weerstandslaag op het watervoerende pakket wordt uitgeoefend ( $P_{\text{lithostatisch}}$ ) en de waterspanning die door het grondwater in het watervoerende pakket op de weerstandslaag wordt uitgeoefend ( $P_{\text{waterspanning}}$ ). Hoe hoger de opbarstingsindex, hoe kleiner de kans dat de weerstandslaag opbarst. In theorie kan dus opbarsting plaatsvinden indien de verhouding  $P_{\text{lithostatisch}}/P_{\text{waterspanning}}$  kleiner is dan 1. De opbarstingsindex geeft echter vaak een te conservatieve schatting. Om deze reden wordt vaak een waarde van 1.1 aangehouden als grenswaarde. Hieronder volgt de uitwerking van de opbarstingsindex.

### 2.3.2 Lithostatische druk ( $P_{\text{lithostatisch}}$ )

De lithostatische druk, die door de weerstandslaag op het watervoerende pakket wordt uitgeoefend, wordt bepaald door de dikte en de dichtheden van de verschillende bovenliggende lagen. De lithostatische druk kan berekend worden uit de som van de gewichten van deze individuele lagen.

$$P_{\text{lithostatisch}} = (\sum (D_i * \rho_i)) * g$$

waarin:

- $P_{\text{lithostatisch}}$  = de lithostatische druk [Pascal],
- $D_i$  = de dikte van de bovenliggende laag  $i$  [m],
- $\rho_i$  = dichtheid van de laag  $i$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],
- $g$  = gravitatieconstante [ $\text{m}/\text{s}^2$ ].

### 2.3.3 Waterdruk op de deklaag ( $P_{\text{waterspanning}}$ )

De waterdruk die door het grondwater in het watervoerende pakket wordt uitgevoerd, wordt bepaald door het verschil tussen de stijghoogte van het grondwater in het watervoerende pakket en de diepte van het grensvlak tussen de weerstandslaag en het watervoerende pakket:

$$P_{\text{water}} = (\phi_{\text{WVP}} - Z_{\text{top WVP}}) * \rho_{\text{water}} * g$$

waarin:

- $P_{\text{water}}$  = de waterdruk [Pascal],
- $\phi_{\text{WVP\_Kiezeloort}}$  = de stijghoogte [m],
- $Z_{\text{top WVP}}$  = de bovenkant van het watervoerende pakket [m],
- $\rho_{\text{water}}$  = dichtheid van water [ $\text{kg/m}^3$ ].

De onderscheiden textuurklassen alsmede de in de berekening gebruikte dichtheden staan in Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Gebruikte verzadigde dichtheden  $\rho_i$  [ $\text{kg/m}^3$ ] per textuurklasse.

Textuur	verzadigde dichtheid
Zand	1970
Leem	1750
Klei	1650
Veen	1050
Bruinkool	1300

### 2.3.4 Regionale versus lokale processen

Deze studie geeft slechts inzicht in de regionale gevolgen van een zeespiegelstijging. Lokale geohydrologische processen zoals dynamische regenwaterlenzen in het topsysteem, of de toestroming van grondwater en zout naar het oppervlaktewatersysteem ter plaatse van zandbanen en wellen kunnen niet meegenomen worden. Daarnaast wordt bij het bepalen van het opbarstingsrisico vaak niet uitgegaan van een gemiddelde situatie, maar juist van bijzondere extreme hydrologische situaties als droogtes en hoogwater op de rivieren. Zo moet voor een gedetailleerde risicoanalyse van het opbarstingsgevaar rondom een dijk het lokale (grond)watersysteem in detail bekend zijn, hetgeen door middel van een numeriek model met een hogere resolutie moet worden berekend.

Aan deze lokale effecten voor opbarstingsrisico en de gevolgen daarvan op dijken en infrastructuur is daarom apart aandacht gegeven. Door middel van expert judgement zijn de mogelijke effecten van zeespiegelstijging op de ondiepe ondergrond en constructies daarin of erop geïnventariseerd. In deze inventarisatie gaat het om mogelijke mechanismen die als gevolg van zeespiegelstijging kunnen optreden, de invloed ervan op geotechnische gebruiksfuncties van ondergrondlagen, zoals het funderen of verankeren van constructies in en op de grond, en een globale inschatting van de maatschappelijke implicaties van deze invloed.



## 2.4 Drainage van Nederland

Meer pompcapaciteit zal noodzakelijk zijn om Nederland te draineren omdat een groter deel van Nederland onder de zeespiegel komt te liggen en daardoor niet meer onder vrij verval naar de zee kan draineren. Een eerste aanzet om de omvang van de toename in kaart te brengen is gedaan in het rapport “Nederland Later en Water” (WL | Delft Hydraulics, 2007). Hier is deze eerste verkenning uitgebreid met een vergelijking tussen het effect van zeespiegelstijging en het effect van een verandering in het neerslagregime als gevolg van klimaatverandering.

Het hoogtebestand van Nederland met een resolutie van 100 bij 100 m is gebruikt als uitgangspunt voor de analyse. Dit is een vereenvoudigd bestand gemaakt op basis van het AHN hoogtebestand van Nederland. Op grond hiervan zijn de oppervlaktes van de hoogtezones bepaald. Bij de indeling van de hoogtezones is een interval van 1 m. gehanteerd. Met deze gegevens is per meter zeespiegelstijging de grootte van het gebied vastgesteld dat beneden de zeespiegel ligt (zie Tabel 2.3).

Tabel 2.3 . Gebruikte Hoogtezone indeling.

Hoogte zone (m.b.z)	Oppervlak (ha)	Geaccumuleerd oppervlak (ha)
<-3	221796	221796
-3 - -2	73183	294979
-2 - -1	258161	553140
-1 - 0	470811	1023951
0 - +1	467386	1491337
+1 - +2	259399	1750736
+2 - +3	128073	1878809
+3 - +4	107134	1985943
+4 - +5	90942	2076885
+5 - +6	92059	2168944
+6 - +7	88698	2257642
+7 - +40	1252526	3510168
>40	134085	3644253

Het uit te pompen volume water is geschat op basis van gemiddelde cijfers voor neerslag en verdamping voor Nederland. Het wateroverschot is bepaald door het verschil te nemen van neerslag en de verdamping (Tabel 2.4).

Tabel 2.4 . Gebruikte neerslag en verdampingcijfers voor Nederland

	jaar	winter	zomer	10- daagse volume (10yr)
Neerslag	800	375	425	98
Verdamping	500	100	400	0
Wateroverschot	300	275	25	98

Voor de veranderingen van het toekomstige wateroverschot (zie Tabel 2.5) is gebruik gemaakt van zowel de WB21 als de KNMI-06 scenario gegevens. Deze scenario's geven onder andere percentuele veranderingen voor de seizoensneerslag en verdamping aan. Op grond hiervan zijn de gemiddelde neerslag en verdamping per scenario aangepast en is per scenario opnieuw het wateroverschot vastgesteld. Omdat alleen de winterperiode (december-januari-februari (DJF)) is beschouwd, is er geen verandering in verdamping meegenomen

Tabel 2.5 . Verandering in het winter (DJF) wateroverschot voor verschillende scenario's.

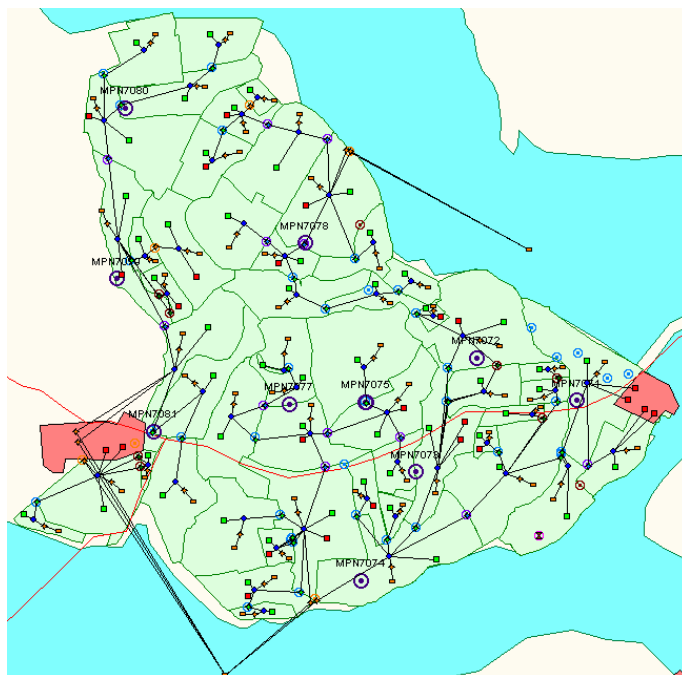
	WB21-L	WB21-M	G	WB21-H	W	WB21 H+D	G+	W+
P (DJF)	3%	6%	4%	12%	7%	13%	7%	14%
P (10d)	5%	10%	4%	20%	8%	13%	6%	12%
EP (DJF)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
P-EP (DJF)	4%	8%	5%	16%	10%	18%	10%	19%
10d-P-EP (10jr)	5%	10%	4%	20%	8%	13%	6%	12%

## 2.5 Drainage poldergebieden

Een verhoging van de zeespiegel leidt ook tot een toename van de kwel. Om een beeld te krijgen van de invloed van de kweltoename op het regionale watersysteem is een aantal berekeningen uitgevoerd met een SOBEK-RR model voor een karakteristieke kwelpolder. Vooraf waren geen getallen beschikbaar van de toename van de kwel bij zeer grote zeespiegelstijgingen. Daarom is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd door de toename van de kwel te variëren van 100% tot 600%. Vervolgens is gekeken wat de effecten zijn van deze verhogingen van de kwel, zowel voor de optredende waterstanden in de polder als voor de benodigde gemaalcapaciteit om de polder droog te houden. Het gekozen studiegebied betreft polder Duiveland, dat ligt in de provincie Zeeland. Zie Figuur 2.6 voor een overzicht van het studiegebied. Figuur 2.7 geeft de modelschematisatie weer in de vorm van knopen en takken in SOBEK.



Figuur 2.6 Studiegebied Duiveland



Figuur 2.7 Modelschematisatie in SOBEK.

In totaal zijn er 7 modelberekeningen gemaakt waarbij de dagelijkse hoeveelheid kwel steeds is opgevoerd ten opzicht van de referentieberekening. Bij de referentieberekening is uitgegaan van een uniforme hoeveelheid dagelijkse kwel voor het poldergebied Duiveland. Er is hierbij wel onderscheid gemaakt tussen de kwel ter plekke van het onverharde gebied en kwel ter plekke van het open water. Deze gehanteerde kwelwaarden zijn de gemiddelden van de op gebiedskennis gebaseerde kwelwaarden voor Duiveland zoals deze in het oorspronkelijke model waren geschematiseerd. Door het uniform maken van de kwelwaarden binnen het poldergebied kunnen de resultaten van de verschillende afwateringseenheden beter met elkaar vergeleken worden omdat ze allemaal dezelfde hoeveelheid kwel hebben. Tabel 2.6 geeft de toegepaste kwelwaarden weer per modelberekening voor het onverharde gebied en voor het open water.

Tabel 2.6 Modelberekeningen uitgevoerd met SOBEK-RR

<b>Modelberekeningen</b>	<b>Kwel bij onverhard gebied</b>	<b>Kwel bij open water</b>
relatieve kwel	(mm / dag)	(mm / dag)
100%	0.4	4
150%	0.6	6
200%	0.8	8
300%	1.2	12
400%	1.6	16
500%	2.0	20
600%	2.4	24

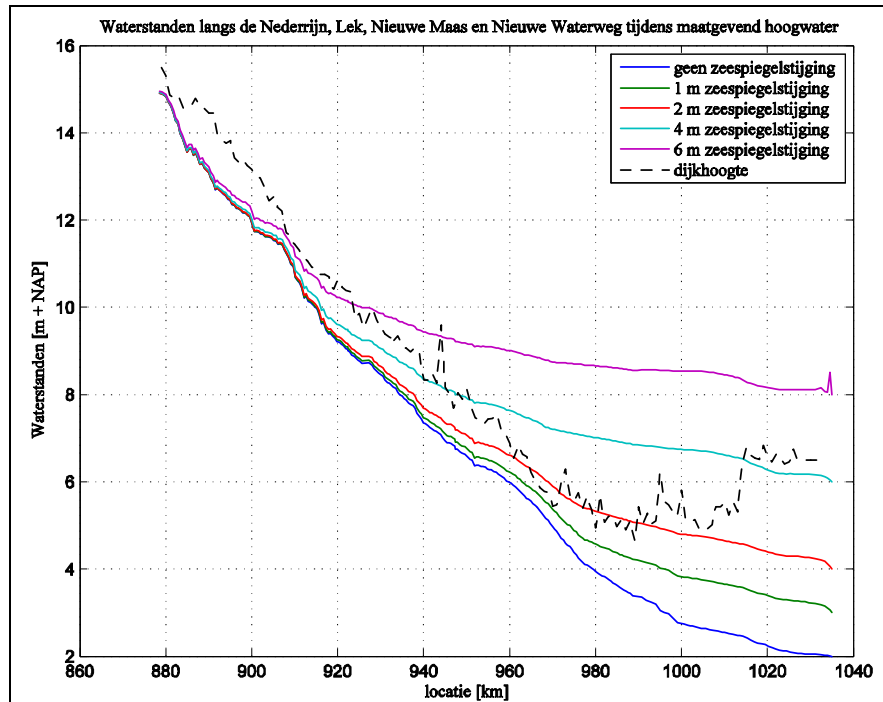
Bij elke modelberekening is 1 volledig jaar doorgerekend met uurwaarden voor de neerslag.

### 3 Resultaten voor de grote rivieren

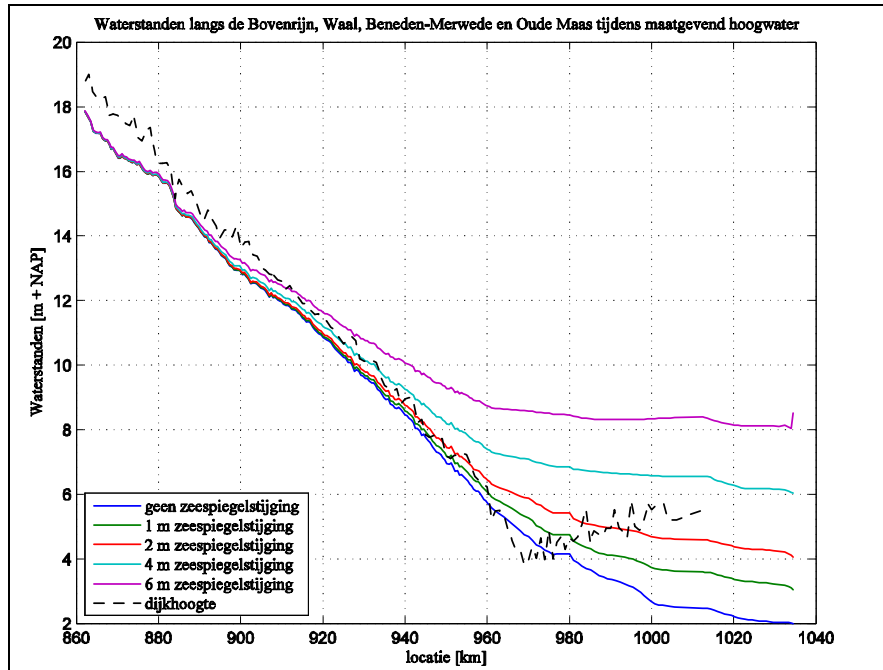
#### 3.1 Maatgevende waterstanden op de rivieren

De benodigde kruinhoogten van de primaire waterkeringen langs de rivieren zijn gebaseerd op maatgevende hoogwaterstanden, de verwachte golfloop met een minimum van 0,5 m en de verwachte inklinking van de bodem. Om de klimaatsbestendigheid van Nederland te onderzoeken is de ontwikkeling van de maatgevende hoogwaterstanden als gevolg van zeespiegelstijging en het effect hiervan op dijkverhoogten bepaald.

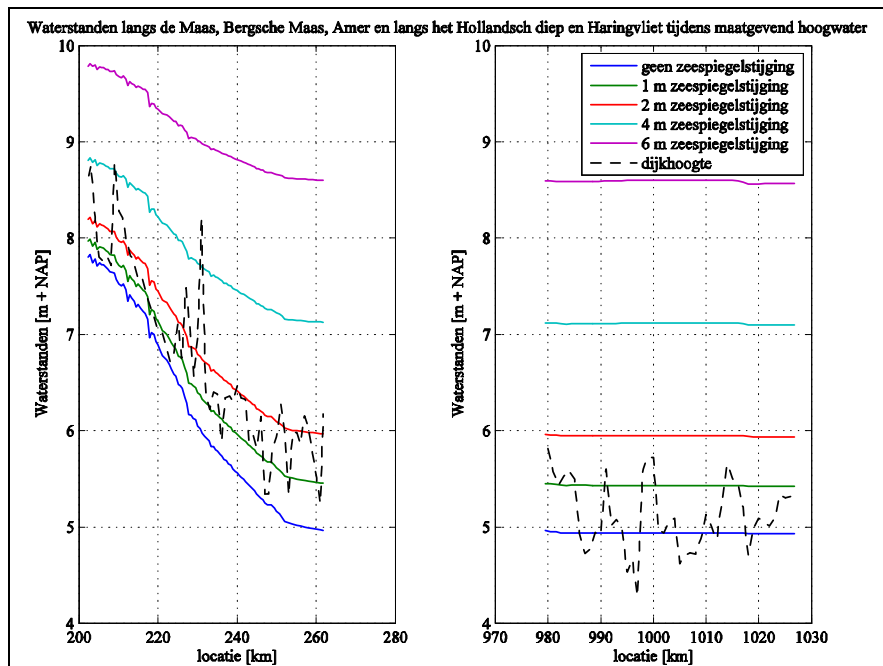
In Figuur 3.1 - Figuur 3.3 zijn de maatgevende hoogwaterstanden langs de Rijn- en Maastakken bij verschillende mate van zeespiegelstijgingen weergegeven. In de figuur zijn ook de dijkhoogten opgenomen. De kilometrage is weergegeven in Figuur 2.2



Figuur 3.1 Maatgevende waterstanden langs de Nederrijn, Lek Nieuwe Maas en Nieuwe Waterweg.



Figuur 3.2 Maatgevende waterstanden langs de Bovenrijn, Waal, Beneden-Merwede en de Oude Maas.

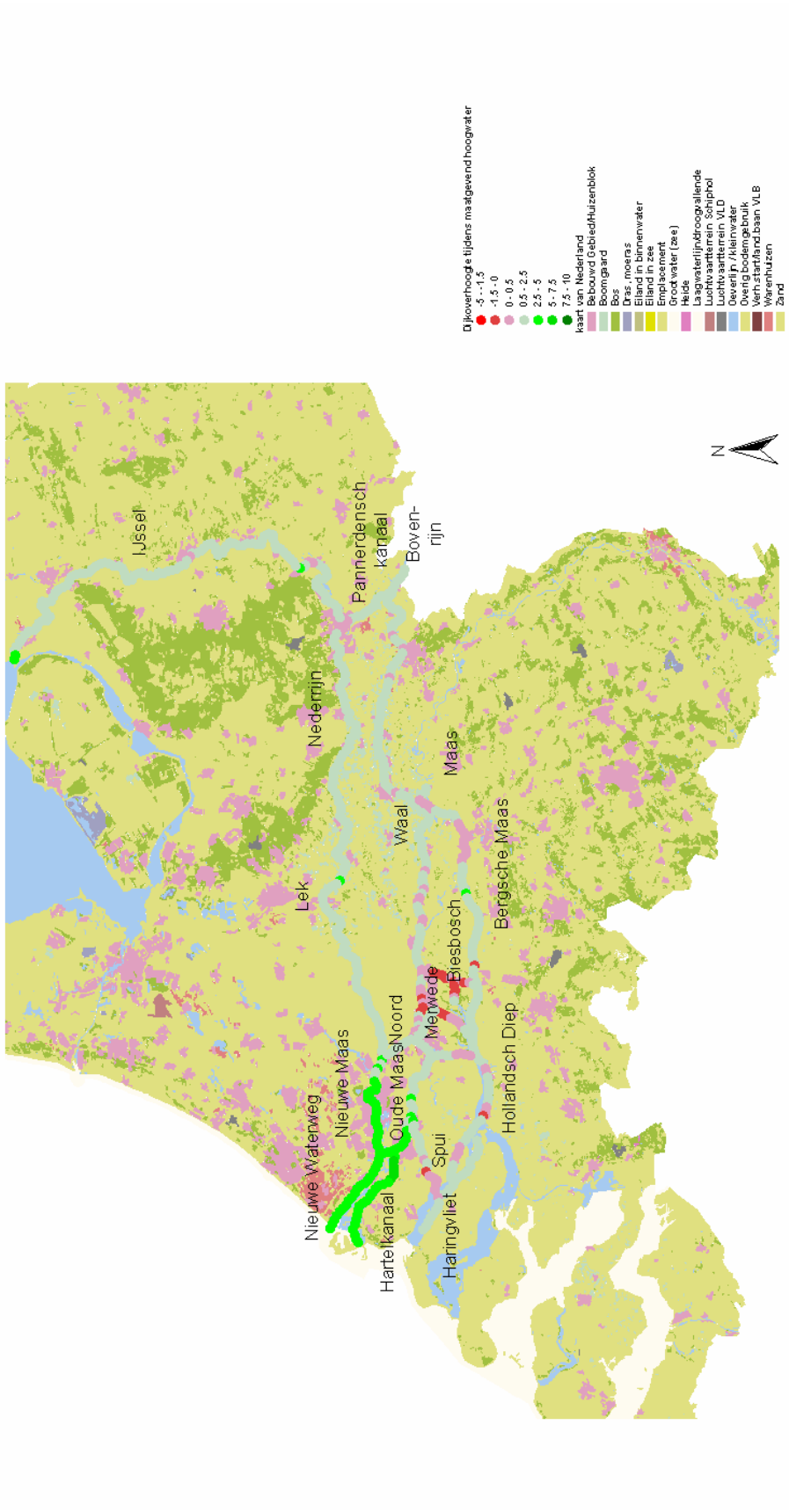


Figuur 3.3 Maatgevende waterstanden langs Maas, de Bergsche Maas, de Amer, het Hollandsch Diep en het Haringvliet.

