



Gualbert Oude Essink, TNO

# Effect zeespiegelstijging op het grondwatersysteem in het kustgebied

In dit artikel wordt getracht de effecten van zeespiegelstijging op het Nederlandse grondwatersysteem boven water te krijgen. Deze directe gevolgen krijgen over het algemeen weinig aandacht in klimaatstudies die het zwaartepunt vaak hebben liggen bij adaptieve en/of mitigatieve oplossingsrichtingen. Gekeken wordt naar de invloedssfeer van een zeespiegelstijging in de vorm van een stijghoogteverhoging in het grondwatersysteem, de toename van de kwel in poldergebieden én de toename van het opbarstingsgevaar van de Holocene deklaag. Daarnaast wordt met het ontwikkelde numerieke modelinstrumentarium een inschatting gegeven van de toename van het zoutflux vanuit het grondwater- naar het oppervlaktewatersysteem.

Toenemende menselijke activiteiten in de Nederlandse delta, zowel aan het oppervlak als ondergronds, leiden tot intensivering van het waterbeheer. Daarnaast wordt de druk op het watersysteem vergroot door fysische processen als bodemdaling, zeespiegelstijging en klimaatverandering in de vorm van een veranderd neerslag- en verdampingspatroon.

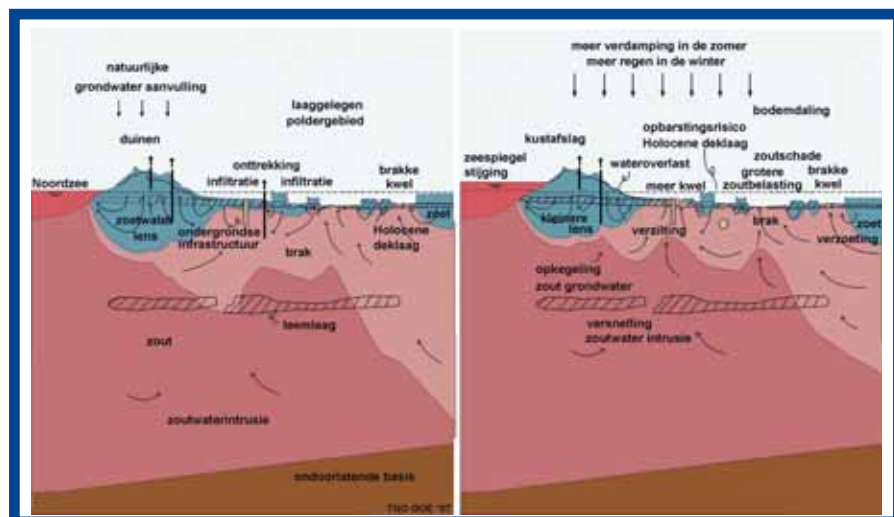
In Nederland is al veel gezegd en geschreven over de gevolgen van klimaatverandering voor het watersysteem. In de toekomst zullen we niet verschoond blijven van nieuwe inzichten, wetenswaardigheden en mogelijke oplossingen.

Hierop vooruitlopend hebben drie partijen in Deltares i.o. (WL|Delft Hydraulics, TNO

Bouw en Ondergrond en GeoDelft) recent in opdracht van het Milieu- en Natuur Planbureau (MNP) een verkennende studie<sup>1)</sup> uitgevoerd naar de klimaatbestendigheid voor de lange termijn van de Nederlandse waterhuishouding.

Om een eerste beoordeling van de ernst van de problemen te geven, is gekeken naar de veiligheid met betrekking tot overstroming vanuit de zee, hogere rivierafvoeren en de toenemende kweldruk in vooral laag Nederland met de daaraan gerelateerde opbarstings- en verziltingsproblemen.

**Afb 1:** Vereenvoudiging van het regionale grondwatersysteem in het Hoogheemraadschap van Delfland: a. huidige situatie, inclusief de DSM onttrekking en b. toekomstige situatie. Zoutwater intrusie vindt op regionale schaal plaats omdat het gemiddeld polderpeil enkele meters lager ligt dan het gemiddeld zeeniveau, terwijl op lokale schaal verzoeting kan optreden op de overgang van hooggelegen gebieden waar infiltratie plaatsvindt en laaggelegen droogmakerijen.



In de MNP-studie is ervoor gekozen alleen scenario's te bekijken waarbij het waterpeil in de rivieren, het IJsselmeer en de Zeeuwse wateren meestijgen met het zeeniveau. Grootchalige ruimtelijke ontwikkelingen, zoals landaanwinning voor de kust of inundaties van (laaggelegen) polders, zijn niet meegenomen. Er wordt ook geen aandacht gegeven aan de voorspelde veranderingen in neerslag- en verdampingspatronen. Hoewel een groot aantal scenario's voor zeespiegelstijging is doorgerekend in de MNP-studie, wordt hier slechts één scenario nader bekeken: een zeespiegelstijging van één meter in 100 jaar.

