

Deltares-rapport

2008-U-R0322/A

Verkennde studie klimaatverandering en verzilting grondwater in Zuid-Holland

Bodem- en
Grondwatersystemen
Princetonlaan 6
Postbus 85467
3508 AL Utrecht

www.deltares.nl

T +31 30 256 47 50
F +31 30 256 48 55
info@deltares.nl

Datum	1 juli 2008
Auteur(s)	Gualbert Oude Essink, Esther van Baaren, Michelle van Vliet
Opdrachtgever	Provincie Zuid-Holland, Sieb de Jong
Projectnummer	092.81111
Aantal pagina's	64
Aantal bijlagen	5
Goedgekeurd door	Bennie Minnema

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

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

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

© 2008 Deltares

Samenvatting

Inleiding

Het doel van het *Actieprogramma Klimaat en Ruimte* van de Provincie Zuid-Holland is om de gevolgen van klimaatverandering van de KNMI'06 klimaatscenario's voor de komende honderd jaar beter in beeld te brengen. In deze scenario's wordt op basis van aannames over wereldwijde temperatuurstijging en luchtstromingspatronen een overzicht van verwachte veranderingen weergegeven.

In deze verkennende studie is de TNO 2004 studie "*Bepaling van de toekomstige verzilting van het grondwater in Zuid-Holland*" (Minnema, Kuijper en Oude Essink, 2004) opnieuw tegen het licht gehouden. Een drietal vragen is centraal gesteld bij het beantwoorden van de effecten van klimaatverandering op de verzilting van het grondwater: 1. in hoeverre brengt het rapport uit 2004 de problematiek van verzilting van het opkwellend ondiepe grondwater op lokale schaal in beeld?; 2. Wat is het verschil in neerslagoverschot in 2050 en 2100, voornamelijk in de duingebieden?; en 3. In hoeverre barst de Holocene deklaag open als gevolg van toenemende kweldruk door zeespiegelstijging (en klimaatverandering)? Bij het beantwoorden van de genoemde vragen is gekozen om de vragen toe te spitsen op het tussenliggende jaar 2075 AD. Dit verkennende onderzoek beperkt zich vooralsnog met name tot drie deelgebieden waar verzilting van het grond- en oppervlaktewatersysteem mogelijk een rol zal spelen: 1. de Bollenstreek, 2. de Zuid-Hollandse Eilanden en 3. het duingebied tussen Den Haag en Katwijk.

Het hier gebruikte modelinstrumentarium is, zoals bekend, grotendeels gebaseerd op het instrumentarium zoals ontwikkeld in de TNO 2004 studie. Het onderscheidend vermogen in het horizontale vlak is nog steeds 250x250 m². Wat nieuw is in dit onderzoek is dat gebruik is gemaakt van een sterk verbeterd initiële chloride concentratie verdeling waarbij naast analyses ook VES (verticale elektrische sonderingen) en boorgatmetingen zijn gebruikt. Daarnaast is het topsysteem nauwkeuriger gemodelleerd door het aanbrengen van een dynamische bovenrandvoorwaarde, zodat het effect van de verschillende klimaatscenario's (viz. veranderend neerslag- en verdampingspatroon) en bodemdaling beter kan worden nagebootst.

Bollenstreek

Voor de Bollenstreek is onderzoek gedaan naar de invloed van de effecten van de klimaatscenario's op de zoutvracht van het grondwater naar het oppervlaktewater en de zoutschade als berekening met grondwater plaatsvindt. Daarnaast is in beeld gebracht welke bolgewassen in de huidige situatie geteeld worden in de 2500 ha bestemd voor bollenteelt en in welke mate deze gewassen gevoelig zijn voor opkwellend brak/zout. Er zijn twee risicogebieden te onderscheiden in de Bollenstreek; het eerste risicogebied ligt ten westen en noorden van Noordwijkerhout en het tweede ten westen van Voorhout. Deze twee risicogebieden vertonen naast mogelijk zoutschade aan gewassen door berekening ook een grotere zoutvracht (kg/ha/jaar) van het grondwater naar het oppervlaktewater. De grootste zoutvracht van het grondwater naar het oppervlaktewater wordt bereikt in de Bollenstreek indien het KNMI'06 klimaatscenario W werkelijkheid wordt.

Hoewel de verschillen tussen de klimaatscenario's gering zijn, is te zeggen dat de zeespiegelstijging zorgt voor verzilting van het grondwater langs de kust en dat een grotere grondwateraanvulling zal leiden tot verzoeting in het duingebied en tot verzilting landinwaarts.

Zuid-Hollandse Eilanden

Een significante verhoging van de stijghoogte in het watervoerend pakket is te verwachten voor alle klimaatscenario's direct langs de Noordzeekustlijn in het zuiden, bij de Zuid-Hollandse Eilanden en in het Rotterdamse Havengebied. Het effect van een zeespiegelstijging dempt echter richting het binnenland relatief snel uit; binnen 6 km vanaf de Noordzee is over het algemeen de invloed te verwaarlozen. Langs de Noordzeekustlijn boven Den Haag is de stijghoogteverandering ook onderhevig aan de grondwateraanvulling die flink verschilt bij de verschillende KNMI'06 klimaatscenario's: hoe extremer het klimaatscenario (van G+→W+), hoe groter het neerslagtekort en hoe groter de afname in stijghoogte t.o.v. de referentie case. Toegespitst op de Zuid-Hollandse Eilanden blijkt de invloed van een zeespiegelstijging significant te zijn. Zo neemt de stijghoogte aan de randen van Goeree-Overflakkee flink toe: in het grootste deel van het eiland is immers het open water altijd dichtbij. Het risico van opbarsten van de Holocene deklaag zal toenemen door een significante verhoging van de stijghoogte, vooral in gebieden waar de deklaag dun is en waar zandbanen veelvuldig voorkomen. Dit risico neemt toe bij zeespiegelstijging. De uitkomsten van de modellering (op 250x250 m² schaal) blijken vooralsnog te grof om gedetailleerde en nauwkeurige risicoschattingen te kunnen berekenen. Met betrekking tot verzilting van het grondwater zijn twee risicogebieden te onderscheiden. Het eerste gebied ligt in het midden van Goeree-Overflakkee, bij Dirksland, waar nu al grote zoutvrachten optreden. Die vrachten zouden weliswaar in het autonome scenario iets kunnen afnemen, maar door de stijging van de zeespiegel van de klimaatscenario's zullen ze echter uiteindelijk flink toenemen. Het tweede risicogebied ligt rond Hellevoetsluis. De zoutvracht is op dit moment niet zo groot, maar zal door het autonome verziltingsproces toenemen en door de klimaatscenario's nóg meer toenemen. De toename van de zoutvracht door de effecten van klimaatverandering is bij de Zuid-Hollandse eilanden vooral te wijten aan de zeespiegelstijging. Het drogere en met een hogere zeespiegel W+ scenario is voor dit gebied het meest extreme scenario.