De figuren laten duidelijk zien dat hoe hoger de zeespiegelstijging, hoe groter het probleem met betrekking tot de veiligheid tegen overstroming. Zeespiegelstijging van meer dan 2 m betekent dat de waterstand in de Rijn-Maasmonding op veel plaatsen boven de dijk uitkomt. Dit levert een aanzienlijk veiligheidsprobleem op omdat in dit dichtbebouwde gebied de ruimte om de dijken te verhogen beperkt is. Opgemerkt moet worden dat de figuren suggereren dat zelfs onder de huidige omstandigheden de maatgevende waterstanden hoger zijn dan de dijk. Dit is echter toe te schrijven aan fouten in de gebruikte dataset voor de dijkhoogtes. Deze fouten hebben overigens geen invloed op de modelresultaten. In de simulaties van de waterstanden wordt in de gebruikte modellen aangenomen dat de dijken niet overstromen. De waterstanden in de figuren zijn daarom ook niet reëel maar theoretisch, ze illustreren de lengte van de rivier waarover problemen zullen optreden, niet de precieze waterstanden.

In Figuur 3.4 - Figuur 3.8 zijn de dijkverhoogten langs de Rijn- en de Maastakken voor zeespiegelstijgingen variërend tussen de 0 en 6 m weergegeven. Gemakshalve is in de figuur de dijkverhoogte gedefinieerd als het verschil tussen de kruinhoogte en de maatgevende hoogwaterstand. Aangezien de veiligheidshoogte voor golfloop en inklinking minimaal 0,5 m bedraagt, ontstaan al problemen indien de dijkverhoogte minder is dan een halve meter. De rivierlocaties met een overhoogte van minder dan 0,5 m zijn daarom al aangegeven met een lichtrode kleur.

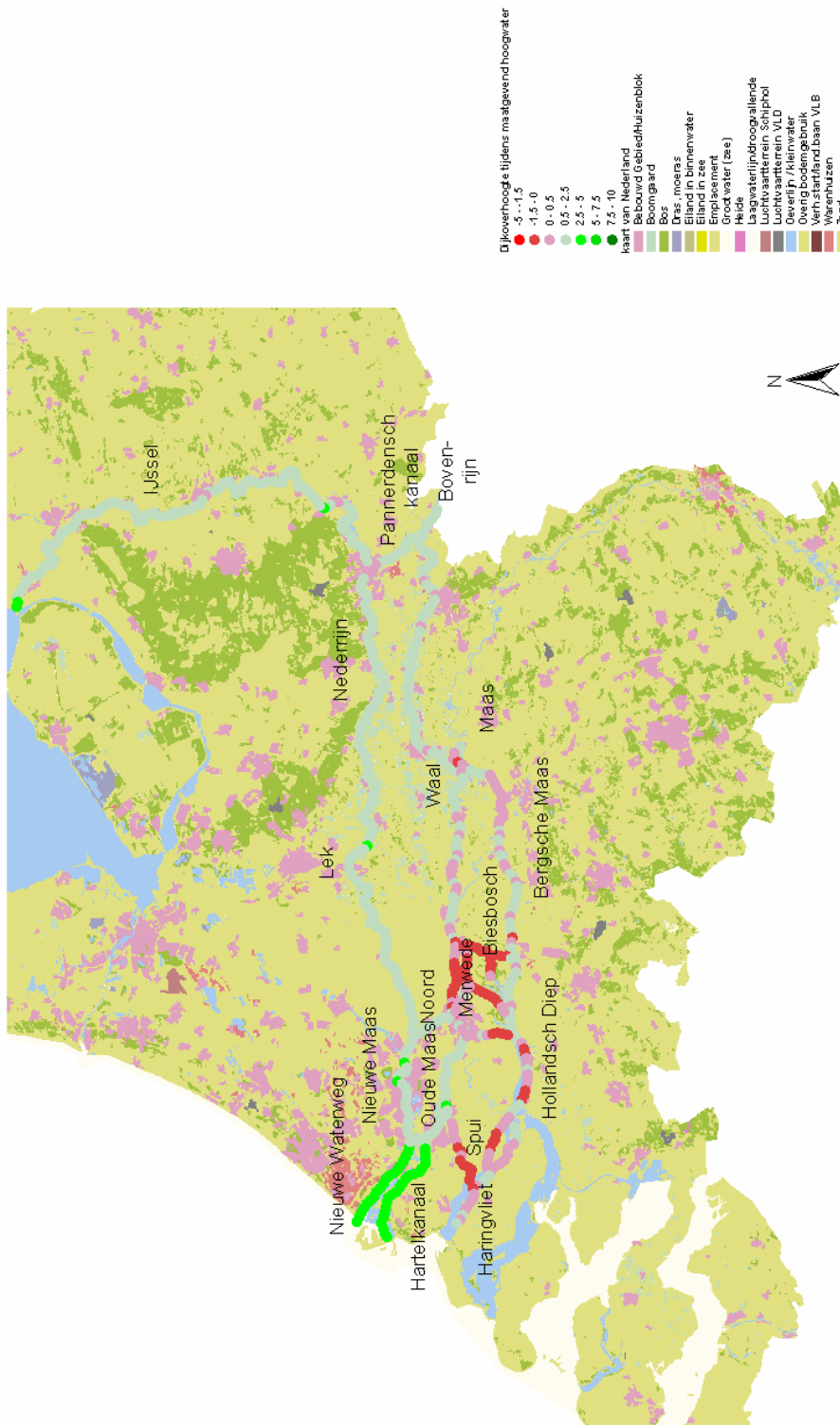
Dijkoverhoogten tijdens maatgevend hoogwater bij Om zeespiegelstijging



Figuur 3.4 Dijkoverhoogten langs de Rijn- en de Maastakken zonder zeespiegelstijging.

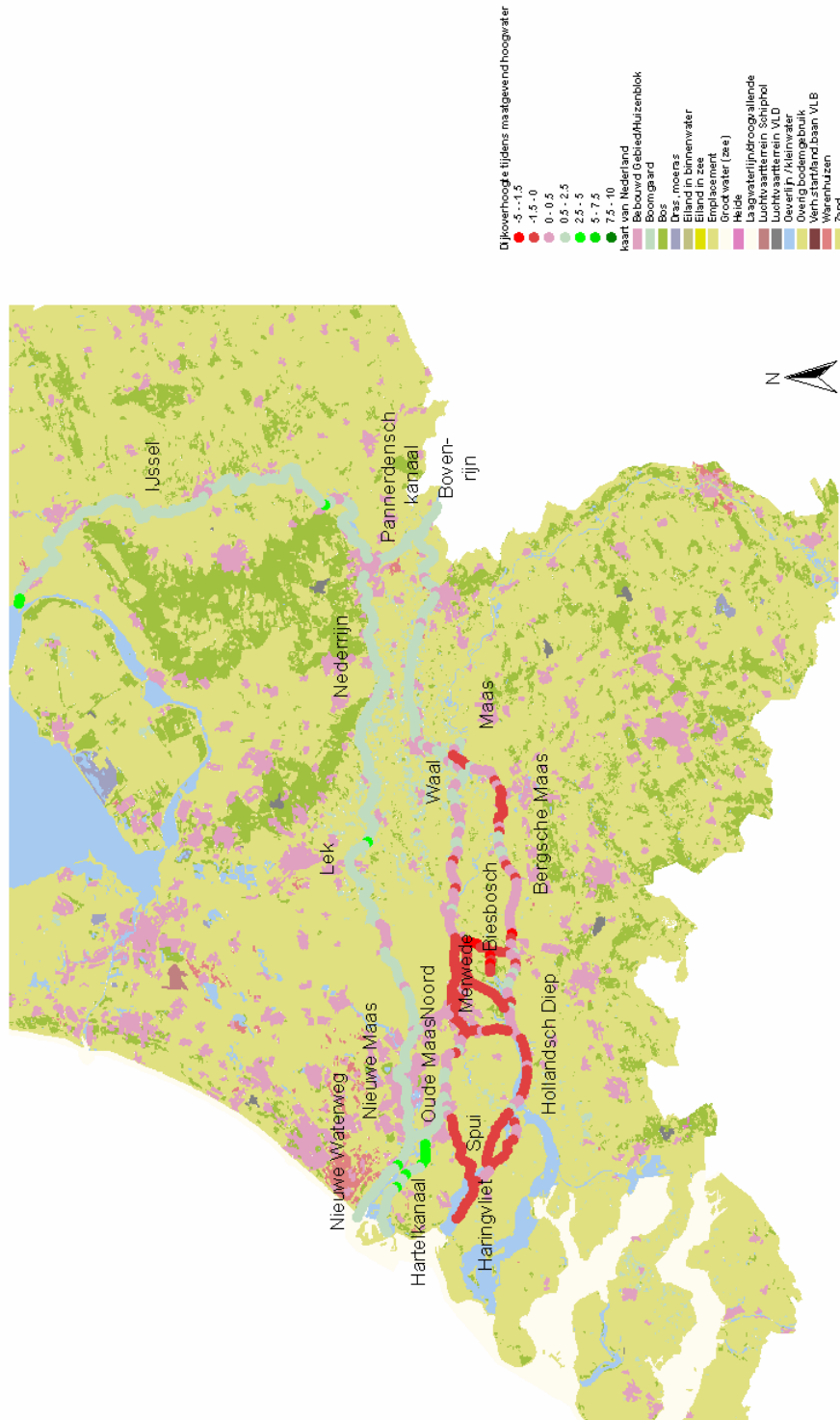


Dijkverhoogten tijdens maatgevend hoogwater bij 1 m zeespiegelstijging



Figuur 3.5 Dijkverhoogten langs de Rijn- en de Maastakken bij 1 m zeespiegelstijging.

Dijkoverhoogten tijdens maatgevend hoogwater bij 2m zeespiegelstijging



Figuur 3.6 Dijkoverhoogten langs de Rijn- en de Maastakken bij 2 m zeespiegelstijging.





### 3.2 Zoutgehaltes in de benedenrivieren

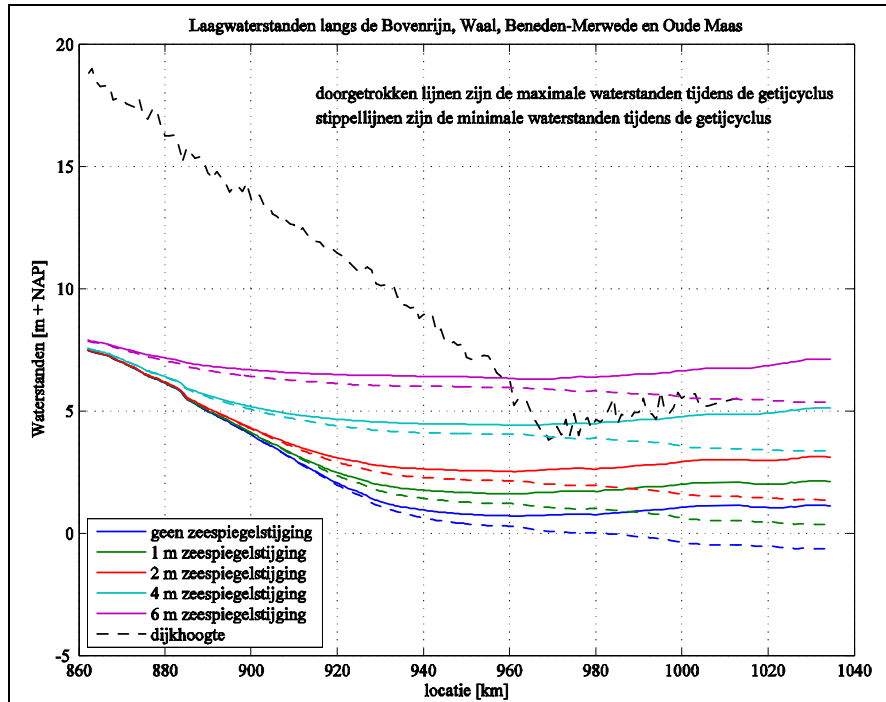
Zeespiegelstijging in combinatie met een afname van de laagwaterafvoer zal in de toekomst zorgen voor een verdere landinwaartse zoutindringing. De mate van zoutindringing is met name van belang voor de gebruikers van zoet rivierwater, zoals drinkwaterbedrijven en waterschappen. Indien het oppervlaktewater ter plaatse van de innamepunten te zout wordt, dan kan dat leiden tot productieverlies (drinkwater), of droogte- dan wel zoutschade in de landbouw.



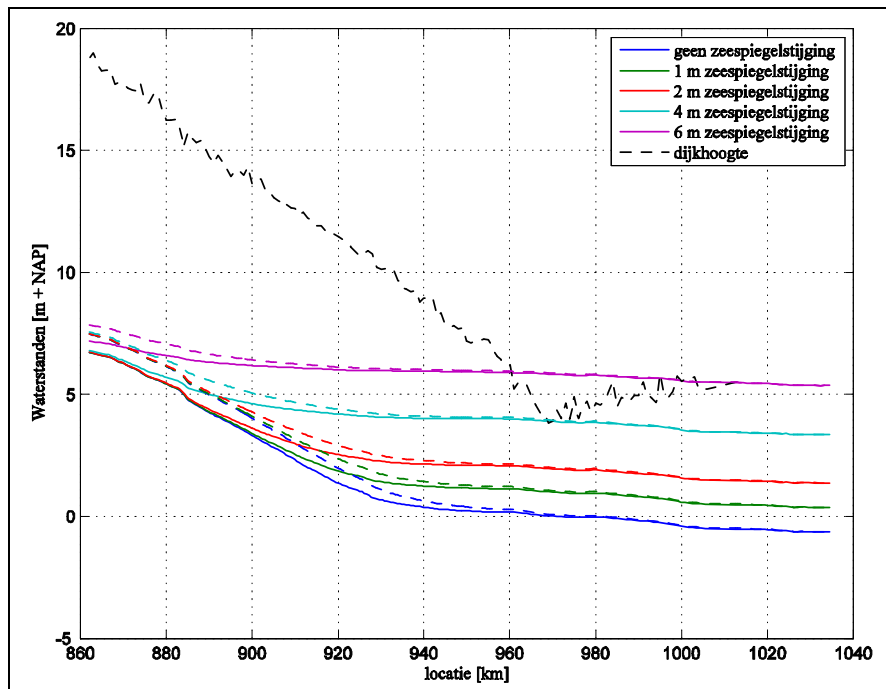
Figuur 3.9 Een overzicht van de inlaatpunten van drinkwater en oppervlaktewater in het Noordelijk Deltabekken (Bron: Zoet-Zout berichten van Rijkswaterstaat, nummer 3, 2005)

Figuur 3.10 geeft de waterstanden tijdens de huidige laagwaterafvoeren gedurende een getijcyclus weer langs de Bovenrijn, Waal, Beneden-Merwede en de Oude Maas: de stippellijn geeft de minimale en de doorgetrokken lijn de maximale laagwaterstanden weer. De figuur geeft een indicatie in hoeverre het getij landinwaarts merkbaar is. Dit punt verschuift steeds verder landinwaarts naar mate de zeespiegelstijging toeneemt.

Als gevolg van klimaatverandering wordt verwacht dat de lage rivierafvoeren in de toekomst verder zullen afnemen, zoals in Tabel 2.1 is weergegeven. Bij een afname van de laagwaterafvoeren dalen de laagwaterstanden in de rivieren in de toekomst en zal het punt waar de invloed van het getij nog merkbaar is verder landinwaarts liggen. Figuur 3.11 geeft voor verschillende zeespiegelstijgingen de waterstanden in de rivieren gedurende lage afvoer weer. De stippellijnen geven de waterstanden bij de huidige laagwatercondities weer, de doorgetrokken lijnen de waterstanden voor de toekomstige lagere rivierafvoeren. Kortom, de doorgetrokken lijnen geven het gecombineerde effect weer van zeespiegelstijging en lagere rivierafvoeren.



Figuur 3.10 Waterstanden tijdens de huidige laagwatercondities langs de Bovenrijn, Waal, Beneden-Merwede en de Oude Maas bij verschillende zeespiegelstijgingen.

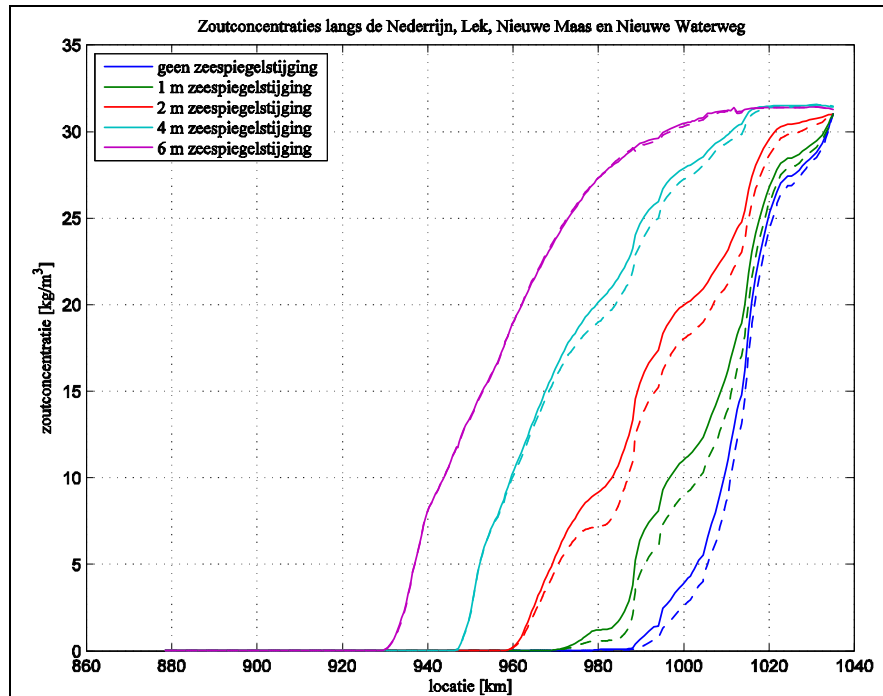


Figuur 3.11 Waterstanden tijdens laagwatercondities langs de Bovenrijn, Waal, Beneden-Merwede bij verschillende zeespiegelstijgingen. De stippellijnen geven de waterstanden bij de huidige laagwatercondities weer, de doorgetrokken lijnen de waterstanden voor de toekomstige lagere rivierafvoeren.

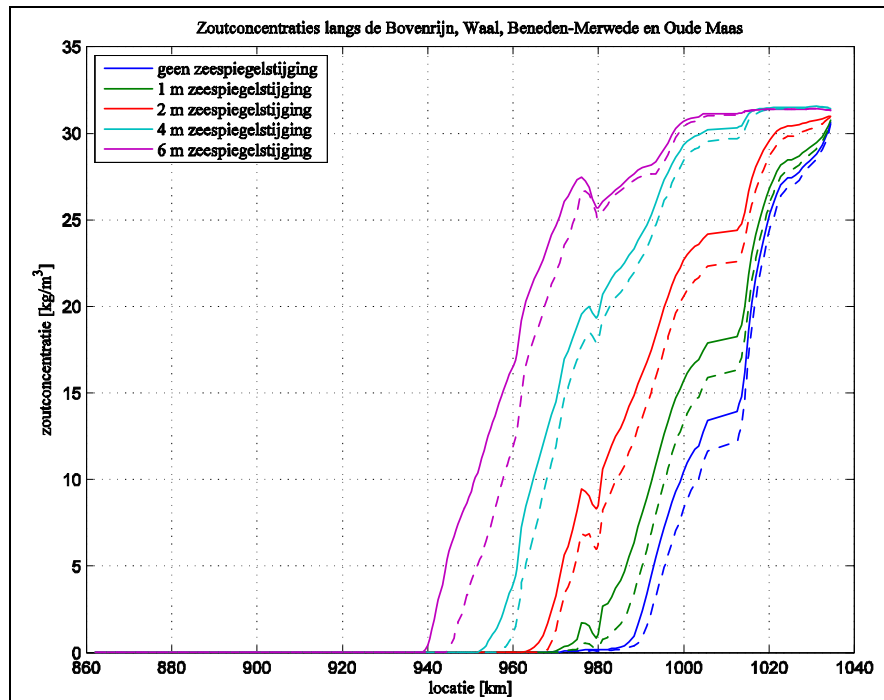
Het effect van zeespiegelstijging in combinatie met een afname van de laagwaterafvoer op de zoutconcentraties langs de Rijn- en de Maastakken is te zien in Figuur 3.15 tot en met Figuur 3.19. Hier is het verloop van de zoutconcentratie voor de verschillende zeespiegelstijgingen tijdens de toekomstige laagwatercondities op een topografische kaart weergegeven. De volgende klassen zijn gehanteerd om zoutwater van brak- en zoetwater te onderscheiden:

- zoutwater                    zoutgehalte hoger dan 10.000 Cl<sup>-</sup> mg/l
- brak water                 zoutgehalte tussen 1.000 - 10.000 mg/l
- licht brak water         zoutgehalte tussen 300 – 1.000 mg/l
- zoetwater                  zoutgehalte lager dan 300 mg/l

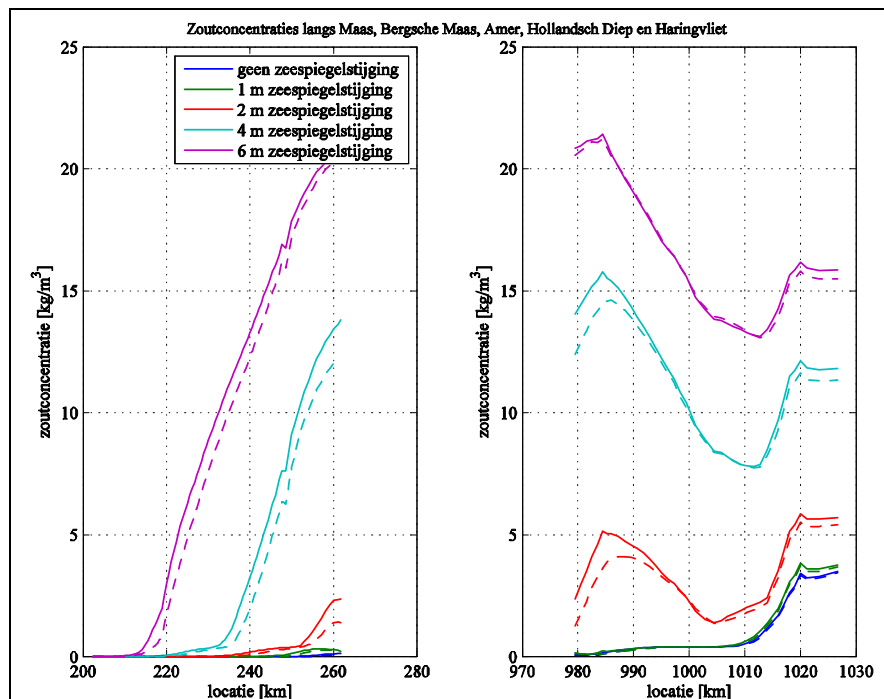
Om te beoordelen wanneer de grenzen van de klimaatsbestendigheid echt zijn bereikt, is informatie nodig over de grenswaarde van de zoutconcentratie waarbij de drinkwaterbedrijven en de waterschappen de inname van rivierwater staken of wanneer er schade ontstaat. Grasland en veeteelt ondervinden nog geen schade indien het zoutgehalte onder de 1000 mg/l blijft. De teelt van gladiolen en rododendron ondervindt al zoutschade als het zoutgehalte hoger is dan 300 mg/l. Indien het zoutgehalte hoger dan 200 mg/l is, is het gehalte te hoog voor drinkwaterbereiding. In Figuur 3.9 is een overzicht te zien van de inlaatpunten van drinkwater en oppervlaktewater in het Noordelijk Deltabekken. In de figuur komt 1 kg/m<sup>3</sup> overeen met 1 g/l. Om de zoutconcentratie (NaCl) te vertalen naar Chloride concentratie (Cl<sup>-</sup>) dient door 1,81 gedeeld te worden. Gezien het grote aantal inlaatpunten zal de toename van zoutconcentraties zeker problemen voor de drinkwaterbedrijven en de waterschappen veroorzaken.