## Kwantitatieve beschrijving effecten

Het directe effect van een zeespiegelstijging op het grondwatersysteem is de verhoging van de stijghoogte (afbeelding 1). Deze

## Globale inschatting stijghoogteverandering

Om een idee te krijgen hoe ver de invloedssfeer van een zeespiegelstijging reikt in het grondwatersysteem, is een simpele analytische benadering voorhanden: de Formule van Mazure<sup>2)</sup> (afbeelding 2). Deze schat op grove wijze de stijghoogteverandering in een watervoerend pakket en de verandering in kwel naar het oppervlaktewatersysteem. De formule is in eerste instantie toegepast voor het Holland-profiel: één homogeen watervoerend pakket met een doorlaatvermogen  $kD$  en één deklaag met een hydraulische weerstand  $c$ . De verhoging van het waterpeil in de Noordzee leidt tot een verhoging van de stijghoogte in het watervoerend pakket. De verhoging heeft de vorm van een exponentiële functie  $\Delta\Phi(x) = \Phi_0 e^{-x/\lambda}$ .

De karakteristieke lengte oftewel de spreidingslengte  $\lambda$  (m) is gelijk aan  $\sqrt{(kDc)}$  en bepaalt de lengte van de invloedssfeer van een stijghoogteverhoging. Op een afstand van drie keer de karakteristieke lengte  $\lambda$  is nog maar vijf procent over van de verhoging van het waterpeil in de Noordzee.

Als voorbeeld zijn de invloedssfeer van een zeespiegelstijging en de toename in kwelintensiteit berekend voor vier Holland-profielen (afbeelding 3). De invloedssfeer van een zeespiegelstijging is over het algemeen beperkt (afbeelding 3a). Hoe groter de spreidingslengte, des te groter de invloedssfeer van een zeespiegelstijging. Op tien kilometer afstand van de kust is de stijghoogte alleen nog verhoogd bij het geohydrologisch profiel waar het doorlaatvermogen vrij groot is én de deklaag een hoge hydraulische weerstand heeft. De toename in kwel

is ook afhankelijk van de hydraulische weerstand van de deklaag: hoe kleiner de weerstand, des te kleiner de spreidingslengte (donkerblauwe lijn in afbeelding 3a), maar des te groter de kweltoename in de eerste kilometers vanaf de kust (donkerblauwe lijn in afbeelding 3b).

In werkelijkheid is de geologische bodemopbouw in Nederland niet te benaderen met het geïdealiseerde Holland-profiel. Watervoerende pakketten in het kustgebied nemen naar het noordwesten over het algemeen in dikte toe en worden doorsneden door vele klei- en veenlagen. Daarnaast is ook de Holocene deklaag geen aaneengesloten geheel; deze formatie kent van nature, maar ook door antropogene redenen (bijvoorbeeld inpolderingen) grote ruimtelijke verschillen (zie afbeelding 4). De grote variatie in bodemopbouw beïnvloedt in sterke mate de invloedssfeer. Zo zorgen 'gaten' in de deklaag ervoor dat de invloedssfeer van een zeespiegelstijging kleiner is dan men in eerste instantie zou verwachten.

Dit concept wordt geïllustreerd in afbeelding 5, waar het effect van een goeddoorlatend segment in een verder continue Holocene deklaag zichtbaar wordt. Twee geohydrologische profielen worden vergeleken, waarbij 1000 meter uit de kust over een lengte van 400 meter de hydraulische weerstand van de deklaag flink afneemt. De invloedssfeer neemt sterk af in het profiel met het goeddoorlatende segment (rode lijn in afbeelding 5). Het segment ontlast als het ware de druk van het grondwatersysteem. Ter plaatse neemt de kwelintensiteit overigens sterk toe.

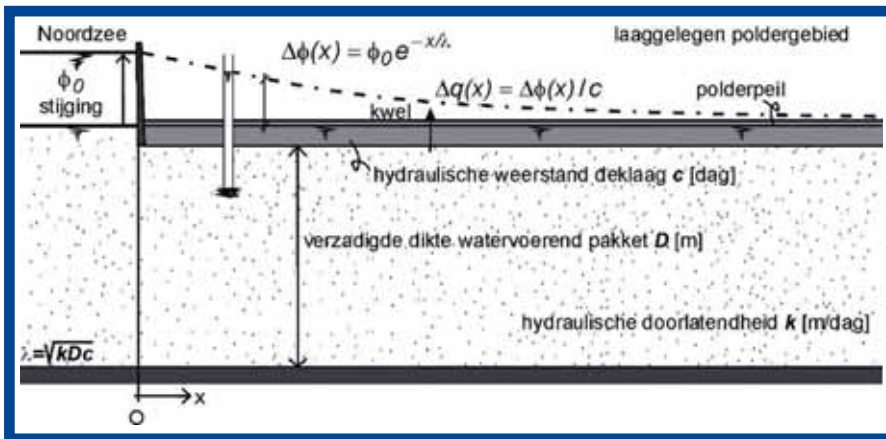
verhoging vindt op de tijdschaal van een zeespiegelstijging nagenoeg direct plaats<sup>3)</sup>.