Duingebied Den Haag – Katwijk

Voor de huidige situatie is de natuurlijke grondwateraanvulling in het duingebied en de polders hoger in vergelijking tot het stedelijke gebied. Voor de situatie van 2100 is uitgegaan van een verdubbeling van de veranderingen in neerslag en verdamping volgens de vier KNMI'06 scenario's voor 2050. Dit resulteert in een sterkere toename in grondwateraanvulling voor de G en W klimaatscenario's en een sterkere afname voor de G+ en W+ klimaatscenario's op jaarbasis.

Zoutvracht

Voor de tien deelgebieden en de Haarlemmermeer is de verandering van zoutvracht van het grondwater naar het oppervlaktewater berekend tot het jaar 2050. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen een toe- of afname in zoutvracht door autonome processen en door klimaatverandering. Voor enkele deelgebieden zorgt het 'drogere' W+-scenario voor de grootste toename in zoutvracht, voor andere is dit het nattere scenario (G of W). In de huidige situatie is de zoutvracht in de Haarlemmermeer de grootste (gemiddeld 2600 kg/ha/jaar) en zal door zowel autonome processen als klimaatscenario's toenemen tot maximaal 3150 kg/ha/jaar. Daarnaast heeft de Haarlemmermeer nauwelijks infiltratiegebieden (bijna volledig kwelgebied). De zoutvracht in de Tempelpolder is al 2200 kg/ha/jaar maar zal niet toenemen. Goeree-Overflakkee heeft een zoutvracht van 1200 kg/ha/jaar welke door klimaatscenario W+ kan toenemen tot 1900 kg/ha/jaar.

Vervolgonderzoek

De resultaten van de klimaatscenario's liggen dicht bij elkaar in de buurt. Het autonome verziltingsproces lijkt een veel grotere rol te spelen. De vraag komt op of bij de bepaling van de effecten op de verzilting van het grondwatersysteem wel zoveel klimaatscenario's nodig zijn om de verzilting in de toekomst in kaart te brengen.

Voor meer nauwkeurige resultaten is het nodig om het 3D geologisch topsysteem te verbeteren, waarbij zandbanen en zelfs wellen beter worden weergegeven. Bovendien is een verfijnd model (met veel kleinere gridcellen) nodig om de volgende aspecten meer in detail te kwantificeren: 1. grondwaterstroming en stoftransport naar het oppervlaktewatersysteem, 2. zoute kwel in de buurt van zandbanen en in het bijzonder wellen, 3. opbarsten Holocene deklaag, bijv. in de buurt van dijken, en 4. zoutschade aan gewassen in de onverzadigde zone. Daarnaast is het verfijnen van de temporele discretisatie nodig om de effecten van bijvoorbeeld seizoenale verschillen op het grondwater en oppervlaktewatersysteem te detecteren.

Inhoudsopgave

	Samenvatting.....	3
1	Inleiding.....	9
1.1	Aanleiding.....	9
1.2	Doelstelling.....	9
1.3	Aanpak en afbakening tot drie bovenregionale ruimtelijke opgaven.....	10
1.4	Leeswijzer.....	11
2	Inventariseren bestaande klimaatstudies.....	13
3	Modelinstrumentarium en klimaatscenario's	17
3.1	Modelinstrumentarium.....	17
3.2	Implementatie klimaatscenario's	21
4	Uitwerken TNO 2004 studie voor Bollenstreek.....	23
4.1	Zoet-brak-zout verdeling voor de verschillende klimaatscenario's	23
4.2	Zoutschade aan bollenteelt.....	28
4.3	Zoutbelasting vanuit het grondwater naar het oppervlaktewater	32
5	Uitwerking TNO 2004 studie voor Zuid-Hollandse Eilanden.....	35
5.1	Invloedssfeer van een zeespiegelstijging op het grondwatersysteem	35
5.2	Opbarstingsrisico van slechtdoorlatende weerstandslagen	37
5.3	Verzilting van het grondwatersysteem op de Zuid-Hollandse Eilanden.....	38
6	Zoutvracht naar het oppervlaktewatersysteem	43
6.1	Totale zoutvracht per deelgebied	44
6.2	Gemiddelde zoutvracht per deelgebied.....	47
6.3	Oorzaken toe- of afname zoutvracht.....	49
7	Bepalen van neerslagoverschot voor duingebieden Den Haag-Katwijk	53
8	Doorkijk naar mogelijk vervolgonderzoek.....	57
9	Conclusies	59
10	Literatuur	63
	Bijlage(n)	
	A Initiële chloride concentratie verdelingen	
	B Korte beschrijving MOCDENS3D	
	C KNMI' 06 klimaatscenario's	
	D Grondwateraanvulling	
	E Zoutvracht naar het oppervlaktewatersysteem 2075	

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Voor een goed beheer van grondwater, bodem en natuur in de provincie Zuid-Holland is het belangrijk te weten in hoeverre het watersysteem in de nabije toekomst zal veranderen. Vragen die opkomen zijn: Hoe gaan we de provincie in de nabije toekomst ruimtelijk inrichten, en welke vormen van landgebruik zijn nog mogelijk? Behalve door menselijk handelen zal door externe factoren als zeespiegelstijging, bodemdaling en klimaatverandering in de vorm van een veranderend neerslag- en verdampingspatroon de druk op het watersysteem toenemen. In deze verkennende studie wordt de aandacht gericht op het grondwatersysteem in het kustgebied, en in het bijzonder op de zoet-brak-zout¹ verdeling met daarbij de focus op de chloride concentratie. Afgeleide vragen zijn: Wat zijn de effecten van klimaatverandering en de daarmee gepaard gaande stijging van de zeespiegel op de zoetwatervoorraden, en met welke snelheid verzilt het grondwater en waar blijft uiteindelijk nog zoet grondwater over? Daarnaast is het interessant om te weten hoe groot onze menselijke invloed is op de verzilting en hoe we hierop kunnen inspelen. Om deze aspecten verder uit te kunnen werken, is meer kennis nodig over de snelheid en regionale verdeling van de zoet-zout verdeling van het grondwatersysteem. Uit de TNO studie “*Bepaling van de toekomstige verzilting van het grondwater in Zuid-Holland*” (Minnema, Kuijper en Oude Essink, 2004) zijn enkele vervolgvragen ontstaan die met deze aanvullende verkenning beantwoord zullen worden. De eerste vraag is in hoeverre het rapport uit 2004 de problematiek van verzilting van het opkwellend ondiepe grondwater op lokale schaal in beeld brengt. De tweede vraag betreft het in beeld brengen van het verschil in neerslagoverschot in 2050 en 2100, voornamelijk in de duingebieden. De derde vraag tot slot betreft het opbarsten van slechtdoorlatende Holocene lagen als gevolg van toenemende kweldruk door klimaatverandering.