Figuur 3.12 Zoutconcentraties (NaCl) langs de Nederrijn, Lek Nieuwe Maas en Nieuwe Waterweg bij verschillende zeespiegelstijgingen. De stippellijnen geven de zoutconcentraties bij de huidige laagwatercondities weer, de doorgetrokken lijnen de zoutconcentraties voor de toekomstige lagere rivierafvoeren. Kortom, de doorgetrokken lijnen geven het gecombineerde effect weer van zeespiegelstijging en lagere rivierafvoeren.

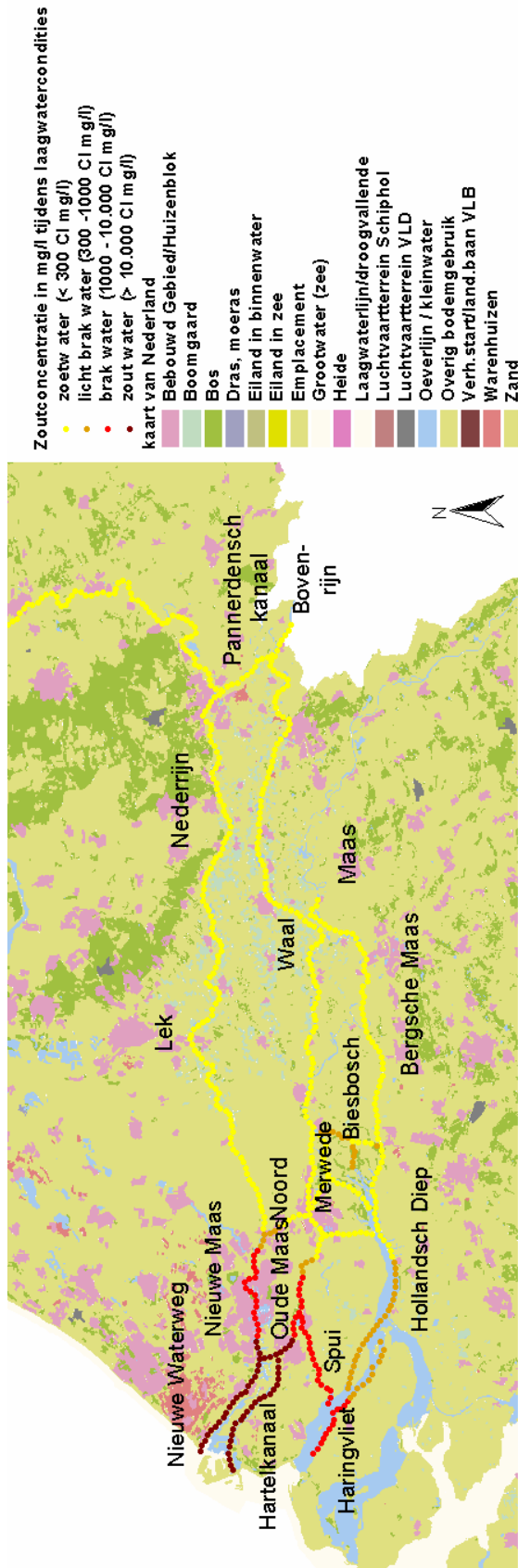


Figuur 3.13 Zoutconcentraties (NaCl) langs de Bovenrijn, Waal, Beneden-Merwede en de Oude Maas bij verschillende zeespiegelstijgingen. De stippellijnen geven de zoutconcentraties bij de huidige laagwatercondities weer, de doorgetrokken lijnen de zoutconcentraties voor de toekomstige lagere rivierafvoeren. Kortom, de doorgetrokken lijnen geven het gecombineerde effect weer van zeespiegelstijging en lagere rivierafvoeren.

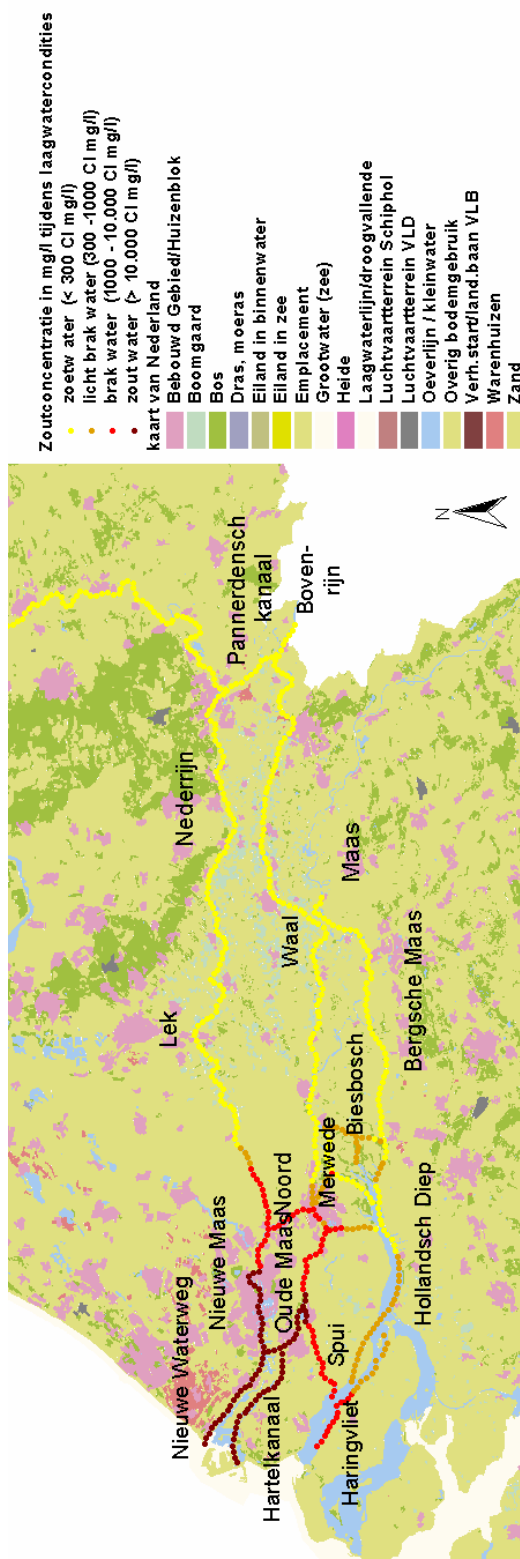


Figuur 3.14 Zoutconcentraties (NaCl) langs Maas, de Bergsche Maas, de Amer, het Hollandsch Diep en het Haringvliet bij verschillende zeespiegelstijgingen. De stippellijnen geven de zoutconcentraties bij de huidige laagwatercondities weer, de doorgetrokken lijnen de zoutconcentraties voor de toekomstige lagere rivierafvoeren. Kortom, de doorgetrokken lijnen geven het gecombineerde effect weer van zeespiegelstijging en lagere rivierafvoeren.

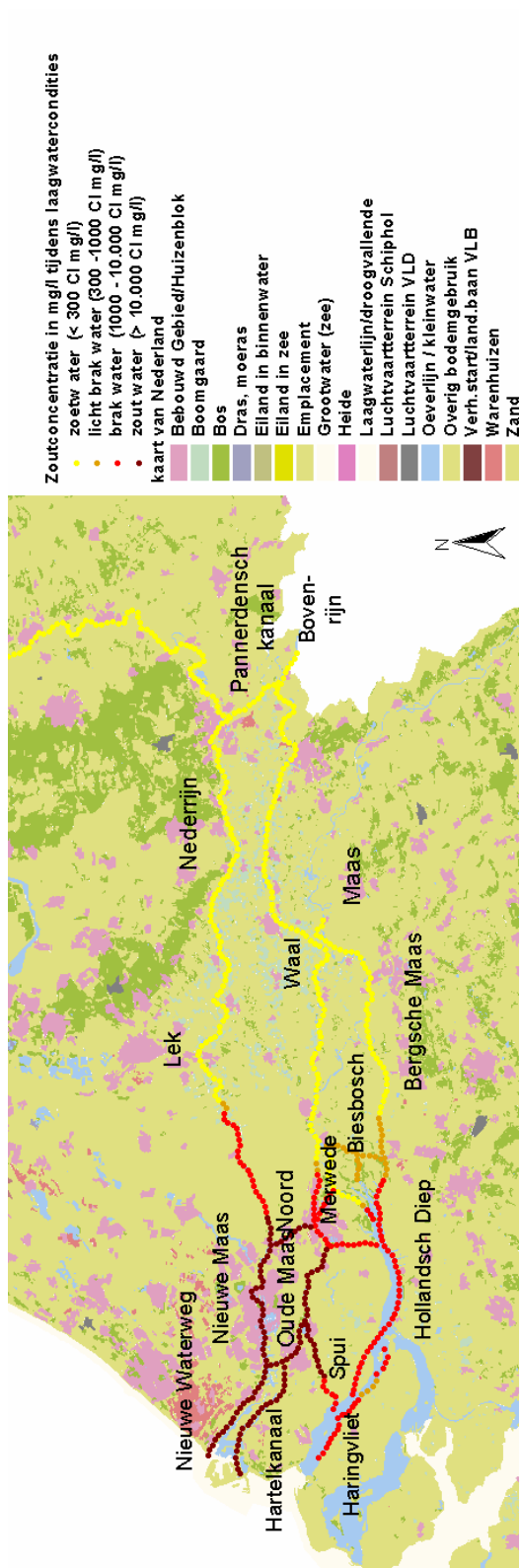




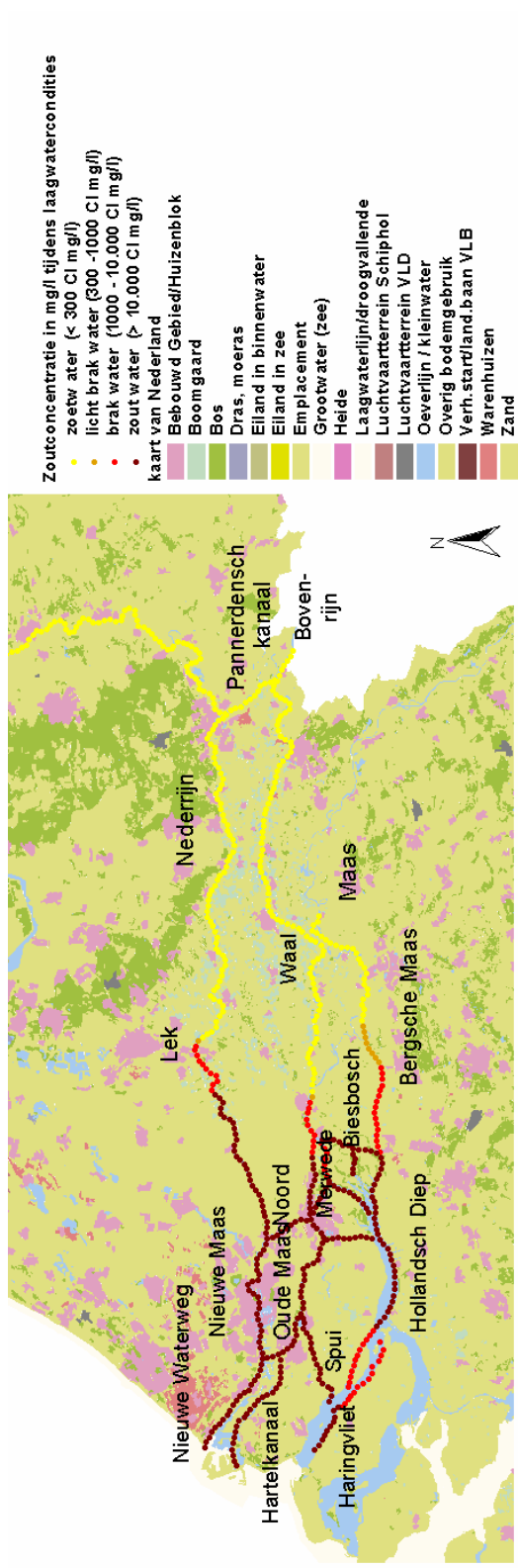
Figuur 3.15 Zoutconcentratie tijdens toekomstige laagwatercondities bij 0 m zeespiegelstijging



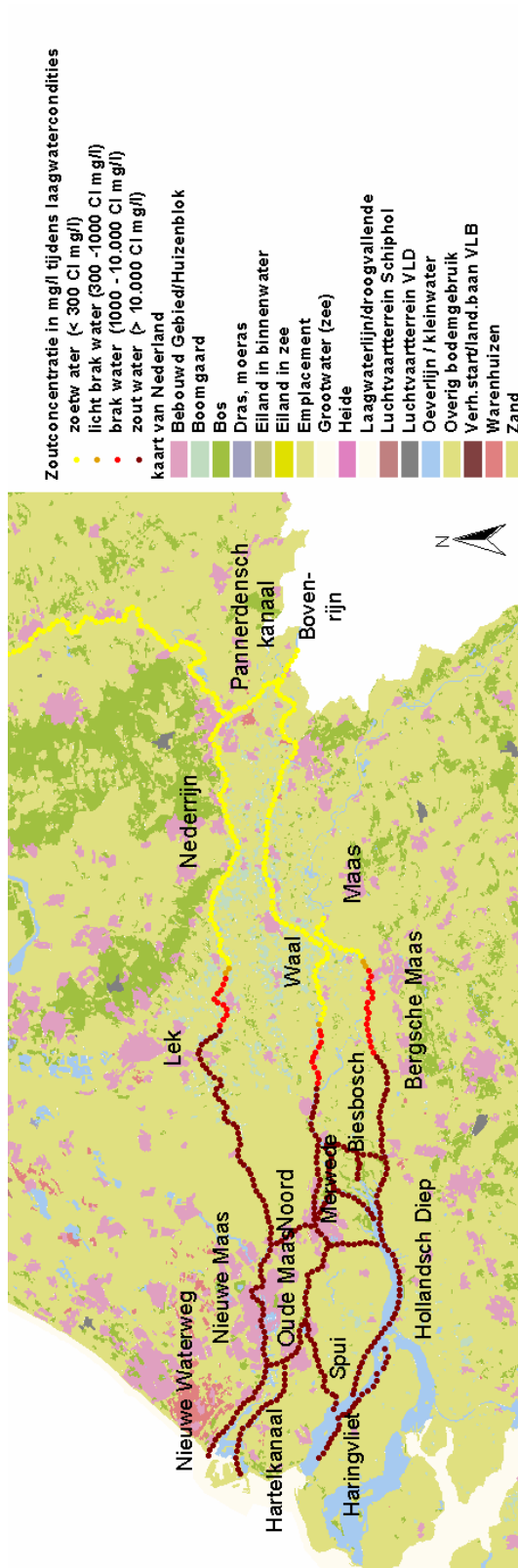
Figuur 3.16 Zoutconcentratie tijdens toekomstige laagwatercondities bij 1 m zeespiegelstijging



Figuur 3.17 Zoutconcentratie tijdens toekomstige laagwatercondities bij 2 m zeespiegelstijging



Figuur 3.18 Zoutconcentratie tijdens toekomstige laagwatercondities bij 4 m zeespiegelstijging



Figuur 3.19 Zoutconcentratie tijdens toekomstige laagwatercondities bij 6 m zeespiegelstijging

## 4 Resultaten voor opbarsten van de bodem

In bijlage A4 en A5 zijn de kaarten met de resultaten met betrekking tot het opbarstingsrisico opgenomen. Deze resultaten zijn in een expertbijeenkomst besproken. De belangrijkste bevindingen zijn hieronder weergegeven.

### 4.1 Globale effecten op opbarstingsrisico

Verhoging van de zeespiegel leidt tot een vergroting van het opbarstingsrisico (zie bijlage A4). De locaties waar dit tot problemen kan leiden zijn grotendeels die gebieden waarbij onder de huidige omstandigheden ook al een opbarstingsrisico is. De nieuwe gebieden waar opbarsting een rol kan gaan spelen liggen in de IJsselmeerpolders. De uitbreiding van de gebieden zal vooral een rol gaan spelen bij zeer grote zeespiegelstijgingen (vanaf 2 m). Net zoals voor de veranderingen voor de andere parameters moet ook hier opgemerkt worden dat het opbarstingsrisico voor 1000x1000 m blokken bepaald is, terwijl opbarstingslocaties soms maar decimeters tot meters groot zijn. Het opbarstingsrisico zal op risicolocaties (dijkvoet langs rivieren en polders) waarschijnlijk hoger zijn dan nu berekend.

### 4.2 Lokale effecten op opbarstingsrisico en mogelijke maatregelen

Op basis van een eerste “brainstorm” met deskundigen uit de disciplines van de geotechniek is onderzocht bij welke zeespiegelstijging grote maatschappelijke consequenties te verwachten zijn voor de volgende geotechnische onderwerpen:

- Invloed op stabiliteit van de (cohesieve, slecht doorlatende) bovenlaag van de ondergrond. Het gaat daarbij om “opdrijven en opbarsten” van deze laag, wat tot verheugde kwel in een gebied kan leiden. Deze kwel zal, om de gebruiksfuncties te herstellen of in stand te houden, afgepompt moeten worden. Mogelijke maatschappelijke implicaties zijn een aanzienlijke toename van de kosten van drooglegging van een gebied, toename van zoute kwel en uiteindelijk ook het veranderen van gebruiksbestemmingen van gebieden. De omvang en effecten van toename van zoute kwel wordt in andere secties behandeld.
- Invloed op draagkracht van funderingen met als gevolg het optreden van vervormingen en zettingen die tot schade aan en onderhoudstoename van bestaande bebouwingen en infrastructuur kunnen leiden en/of veranderingen van ontwerpcodes en regels voor nieuw te bouwen constructies en infrastructuur.
- Invloed op constructies in de grond, zoals ondergrondse ruimten, tunnels, leidingen en leidingtunnels.
- Invloed op stabiliteit van (primaire) dijken (macro-stabiliteit, weerstand tegen onderloopsheid).

Effecten op andere gebruiksfuncties van de (onder)grond worden niet beschouwd. Denk hierbij bijvoorbeeld aan agrarisch gebruik, waarvoor verandering van beleid ten aanzien van (grondwater)peilbeheer en eventuele verzilting tot grote economische effecten kan leiden. Maatregelen in de sfeer van de ruimtelijke ordening vallen ook buiten het bereik van deze studie. Een inventarisatie van effecten van zeespiegelstijging ten aanzien van deze gebruiksfuncties en mogelijkheden om hier mee om te gaan is uiteraard wel relevant.

In het navolgende worden mogelijke directe gevolgen ten aanzien van bovengenoemde onderwerpen kort kwalitatief besproken en indien mogelijk beperkt gekwantificeerd.

#### **4.2.1 Opbarsten van de deklaag van het slappe lagenpakket**

Het gebied waar de zeespiegelstijging tot toenames leidt is een betrekkelijk smalle strook langs de kust van enkele kilometers. In de globale analyse is het gevaar voor opbarsten in kaart gebracht door vergelijking van de nieuwe stijghoogtes bij de verschillende scenario's (= druk onder het klei/veen-pakket) met geschatte gewichten van dit pakket (= dikte x volumegegewicht). Hieruit blijkt dat op betrekkelijk kleine schaal achter de kustlijn en langs de rivieren (bij gemiddelde rivierafvoeren) opbarsten kan voorkomen.

Op locaties waar vrijwel continu sprake zal zijn van opdrijven en/of opbarsten zal het gebruik van de ruimte moeten worden aangepast, of zal door maatregelen de kans op opbarsten moeten worden gereduceerd. In principe kun je bij dit laatste denken aan het verzwaren van de deklaag of het bemalen van de ondergrond.