De kweldruk in het kustgebied binnen de invloedssfeer zal toenemen. Infiltratiegebieden kunnen daarbij omslaan in kwelgebieden. Nutriëntrijk kwelwater kan aanleiding geven tot verslechtering van de waterkwaliteit van het oppervlaktewater. Een hogere zoutbelasting naar het oppervlaktewatersysteem, veroorzaakt door de combinatie van kweltoename én het autonome verziltingproces<sup>4)</sup>, zou ertoe kunnen leiden dat de huidige doorspoelcapaciteit van het oppervlaktewater niet meer voldoende is.

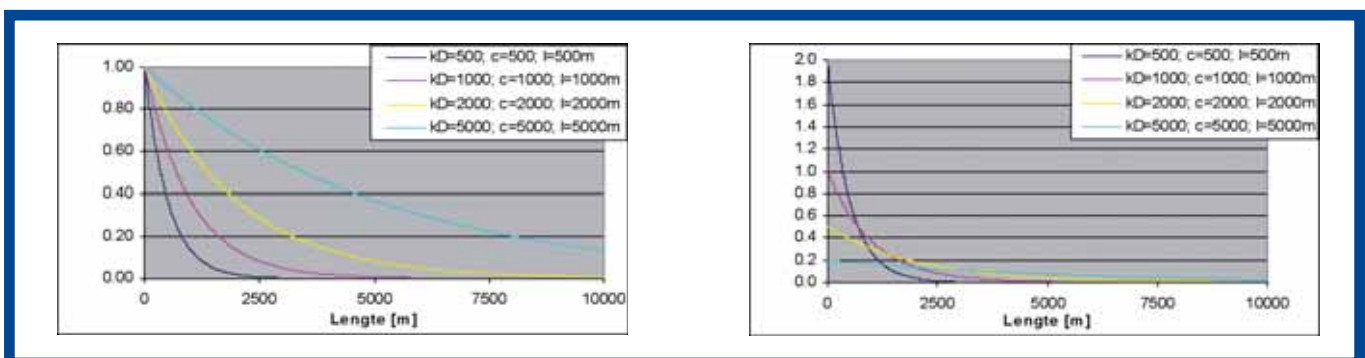
Het risico van opbarsten van de Holocene deklaag kan toenemen door een significante verhoging van de stijghoogte, vooral in gebieden waar de deklaag dun is en zandbanen veelvuldig voorkomen. Ook het aantal wellen, dat waarschijnlijk een grote bijdrage levert aan de waterkwaliteit van het oppervlaktewatersysteem<sup>10)</sup>, kan toenemen.

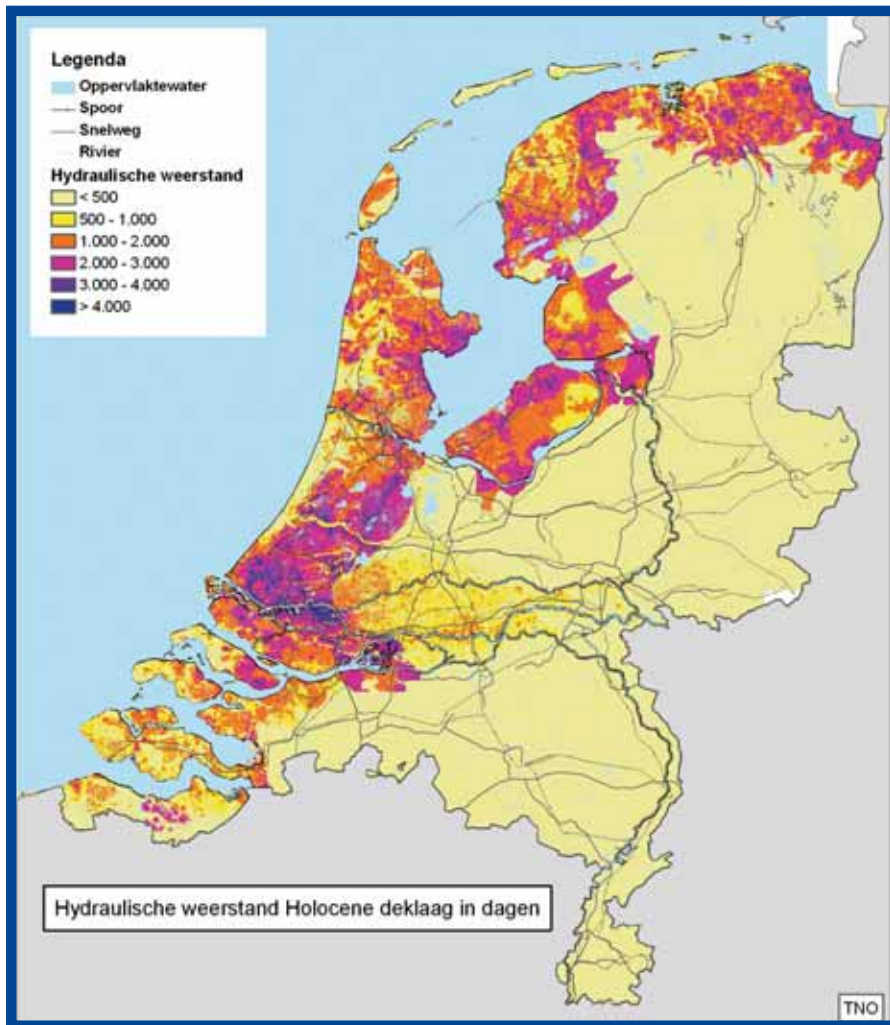
In bestaand stedelijk kustgebied worden funderingsrisico's verwacht, doordat de drukverandering zou kunnen leiden tot zettingverschillen in de veen- en kleilagen