1.2 Doelstelling

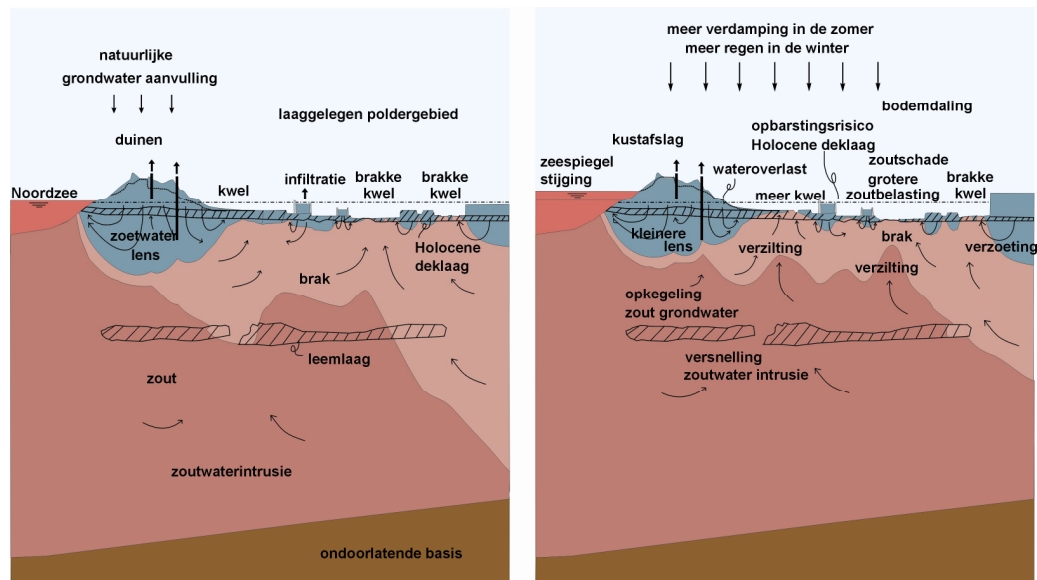
Het doel van het *Actieprogramma Klimaat en Ruimte* van de Provincie Zuid-Holland is voor de korte termijn de gevolgen van klimaatverandering van de KNMI'06 scenario's voor de komende honderd jaar beter in beeld te brengen. Bij het thema grondwater gaat het vooral om de volgende mogelijke bedreigingen (zie ook figuur 1):

- de verhoging van de stijghoogten in de watervoerende pakketten en de freatische grondwaterstanden;
- de toename van de zoutbelasting op het oppervlaktewater door een toename van de hoeveelheid en een verhoging van het zoutgehalte van het kwelwater;
- het ‘opbarsten’ van de slechtdoorlatende Holocene deklaag door toename van de stijghoogte in het watervoerend pakket.

In deze verkennende studie zullen een grote hoeveelheid gegevens, figuren en getallen de revue passeren. Bij het beantwoorden van de genoemde vragen is gekozen om de vragen toe te spitsen op het jaar 2075 AD, precies liggend tussen 2050 AD en 2100 AD,

¹ Voor zoet, brak en zout grondwater zijn de volgende chloridegehalten gehanteerd: zoet: chloridegehalte grondwater < 150 mg/l, brak: chloridegehalte tussen 150 mg/l en 1000 mg/l; zout: chloridegehalte > 1000 mg/l.

om het geheel overzichtelijk te houden. Het onderscheidend vermogen in het horizontale vlak is 250x250 m² (conform de TNO 2004 studie).



Figuur 1: Vereenvoudiging van het regionale grondwatersysteem in de provincie Zuid-Holland: a. huidige situatie 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.

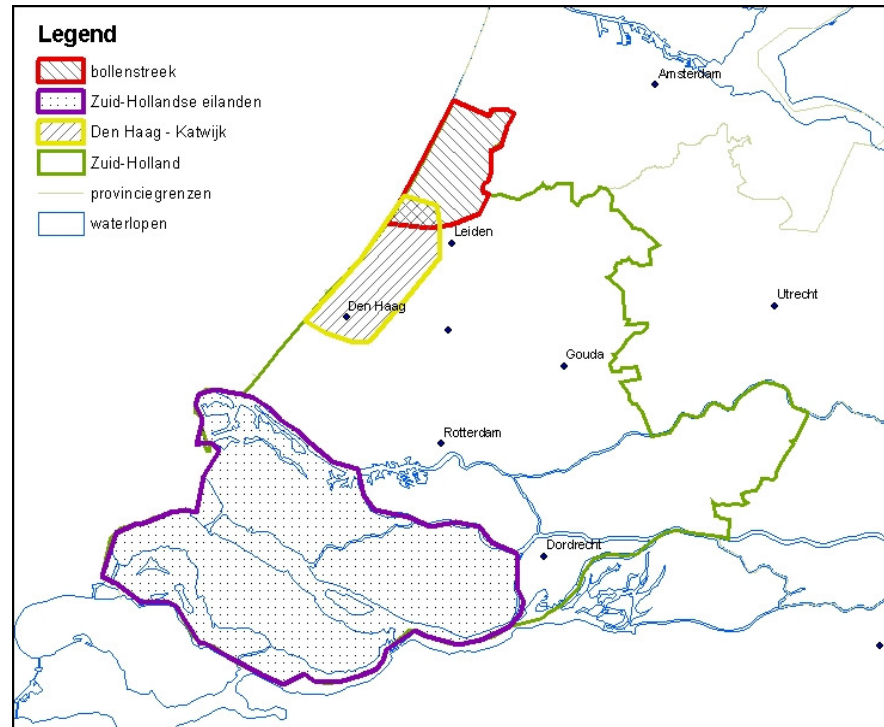
1.3 Aanpak en afbakening tot drie bovenregionale ruimtelijke opgaven

De TNO 2004 studie (Minnema, Kuijper en Oude Essink, 2004) vormt de basis van deze verkennende studie. De klimaatscenario's, die door het KNMI in 2006 zijn opgesteld, zijn doorgerekend met het numerieke modelinstrumentarium.