Voor constructies die onvermijdelijk in zulke gebieden moeten liggen of moeten doorkruisen (denk bijvoorbeeld aan tunnels en leidingen) zullen aanpassingen nodig zijn; een deklaag die kan gaan opdrijven en/of opbarsten is ongeschikt als grondlaag voor stabiele fundering van zulke constructies. Bij nieuwbouw zal gekozen moeten worden voor diepere ligging van de fundering (in het Pleistoceen). Overigens wordt bijvoorbeeld voor (boor)tunnels nu ook al doorgaans de diepe pleistocene laag als funderingslaag gekozen.

#### **4.2.2 Mogelijke gevolgen voor ondergrondse leiding-infrastructuur (kabels en leidingen)**

Toename van de stijghoogte in de watervoerende grondlagen en hogere waterstanden in de rivieren, die het gevolg zijn van zeespiegelstijging, hebben consequenties voor leidingen die primaire waterkeringen kruisen en geboorde leidingen. De mogelijke problemen die bij ondergrondse leidinginfrastructuur zouden kunnen ontstaan wanneer de stijghoogte in het watervoerende pakket toeneemt, worden puntsgewijs besproken:

1. Toename van het kweldebiet langs leidingen die afdekkende grondlagen doorkruisen: Toename van de stijghoogte in het watervoerende pakket betekent een vergroting van het zogenaamde kwelgebied. Veel ondergrondse leidingen gaan door de bovenliggende afsluitende lagen. Door een toename van het potentiaalverschil zal het aantal leidingen waarbij er een kans is op kwel, toenemen.

2. Mogelijke problemen bij leidingen die primaire waterkeringen kruisen. In NEN 3651 wordt voor leidingkruisingen met primaire waterkeringen geadviseerd om het verticale alignement zodanig te bepalen dat, ná een eventuele zakking van de leiding, de kruisende leidingstrekking op dijktafelhoogte ligt. In overleg met de beheerder van de desbetreffende waterkering zou de onderkant van de leiding onder de dijktafelhoogte aangebracht kunnen worden. Indien hiervoor gekozen wordt, dan wordt in NEN 3651 het volgende voorgeschreven: de onderkant van de leiding moet worden aangebracht op een zodanig niveau dat deze niet lager ligt dan het ontwerppeil vermeerderd met de verwachte zakking van de leiding en een reserve van 0.1 m. In Nederland waren in 2001 3585 km primaire waterkeringen. Van een deel van de leidingen die deze waterkeringen kruisen, ligt de onderzijde van de kruisende leidingstrekking onder de dijktafelhoogte. Door stijging van het ontwerppeil van de dijken zullen meer van de bestaande leidingen onder dijktafelhoogte komen te liggen. Om kwel langs deze leidingen te voorkomen zullen per kruising maatregelen moeten worden genomen, zoals het plaatsen van damwanden en kwelschermen.

### **4.2.3 Effect van verzilting op grondeigenschappen**

Het effect van verzilting op de sterkte en doorlatendheid van klei speelt slechts in theoretisch opzicht voor kunstmatige kleigrondmengsels een rol. In natuurlijke kleien bevinden kleideeltjes zich zo dicht op elkaar en is de effectiviteit van oppervlaktelading van kleideeltjes zo gering door onder andere organische coating van deeltjes dat verandering van kationen in het poriewater effect sorteert. Hooguit zou er door osmotische werking in het traject van zoet naar zout enige krimp optreden.

### **4.2.4 Effecten op funderingen en ondergrondse constructies**

Hier worden effecten van toename van de stijghoogte van watervoerende zandlagen op funderingsconstructies etc. kwalitatief geïnventariseerd. Hierbij wordt er van uitgegaan dat die toename op zich niet leidt tot opdrijven en opbarsten van de slecht doorlatende deklaag, wel tot een verandering in de ruimtelijke verdeling van waterspanningen. Zoals eerder betoogd is bij opdrijven en opbarsten van de slecht doorlatende deklaag deze laag onbruikbaar voor stabiele verankering van constructies op en in de grond.

#### **4.2.4.1 Effect op maaiveldligging**

Door de stijging van de diepe stijghoogte van het grondwater zal er zwellen van met name de diepe holocene slappe bodemlagen optreden. De belastingverandering is echter relatief klein ten opzichte van al aanwezige spanningen in de bodem. De omvang van deze zwellen is daarom beperkt. Er kan sprake zijn van een geringe maaiveldrijzing, maximaal in de orde van grootte van enkele centimeters.



#### 4.2.4.2 Effect op draagkracht van staalfunderingen

Een stijging van de diepe stijghoogte kan doorwerken naar een stijging van de freatische grondwaterstand. De omvang van het effect hangt af van de mate waarin de toplaag beheerst wordt door oppervlaktewater of door de aanwezigheid van drainage. Over het algemeen is de stijging van de freatische grondwaterstand ten gevolge van stijging van de diepe stijghoogte in een onderliggend watervoerend pakket niet meer dan enige procenten.

Volgens Bijlagte e.a. (Het effect van grondwaterstijging op funderingen op staal, Geotechniek, april 2006) leidt tot verandering van de ondiepe of freatische grondwaterstand van kleine omvang (orde 0.1 à 0.2 m) tot een zeer geringe reductie van draagkracht. De zakking en de eventuele differentiële zetting die hiermee gepaard gaat, is zeer gering. De kans dat hieruit schade voortvloeit is verwaarloosbaar.

#### 4.2.4.3 Effect op draagkracht van paalfunderingen

De meeste paalfunderingen ontleen het grootste deel van hun draagkracht aan het puntdragvermogen. Dit draagvermogen kan afnemen als de waterspanning in de bodem toeneemt en de korrelspanning afneemt. Door een stijging van de stijghoogte met een meter neemt het puntdragvermogen met een omvang van maximaal circa 5 % af. Dit is als volgt bepaald: Bij een paalpuntdiepte van 20 m is de korrelspanning in de orde van grootte van 120 tot 150 kPa. Door een stijghoogtetoeename van een meter neemt die korrelspanning met 10 kPa af. De afname van de sondeerwaarde volgt dan uit:

$$q_{c,n} = q_{c,o} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_n^1}{\sigma_o^1}}$$

(CUR-richtlijn ontwerpregel trekpalen 2001-4).

De veiligheid in de ontwerpberekeningen van paalfunderingen is echter zo groot dat deze afname (bij stijging van de stijghoogte van 1 tot 2 meter) alleen in uitzonderingsgevallen zal leiden tot een te geringe draagkracht van de fundering. De optredende vervorming is slechts enkele millimeters zodat de kans op schade nihil is. Bij een grotere toename van de stijghoogte (enkele meters) wordt de veiligheid opgesoupeerd en neemt de kans op schadegevallen toe. We merken overigens op dat de grotere toenames pas op lange termijn verwacht worden, in het algemeen na de levensduur van de huidige constructies.

#### 4.2.4.4 Effect op panden met gemengd funderingstype

Ter plekke van panden waar aanbouwen zijn gerealiseerd met een ander funderingstype kunnen kleine verschilvervormingen optreden. Deze hangen samen met het verschil tussen mogelijk optredende maaiveldrijzing ter plaatse van op staal gefundeerde delen en delen op paalfundering. Uit de optredende verschilvervorming kan naar verwachting maximaal slechts kleine esthetische schade voortkomen. De kans op constructieve schade wordt klein geacht. Tevens zullen de vervormingen over vele jaren gespreid optreden (door de langzame stijging van de stijghoogte), wat een gunstig effect heeft op de opneembare vervorming. Eventuele constructieve schade wordt daardoor beperkt. Gezien de korte levensduur van

bebouwing, ten opzichte van de processnelheid bij zeespiegelstijging wordt geen substantieel effect verwacht.

#### **4.2.4.5 Schade door opdrijven van constructies**

Civiele constructies in waterkeringen zoals sluizen, dokken, toeritten van tunnels en dergelijke maar ook parkeergarages onder gebouwen zijn over het algemeen gedimensioneerd op opwaartse waterdruk tegen de onderzijde van de fundering. Dit geldt zeker tijdens de bouwfase maar ook in de gebruiksfase. Bij het ontwerp wordt ook uitgegaan van mogelijke extreme waterstanden in de betreffende fase. Daarmee wordt bij het aanbrengen van gewichtsconstructies of trekpalen rekening gehouden. De ontwerpveiligheid is meestal orde 10 % zodat relatief geringe veranderingen van de gemiddelde waterstand niet direct tot problemen zullen leiden. Bij grotere toename van de stijghoogte zal wel schade kunnen optreden. Ook hier dient te worden opgemerkt dat de grotere stijging pas op lange termijn verwacht worden.

#### **4.2.5 Toename Bouwkosten**

Door een toename van de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket zullen de kosten bij het maken van bouwputten toenemen. Door de hogere waterdruk zal de benodigde lengte van de toe te passen damwandplanken toenemen en zullen maatregelen moeten worden genomen om horizontaal evenwicht tijdens de bouw te kunnen garanderen (plaatsing meer ankers). Ook zullen de kosten voor het realiseren van verticaal evenwicht van de bouwputbodem tijdens de bouw toenemen. De intensiteit van bemaling zal door de hogere stijghoogte toenemen.

##### **4.2.5.1 Schade door belasting van grondwater op keermuren**

Hierbij wordt gedacht aan de horizontale belasting op keermuren door waterdruk. Een probleem kan zich voordoen bij toenemende belasting op waterdichte wanden langs toeritten van tunnels. Aangezien de toeritten van tunnels onder rivieren vaak de waterkering doorsnijden werkt daar mogelijk het grootste effect door peilverandering van rivierstanden door.

##### **4.2.5.2 Schade door verzilting voor keermuren en afdichting boorgaten**

Door verzilting van het grondwater wordt het milieu waarin stalen en betonnen wanden zich bevinden agressiever. Dit kan leiden tot noodzakelijk frequenter onderhoud of een kortere levensduur van dergelijke constructies.

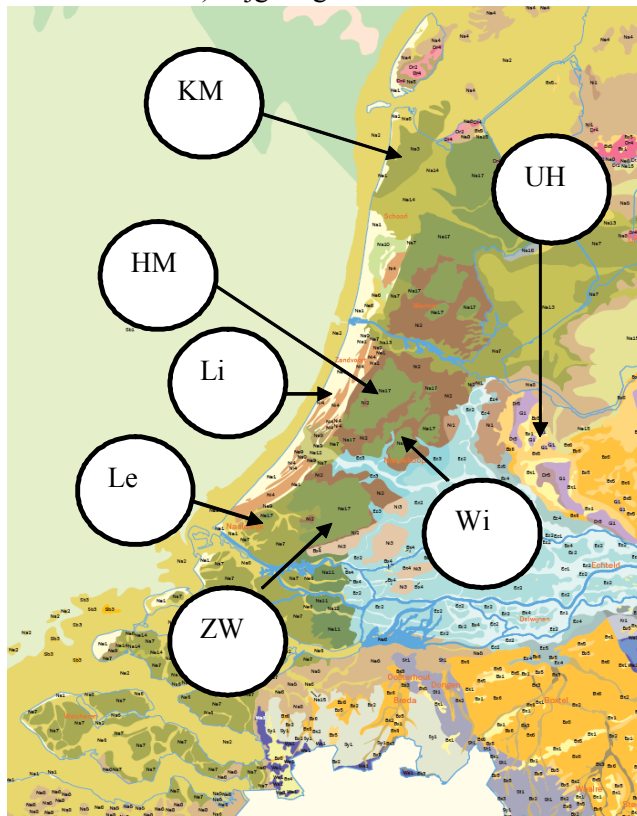
Verzilting van het grondwater heeft effect op afdichtingen van boorgaten (verticale boorgaten en boorgaten van horizontaal gestuurde boringen). Door toename van het zoutgehalte desintegreert de kleiafdichting en neemt de kans op kwel door een boorgat toe. Het dient te worden opgemerkt dat desintegratie een langdurig proces is zodat de effecten na langere termijn zichtbaar zullen worden.

### 4.2.5.3 Schade door vernatting

Het is wel mogelijk dat de freatische grondwaterstand in stedelijke gebieden langs de kust en grote rivieren op den duur enkele decimeters stijgt ten gevolge van de toenemende stijghoogte in diepere lagen. Daardoor kan overlast optreden. Deze overlast kan zich uiten in een toenemende frequentie van blank staan van kelders en kruipruimten in de betreffende gebieden. Ook in die gebieden langs de kustlijn waar de drooglegging al gering is kan verweking van het cunet of ballastbed van de infrastructuur optreden. Dit kan leiden tot toenemende schade door verminderde draagkracht van de verharding. Het benodigde wegonderhoud kan daardoor vaker worden. Ook kunnen kabels en leidingen in de wegcunetten hiervan te lijden hebben. Lekkende riolen zullen meer grondwater gaan afvoeren en de rioolzuivering daarmee extra belasten.

## 4.3 Opbarsten als gevolg van bodemdaling in veenweidegebieden

Los van zeespiegelstijging zal, met name in West-Nederland door bodemdaling onafhankelijk van de zeespiegelstijging het aantal opbarstlocaties toenemen. Voor een aantal locaties is de huidige veiligheid tegen opbarsten berekend (zie Figuur 4.1 en Tabel 4.1). Uitgangspunten voor de berekeningen zijn TNO kaartbeelden van de diepteligging van boven en onderkant van het holocene pakket (referentie: [www.dinoloket.nl](http://www.dinoloket.nl)) en (voor Noord- en Zuid-Holland) stijghoogten in het eerste watervoerende pakket (Griffioen et al, 2002).



Figuur 4.1 Locaties voor opbarstberekeningen (Tabel 4.1) Locaties: UH, Westrand Utrechtse heuvelrug; Wi, Wilnis omgeving; HM, Delen Haarlemmermeer; Li, overgang strandruggen naar veengebied ten zuiden oosten Haarlemmermeer; ZW, gebied tussen Waddinxveen en Zoetermeer; Le, gebied ten oosten van Leidschendam; KM, gebied ten zuiden van Den Helder.

Tabel 4.1 Opbarstveiligheden voor locaties in Zuid-Holland en toename van grondwaterpotentiaal waarbij opbarsten zal optreden (voorlaatste en laatste kolom)

Locatie/Gebied		maaiveld	top zandl.	dikte deklaag	gebied- grootte	huidige stijghoogte	opbarst veiligheid	V toename
		m + NAP	m + NAP	[m]	[km <sup>2</sup> ]	H [m+NAP]	n [-]	ΔH [m]
UH	max	1	-5	6	40	-2	2,6	4,1
UH	gem	0	-4	4	40	-1,5	2,1	2,2
UH	min	-1	-3	2	40	-1	1,3	0,4
HM	max	-4	-10	6	50	-5	1,7	2,6
HM	gem	-4,5	-8	3,5	50	-4,5	1,4	0,9
HM	min	-5	-7	2	50	-4	0,9	-0,5
Wi	max	-4	-11	7	50	-5	1,3	1,4
Wi	gem	-4,5	-10	5,5	50	-4,5	1,2	0,3
Wi	min	-5	-9	4	50	-5	1,2	0,2
KN	max	0	-8	8	30	1	1,3	1,6
KN	gem	-0,5	-6	5,5	30	0,5	1,2	0,8
KN	min	-1	-4	3	30	0	1,1	0,0
Li	max	-2	-10	8	30	-2	1,3	1,6
Li	gem	-2,5	-9	6,5	30	-1	1,1	-0,2
Li	min	-3	-8	5	30	0	0,8	-2,0
ZW	max	-4	-15	11	75	-5	1,4	2,3
ZW	gem	-5	-12	7	75	-4,5	1,1	0,3
ZW	min	-5,5	-10	4,5	75	-5	1,1	-0,1
Le	max	-3	-15	12	30	-3	1,4	3,4
Le	gem	-3,5	-12	8,5	30	-2	1,2	0,9
Le	min	-4	-9	5	30	-1	0,9	-1,6

In Tabel 4.1 zijn de resultaten van deze berekeningen weergegeven. Bedacht moet worden dat het om indicatieve schattingen gaat, die (nog) niet nader geverifieerd zijn. De gekozen locaties betreffen gebieden, waar op basis van globale inschatting, het eerst problemen te verwachten zijn. In de voorlaatste kolom zijn de huidige oprijf/opbarstveiligheden gegeven voor drie combinaties van (realistische) schattingen van de dikte van de holocene deklaag en de huidige stijghoogte in het onderliggende watervoerende zandpakket.

De laatste kolom bevat schattingen van de mate waarin de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket mag toenemen, voordat er opbarstproblemen ontstaan. Een negatieve waarde betekent dat er in beginsel al sprake is van lokaal opbarstingsrisico. Bedacht moet echter worden dat in Tabel 4.1 de onder- en bovengrenzen van de dikte van de holocene deklaag en de huidige stijghoogte in de watervoerende zandlaag vooralsnog even gecombineerd zijn, waardoor invloeden zijn “gestapeld”.

Gezien de snelle demping van effecten van zeespiegelstijging op toenames van de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket is het onwaarschijnlijk dat zeespiegelstijging de problemen ten aanzien van opbarsten in deze gebieden zal vergroten. Wel is het opbarstingsrisico in een aantal gebieden nu al aanwezig en zal in de toekomst toenemen. Maar de oorzaak hiervoor is echter eerder afname van de dikte van de holocene deklaag door de bodemdaling via oxidatie van het veen (klink) en door vergraving dan door de toenemende zeespiegelstijging.

#### 4.4 Gevolgen voor dijken langs de grote rivieren

De effecten van de verschillende scenario's voor zeespiegelstijging op de rivierwaterstand zijn gegeven in sectie 3.1, zowel voor “gemiddelde” rivierafvoeren als voor extreme (maatgevende) rivierafvoeren. Het beeld dat hieruit naar voren komt is dat zeespiegelstijging de rivierwaterstanden tot op grote afstanden vanaf de kust zullen beïnvloeden (ca 100 km). Berekend is ook dat de effecten in ongeveer even grote mate optreden bij gemiddelde rivierafvoeren en bij extreme rivierafvoeren. Voor de dijken langs de grote rivieren betekent dit dat over grote afstanden dijkverhogingen nodig zullen zijn. Verder zullen dijkversterkingen nodig zijn omdat bij de extreme afvoeren het verval (dwars) over de rivierdijken ongeveer in gelijke mate als het waterstandsverhogende effect toeneemt. Dit heeft gevolgen voor de stabiliteit en de weerstand tegen onderloopsheid van deze dijken.

In de huidige situatie is een groot deel van de dijken in het benedenriviergebied gevoelig voor “oprijven” van de binnendijkse (holocene) deklaag, waardoor massieve stabiliteitsbermen nodig zijn. Met de toename van de rivierwaterstanden bij extreme rivierafvoeren zal dit opdrijfgevoelige gebied zich veel verder oostwaarts uitstrekken, waardoor maatregelen om de stabiliteit te handhaven nodig zullen zijn.

In het midden en oosten van het land zijn dijken gevoelig voor onderloopsheid (piping) bij extreme rivierafvoeren. Brede zogenaamde pipingbermen moeten de kans op onderloopsheid beperken. Een verhoging van de rivierwaterstand zal, met deze huidige techniek, ertoe leiden dat deze pipingbermen moeten worden verbreed. Als indicatie geldt dat bij een toename van het verval over de dijk met 1 meter een toename van de breedte van de pipingberm van 15-18 m nodig is. Dit leidt tot een substantieel beslag op de ruimte langs de dijken.

Een geschatte orde van grootte van de kosten voor aanpassingen van rivierdijken is in Tabel 4.2 weergegeven. Uitgangspunten bij die schattingen zijn:

- Het effect van zeespiegelstijging op de waterstanden in de rivier komt tot 80-100 km vanuit de kust; hierbij is de afname van het effect ruwweg lineair verondersteld;

- Aangenomen is om totaal tussen de 600 en 1200 km rivierdijk te verhogen, waarvan 50% in benedenriviergebied (ber) en 50 % in bovenriviergebied (bor);
- Geschatte kosten van de dijkverhoging per km dijk in het benedenrivierengebied  $\approx (6 + 4 \cdot h)$  M€, h = dijkverhoging (in m);
- Geschatte kosten van de dijkverhoging per km dijk in het bovenrivierengebied  $\approx (3 + h)$  M€, h = dijkverhoging (in m).

Deze kostenschatting per km dijk is indicatief en geëxtrapoleerd op basis van het CPB document 82 2005, C.J.J. Eijgenraam, Veiligheid tegen Overstromen, Kosten/batenanalyse Ruimte voor de Rivier 1.

Tabel 4.2 Kosten rivierdijkaanpassingen (globale schattingen o.b.v. huidig prijspeil).

Scenario zeespiegelstijging	Kosten rivier(ban)dijk aanpassingen in Mld. €
1 m	4 - 9
2 m	6 - 12
4 m	9 - 17
6 m	12 - 23

Bij deze kostenschatting is er van uitgegaan dat dijkverhogingen realiseerbaar zijn met de huidige technieken. Gespeculeerd kan worden dat het tempo waarin zeespiegelstijging zich ontwikkeld voldoende ruimte laat voor ontwikkeling van technische innovatieve concepten. Er zijn geen aanwijzingen dat waterkeringen, met kerende hoogten die ruwweg twee keer zo groot zijn als de huidige kerende hoogten (in de zone direct achter de kust), technisch niet realiseerbaar zouden zijn. Aarden (stuw)dammen en rivierdijken met kerende hoogten van 15 meter of meer zijn, elders in de wereld, niet echt uitzonderlijk. Wel neemt het ruimtebeslag sterk toe, als vuistregel kan worden aangehouden dat met 1 m dijkverhoging, afhankelijk van de ondergrond, 10 tot 15 m ruimtebeslag gemoeid is.