**Afb. 2:** Schematische weergave van de stijghoogteverandering in het Nederlandse poldergebied door een stijging van het waterpeil in de Noordzee. Het waterpeil dempt uit in de richting van het poldergebied. Er wordt hier uitgegaan van het superpositiebeginsel: de zeespiegelstijging in de Noordzee veroorzaakt een aparte verandering in de stijghoogte en de kwel, onafhankelijk van het bestaande stijghoogtepatroon.



**Afb. 3:** De verhoging in stijghoogte en toename in kwelintensiteit als een functie van de afstand tot de Noordzee voor vier verschillende realistische geohydrologische profielen. Er wordt uitgegaan van een zeespiegelstijging van één meter. Het doorlaatvermogen  $kD$  en de hydraulische weerstand [dag] zijn per geval constant, waarmee de spreidingslengte is bepaald.





Afb. 4: De hydraulische weerstand  $c$  van de Holocene deklaag varieert.

waarop gefundeerd is. De stabiliteit van waterkeringen kan mogelijkwerwijs in gevaar komen met consequenties voor de veiligheid van het achterliggende gebied, zeker in die gebieden waar een significante bodemdaling leidt tot grote stijghoogtegradiënten en wegzakkende dijkfundamenten. Daarnaast krijgt ondergrondse infrastructuur (tunnels, garages, kelders) een hogere druk te verwerken met lekkages en opdrijven tot gevolg. Het effect van zeespiegelstijging op het

grondwatersysteem kan niet los worden gezien van antropogene ontwikkelingen. Zo zal bijvoorbeeld de stopzetting van de grondwateronttrekkingen door DSM te Delft in het omliggende gebied relatief grote gevolgen hebben.

#### Landsdekkende modelanalyse

Voor de kwantificering van de effecten van zeespiegelstijging op het grondwatersysteem voor geheel Nederland is voor de MNP-studie een driedimensionaal grondwa-

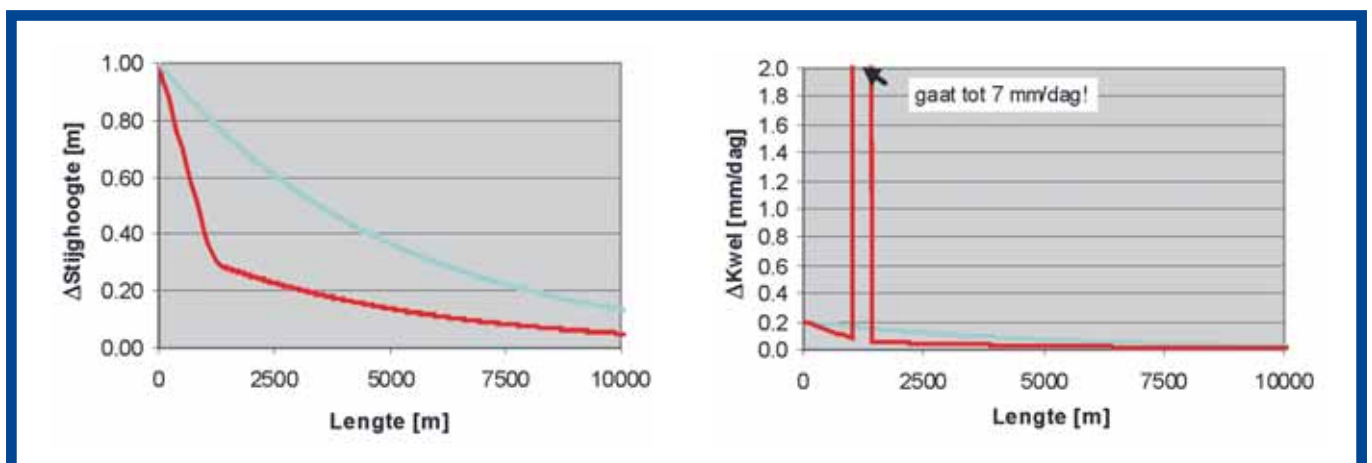
terstromings- en gekoppeld stoftransportmodel ontwikkeld. Het model is gebaseerd op de, binnen TNO veel gebruikte, softwarecodes MODFLOW<sup>5</sup> en MOCDENS3D<sup>6</sup>. Het 'vullen' van het model met geohydrologische parameters is gedaan met bestaande landsdekkende bronnen, zoals REGIS, en met data uit MIPWA<sup>7</sup>. Het model is in het horizontale vlak opgedeeld in grove cellen van 1.000 x 1.000 m<sup>2</sup>, hetgeen voor het verkennende karakter van de studie in eerste instantie voldoende leek. In het verticaal zijn 31 modellagen gebruikt om de complexe geologie tot -280m NAP enigszins mee te nemen.