Om het effect van een veranderend neerslagpatroon te kwantificeren is het bovenste deel van het grondwatersysteem, het zogenaamde topsysteem, nauwkeuriger gemodelleerd dan in de TNO 2004 studie, en wel door waterlopen (zijnde rivieren, boezems en sloten), het afwateringssysteem via drainage en de natuurlijke grondwateraanvulling afzonderlijk te modelleren.

Van de 25 bovenregionale ruimtelijke opgaven waarvan de gevolgen van klimaatverandering in beeld gebracht zullen worden speelt grondwater mogelijk een rol bij zeven opgaven. In dit verkennende onderzoek beperken we ons conform de offerte tot drie deelgebieden: 1. de Bollenstreek, 2. Zuid-Hollandse Eilanden en 3. de duingebieden Den Haag-Katwijk (zie figuur 2).

Daarnaast wordt aanvullend ingegaan op de verandering van de zoutvrucht van het grondwater naar het oppervlaktewater voor de deelgebieden Goeree-Overflakkee, Voorne-Putten, Hoeksche Waard, Westland, Midden-Delfland, Bollenstreek, Haarlemmermeer, Tempelpolder, RZG driehoek (driehoek Rotterdam-Zoetermeer-Gouda, met de Zuidplaspolder), Polder Nieuwkoop en Polder Vierambacht.



Figuur 2: De onderzochte deelgebieden Bollenstreek, Zuid-Hollandse Eilanden en Den Haag-Katwijk.

1.4 Leeswijzer

In deze studie wordt eerst een overzicht gegeven van de klimaatstudies die relevant kunnen zijn voor de Provincie Zuid-Holland. In hoofdstuk 3 wordt het gebruikte modelinstrumentarium kort toegelicht en zullen de gebruikte klimaatscenario's de revue passeren. Vervolgens worden in aparte hoofdstukken de drie deelgebieden behandeld. Dan wordt een overzicht gegeven van de zoutvracht voor 10 deelgebieden van Zuid-Holland en de Haarlemmermeer. Tenslotte wordt een doorkijk gegeven naar mogelijk vervolgonderzoek, waarbij in het oog is gehouden dat in de TNO 2004 studie de diepere ondergrond centraal stond, terwijl in deze verkennende studie juist de vertaalslag naar het topsysteem is gemaakt. Conclusies, literatuurlijst en bijlagen complementeren deze verkennende studie.

2 Inventariseren bestaande klimaatstudies

Op het gebied van veranderingen in neerslag- en verdampingspatronen en zeespiegelstijging ten gevolge van klimaatveranderingen zijn al verschillende studies uitgevoerd op nationaal en regionaal niveau. Hieronder volgt een beschrijving van een aantal eerder verrichte studies die zich op dit thema, viz. klimaatverandering en grondwater in het kustgebied, hebben toegespitst.

MNP: Duurzaamheidsverkenning Nederland (Kwadijk *et al.*, 2007)

DELTAIRES (WLI/Delft Hydraulics, TNO Bouw en Ondergrond, GeoDelft) heeft een verkennend onderzoek uitgevoerd om een eerste beoordeling van de ernst van de problemen te geven in geval van een stijging van de zeespiegel (op lange termijn) van 1, 2, 4 en 6 meter. Het onderzoek richt zich op de gevolgen van de verhoging van de stijghoogte in de watervoerende pakketten, de toename van de kwel voor het waterbezwaar in polders, de toename van het zoutgehalte in het oppervlaktewater (vanuit het grondwater), de stijgende waterstanden op de rivieren, de verder landinwaartse zoutindringing op de rivieren en de toename van het opbarstingsrisico van de bodem. In deze oriënterende studie is naar voren gekomen dat niet zozeer overstroming vanuit zee het grote probleem is, maar dat stagnerende rivierafvoeren (door wegvallen vrij verval) en de toenemende kweldruk in vooral West Nederland (door toenemend risico opbarsten bodem) de belangrijkste problemen kunnen gaan worden.

Inventarisatie van effecten van klimaatverandering op fysiek systeem, Hoogheemraadschap van Delfland (Hoogvliet *et al.*, 2007)

In deze studie is op basis van bestaande literatuur en expertkennis een inventarisatie gemaakt van de effecten van klimaatverandering op het fysieke systeem van het Hoogheemraadschap van Delfland. De nadruk is daarbij gelegd op effecten die van invloed kunnen zijn op de kerntaken van Delfland, waaronder waterkering en veiligheid, waterbeheer, waterkwaliteit, grondwater en bodem. In de studie is gebruik gemaakt van kwalitatieve klimaattrends die in de KNMI'06 scenario's tot uiting komen. Met betrekking tot verzilting werd gesteld dat stijging van de zeespiegel, toename van verdamping en afname van neerslag in de zomer de belangrijkste klimaattrends zijn die invloed zullen uitoefenen op de zoet-brak-zoutverdeling in het gebied. Er wordt verwacht dat als gevolg van zeespiegelstijging op de middellange tot lange termijn (>2050) in het westen nog meer zout grondwater gaat opwellen. In de toekomst zal door zeespiegelstijging en stopzetting of vermindering van DSM-onttrekking de stijghoogte, kwelintensiteit en het oppervlak waar kwel plaatsvindt worden verhoogd waardoor de zoutbelasting op het oppervlaktewater waarschijnlijk gaat toenemen.

Klimaat economie TNO (Jonkhof, 2007)

In dit project worden aan de hand van een zestel klimaatscenario's (de 4 KNMI'06 en 2 extreme scenario's, voor TNO door KNMI aangemaakt) de effecten van klimaatverandering bepaald voor de thema's verzilting en droogte in een aantal deelgebieden in Nederland. De fysieke resultaten worden doorvertaald naar relevante consequenties voor economische en ruimtelijke ordening functies, o.a. aan de hand van een maatschappelijke kosten-batenanalyse.