## 4.5 Samenvattend

Van de potentieel meest gevoelige locaties voor opdrijven en opbarsten van de bovenste grondlaag ligt slechts een beperkt deel in de gebieden waar de stijghoogte in de watervoerende grondlagen door zeespiegelstijging substantieel wordt beïnvloed. In deze gebieden (veenweidegebieden) speelt de maaiveld daling door oxidatie van veen een grotere rol in de toename van het opbarstrisico. Deze bodemdaling zal op termijn vermoedelijk wel tot problemen met opbarsten van de bovenste grondlaag leiden.

In gebieden waar de stijghoogte in de watervoerende pakketten toeneemt, zal de grondwaterspanning veranderen en effect hebben op onder andere de draagkracht van funderingen, de grondwaterdruk op constructies in de bodem en de opdrijfkracht op deze constructies. Rekening houdend met de (rest levensduur en de snelheid waarmee de zeespiegel stijgt is de verwachting dat de gevolgen op de bestaande constructies betrekkelijk klein zijn. Bij stijgingen van meer dan ongeveer 1.5 meter worden de effecten substantieel. Verandering van het regiem van grondwaterspanningen zal leiden tot verzwaring van ontwerppuntspunten en uitvoeringseisen voor nieuw te bouwen constructies. Er is echter geen reden te veronderstellen dat huidige aanpakken en werkwijzen, die overigens ook voortdurend in ontwikkeling zijn, fundamenteel onmogelijk worden. Wel zal vanwege de toenemende kosten de druk om te innoveren toenemen.

In gebieden waar opbarsten wel zal optreden zullen óf maatregelen moeten worden genomen om dit te voorkomen, óf andere gebruiksbestemmingen moeten worden gevonden. Opdrijven en opbarsten van de bovenste grondlaag maakt dat die laag ongeschikt is voor de meest gebruiksfuncties. Opbarsten kan voorkomen worden door óf de grond op te hogen (groter gewicht van deklaag) óf de diepe watervoerende lagen te bemalen (toename -zoutwaterbezwaar).

Er zullen grote verhogingen van de rivierdijken nodig zijn om het effect van toenemende rivierstanden, tot ver in het binnenland, als gevolg van stijging van de zeespiegel op te vangen. De benodigde investeringen hiervoor zijn groot. Er zijn geen aanwijzingen dat zulke verhogingen technisch niet uitvoerbaar zouden zijn. Hiervoor is wel ruimte nodig, dit zal de druk op de ruimte doen toenemen. Belangrijk hierbij is ook dat de beleving van veiligheid, bij publiek zowel als bestuurders, kan veranderen. Indien aanzienlijk hogere dijken dan nu doorbreken, zullen ook de gevolgen (veel) groter zijn dan met de huidige dijken. In de discussies over dijkverhoging versus rivierverruiming speelde deze beleving van het overstromingsrisico ook een rol. Een mogelijke oplossing, die zowel tegemoet zou kunnen komen aan ruimtedruk als aan veiligheidsbeleving, en daarom dus nader onderzocht zou kunnen worden, is het “mega”-dijken concept, zoals bijvoorbeeld toegepast in Japan. Hierbij gaat het om zeer brede dijken, die nagenoeg doorbraakvrij zijn, en die ook geschikt zijn voor bebouwing en andere gebruiksfuncties. Uiteraard is hierbij de ruimtelijke inpassing een belangrijk vraagstuk.

Anders dan bij (toenemende) rivierafvoeren zijn ruimtelijke maatregelen (om waterstanden te beheersen) slechts dan een optie indien een fundamenteel andere gebiedsinrichting in het westen van Nederland wordt overwogen.

## 5 Resultaten met betrekking tot drainage en kwel

### 5.1 Drainage van Nederland

De toename van de benodigde drainagecapaciteit is sterk afhankelijk van de te kiezen strategie voor de toekomstige ontwikkeling van het watersysteem in Nederland. Binnen dit project was het niet mogelijk hiervan een gedetailleerde uitwerking te maken. In grote lijnen zijn er drie opties:

1. Alleen de waterstanden in de grote rivieren en het IJsselmeer stijgen met de zeespiegel mee. De lagere gebieden die draineren op deze wateren worden/blijven poldergebied;
2. het gehele watersysteem in het gebied dat gelijk of onder de zeespiegel ligt wordt opgehoogd met een stijgende zeespiegel. Hierbij zijn dan twee mogelijkheden:
  - 2.a alleen het watersysteem wordt opgehoogd;
  - 2.b of het gehele gebied wordt verhoogd;
3. Nederland wordt volledig als polder ingericht waarbij de riviermondingen worden afgesloten van de zee.

In optie 1 zullen meer gemalen moeten worden ingezet om de drainage te verzorgen tussen de boezemwateren en het hoofdwatersysteem. Zowel de hoogte waarover het water moet worden opgepompt als het gebied dat op deze wijze moet worden ontwaterd neemt toe.

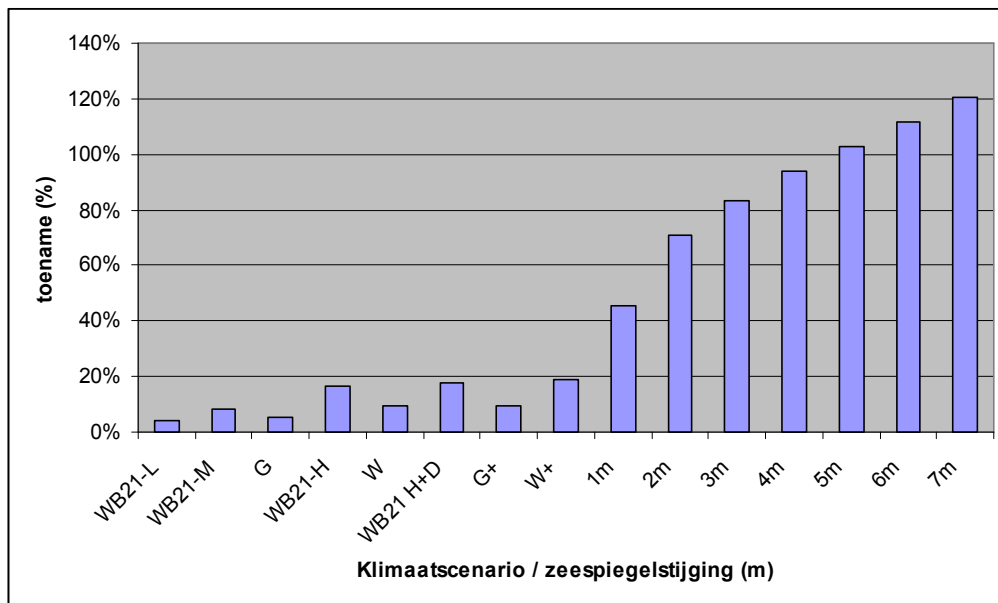
In optie 2a zullen er meer (kleine) gemalen moeten worden ingezet om het water uit te malen van de poldergebieden in het boezemsysteem. In optie 2b zijn geen extra gemalen nodig als gevolg van zeespiegelstijging omdat het deel van Nederland dat onder de zeespiegel komt te liggen niet groter wordt, immers het maaiveld wordt verhoogd. Wel zou uitbreiding van de pompcapaciteit als gevolg van een toename van het neerslagoverschot mogelijk noodzakelijk kunnen zijn.

In optie 3 is een aantal zeer grote pompen nodig omdat in dit geval niet alleen het wateroverschot van Nederland dient weggepompt te worden maar ook de volledige afvoer van de grote rivieren.



### 5.1.1 Gevolgen van zeespiegelstijging ten opzichte van neerslagtoename

Voor optie 1 geeft Figuur 5.1 een indruk van de toenemende gemaalcapaciteit als gevolg van de zeespiegelstijging in vergelijking met de toename die nodig zou zijn indien het klimaat zich zou ontwikkelen volgens de verschillende scenario's. Als scenario's zijn de WB21 scenario's en de KNMI 2006 scenario's gekozen. Hiervan is alleen de verandering in het neerslagoverschot meegenomen en niet de zeespiegelstijging. Verondersteld is verder dat de toename in gemaalcapaciteit dezelfde trend zal volgen als de toename van het wateroverschot. Een toename van de kwel als gevolg van een stijgende zeespiegel is hier buiten beschouwing gelaten. Deze wordt later meer in detail besproken.



Figuur 5.1 Toename van de benodigde pompcapaciteit ten behoeve van de drainage afhankelijk van klimaatscenario's en zeespiegelstijging. WB21-L = WB21-Laag scenario; WB21-M = WB21 Middenscenario; WB21-H = WB21 hoog scenario; G, G+, W en W+ zijn de KNMI 2006 scenario's.

Figuur 5.1 suggereert dat het belang van een verhoging van de zeespiegel voor zeespiegelstijgingen van 1 m en meer veel groter is voor de toename van de pompcapaciteit dan de verandering van het neerslagoverschot. Dit kan echter niet met zekerheid worden gesteld. Voor de onderbouwing hiervan is het nodig te weten welke gebieden nu draineren via vrij verval op het oppervlaktewater en welk deel daarvan bij een stijgende zeespiegel dit niet meer kan doen. De noordelijke provincies Friesland en Groningen zijn voorbeelden van dergelijke gebieden. Wel kan worden geconcludeerd dat de stijging van de zeespiegel bij de beoordeling van de toename in de benodigde gemaalcapaciteit een grote rol moet spelen. Immers de stijging van de zeespiegel is een trend die met zeer grote waarschijnlijkheid zal aanhouden en zekerder is dan de vergroting van de neerslag. Zelfs al zouden de neerslag en verdamping niet veranderen, zal er door de stijgende zeespiegel meer gemaalcapaciteit nodig zijn. Uitgaande van een eens in de 10 jaar optredend neerslagoverschot van 98 mm (zie Tabel 2.4) en een toename van te draineren oppervlak van ongeveer 1.2 miljoen ha. (zie Tabel 2.3) zou bij een extreme stijging van 7 m een toename van de pompcapaciteit nodig zijn van omstreeks 1400 m<sup>3</sup>/s.

### 5.1.2 Maximaal denkbare toename van de gemaalcapaciteit

Een aanvullende pompcapaciteit van 1.400 m<sup>3</sup>/s valt volledig in het niet bij de benodigde toename die noodzakelijk zou zijn indien optie 3 als strategie wordt gekozen. Dit zou namelijk betekenen dat niet alleen het Nederlandse wateroverschot weggepompt zou moeten worden maar ook de afvoer van de grote rivieren. De gemiddelde afvoeren van Rijn en Maas zijn respectievelijk 2.200 m<sup>3</sup>/s en 300 m<sup>3</sup>/s. Indien Nederland als een polder wordt ingericht moet de capaciteit ook voldoende zijn om gedurende extreem hoogwater al het water af te voeren. De maatgevende afvoeren van de Rijn en de Maas zijn momenteel vastgesteld op respectievelijk 16.000 m<sup>3</sup>/s en 3.800 m<sup>3</sup>/s. Om deze volumes af te voeren zou de toename van de pompcapaciteit dus meer dan 10 maal zo groot zijn.

Het huidige grootste pompstation ter wereld heeft een capaciteit van 300m<sup>3</sup>/s waarbij het water over een hoogte van 30 meter omhoog kan worden gebracht (Toshka Valley pompstation in Egypte). Uitgaande van de 300 m<sup>3</sup>/s betekent dit dat er alleen voor de Rijntakken 60 pompstations van 300 m<sup>3</sup>/s nodig zijn. Al deze pompen zouden afvoerkanalen moeten hebben met elk een capaciteit van 300 m<sup>3</sup>/s (de gemiddelde afvoer van de Maas). Momenteel wordt het merendeel van het water via West-Nederland naar zee afgevoerd. Voor een dergelijk aantal stations inclusief de inlaat- en uitlaatwerken is hier weinig ruimte. Een oplossing zou zijn om en groter deel van het water van de grote rivieren af te leiden naar het IJsselmeer of naar de Zeeuwse wateren. Hierbij worden deze wateren samen met Markermeer en de Waddenzee gebruikt als getrapt systeem van boezemwater. De piekafvoer van de Rijn zou dan voor een veel groter deel door de IJssel moeten worden geleid en het IJsselmeer/Markermeer zou moeten functioneren als retentiebekken. Dit zou een grote verbreding van het winterbed in het IJsseldal betekenen, met alle ruimtelijke consequenties hiervan.

Indien zou worden toegestaan dat het IJsselmeer gedurende een maatgevende afvoer 4 meter opgezet zou mogen worden en 90% van de afvoer van de Rijn via het IJsseldal zou kunnen worden afgevoerd volstaan 6 pompstations langs de Afsluitdijk. In dat geval zijn nog steeds ook 6 stations nabij Rotterdam noodzakelijk om het water van de Waal te lozen.

### 5.1.3 Samenvattend

De stijgende zeespiegel zal ook leiden tot een vergroting van het oppervlak dat niet meer onder vrij verval kan lozen op zee. Dit zal wel leiden tot een vergroting van de benodigde gemaalcapaciteit. Momenteel wordt de vergroting van de pompcapaciteit vrijwel altijd in verband gebracht met de toename van het wateroverschot als gevolg van een vergroting van de neerslag in de winter. De analyse laat echter zien dat het effect van zeespiegelstijging waardoor een groter deel van Nederland via gemalen zal moeten lozen mogelijk een grotere rol kan gaan spelen. De kosten van de drie opties lopen natuurlijk sterk uiteen. De kosten van de toenemende gemaalcapaciteit lijken in de opties 2a en b en vermoedelijk ook 3 maar een fractie uit te maken van de totale kosten. In optie 1 zal de toenemende gemaalcapaciteit wel een substantieel deel van de kosten vormen.

## 5.2 Drainage in poldergebieden

In de bijlage A zijn de kaarten met de resultaten voor de met betrekking tot grondwaterdruk, kwel, zoutlast, opgenomen. Deze resultaten zijn in een expertbijeenkomst besproken. De belangrijkste bevindingen zijn hieronder weergegeven.

### 5.2.1 Effecten op stijghoogten

Bijlage A1 geeft een kaart voor Nederland met het effect op de stijghoogte.

- De invloedsgebieden zijn opvallend klein en daarom lijkt het gebied beperkt dat met de gevolgen te maken gaat krijgen. Dit geldt zelfs voor zeer grote zeespiegelstijgingen, in combinatie met een significante bodemdaling. Zo is het effect van een zeespiegelstijging van 6 meter zelfs in de diepe polders in Zuid- en Noord-Holland minimaal.
- De gebieden die de gevolgen van grote stijgingen zullen merken zijn die gebieden dicht langs het open water. Het stedelijk gebied in de duinrand en de IJsselmeerpolders zijn de regio's die met de gevolgen te maken krijgen.
- Lokaal kunnen de effecten wel groter zijn dan de kaart suggereert. Dit komt omdat de berekeningen zijn uitgevoerd op een gridgrootte van 1000 bij 1000 meter en de waardes een gemiddelde weergeven in een dergelijk blok. Ook kunnen gedurende extreme hoge afvoeren langs de rivieren de effecten tijdelijk groter zijn dan hier geschetst. Dit is met name belangrijk voor de zones dicht langs de waterkeringen. Op grond van deze berekeningen kunnen geen uitspraken worden gedaan voor bijvoorbeeld de lokale stabiliteit van dijken. Dit zou nader onderzoek behoeven.

### 5.2.2 Effecten op kwelflux

Bijlage A2 geeft een kaart voor Nederland met het effect op de kwelflux.

De gevolgen in termen van extra kwel lijken beperkt. De toename van de hoeveelheid uit te malen kwelwater is 2 – 13% voor het gehele land, in geval van een significante bodemdaling waarschijnlijk enkele procenten hoger. De gebieden waar lokaal grotere effecten zijn te verwachten beperken zich tot dezelfde zones waar de grondwater druk toeneemt. De onderzochte polder Duiveland in Zeeland is zo'n gebied, alsmede het eiland Texel (Oude Essink, 2004). In het voorbeeld van de polder Duiveland is daarom meer in detail onderzocht of de toenames belangrijke consequenties kan hebben. Deze analyse is beschreven in sectie 5.3.

### 5.2.3 Effecten op zoutbelasting

Bijlage A3 geeft een kaart voor Nederland met het effect op de zoutbelasting.

De zoutgehaltes in het grondwater zullen toenemen. In combinatie met de toename van de kwel is binnen de invloedssfeer van een zeespiegelstijging een sterke toename van de zoutbelasting op het oppervlaktewater te verwachten. Het kaartbeeld laat zien dat voor een groot deel van Nederland de zoutgehaltes in het grondwater gaan lijken op die vandaag de dag in Zeeland te vinden zijn, alwaar het waterbeheer vaak gestuurd wordt door verziltingsprocessen in het grond- en oppervlaktewatersysteem. Regio's die met grote zoutgehaltes rekening zullen moeten gaan houden zijn met name Zeeland en de gebieden in de kop van Noord-Holland, Texel en Friese kust.

## 5.2.4 Samenvattend

De effecten van stijging van de zeespiegel (van 1, 2, 4 en 6 meter) en de daarbij horende bodemdaling op de stijghoogte in watervoerende pakketten lijken zich te beperken tot een betrekkelijk smalle strook langs de Noordzeekust, langs de randen van het IJsselmeer en andere meren en langs de grote rivieren. Hierbij is ervan uitgegaan dat de polderpeilen door bemaling niet zullen wijzigen en dat de zeespiegelstijging ook de rivierwaterstanden omhoog zal brengen in de benedenrivieren.

## 5.3 Waterbalans van Polder Duiveland

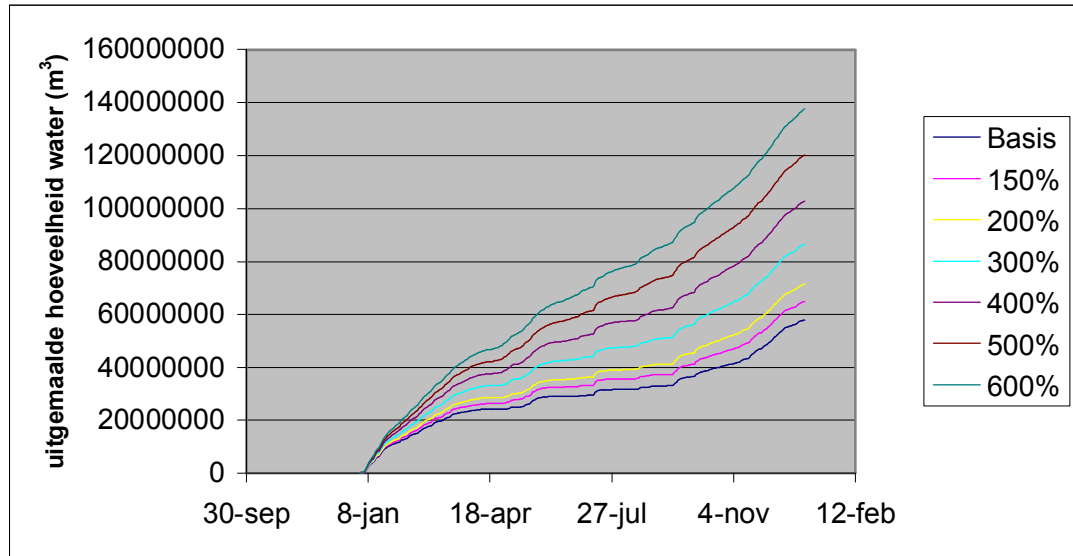
De hoeveelheid water die ten gevolge van neerslag het watersysteem van Polder Duiveland binnenkomt, is 70 miljoen kubieke meter. Voor een oppervlakte van het gebied van bijna 100 vierkante kilometer komt dit neer op ruim 700 mm voor het gehele jaar. In de basis modelberekening komt er 18 miljoen kubieke meter water het systeem binnen ten gevolge van kwel, gezamenlijk van het onverharde gebied en het open water gebied. De verhouding regenwater kwelwater wat het gebied binnen komt is 80% regenwater ten opzichte van 20% kwelwater. Naarmate de kwel wordt opgehoogd voor de verschillende modelberekeningen veranderen deze verhoudingen en bij een kwelverhoging van 400% komt er meer kwelwater het systeem binnen dan regenwater. Bij de grootste kwelverhoging van 600% komt er 109 miljoen kubieke meter water het systeem binnen via de kwel. De verhouding is dat 39% van het binnenkomende water komt van neerslag en 61 % komt van kwel. Tabel 5.1 geeft voor de verschillende modelberekeningen de verhoudingen tussen de hoeveelheid regenwater en kwelwater weer dat het watersysteem binnenkomt.

Tabel 5.1 Verhouding regenwater - kwelwater dat het watersysteem binnenkomt voor de verschillende modelberekeningen.