Twee van de in totaal elf MNP-scenario's<sup>1</sup> worden hier beschreven: een referentievariant (zonder zeespiegelstijging) en een zeespiegelstijgingvariant van +1 meter inclusief bodemdaling conform het hoge scenario van WB21<sup>8</sup>. In totaal wordt een simulatieperiode van 100 jaar doorgerekend, waarbij transport van zoet, brak en zout grondwater plaatsvindt. Daarnaast zijn ook stijgingen van de gemiddelde rivierstanden meegenomen, conform recente voorspellingen van WL|Delft Hydraulics<sup>11</sup>. Het IJsselmeerpeil stijgt in deze analyse mee met het zeeniveau in de Noordzee en op de Wadden. Het numerieke model is in deelgebieden globaal geverifieerd met verscheidene verziltingsstudies van Texel, Wieringermeerpolder, Rijnland en Provincie Zuid Holland. Het model is uitwisselbaar met het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium dat op dit moment ontwikkeld wordt.

#### Verhoging van de stijghoogte

De invloedssfeer van een zeespiegelstijging lijkt in eerste instantie mee te vallen (afbeelding 6). Dit zou wel eens het gevolg kunnen zijn van de geologische condities in het kustgebied. Zandbanen doorkruizen het gebied en slechtdoorlatende weerstandlagen die een beperkte verspreiding hebben, sterk variëren in dikte. Het gevolg is dat de verhoging van de stijghoogte minder ver reikt dan in eerste instantie wordt gedacht (zie het tweede voorbeeld in het kader). Zo lijken de diepe polders in Zuid-Holland niet onderhevig te zijn aan een stijghoogteverhoging door zeespiegelstijging. Gebieden direct langs het open water, zoals Zeeland,

Afb 5: De verhoging in stijghoogte en toename in kwelintensiteit als een functie van de afstand tot de Noordzee voor twee geohydrologische profielen. Het Holland profiel heeft in beide gevallen een doorlaatvermogen  $kD$  van 5.000 m<sup>2</sup>/dag. De hydraulische weerstand is gelijk aan 5.000 dagen, behalve dat één bodemprofiel (rood) een goedgeoorlatend segment heeft (vanaf 1.000 meter uit de kustlijn is over een lengte van 400 meter de weerstand  $c$  gelijk aan slechts 50 dagen).





de IJsselmeerpolders en stedelijk gebied in de duinrand, krijgen wel te maken met een sterke verhoging van de stijghoogte. Indirect zie je de geologie ook terug in dit kaartbeeld: hoe dunner de deklaag, des te sneller de invloed uitdempt (bijvoorbeeld de duinranden van Zuid-Holland, zie afbeeldingen 4 en 6); hoe groter het doorlaatvermogen van de watervoerende pakketten, des te groter de invloedssfeer (bijvoorbeeld in de Kop van Noord-Holland) en hoe kleiner de dikte van het watervoerend pakket, des te kleiner de invloedssfeer (bijvoorbeeld in Zeeuws-Vlaanderen).