Koploperproject Deltares Grenzen aan de Klimaatbestendigheid van het Hoofdwatersysteem (Ad Jeuken, et al., 2007)

In dit koploperproject worden voor de klimaatgerelateerde thema's veiligheid, natuur, watervoorziening, technische aspecten van waterbeheer en scenario-onderbouwing knikpunten geïdentificeerd, waarbij de omslag naar bestaande waterbeheerstrategieën niet meer verder houdbaar zijn om de gewenste ruimtelijke en maatschappelijke economische functionaliteit te kunnen handhaven. Ook voor 2008 zal Deltares met dit onderzoek verder gaan, waarbij de nadruk zal komen te liggen op de doorvertaling van de knikpunten op landelijke schaal en op de ontwikkeling van mitigerende en adaptieve waterbeheersstrategieën

ARK 'Adaptatie ruimte en klimaat' (www.programmaark.nl)

In het programma 'Adaptatie ruimte en klimaat' werken ministeries, wetenschappelijke kennisinstituten, provincies, waterschappen, maatschappelijke organisaties en bedrijfsleven en gemeenten samen om de ruimtelijke inrichting van Nederland 'klimaatbestendig' te maken. Daarbij wordt 100 jaar vooruit gekeken, rekening houdend met de standaard KNMI en IPCC klimaatscenario's. Het programma besteedt aandacht aan de gevolgen van klimaatverandering voor Nederland, bijvoorbeeld voor de ruimtelijke ordening en het waterbeleid. De afspraken zullen worden vastgelegd in een Nationale Adaptatieagenda.

Monitoring zoutwaterintrusie naar aanleiding van de Kaderrichtlijn Water (R. Stuurman, G. Oude Essink, Hans Peter Broers, B. van der Grift, 2006)

Door TNO is in opdracht van VROM een studie uitgevoerd met als doel om de uitgangspunten vast te stellen waaraan toekomstige grondwatermonitoringsprogramma 'zoutwaterintrusie' moet voldoen. Om deze vraag te kunnen beantwoorden zijn interviews en een workshop gehouden met grondwaterbeheerders en andere belanghebbenden. Daarnaast zijn gebiedsspecifieke zoet-zout-processen geïnventariseerd en is de zoet-zout overgang in Nederland in kaart gebracht.

Bepaling van de toekomstige verzilting van het grondwater in Zuid-Holland, Provincie Zuid-Holland (B. Minnema, G. Oude Essink, M. Kuijper, K. Maas (KIWA), 2004)

Voor de Provincie Zuid-Holland heeft TNO een studie uitgevoerd naar de veranderingen binnen zoete grondwaterlichamen onder invloed van autonome ontwikkelingen, zeespiegelstijging, bodemdaling en klimaatverandering. Bovendien is gekeken naar de effecten van menselijk ingrijpen, zoals het effect van brijnlozingen in het tweede watervoerend pakket.

Verzoetingverzilting freatisch grondwater in de Provincie Zeeland (G. Oude Essink, 2006-2008)

De Provincie Zeeland heeft in 2006 het initiatief genomen een langjarig verziltingsonderzoek op te doen naar de verzilting van het grondwater in de bovenste meters van de ondergrond onder invloed van zeespiegelstijging en een veranderend klimaat. Het hoofddoel is te kijken welke waterbeheersmaatregelen effectief zijn in het bestrijden van de verzilting in Zeeland in landbouw- en natuurgebieden. Speciale aandacht wordt gegeven aan de zogenaamde relatief dunne regenwaterlenzen in landbouwpercelen. Naast het ontwikkelen van een betrouwbaar modelinstrumentarium zal een uitgebreide meerjarige meetcampagne plaatsvinden waarmee het voorspellend vermogen van het modelinstrumentarium wordt vergroot.

Investeringsruimte voor toekomstige droogte; verkenning van de hydrologische effecten en economische schade in de KNMI '06 klimaatscenario's (Rijkswaterstaat/RIZA, Haskoning, 2007)

In dit door Haskoning uitgevoerde verkennend onderzoek is gekeken naar de hydrologische effecten en de toekomstige economische schade in geval van de nieuwe KNMI '06 klimaatscenario's. Daarnaast heeft Haskoning vervolgens bepaald welke grootschalige maatregelen ter voorkoming van droogteschade rendabel kunnen zijn.

Impact of climate change on groundwater, Review (M. van Vliet, 2007)

In dit rapport wordt een overzicht gegeven van de verschillende processen en factoren (*direct & indirect climate drivers*) die bijdragen tot veranderingen in het grondwatersysteem door klimaatverandering. Centraal in deze studie staat UNESCO's initiatief GRAPHIC: Groundwater Resources Assessment under the Pressures of Humanity and Climate Changes. Aan de hand van enkele globale en regionale voorbeelden worden verschillende onderzoeksmethoden zoals *remote sensing* geëvalueerd die veranderingen in neerslag, grondwaterstanden, afvoer, berging en waterkwaliteit zouden kunnen monitoren.

Kennis voor Klimaat (www.kennisvoorklimaat.nl, i.o.)

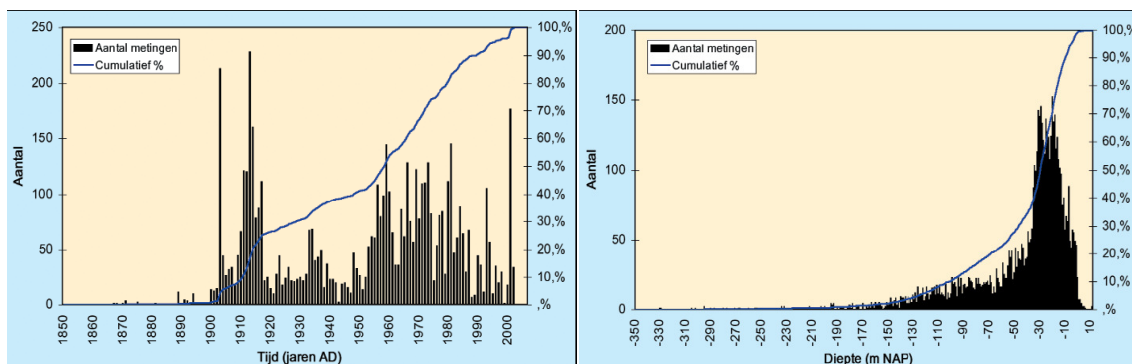
Het onderzoeksprogramma Kennis voor Klimaat ontwikkelt kennis over hoe Nederland zich het beste voorbereidt op de gevolgen van de wereldklimaatverandering - zoals de opwarming van de aarde, de toename van perioden met hevige storm en regenval, lange droogteperioden, de zeespiegelstijging en een verslechtering van de kwaliteit van de leefomgeving. Kennis voor Klimaat gaat vooral over adaptatie, over praktische maatregelen per regio om de veranderingen het hoofd te bieden. Er zijn acht zgn. 'hot spots' in Nederland aangewezen: de regio's Rotterdam en Haaglanden, Schiphol, de Zuidwestelijke Delta, de Waddenzee, de Grote Rivieren, de ondiepe meren en de droge zandgronden. Belangrijke onderzoeksvragen zijn bijvoorbeeld wat de gevolgen zijn van meer neerslag voor de afwatering van polders, hoe wateroverlast is te voorkomen in dichtbevolkt stedelijk gebied, wat het effect is van verzilting voor de landbouw, en de invloed van veranderende meteorologische omstandigheden op de landbouw en de luchtkwaliteit in steden.