	<b>Basis</b>	<b>150%</b>	<b>200%</b>	<b>300%</b>	<b>400%</b>	<b>500%</b>	<b>600%</b>
regen	80%	72%	66%	56%	49%	44%	39%
kwel	20%	28%	34%	44%	51%	56%	61%

### 5.3.1 Gemalen

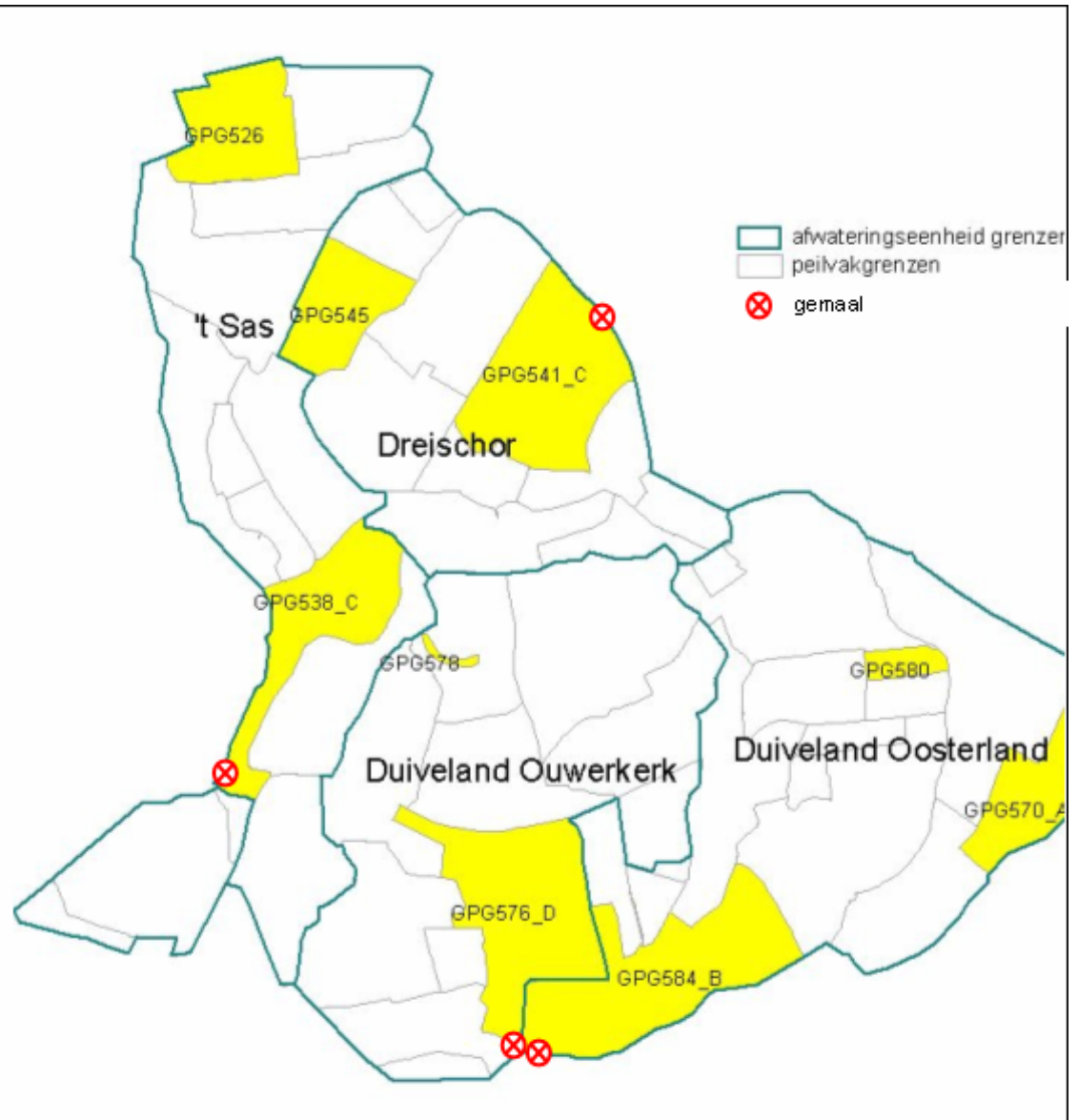
Door de grote extra hoeveelheid water dat het systeem binnenkomt moeten de gemalen meer water uit het gebied pompen. Figuur 5.2 geeft de cumulatieve hoeveelheid uitgemaald water door de pompen aan ten opzichte van de tijd. Duidelijk is te zien dat de hoeveelheid water dat uit het gebied moet worden gemalen sterk toeneemt met de verhogingen van de hoeveelheid kwel. In de basis modelberekening wordt door de gemalen totaal 58 miljoen kubieke meter uitgemaal. Bij de kwelverhoging van 600% is dit ruimschoots verdubbeld en wordt er totaal 138 miljoen kubieke meter water uitgemaal. Gezamenlijk hebben de gemalen in dit gebied een pompcapaciteit van 19.19 m<sup>3</sup>/s, voor dit gebied komt dat neer op 16.6 mm/dag. Theoretisch zouden deze gemalen wanneer zij 24 uur per dag aan staan ruim 605 miljoen kubieke meter per jaar kunnen wegpompen. Dit zal in werkelijkheid niet mogelijk zijn, maar het geeft aan dat de extra hoeveelheid water die moet worden weggepompt door de toename van de kwel nog wel binnen de marge van de beschikbare pompcapaciteiten ligt.



Figuur 5.2 Cumulatieve hoeveelheid uitgemaald water in poldergebied Duiveland.

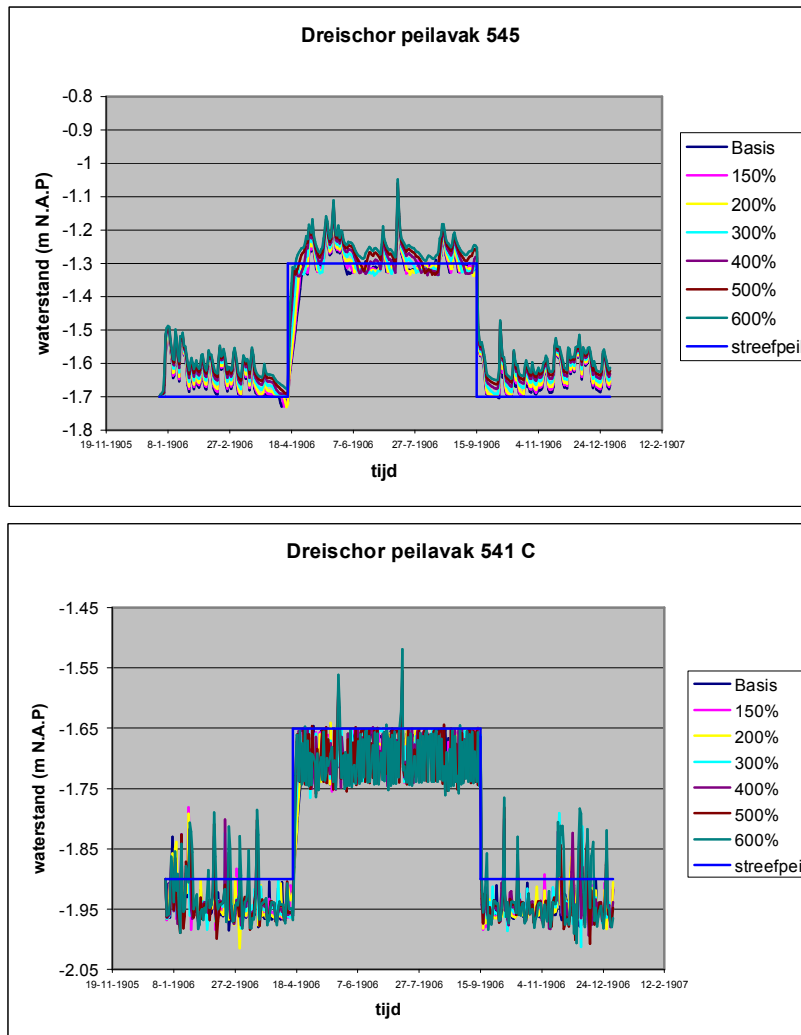
### 5.3.2 Waterstanden

Om te onderzoeken wat het effect is van de kweltoename op de optredende waterstanden in het gebied is voor verschillende peilvakken de optredende waterstand gedurende het jaar geanalyseerd. Er is hierbij een selectie gemaakt uit de 52 peilvakken binnen het gebied. Van de vier grote afwateringseenheden zijn ten minste twee peilvakken uitgekozen, één ter plaatse van het uitwateringsgemaal, en één verder stroomopwaarts binnen de afwateringseenheid. Doordat de gemalen bij een verhoging van de kwel meer van hun pompcapaciteit kwijt zijn aan het wegmalen van het kwelwater is het met name interessant of deze reductie in beschikbare pompcapaciteit erg ten koste gaat van de benodigde maalcapaciteit bij piekgebeurtenissen, zoals bij hevige regenbuien. Per peilvak zijn de optredende waterstanden van de 7 verschillende modelberekeningen bepaald. De selectie van peilvakken waarvan de optredende waterstanden in grafieken zijn gezet is weergegeven in Figuur 5.3.



Figuur 5.3 Selectie van peilvakken waarvan de optredende waterstanden zijn bepaald.

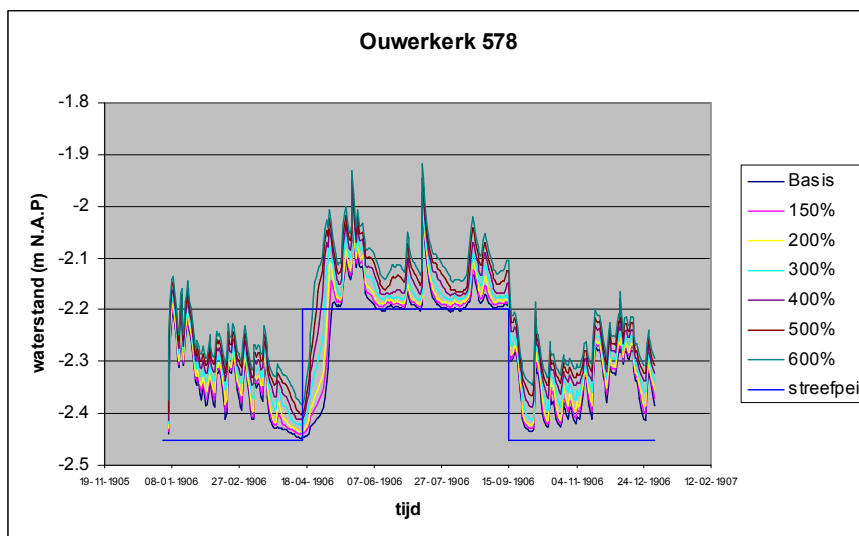
Figuur 5.4 geeft een voorbeeld van het verloop van de waterstand in een dergelijk peilgebied zowel bovenstrooms als benedenstrooms.



Figuur 5.4 Waterstanden van de peilvakken 545 (bovenstrooms) en 521 C (bij gemaal) in afwateringseenheid Dreischor voor de verschillende modelberekeningen.

De figuur laat zien dat in het bovenstroomse peilvak 545 in de afwateringseenheid Dreischor bij de verhoging van de kwel een lichte constante waterstandsverhoging optreedt. De veranderingen blijven echter ruim binnen de huidige seizoensfluctuaties. In het benedenstroomse peilvak 541 C, waar het gemaal zich bevindt, blijft de waterstand goed onder controle ondanks de verhoging van de kwel. Wel resulteert een sterke verhoging van de kwel ook hier tot een lichte verhoging van het aantal pieken in de waterstand bij hevige neerslaggebeurtenissen.

Ook in het bovenstroomse peilvak 578 in de afwateringseenheid Ouwkerk is bij de verhoging van de kwel een constante waterstandsverhoging zichtbaar (Figuur 5.5). Bij de toename van de kwel gaat het hier om een waterstandsverhoging van ruwweg 8 cm. Hoewel de reactie van de waterstanden op de verhoging van de kwel varieert in details, blijven ook hier de waterstanden van de verschillende modelberekeningen binnen de marges van de huidige seizoensfluctuaties.



Figuur 5.5 Waterstanden van het peilvak 578 (bovenstrooms) in afwateringseenheid Ouwkerk voor de verschillende modelberekeningen.

### 5.3.3 Samenvattend

Uit de analyses blijkt dat zelfs bij zeer grote verhogingen van de kwel de gevolgen voor de optredende waterstanden in de watersystemen in de polders gering is. Op basis van de zeespiegelstijgingen neemt de kwel met veel minder grote percentages toe dan waarmee hier gerekend is. Voor zeespiegelstijgingen tot 6 meter blijft in de polder Duiveland het aandeel van de neerslag in de uit te pompen hoeveelheid water veel groter dan het aandeel van de kwel. De toename van de kwel als gevolg van zeespiegelstijging zal derhalve niet of nauwelijks leiden tot een vergroting van de benodigde drainage capaciteit.



## 6 Conclusies

### 6.1 Conclusies van het onderzoek ten aanzien van de rivieren

De offerteaanvraag noemt de volgende belangrijke vragen rond de stagnerende rivierafvoeren als gevolg van zeespiegelstijging:

1. **Wanneer (op welke termijn) gaat de stagnatie van de rivierafvoeren daadwerkelijk tot problemen leiden, ervan uitgaande dat het riviersysteem niet wordt afgesloten van zee?**

Verhoging van de zeespiegelstand leidt voor de benedenrivieren direct tot een toename van de waterstanden die verdere dijkversterking noodzakelijk maakt indien de huidige veiligheidsnormering gehandhaafd moet worden. Vanaf een zeespiegelstijging van 4 m komen de waterstanden op verschillende rivierlocaties in de Rijn-Maasmonding boven de kruinhoogten uit. Verdere dijkversterking is technisch mogelijk. De ruimte om dergelijke dijkversterkingen uit te voeren is in het gebied tussen Dordrecht en Europoort echter gering.

2. **Wat betekent deze stagnatie voor de waterhuishouding van Nederland? Niet alleen voor de afvoerende rivieren, maar ook de regionale watersystemen.**

Poldergebieden draineren hun overtollige water deels naar de rivieren. Zolang de rivierwaterstand lager is dan de binnenwaterstand kan de drainage eenvoudig plaatsvinden door vrij verval. Als de buitenwaterstand hoger wordt dan de binnenwaterstand moet het overtollige water naar buiten toe worden gemalen. Voor de polders die in het benedenrivierengebied liggen zal de pompcapaciteit moeten toenemen omdat het water over een grotere hoogte moet worden opgepompt. Voor het bovenrivierengebied zullen de extra maatregelen beperkt zijn omdat de invloed van de zeespiegelstijging op de waterstanden afneemt met een toenemende afstand tot de kust. (uit NL Later en Water, WL | Delft Hydraulics, 2007).

3. **Hoe zal de benodigde inzet (capaciteit en kosten) van gemalen zich ontwikkelen om de afvoer van de rivieren en regionale systemen zeker te stellen?**

Voor extreme zeespiegelstijgingen zal de benodigde inzet van gemalen sterk afhankelijk zijn van de te volgen waterbeheerstrategie. Indien de huidige strategie wordt voortgezet, zal een toename van de gemaalcapaciteit noodzakelijk zijn omdat de omvang van het gebied dat onder de zeespiegel ligt toeneemt en daarmee niet meer onder vrij verval kan lozen. Deze toename is met name voor een stijging tussen de 0 en 2 meter groot. De toename van de gemaalcapaciteit wordt ook verwacht als gevolg van de grotere toekomstige neerslag. Voor Nederland als geheel lijkt verhoudingsgewijs de toename als gevolg van de zeespiegelstijging groter dan als gevolg van de verhoging van de neerslag. De toename van de gemaalcapaciteit bij zeer grote zeespiegelstijgingen (7 m) ligt in de orde van 1400 m<sup>3</sup>/s. Uitgaande van een vuistregel dat de kosten 1 MEURO per m<sup>3</sup>/s bedragen zou dit een investering betekenen van 1.4 Miljard EURO. Veel meer gemaalcapaciteit zal noodzakelijk zijn indien ook de rivierafvoeren uitgeslagen zouden moeten worden.

De ordegrootte van de toename ligt dan op 20.000 m<sup>3</sup>/s, dit om ook gedurende extreme hoge afvoeren het water kwijt te raken. Hiervoor zijn ongeveer 80 gemalen met een capaciteit van het gemaal in IJmuiden nodig. De ordegrootte van het benodigde bedrag is dan 20 Miljard EURO, 2 maal de totale kosten van de Deltawerken.

#### **4. In hoeverre kan afleiding van de (piek)afvoer via IJssel en IJsselmeer de inzet van gemalen verminderen?**

Een groot probleem bij het malen van de rivierafvoeren is de omvang van de inlaten. Hiervoor is in West-Nederland weinig plaats. Ook kan afleiding de inzet van de benodigde gemalen aanzienlijk verminderen. Afleiding van het water via de IJssel in plaats van via de Waal kan bijdragen aan de oplossing van dit probleem. Ook afleiding van het water in de Merwede naar de Zuid-Hollandse en Zeeuwse wateren draagt bij. Het IJsselmeer zou dan als boezem/retentiegebied kunnen fungeren net als de Zuid-Hollandse en Zeeuwse wateren. Dit zal wel leiden tot een grote vraag naar ruimte voor de rivier de IJssel, aanpassing van de dijken langs het IJsselmeer en kunstwerken die de afleidingen mogelijk maken.

## **6.2 Conclusies van het onderzoek ten aanzien van de toenemende kwel**

De offerteaanvraag noemt de volgende belangrijke vragen rond de toenemende kwel als gevolg van zeespiegelstijging:

### **1. Hoe zit de problematiek van het “opbarsten van de bodem” in elkaar, waarbij aandacht voor de situatie in diepe droogmakerijen, in de veengebieden en in het rivierengebied. Speelt deze problematiek in zowel Noord- als West-Nederland?**

Met betrekking tot veiligheidsaspecten zijn de gevolgen van verhoogde grondwaterdruk voor eventueel opbarsten van de deklaag van belang. Dit risico neemt toe, maar lijkt zich te beperken tot goed te identificeren zones langs de grote wateren en in de IJsselmeerpolders. Het toenemende risico heeft gevolgen voor de stabiliteit van dijken. Deze kunnen in de huidige studie nog niet goed worden ingeschat. Echter door aangepast ontwerpen van de waterkeringen lijken de gevolgen beheersbaar.

### **2. Wanneer (op welke termijn) gaat het opbarsten van de bodem als gevolg van zeespiegelstijging en bodemdaling (veengebieden; zout- en gaswinningen) en de hieraan gekoppelde toename van de kweldruk en zoutbelasting op grotere schaal voorkomen en wat betekent dit voor gebruiksfuncties? Worden er gebruiksfuncties onmogelijk vanwege fysieke omstandigheden cq. grote schades?**

De resultaten van deze verkenning geven geen aanleiding om te veronderstellen dat gebruiksfuncties op grote schaal door opbarsten van de bodem zullen worden beïnvloed, anders dan door eventuele toename van het veiligheidsrisico met betrekking tot het onstabiel worden van waterkeringen.

**3. Welke gebieden vormen de belangrijkste risicogebieden voor het opbarsten van de bodem (Kenmerken en kaartbeeld droogmakerijen, veengebieden, rivierengebied)?**

De belangrijkste risicozones liggen langs de grote rivieren en in de IJsselmeerpolders.

**4. Wat zijn de consequenties van de toenemende kweldruk in laag Nederland (afvoer van brakwater, pompcapaciteit, functies, etc.) bij een zeespiegelstijging van 1, 2, 4 en 6 m?**

Vergroting van de kwelstromen betekent dat meer water weggepompt zal moeten worden uit Nederland. Zelfs bij zeer grote zeespiegelstijgingen blijven de hoeveelheden relatief klein ten opzichte van de drainagecapaciteit die nodig is om overtollig regenwater af te voeren. De verzilting van het oppervlaktewater zal de inlaat van zoetwater in het benedenrivierengebied bemoeilijken. Dit terwijl extra doorspoelen van polders nodig zal zijn om zout en nutriënten te verwijderen. Er andermaal vanuit gaande dat de riviermondingen open blijven en het Haringvliet dicht blijft, zullen de inlaatpunten voor zoet water (Figuur 3.9) naar locaties verder bovenstrooms gebracht moeten worden.

**5. Wat zijn mogelijke maatregelen om opbarstproblemen te voorkomen en de orde grootte kosten daarvan?**

Problemen met betrekking tot opbarsting zijn uiteenlopend en daarmee zijn verschillende maatregelen mogelijk. Opbarsten kan voorkomen worden door óf de grond op te hogen (groter gewicht van deklaag) óf de diepe watervoerende lagen te bemalen (toename -zoutwaterbezwaar). Kostenschattingen hiervoor zijn op basis van de uitgevoerde analyse niet mogelijk omdat de opbarstproblematiek erg lokaal zal zijn. Voor wat betreft de effecten op de infrastructuur is de verwachting dat de gevolgen op de bestaande constructies betrekkelijk klein zijn als we rekening houden met de rest levensduur van de infrastructuur en de snelheid waarmee de zeespiegel stijgt. Bij stijgingen van meer dan ongeveer 1,5 meter worden de effecten substantieel. Bij de huidige inzichten is een dergelijke stijging zelfs niet in een worst-case scenario binnen de komende 100 jaar te verwachten.

## **6.3 Interpretatie van resultaten in termen van risico's**

### **6.3.1 Risico's samenhangend met veranderingen in de rivieren**

- Verhoging van de zeespiegelstand leidt tot een toename van de waterstanden in de benedenrivieren. Vanaf een zeespiegelstijging van 4 m komen de waterstanden op verschillende rivierlocaties in de Rijn-Maasmonding boven de huidige kruinhoogten uit.
- Een toename van de waterstanden tijdens gemiddelde omstandigheden door enerzijds een toename van de gemiddelde rivierafvoeren en anderzijds zeespiegelstijging kan er toe leiden dat de dijken langs de rivieren onder een continue druk komen te staan. Met een dergelijke druk wordt nu incidenteel tijdens hoogwatercondities rekening gehouden. Daarnaast veroorzaken hogere waterstanden een grotere druk op het grondwater, wat mogelijk het gevaar van piping en kwel achter de dijk kan versterken.
- Zeespiegelstijging in combinatie met een afname van de laagwaterafvoer zal in de toekomst zorgen voor een verdere landinwaartse zoutindringing. Bij 6 meter zeespiegelstijging spreidt de zoutinvloed zich uit tot oostelijk van Gorinchem in de Merwede en oostelijk van Vianen in de Lek.

### 6.3.2 Risico's samenhangend grondwater veranderingen

De volgende algemene conclusies zijn in de bijeenkomst van de experts getrokken:

- Effecten zeespiegelstijging op grondwaterstijghoogten zijn relatief beperkt.
- Risicogebieden qua stijghoogteverhoging, toename kwel en zoutbelasting zijn Zeeland, de Biesbosch, Zeeland, de Kop van Noord-Holland en Flevoland.
- Lokaal, in de eerste kilometers vanaf de kust, kunnen effecten significant zijn.

In de volgende secties worden de gedetailleerde resultaten gegeven.