### Kwelintensiteit

Met het model is ook de kwel te bepalen naar het oppervlaktewatersysteem. De hoeveelheid extra kwel lijkt ook beperkt te zijn. Landelijk gezien blijkt dat de toename van de hoeveelheid uit te malen kwel door een zeespiegelstijging van één meter over 100 jaar minder dan vijf procent. Door drainage en onderbemaling kunnen we bestaande bebouwing en infrastructuur droog houden en de diverse (wateroverlast) risico's beperken. De gebieden waar lokaal wel grotere effecten zijn te verwachten, beperken zich tot dezelfde zones waar de stijghoogteverhoging aanmerkelijk toeneemt, zoals Flevoland, Schouwen-Duiveland (Zeeland), Texel<sup>9)</sup> en langs de mondingen van de grote rivieren (Biesbosch, Kampereiland, Rotterdam, etc.). In de gehele kustzone slaat in een aantal gebieden (zo'n 500 km<sup>2</sup> over 100 jaar) de infiltratiesituatie om in een kwelsituatie.

### Opbarstingsrisico

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 en is het gemakkelijker voor grondwater in het onderliggende watervoerend pakket door de weerstandslaag omhoog te stromen naar het oppervlaktewatersysteem. Dit kan leiden tot een grote kwelstroom met vaak zout en nutriëntenrijk grondwater van grote diepte bij de scheur of zogenaamde wel, met verslechtering van de oppervlaktewaterkwaliteit als gevolg<sup>10)</sup>. De opbarstingsindex is gedefinieerd als de verhouding tussen de lithostatische druk die door de weerstandslaag (bestaande uit veen, zand en klei met verschillende dichtheden) wordt uitgeoefend op het watervoerende pakket en de waterspanning die door het grondwater in het watervoerende pakket op de weerstandslaag wordt uitgeoefend. Hoe hoger de opbarstingsindex, des te kleiner de kans dat de weerstandslaag opbarst. In de praktijk blijkt dat opbarsting kan plaatsvinden indien de verhouding tussen de lithostatische druk en de waterspanning kleiner is dan 1.1 (volgens NEN 6740 uit 1991).

Gevaar voor opbarsten is aanwezig in die gebieden waar de hydraulische weerstand van de Holocene deklaag relatief dun is (afbeeldingen 4 en 7a). Dit risico neemt toe bij zeespiegelstijging (afbeelding 7b). Het heeft gevolgen voor de stabiliteit van dijken,

met name op risicocolocaties als de dijkvoet langs rivieren en polders. De uitkomsten van de modellering (op een schaal van 1000 x 1000 m<sup>2</sup>) zijn voornamelijk te grof om echte risicoschattingen aan te kunnen hangen; lokaal zal het opbarstingsrisico waarschijnlijk hoger zijn dan nu berekend.

### Zoutgehalten in het grondwater

Het zoutgehalte in het grondwater zal de komende 100 jaar over het algemeen toenemen (afbeelding 8). Het kaartbeeld laat zien dat in delen van de Kop van Noord-Holland, Texel en de Friese kust de zoutgehalten in het grondwater gaan lijken op de gehalten die vandaag de dag in Zeeland te vinden zijn. De waterbeheerders in deze gebieden doen er goed aan het huidige waterbeheer in Zeeland te bestuderen. De zoutbelasting lijkt flink toe te nemen door drie factoren: de toename in kwel, maar in het bijzonder het autonome proces van verzilten én de extra bijdrage vanuit de gebieden die omslaan van infiltratie naar kwel. Voor de zoetwatervoorziening bestaat het risico van opkleding van brak tot zout grondwater in opbarstingsgevoelige gebieden en het inlaten van brak tot zout oppervlaktewater via de rivieren. Daarnaast is voornamelijk niet duidelijk hoe de waterkwaliteit van het grote zoetwaterbekken het IJsselmeer zal veranderen. Verhoging van de doorspoelcapaciteit is misschien

noodzakelijk om de extra hoeveelheid zout en nutriënten te verwijderen uit het landelijk gebied. De bijbehorende vragen zullen dan zijn: is dat nodig, zo ja, hoe vaak, en ten koste van wat?