3 Modelinstrumentarium en klimaatscenario's

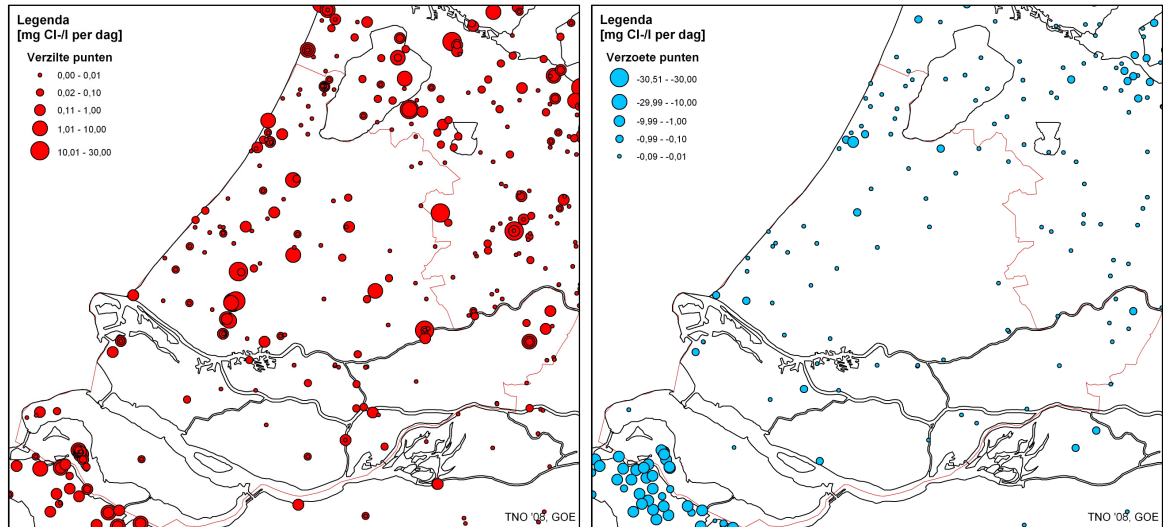
3.1 Modelinstrumentarium

Het modelinstrumentarium is, zoals bekend, grotendeels gebaseerd op de TNO 2004 studie (Minnema, Kuijper en Oude Essink, 2004). Voor meer informatie over het gebruikte modelinstrumentarium wordt verwezen naar deze studie. Hieronder volgt de bespreking van de uitbreidingen met betrekking tot de klimaatscenario's.

In de TNO 2004 studie is getracht een zo goed mogelijke weergave van de huidige verdeling van zoet en zout grondwater te genereren; de initiële dichtheidsverdeling heeft immers een grote invloed op de modelresultaten. Deze verdeling van zoet, brak en zout grondwater binnen Zuid-Holland is bepaald aan de hand van chloride concentratie analyses van TNO (DINO-Qua) en de provincie Zuid-Holland. Van de stijghoogten en chloride concentraties zijn gegevens beschikbaar vanaf 1867 tot 2001 (figuur 3a en 4). De betrouwbaarheid van de initiële dichtheidsverdeling is sterk afhankelijk van het aantal metingen en de ruimtelijke verdeling daarvan. In de TNO 2004 studie was de zoet-brak-zout verdeling gebaseerd op in totaal 5772 chloride concentratie analyses; dit lijkt erg veel maar er zitten ook tijdreeksen bij (figuur 4). De concentraties zijn ook nog eens bemonsterd over een lange periode, waarvan een groot aantal van vóór 1960 (figuur 3a). Daarnaast zijn onderin het grondwatersysteem relatief weinig bruikbare metingen aanwezig (figuur 3b), terwijl juist hier vaak brak en zout grondwater voorkomt.



Figuur 3: a. Hoeveelheid beschikbare grondwatergegevens per jaar (waarbij grondwaterstand én chloride concentraties zijn gemeten); b. Aantal metingen en percentage van het totaal als functie van de diepte.

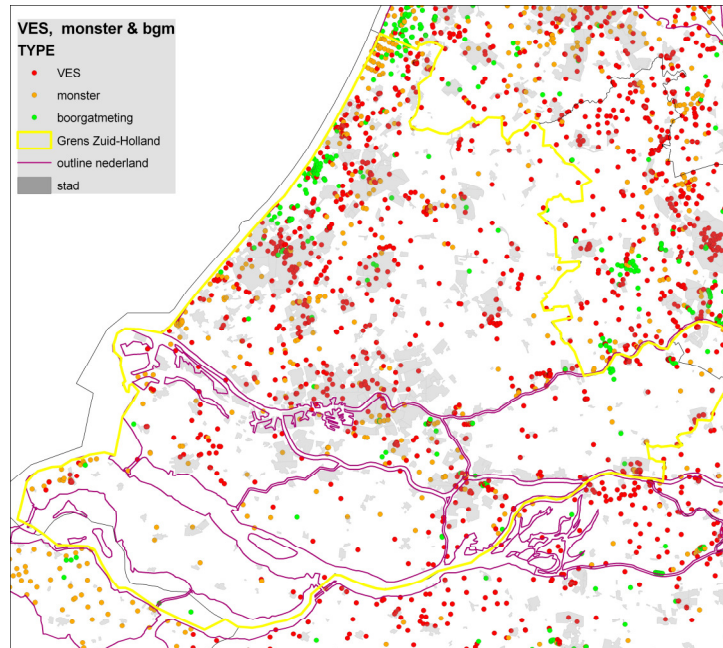


Figuur 4: Overzicht van de locaties van observatiebuizen in de provincie Zuid-Holland waar de chloride concentratie minimaal twee keer is gemeten. Zowel a: verzilting (toename chloride concentratie als een functie van de tijd) als b: verzoeting van het grondwater treedt op. Bron: DINO Qua. De complexe verzoetings- en verziltingspatronen variëren in ruimte en tijd.