#### 6.3.2.1 Infrastructuur en hoogwaterbescherming

- Funderingsrisico's in bestaand stedelijk gebied worden verwacht doordat door de drukverandering zettingsverschillen optreden in de zandlaag waarop gefundeerd is (eerste watervoerend pakket).
- Ondergrondse infrastructuur (tunnels, garages, kelders) krijgen meer druk te verwerken en kunnen mogelijk gaan lekken of opdrijven.
- In de duinrand (Den Haag, Westland, etc.), langs de mondingen van de grote rivieren (Biesbosch, Kampereiland, Rotterdam) en langs het IJsselmeer (Flevoland) is de toename van de stijghoogte zo groot dat instabiliteit van dijken kan voorkomen. Een precieze inschatting is echter niet te geven op basis van deze studie door de te lage resolutie van de toegepaste modellen.
- Mogelijk kan verzilting van het grondwater ook zorgen voor minder stabiliteit van dijken, wanneer deze bestaan uit of gefundeerd zijn op bepaalde kleisoorten waarvan de fysische eigenschappen veranderen door zout water. Of het echt een risico is kan op dit moment niet worden uitgesloten, dit behoeft onderzoek.

#### 6.3.2.2 Drainage

- In de duinrand (Den Haag, Westland, etc.), langs de mondingen van de grote rivieren (Biesbosch, Kampereiland, Rotterdam, etc.) en langs het IJsselmeer (Flevoland) is de toename van de flux groot. Hier moet drainage en onderbemaling worden uitgebreid om bestaande bebouwing en infrastructuur droog te houden. In vergelijking met de drainagecapaciteit die nodig is om overtollig water als gevolg van neerslag te draineren lijken de noodzakelijk toenames echter gering.

#### 6.3.2.3 Waterkwaliteit en ecologie

De drinkwatervoorziening zal hinder ondervinden. Grondwater (opkegeling van zout) en oppervlaktewater (zout in inlaatpunten) worden zouter.

- Het is een risico voor de landbouw (zoutschade), wanneer oppervlaktewater te zout wordt voor beregeningswater of drinkwater voor het vee.
- Door een verandering van de oppervlaktewaterkwaliteit (van infiltratiegebied naar kwelgebied met bijhorend zout) kan het ecologisch potentieel veranderen, waarmee het halen van de Kaderrichtlijn Water (KRW) eisen in gedrang kan komen.

- Naast extra zout, zal ook de flux van nutriënten en in risicogebieden ook arseen, toenemen. Dit is een extra risico voor de oppervlaktewaterkwaliteit en daarmee op landbouw, drinkwatervoorziening, ecologie (KRW).
- Risico voor toerisme en visserij door verandering oppervlaktewatersysteem: algenbloei door extra nutriënten, verslechtering zwemwater en verdwijning van commerciële vissoorten.
- Leidingen kunnen mogelijk sneller corroderen door zouter grondwater, dit wordt echter niet als een groot risico gezien.

#### 6.4 Betekenis van de resultaten voor beslissingen in het waterbeheer

- Grote stijging, in de orde van meters, van de zeespiegelstijging leidt natuurlijk tot grote benodigde aanpassingen in het Nederlandse watersysteem. Desondanks geven de resultaten van deze verkennende studie aanleiding om te veronderstellen dat aanpassing te beheersen is. Meters zeespiegelstijging zijn minimaal nog een eeuw weg.
- Indien bij een stijgende zeespiegel ervoor wordt gekozen de riviermondingen in open verbinding met de zee te laten, zullen de rivierdijken verder versterkt moeten worden. In feite breidt het estuarium zich naar het oosten toe uit. De riviertakken krijgen het karakter van zeearmen, vergelijkbaar met de huidige Westerschelde. Dit betekent dat de rivierdijken door zeedijken vervangen zouden moeten worden. Deze zeedijken nemen aanzienlijk meer ruimte in, ruimte die in het dichtbebouwde gebied tussen Dordrecht en Europoort schaars is. De aanpak rivierverbreding en verlaging van de uiterwaarden biedt geen oplossing voor de verhoogde waterstanden in het door de zee beïnvloede gebied. Komberging, waarbij de zeearmen middels keringen tijdelijk worden afgesloten biedt wel de mogelijkheid tot beperkte berging van hoogwatergolven.
- De verzilting van het oppervlaktewater zal de inlaat van zoetwater in het benedenrivierengebied bemoeilijken. Er andermaal vanuit gaande dat de riviermondingen open blijven en het Haringvliet dicht blijft, zullen de inlaatpunten (Figuur 3.9) naar locaties verder bovenstrooms gebracht moeten worden. Dit terwijl extra doorspoelen van polders nodig zal zijn om zout en nutriënten te verwijderen.
- Met betrekking tot veiligheidsaspecten zijn de gevolgen van verhoogde grondwaterdruk voor eventueel opbarsten van de deklaag van belang. Dit risico neemt toe, maar lijkt zich te beperken tot goed te identificeren zones langs de grote wateren en in de IJsselmeerpolders. Het toenemende risico heeft gevolgen voor de stabiliteit van dijken. Door aangepast ontwerpen van de waterkeringen lijken de gevolgen beheersbaar.
- Vergroting van de kwelstromen betekent dat meer water weggepompt zal moeten worden uit Nederland. Zelfs bij zeer grote zeespiegelstijgingen blijven de hoeveelheden relatief klein ten opzichte van de drainage capaciteit die nodig is om overtollig regenwater af te voeren.

## 7 Aanbevelingen

De resultaten van deze studie suggereren dat de gevolgen van zeer grote zeespiegelstijgingen beheersbaar zijn. In deze studie zijn geen strategieën of maatregelen verkend die deze beheersbaarheid kunnen garanderen. Duidelijk is daarmee dat de resultaten als verkennend gezien moeten worden. Omdat zeer grote stijgingen nog minimaal eeuwen weg zijn, zijn maatregelen niet direct maatregelen. Het blijft echter buitengewoon belangrijk bij te houden of de omstandigheden zich wijzigen. Hiervoor is een monitoringstrategie noodzakelijk die zich niet alleen richt op de waterhuishouding, de kust en het weer, maar die ook de ontwikkelingen van de Groenlandse en Antarctische ijskappen volgt. Verder moet er aandacht komen voor zogenaamde ‘surprises’ zoals het optreden van superstormen en het afzwakken van de golfstroom (waardoor het in ons land kouder zou kunnen worden).

Welke gevolgen zeer grote zeespiegelstijgingen hebben, is sterk afhankelijk van de waterbeheerstrategie die gevolgd gaat worden. De aanbeveling hier is om te onderzoeken welke strategieën bij uiteenlopende zeespiegelstijgingen houdbaar zijn. In grote lijnen zou dit neerkomen op het beantwoorden van de vraag: “hoe erg moet het worden voordat de gevolgen van klimaatverandering zodanig worden dat deze niet meer binnen de Rijn-Maas delta opgelost kunnen worden?”. Het eindproduct van een dergelijk project zou een verhaal zijn over hoe wij met klimaatverandering omgaan dat tamelijk onafhankelijk is van nieuwe scenario’s. Het voordeel hiervan is dat het beleid gemakkelijker kan anticiperen op nieuwe scenario’s. Eventuele beleidsaanpassingen worden naar voren of naar achteren gezet afhankelijk of de veranderingen in de loop van de tijd sneller dan wel langzamer blijken te gaan.

Gezien de grote onzekerheid in de klimaatscenario’s verdient het tevens aanbeveling niet alleen uit te gaan van één voorkeurscenario, zoals dat is gebeurd bij Waterbeheer 21<sup>e</sup> eeuw en het daarop gebaseerde nationaal bestuursakkoord water. De aanbeveling is om eerst een risicoanalyse uit te voeren. Hierbij zouden de verschillende scenario’s tegenover elkaar moeten worden gezet en zou moeten worden beoordeeld welk risico gelopen wordt indien uitgegaan wordt van het ene scenario terwijl het andere scenario de werkelijkheid wordt. Het brengt in beeld welke onderdelen van het beleid bij de nieuwe scenario’s aandacht behoeven en welke niet of minder. Indien de scenario’s voldoende onderscheidend zijn, zal blijken dat de uitkomsten per beleidsterrein zullen verschillen. Bij de ontwikkeling van de strategie is het nodig om in elk geval onderzoeksmatig rekening te houden met (op termijn) zeer grote veranderingen, een “worst case benadering”. Voor verschillende sectoren en beleidsterreinen kunnen verschillende scenario’s gelden als “worst case”. Deze “worst case” hoeft geen uitgangspunt te zijn voor het binnenkort te ontwikkelen beleid. De benodigde maatregelen zijn vermoedelijk zeer kostbaar, terwijl het risico slechts beperkt wordt gereduceerd (er is immers maar een kleine kans).

Het IJsselmeergebied en Zuid-West Nederland, het estuarium, zullen naar verwachting de gebieden zijn waar de hydrologische gevolgen van zeespiegelstijging en klimaatverandering het sterkst merkbaar zullen zijn. Tot nu toe hebben onderzoeken zich meer geconcentreerd op de boven-rivieren en de kust, inclusief de Waddenzee. De vierde aanbeveling is dan ook om in de komende tijd onderzoek uit te voeren dat met name gericht is op Zuidwest-Nederland en het IJsselmeer.

## 8 Samenvatting

In een oriënterende studie naar de lange-termijn consequenties van zeespiegelstijging is naar voren gekomen dat niet zozeer overstroming vanuit zee het grote probleem is, maar dat stagnerende rivierafvoeren (door het wegvallen van het vrije verval) en de toenemende kweldruk in vooral West-Nederland (toenemende risico's opbarsten bodem) de belangrijkste problemen kunnen gaan worden. DELTARES (WL | Delft Hydraulics, TNO Bouw en Ondergrond, GeoDelft) heeft vervolgonderzoek uitgevoerd om een eerste beoordeling van de ernst van de problemen te geven. Hiervoor is uitgegaan van een stijging van de zeespiegel van respectievelijk 1, 2, 4 en 6 meter. Dergelijke stijgingen zijn weliswaar voor deze eeuw zeer onwaarschijnlijk maar op de lange termijn zeker mogelijk. Het vervolgonderzoek richtte zich op de gevolgen van de toename van de kwel voor het waterbezwaar in polders, de toename van het zoutgehalte in het oppervlaktewater, de stijgende waterstanden op de rivieren en het toenemende risico van opbarsten van de bodem.

In hoeverre zeespiegelstijging gevolgen heeft voor de Nederlandse waterhuishouding hangt natuurlijk erg af van hoe Nederland zich gaat aanpassen aan de stijgende zeespiegel. In grote lijnen kan gekozen kan worden om:

1. het gehele Nederlandse watersysteem te laten meestijgen met de zee;
2. alleen de rivieren, het IJsselmeer en de Zeeuwse wateren te laten meestijgen met de zee;
3. Nederland als een grote polder in te richten, waarbij de waterstanden binnen Nederland volledig door bemaling gereguleerd worden en onafhankelijk worden van de zeespiegel.

De DELTARES studie ging uit van optie 2.

### 8.1 Waterstanden op de rivier

Indien er bij een stijgende zeespiegel voor wordt gekozen de riviermondingen in open verbinding met de zee te laten, zullen de rivierdijken verder versterkt moeten worden. In feite breidt het benedenriviereengebied zich naar het oosten toe uit. De riviertakken krijgen het karakter van getijderivieren, vergelijkbaar met de huidige Schelde. Dit betekent ook dat de dijken verzaamd zouden moeten worden. Deze zeedijken nemen aanzienlijk meer ruimte in, ruimte die zeker in het dichtbebouwde gebied tussen Dordrecht en Europoort schaars is. De aanpak rivierverbreding en verlaging van de uiterwaarden biedt geen oplossing voor de verhoogde waterstanden in het door de zee beïnvloede gebied. Komberging, waarbij de zeearmen met keringen tijdelijk worden afgesloten, biedt wel de mogelijkheid tot beperkte berging van hoogwatergolven tijdens stormvloed.

### 8.2 Zoutgehalte van in het rivierwater

Zeespiegelstijging in combinatie met een geringere laagwaterafvoer zal in de toekomst zorgen voor een verdere landinwaartse zoutindringing op de rivieren. De mate van zoutindringing is met name van belang voor de gebruikers van zoet water, zoals land- en tuinbouw en drinkwaterbedrijven. Indien het oppervlaktewater ter plaatse van de innamepunten te zout wordt, dan kan dat leiden tot productieverlies door droogte- dan wel



zoutschade in de landbouw. De resultaten laten zien dat de huidige inlaatpunten langs de benedenrivieren te maken zullen gaan krijgen met verzilting van het oppervlaktewater. Bij extreme zeespiegelstijging (6m) zou bij lage afvoeren de Lek tot Vianen en de Waal tot Gorinchem zout kunnen worden.

### **8.3 Toename van de kwel en drainagecapaciteit**

Toename van de kwel kan gevolgen hebben voor de polders omdat meer water moet worden afgevoerd en dit de capaciteit van de watergangen en gemalen te boven zou kunnen gaan. In de duinrand (Den Haag, Westland, etc.), langs de mondingen van de grote rivieren (Biesbosch, Kampereiland, Rotterdam, etc.) en langs het IJsselmeer (Flevoland) en in Zeeland is de toename van de kwel zo groot dat drainage en onderbemaling moeten worden uitgebreid om bestaande bebouwing en infrastructuur droog te houden. De resultaten laten echter zien dat zelfs bij zeer grote zeespiegelstijgingen, eventuele toenames in de regenval veel belangrijker zullen zijn voor de dimensionering van het drainagesysteem dan de toename van de kwel. De stijgende zeespiegel zal ook leiden tot een vergroting van het oppervlak dat niet meer onder vrij verval kan lozen op zee. Dit zal wel leiden tot een vergroting van de benodigde gemaalcapaciteit. Momenteel wordt de vergroting van de pompcapaciteit vrijwel altijd in verband gebracht met de toename van het wateroverschot als gevolg van een vergroting van de neerslag in de winter. De analyse laat echter zien dat het effect van zeespiegelstijging waardoor een groter deel van Nederland via gemalen zal moeten lozen mogelijk een grotere rol kan gaan spelen.

### **8.4 Zoutgehalten in het grondwater**

De zoutgehalten in het grondwater zullen toenemen, deels door zeespiegelstijging en deels door de autonome verzilting van het laaggelegen Nederlandse kustgebied (opkegeling diep brak grondwater en/of laterale zoutwaterintrusie in het grondwatersysteem). Voor een groot deel van West-Nederland gaan de zoutgehalten in het grondwater lijken op die vandaag de dag in Zeeland te vinden zijn. Regio's die met flink hogere grote zoutgehalten rekening zullen moeten gaan houden zijn met name Zeeland, gebieden in de kop van Noord-Holland, Texel en de Friese kust en de laaggelegen droogmakerijen (Haarlemmermeerpolder) in het Hollandse kustgebied.

### **8.5 Risico van het opbarsten van de bodem**

Verhoogde grondwaterdruk kan leiden tot het opbarsten van de bodem. In de diepste delen van Nederland, de droogmakerijen, komt het nu al voor dat deklagen worden doorbroken. In de Haarlemmermeer is al eens door het graven van nieuwe watergangen tijdens de aanleg van een nieuwe woonwijk de deklaag zo aangetast dat er wellen ontstonden. Ook in droogmakerijen waar de bodem bestaat uit veenpakketten treedt dit fenomeen op. Het is tevens een bekend risico in de zone langs de grote rivieren gedurende hoog water. Hier vormt het een veiligheidsrisico omdat het de stabiliteit van de dijken beïnvloedt. Het risico van opbarsten van de bodem neemt toe, maar lijkt zich volgens de landsdekkende analyse te beperken tot goed te identificeren zones langs de grote wateren en in de IJsselmeerpolders. Omdat opbarsting een proces is dat zich op kleine schaal afspeelt, zijn landsdekkende analyses moeilijk te interpreteren. De precieze toename van het opbarstingsrisico kan dan ook nog niet goed worden beoordeeld. De resultaten van deze verkenning geven geen aanleiding

om te veronderstellen dat op grote schaal opbarsten van de bodem zal optreden. Wel is een toename van het veiligheidsrisico te verwachten door het onstabiel worden van waterkeringen. Echter door aangepast ontwerpen van de waterkeringen lijken de gevolgen beheersbaar.

## **8.6 Aanbevelingen**

Ontwikkel een monitoringstrategie die zich niet alleen richt op de waterhuishouding, de kust en het weer, maar die ook de ontwikkelingen van de Groenlandse en Antarctische ijskappen volgt.

Start een studie om uiteenlopende strategieën te ontwikkelen die houdbaar zijn bij verschillende klimaatveranderingen en zeespiegelstijgingen.

Ga bij klimaatadaptatie niet uit van één voorkeurscenario, maar voer eerst een risicoanalyse uit. Hierbij zouden de verschillende scenario's tegenover elkaar moeten worden gezet en zou moeten worden beoordeeld welk risico gelopen wordt indien uitgegaan wordt van het ene scenario terwijl het andere scenario de werkelijkheid wordt. Verken in ieder geval ook worst case scenario's.

Concentreer studies in de eerste plaats op het IJsselmeer en Zuidwest-Nederland omdat hier de belangrijkste gevolgen van sterke zeespiegelstijgingen en klimaatveranderingen merkbaar zullen zijn.

## 9 Referenties

- Bijnagte et al. ;2006; Het effect van grondwaterstijging op funderingen op staal, Geotechniek.
- CUR; 2001; CUR-richtlijn ontwerpregel trekpalen 2001-4.
- Eijgenraam C.J.J.; 2005; Veiligheid tegen Overstromen, Kosten/batenanalyse Ruimte voor de Rivier 1. CPB document 82, 2005.
- 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.
- Haasnoot, M., J.A.P.H. Vermulst en H. Middelkoop; 1999; Impacts of climate change and land subsidence on the water systems in the Netherlands. Terrestrial areas, RIZA, Lelystad
- IPCC; 2001; Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Kloosterman, F. (2007), Kartering zoet/brak/zout verdeling Nederland; Beschrijving van de ZZ-REGIS software suite. Concept TNO-rapport.
- 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.
- MNP (2007). Nederland Later. Tweede Duurzaamheidsverkenning – deel Fysieke leefomgeving Nederland. MNP publicatienummer 500127001/2007. Milieu- en Natuurplanbureau, Bilthoven.
- Oude Essink, G.H.P.; 2004; Modelling 3D density dependent groundwater flow at the Island of Texel, The Netherlands (chapter 4). Coastal Aquifer Management-Monitoring, Modeling and Recent Practices. A. H.-D. Cheng and D. Ouazar, CRC Press: 75-92.
- Rijkswaterstaat; 2005; Zoet-Zout berichten van Rijkswaterstaat no.3, 2005.
- Snepvangers, J.J.J.C. en W.J. Berendrecht; 2007; MIPWA - Methodiekontwikkeling voor Interactieve Planvorming ten behoeve van Waterbeheer. TNO rapport in concept, 234p.
- WL | Delft Hydraulics; 2007; Nederland Later en Water.