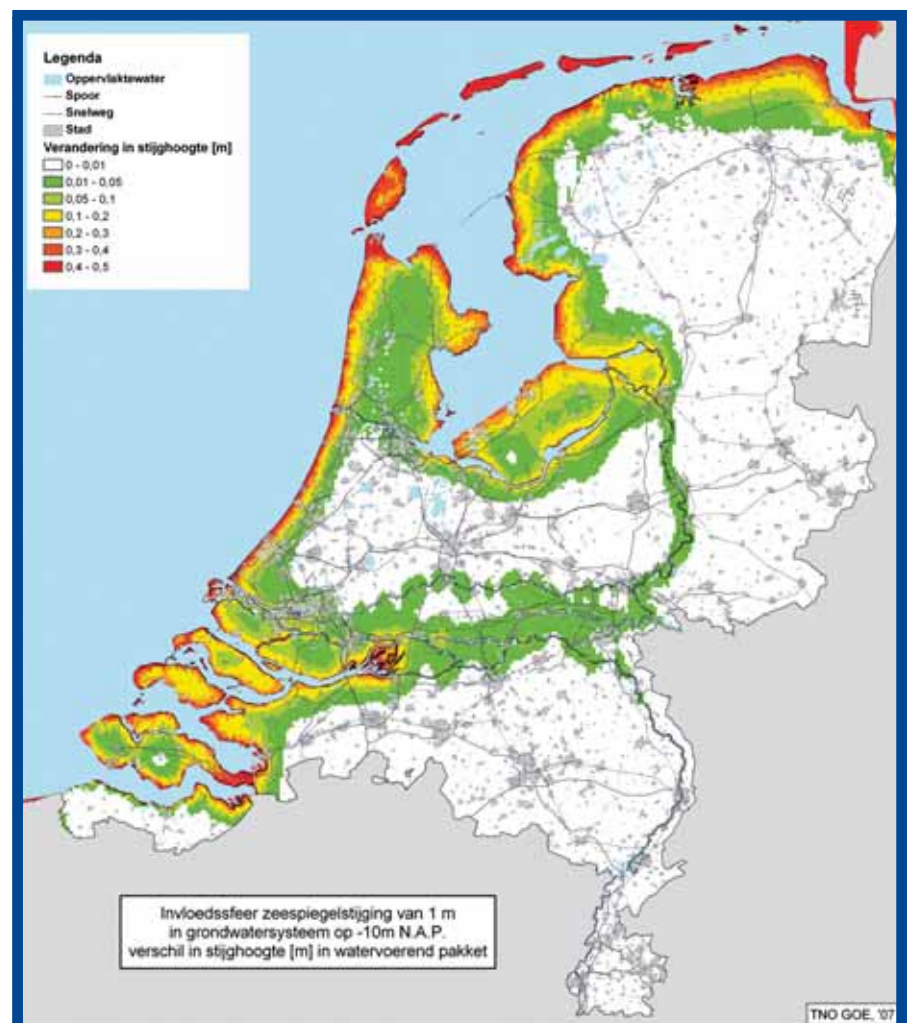
### Regionale langjarige versus lokale dynamische processen

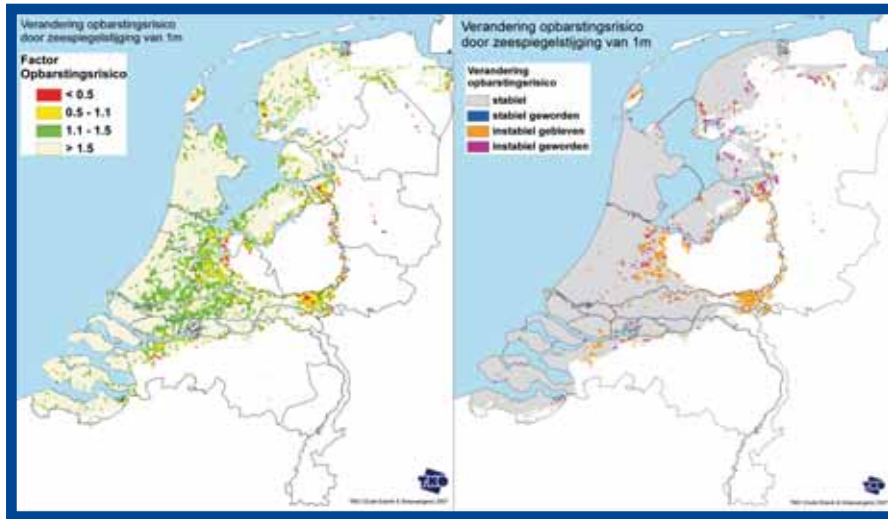
De MNP-studie geeft inzicht in de regionale aspecten van een zeespiegelstijging voor de lange termijn. Lokale dynamische (geo) hydrologische processen, zoals dynamische regenwaterlenzen in het topsysteem of de toestroming van zout grondwater naar het oppervlaktewatersysteem bij zandbanen en wellen, zijn hierin niet meegenomen. TNO verricht wel onderzoek naar deze processen<sup>10),11)</sup>. Daarnaast zou voor een gedetailleerde risicoanalyse van het opbarstingsgevaar rondom waterkeringen gekeken moeten worden naar bijzondere (extreme) hydrologische situaties als droogtes en hoogwaters op de rivieren. Een numeriek deelmodel met fijne discretisatie zou uitsluiting kunnen geven over het lokale grondwatersysteem.

### Conclusies

In de MNP-studie komt naar voren dat de effecten van een zeespiegelstijging op het Nederlandse grondwatersysteem zich ruimtelijk lijken te beperken tot de eerste kilometers vanaf het open water.

**Afb 6:** Verhoging van de stijghoogte in het watervoerend pakket op -10 meter N.A.P. door een zeespiegelstijging van één meter.