Voor dit onderhavige onderzoek is het modelinstrumentarium van 2004 verder verfijnd om verschillende aspecten te onderzoeken in de Bollenstreek, op de Zuid-Hollandse eilanden en in de regio Den Haag – Katwijk. Bij het inzoomen naar deze deelgebieden bleek de initiële chloride verdeling nog belangrijker te zijn dan voor het model van 2004 dat heel Zuid-Holland beschreef, waar de aandacht met name was toegespitst op het diepe grondwatersysteem onder de deklaag. Met name bovenin het topsysteem bleek de verdeling nog niet op orde. Zo is er waarschijnlijk sprake van een inspeleffect. Om een beter beeld te krijgen van de effecten van de klimaatscenario's op de verzilting van de ondergrond is daarom besloten om de initiële zoet-brak-zout verdeling in de ondergrond flink te verbeteren.

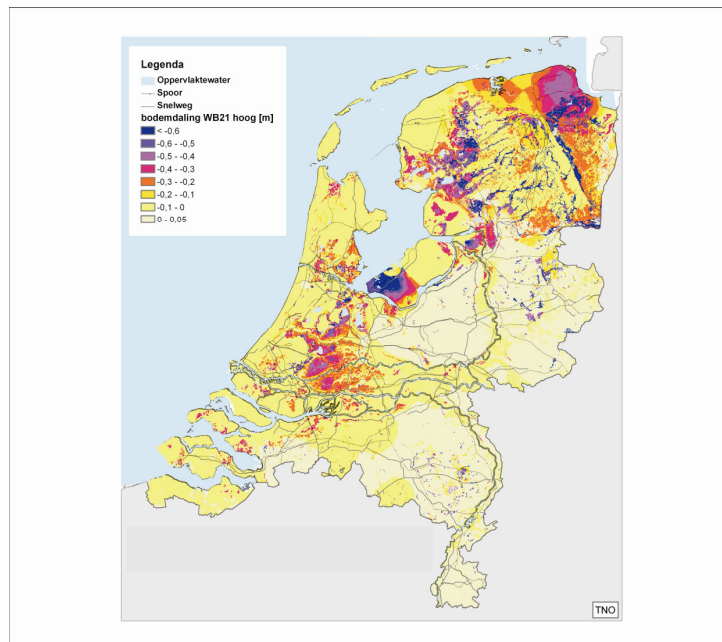
De afgelopen jaren heeft TNO onderzoek gedaan om ook andere gegevensbronnen direct te incorporeren in de zoet-brak-zout verdeling in de ondergrond (o.a. Kloosterman, 2007). VES (Verticale Elektrische Sondering) en Boorgatmetingen hebben geholpen om de initiële verdeling te verbeteren (figuur 5). Deze nieuwe gegevens zijn verwerkt om een betere initiële chloride concentratie verdeling in kaart te kunnen brengen. Bovendien is een andere interpolatietechniek gebruikt. Zie bijlage A voor beide initiële chloride concentratie verdelingen. Vervolgens zijn tijdens deze verkennende studie de effecten van alle klimaatscenario's berekend.

Het model is doorgerekend tot en met het jaar 2075. In deze studie is de vaste bovenrandvoorwaarde in het grondwater systeem vervangen door een dynamische randvoorwaarde zodat de effecten van de klimaatscenario's nauwkeuriger kunnen worden gemodelleerd.

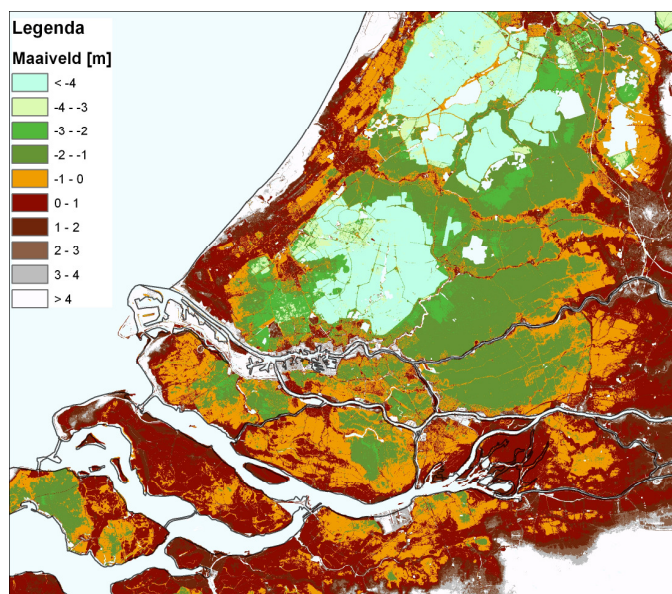


Figuur 5: Locaties van VES-metingen, chloride concentratie analyses en boorgatmetingen in het studiegebied, die allemaal minder dan 5m zijn verwijderd van de onderkant van de deklaag (TNO, DINO; Oude Essink et al., 2005).

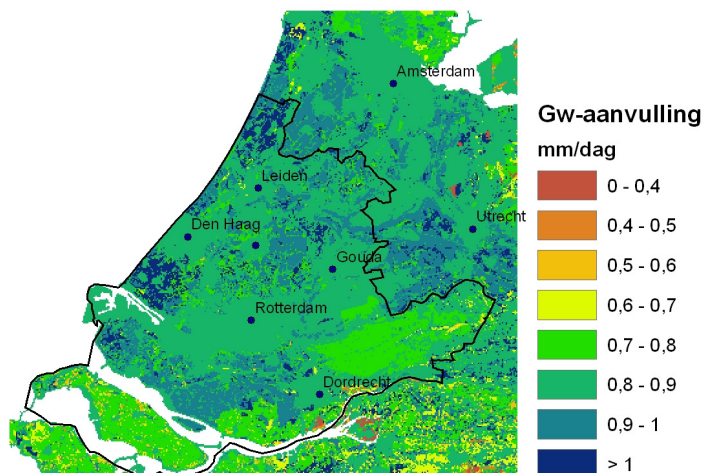
Zo is de bodemdaling (figuur 6) gedurende een periode van 100 in stapjes van 1 jaar aangebracht, conform de voorspellingen van het hoge scenario van WB21 (Haasnoot, 1999). Figuur 7 toont het maaiveld in het gehele studiegebied, en figuur 8 de grondwateraanvulling voor de referentiecasse; in bijlage D zijn de waarden voor de verschillende klimaatscenario's voor neerslag- en verdampingspatronen, en zeespiegelstijging terug te vinden.



Figuur 6: Bodemdalingsprognose (conform WB21 Hoog): 2050 t.o.v. 2000, in m (bron: RIZA).