## A Grondwaterkaarten

A.1	Verandering ondiepe stijghoogten door zeespiegelstijging
A.2	Verandering kwelflux door zeespiegelstijging
A.3	Verandering zoutlast door zeespiegelstijging
A.4	Verandering van de opbarstingsfactor als functie van de zeespiegelstijging
A.5	Verandering in opbarstingsrisico van de deklaag als gevolg van zeespiegelstijging

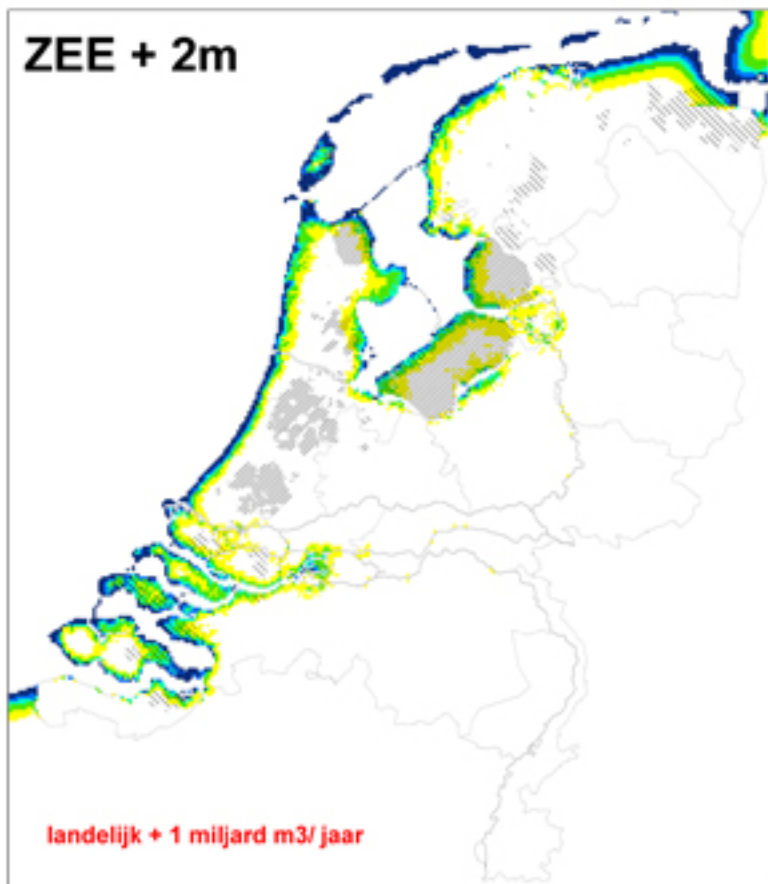
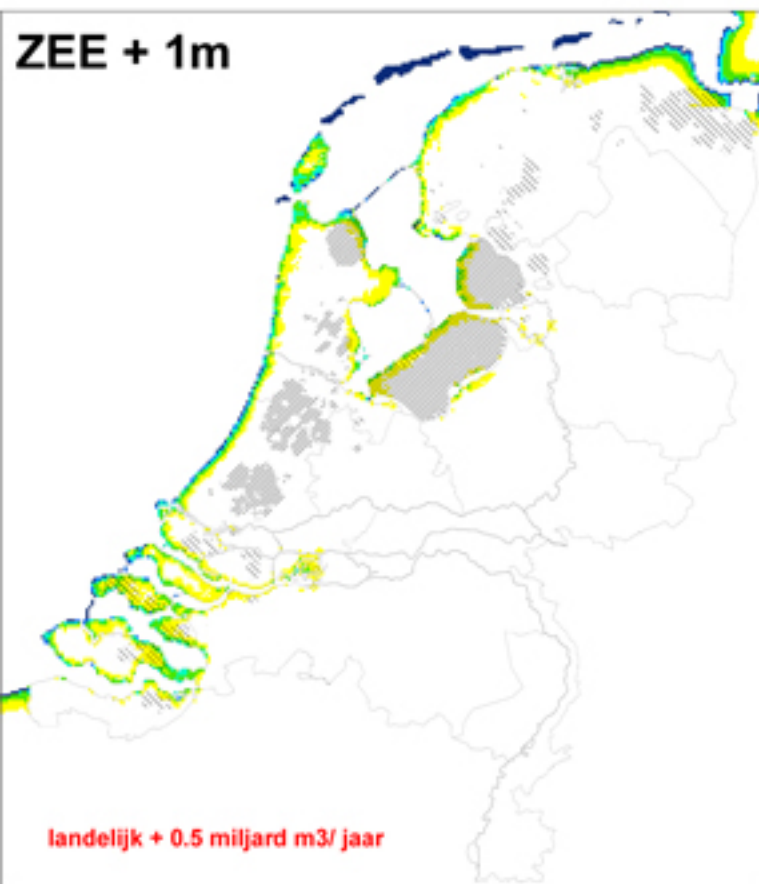
## Verandering ondiepe stijghoogten door zeespiegelstijging





Verandering stijghoogte [m]

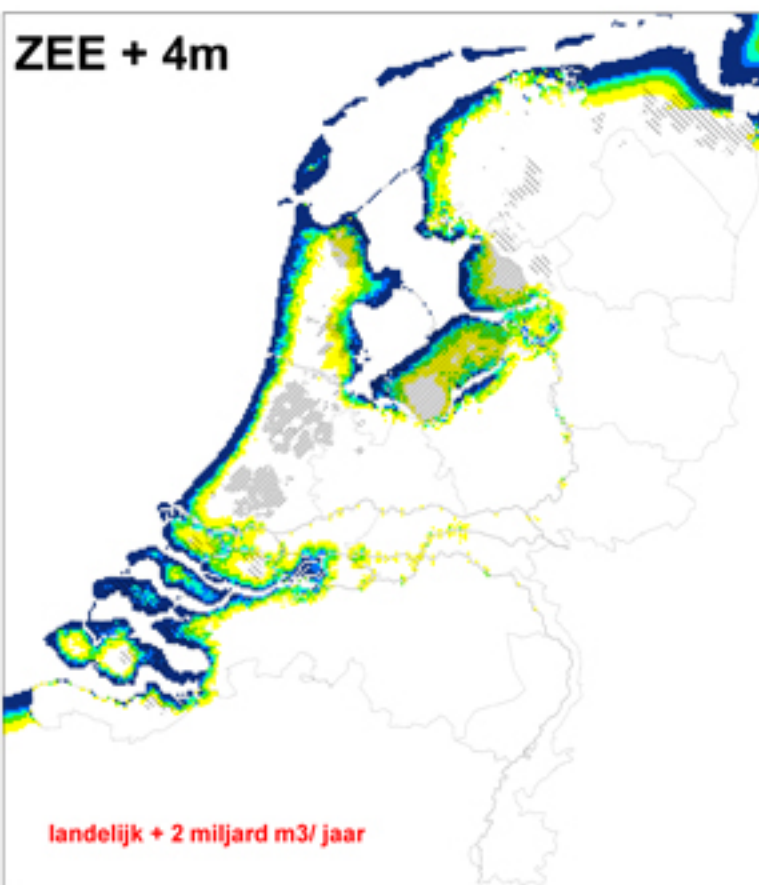


## Verandering kwelflux door zeespiegelstijging



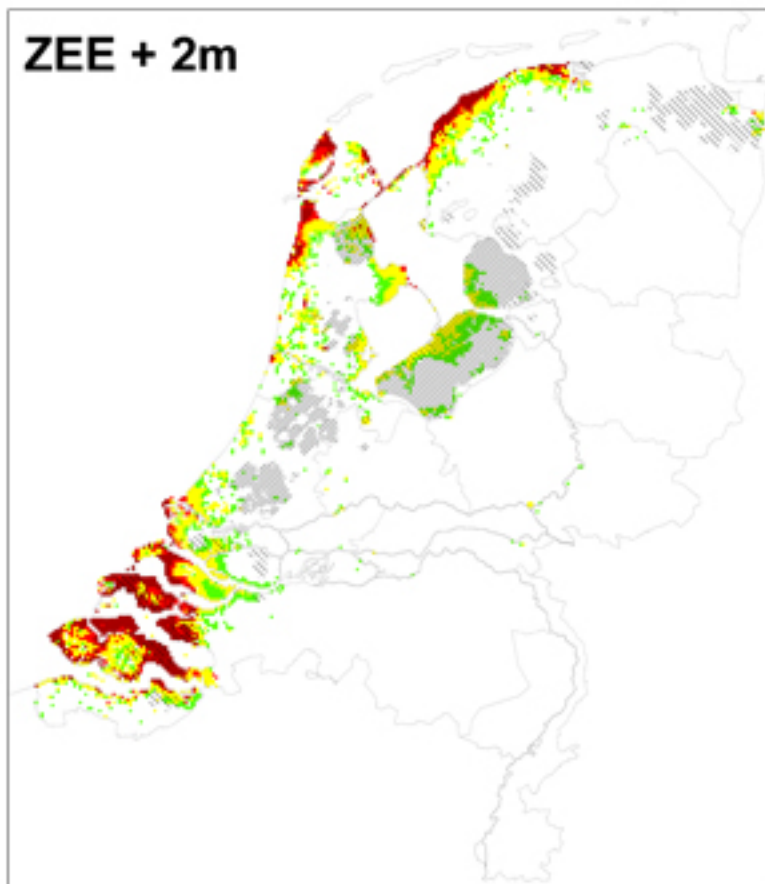
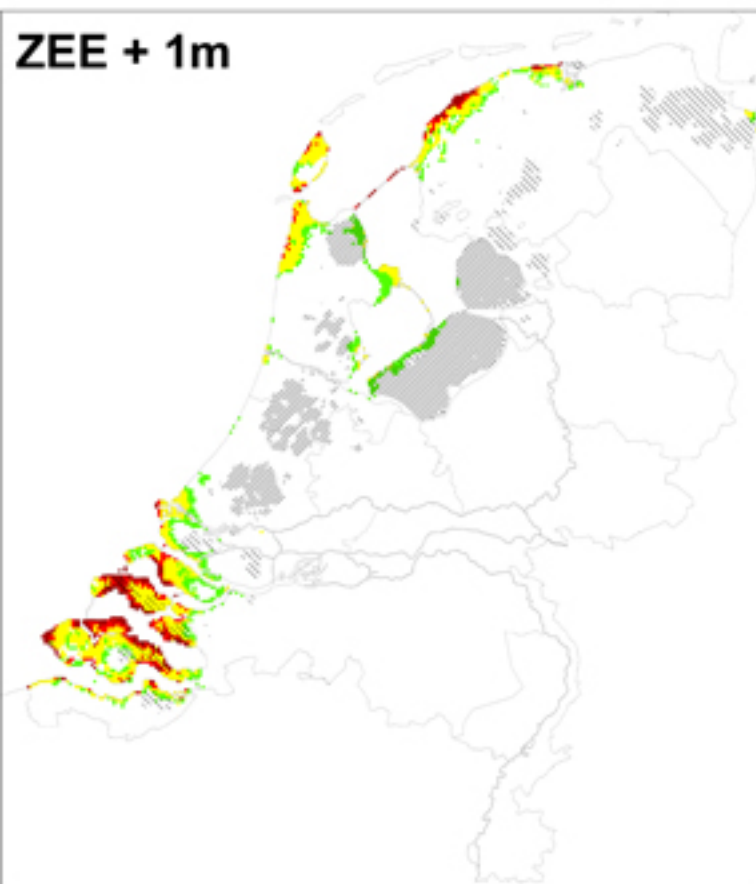
Verandering kwelflux [mm/dag]

 > 0.5 mm/dag	 0.2 - 0.3	 polders dieper dan -4 m NAP
 0.4 - 0.5	 0.1 - 0.2	 polders tussen -2 en -4 m NAP
 0.3 - 0.4	 < 0.1 mm/dag	

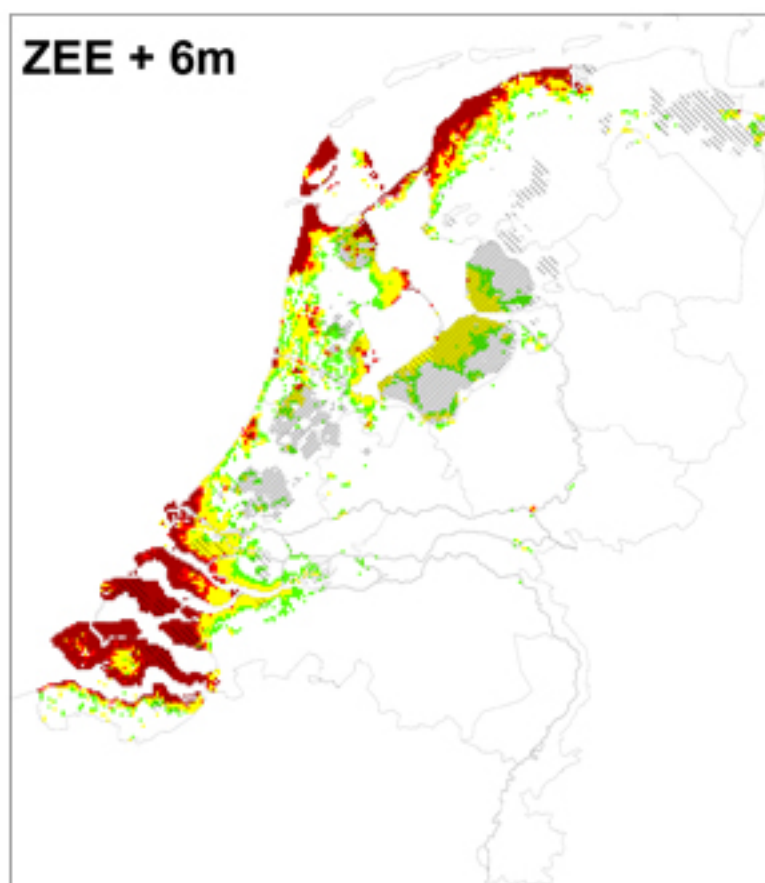
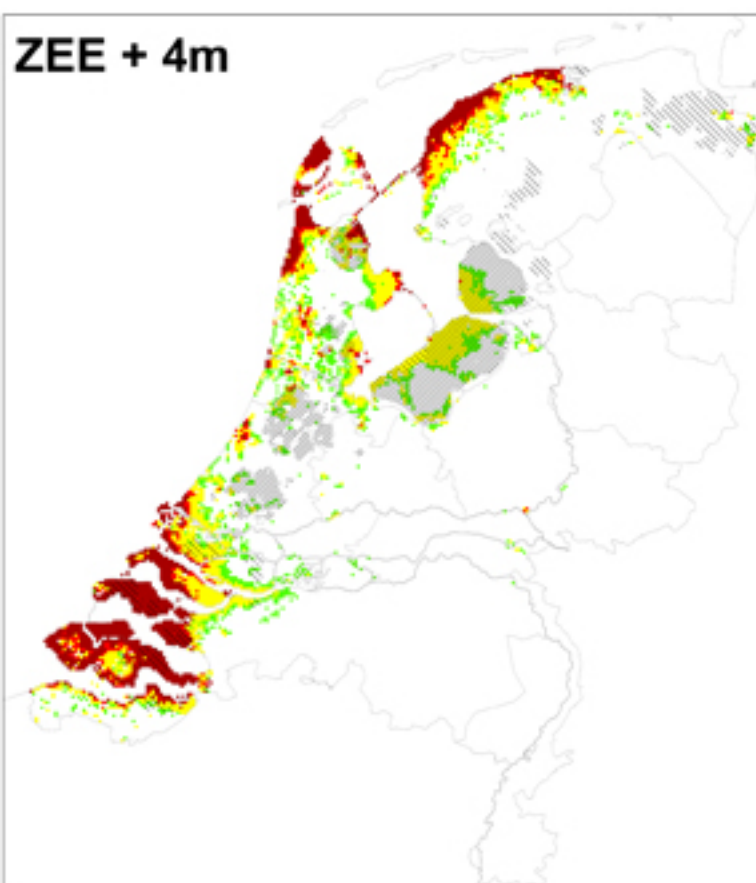


# ZOUT

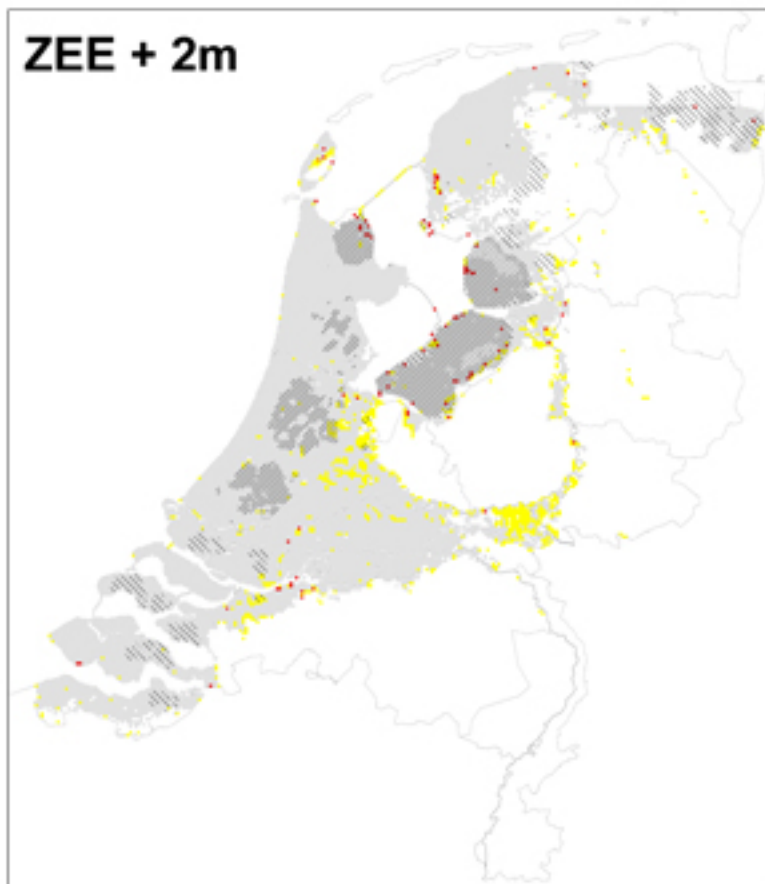
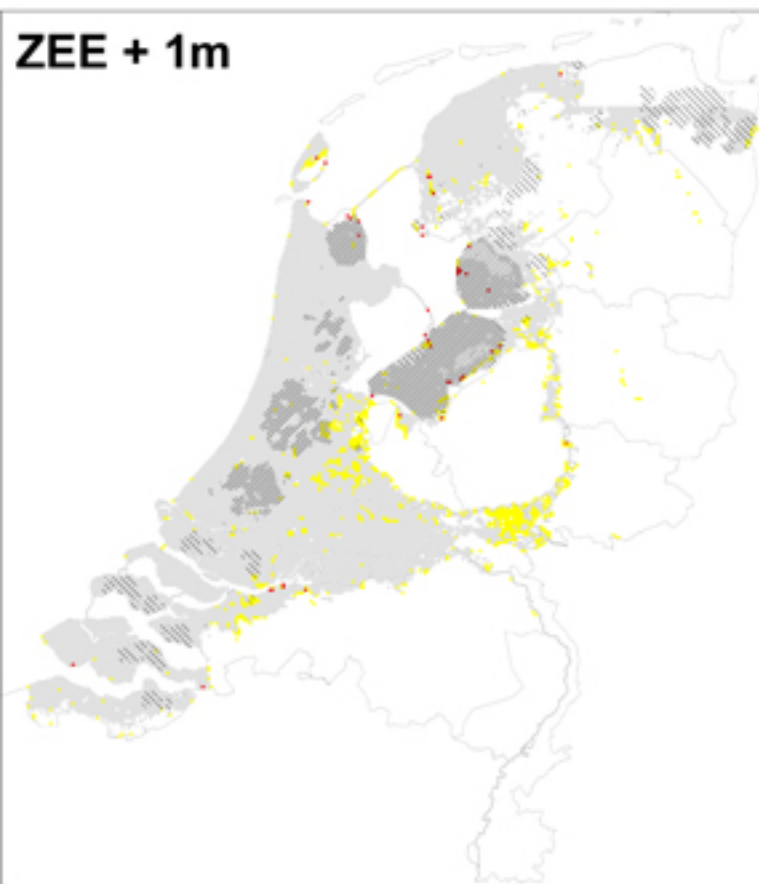
## Verandering zoutlast



Verandering zoutlast [kg Cl-/ha/jaar]



## Verandering opbarstingsrisico door zeespiegelstijging



Verandering  
opbarstingsrisico

stabil

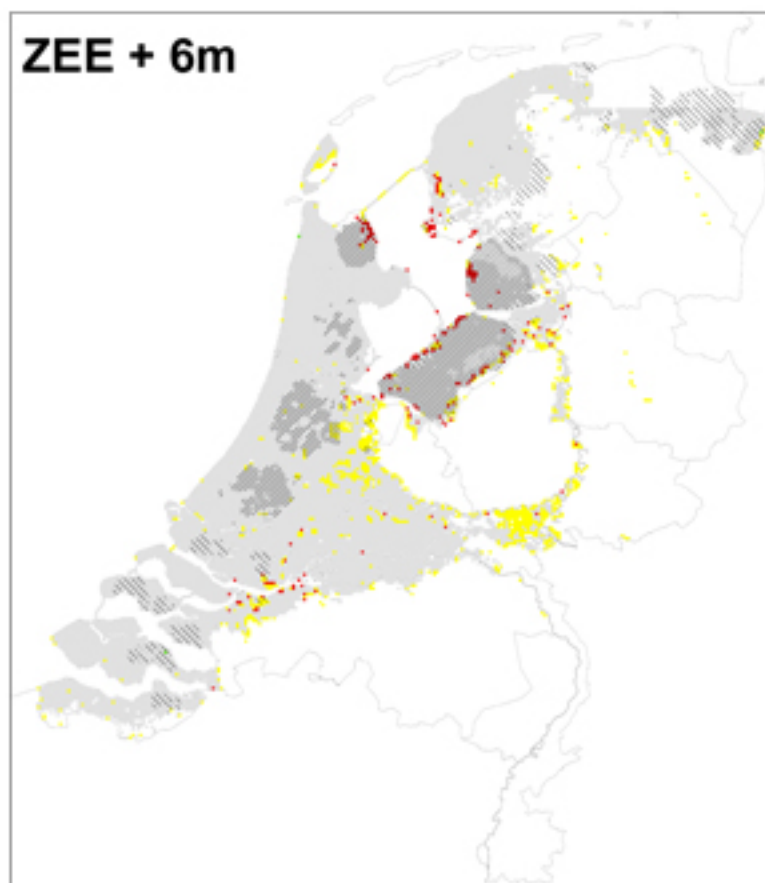
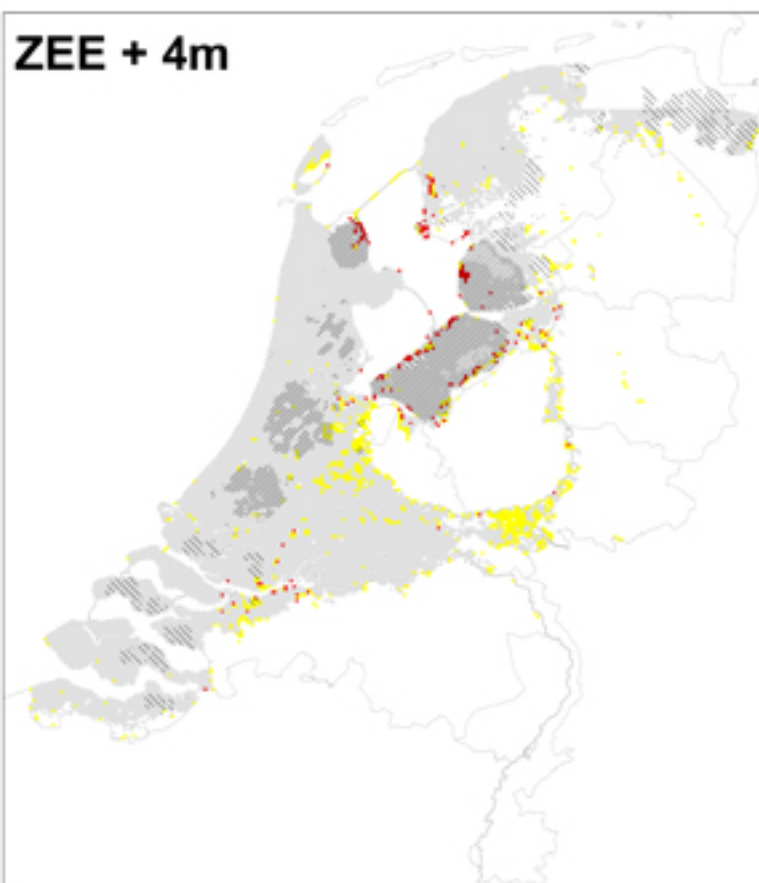
stabil geworden

instabil gebleven

instabil geworden

polders dieper dan -4 m NAP

polders tussen -2 en -4 m NAP





## Opbarstingsrisico