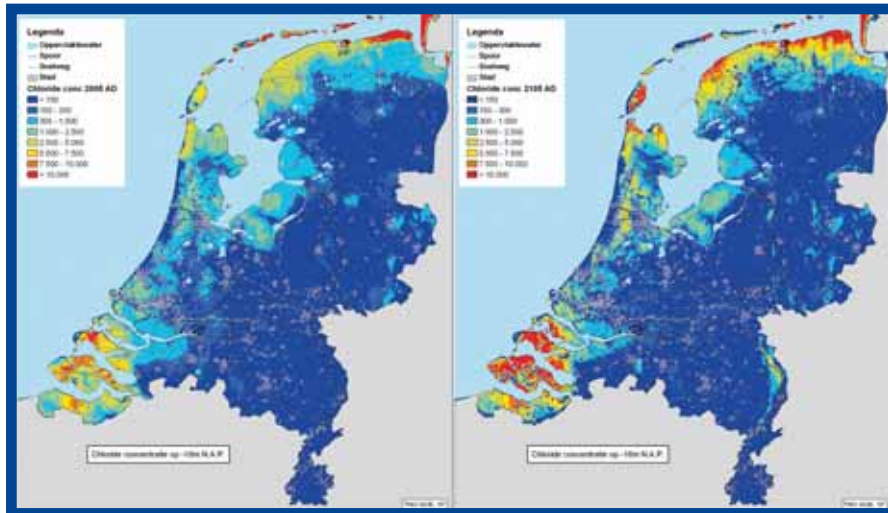


**Afb 7: a. Opbarstingsrisico van de Holocene deklaag; b. verandering in opbarstingsrisico van de Holocene deklaag bij een zeespiegelstijging van één meter.**

De geologische bodemopbouw speelt een belangrijke rol bij het vaststellen van de invloedssfeer. De analyse van het opbarstingsgevaar geeft aan dat de dikte van de Holocene deklaag doorslaggevend is bij

de bepaling van het risico. Het autonome verziltingsproces van de ondergrond in het kustgebied zal over het algemeen leiden tot hogere zoutgehalten naar het oppervlaktewatersysteem. Risicogebieden qua stijghoog-

**Afb 8: Zoutgehalte (chlorideconcentratie in mg Cl-/l) op -10 meter N.A.P. voor 2005 en 2105, inclusief een zeespiegelstijging van één meter, bodemdaling conform WB21 Hoog scenario en verhoging rivierwaterstand.**



teverhoging, toename van kwel en met name zoutbelasting zijn Zeeland, de Biesbosch, Zeeland, de Kop van Noord-Holland en Noord-Nederland. De effecten kunnen lokaal aanmerkelijk zijn.

Om het opbarstingsgevaar van waterkeringen nauwkeurig in kaart te brengen, moet meer detail worden aangebracht in het, voor de MNP-studie ontwikkelde, model. Daarnaast dient rekening te worden gehouden met extreme afvoeren in de rivieren en met extreme weersituaties.

#### LITERATUUR

- 1) Kwadijk et al. (2007). Gevolgen van grote zeespiegelstijging op de Nederlandse zoetwaterhuishouding. In opdracht van het Milieu en Natuurplan Bureau. Deltares.
- 2) Huisman L. (1972). Groundwater recovery. MacMillan Press, London.
- 3) Oude Essink G. (1996). Impact of sea level rise on groundwater flow regimes. A sensitivity analysis for the Netherlands. TU Delft.
- 4) Stuurman R., G. Oude Essink et al. (2006). Monitoring zoutwaterintrusie naar aanleiding van de Kaderrichtlijn Water 'Verzilting door zoutwaterintrusie en chloridevervuiling'. TNO Bouw en Ondergrond. Rapport 2006-U-R0080/A.
- 5) McDonald M. en A. 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.
- 6) Minnema B., B. Kuijper en G. Oude Essink (2004). Bepaling van de toekomstige verzilting van het grondwater in Zuid-Holland. TNO Bouw en Ondergrond. Rapport NITG 04-189-B.
- 7) Snepvangers J. en W. Berendrecht (2007). Methodiekontwikkeling voor interactieve planvorming ten behoeve van waterbeheer. TNO. Rapport in concept.
- 8) Haasnoot M., J. Vermulst en H. Middelkoop (1999). Impacts of climate change and land subsidence on the water systems in the Netherlands. Terrestrial areas. RIZA.
- 9) Van Vugt A., G. Oude Essink en A. Biesheuvel (2003). Modelleren van het zoet-zout grondwatersysteem op Texel. Stromingen nr. 1, pag. 33-46.
- 10) De Louw P., G. Oude Essink en P. Maljaars (2007). Achtergrondstudie kwelreductietechnieken. TNO. Rapport 2007-U-R0357/B.