Figuur 7: Maaiveld in het gehele studiegebied van de provincie Zuid-Holland.



Figuur 8: Grondwateraanvulling (mm/dag) voor de referentiecasse.

3.2 Implementatie klimaatscenario's

In 2006 heeft het KNMI nieuwe klimaatscenario's opgesteld voor 2050 en 2100 (KNMI 2006). In deze scenario's wordt op basis van aannames over wereldwijde temperatuurstijging en luchtstromingspatronen een overzicht van verwachte veranderingen in weer gegeven. Deze veranderingen hebben betrekking op temperatuur, neerslag en wind gedifferentieerd naar winter en zomer, evenals verwachte zeespiegelstijging. De KNMI'06 scenario's zijn een vervolg op de WB21-scenario's. In deze scenario's vormde 1 graad temperatuurstijging tot 2050 (en 2 graden stijging in 2100) nog het middenscenario. In de KNMI'06-scenario's is 1 graad temperatuurstijging tot 2050 en 2 graden tot 2100 min of meer het lage scenario. In Bijlage C staan de KNMI'06 klimaatscenario's vermeld voor de jaren rond 2050 en 2100. Wereldwijde projecties kunnen op regionale schaal zeer verschillende uitkomsten geven. Onder andere om deze reden bestaat er in hoge mate onzekerheid omtrent de snelheid waarmee het klimaat in ons land verandert. Zo lijkt twee graden wereldwijde temperatuurstijging tot 2100 in de KNMI'06 scenario's een gematigd uitgangspunt te zijn geworden vergeleken met de scenario's in WB21. Om een idee te krijgen van de gevolgen van een sneller dan verwachte toename van temperatuur tot 2100, is door TNO aan het KNMI gevraagd een tweetal scenario's toe te voegen: C en C+. Deze scenario's zijn vastgesteld op basis van eenvoudige lineaire extrapolatie van de bestaande KNMI-scenario's. In tabel 1 staat een overzicht van alle zes scenario's.

Tabel 1: Zes scenario's voor klimaatverandering tot 2100 (Bron: TNO op basis van KNMI, www.knmi.nl/klimaatscenario's).

2100		G	G+	W	W+	C	C+
Wereldwijde temperatuurstijging in 2050		+1°C	+1°C	+2°C	+2°C	+3°C	+3°C
Wereldwijde temperatuurstijging in 2100		+2°C	+2°C	+4°C	+4°C	+6°C	+6°C
Verandering luchtstromingspatronen West Europa		nee	ja	nee	ja	nee	ja
Winter	gemiddelde temperatuur	+1,8°C	+2,3°C	+3,6°C	+4,6°C	+5,4°C	+6,9°C
	koudste winterdag per jaar	+2,1°C	+2,9°C	+4,2°C	+5,8°C	+6,3°C	+7,8°C
	gemiddelde neerslaghoeveelheid	7%	14%	14%	28%	21%	42%
	aantal natte dagen ($\geq 0,1$ mm)	0%	2%	0%	4%	0%	6%
	10-daagse neerslagsom die eens in de 10 jaar wordt overschreden	8%	12%	16%	24%	24%	36%
	hoogste daggemiddelde windsnelheid per jaar	-1%	4%	-2%	8%	-3%	12%
Zomer	gemiddelde temperatuur	+1,7°C	+2,8°C	+3,4°C	+5,6°C	+5,1°C	+8,4°C
	warmste zomerdag per jaar	+2,1°C	+3,8°C	+4,2°C	+7,6°C	+6,3°C	+11,4°C
	gemiddelde neerslaghoeveelheid	6%	-19%	12%	-38%	18%	-57%
	aantal natte dagen ($\geq 0,1$ mm)	-3%	-19%	-6%	-38%	-9%	-57%
	dagsom van de neerslag die eens in de 10 jaar wordt overschreden	27%	10%	54%	20%	81%	30%
	potentiële verdamping	7%	15%	14%	30%	21%	45%
Zeespiegel	absolute stijging (cm)	35-60	35-60	40-85	40-85	45-110	45-110

Met het numerieke modelinstrumentarium wordt de snelheid van verplaatsing van zoet-brak-zout grondwater bepaald, bij de zes verschillende klimaatscenario's. Daarnaast is een extra scenario doorgerekend (uit de studie *Koploperproject Deltares Grenzen aan de Klimaatbestendigheid van het Hoofdwatersysteem*, zie hoofdstuk 2): hierbij zijn de KNMI'06 W+ gegevens gebruikt, maar mét een zeespiegelstijging van +200cm (in plaats van +85cm).

Stoftransport in de ondergrond is een traag proces. Veranderingen van ingrepen in het watersysteem zijn daarom niet snel zichtbaar. De veranderingen in neerslag- en verdampingspatronen, die ingrijpen in het bovenste deel van het grondwatersysteem, zijn voor de modelberekeningen over het jaar gemiddeld. Voor deze verkennende studie worden slechts de resultaten van de KNMI'06 klimaatscenario's G, G+, W en W+ weergegeven.

4 Uitwerken TNO 2004 studie voor Bollenstreek

In dit hoofdstuk wordt op hoofdlijnen bepaald in hoeverre de chloride concentratie in het grondwater zal veranderen in de Bollenstreek als gevolg van de verschillende KNMI'06 klimaatscenario's. Brakke of zoute kwel vanuit de ondergrond verhoogt namelijk de zoutbelasting naar het oppervlaktewater in de Bollenstreek. Daarnaast wordt in beeld gebracht welke bolgewassen in de huidige situatie geteeld worden in de 2500 ha bestemd voor bollenteelt en in welke mate deze gewassen gevoelig zijn voor opkwellend brak/zout grondwater en daaraan gelieerd brak/zout oppervlaktewater.

4.1 Zoet-brak-zout verdeling voor de verschillende klimaatscenario's

In de literatuur wordt onderscheid gemaakt tussen twee soorten zoutschade. De eerste is de zoutschade ontstaan door chloride concentraties bij de wortelzone van planten en de tweede is schade ontstaan door zout in het beregeningswater. Naar beide soorten schade is onderzoek gedaan gedurende dit verkennende project. De hoogte van de zoutschade is afhankelijk van het soort gewas en de hoeveelheid chloride in het grondwater. Dit laatste aspect wordt in deze paragraaf verder besproken, in paragraaf 4.2 wordt dieper ingegaan op het begrip zoutschade.

De aanname is gemaakt dat de wortelzone van gewassen in de Bollenstreek in de numerieke modellaag 2 ligt, op 7.5 m-NAP. Dit impliceert dat de hieronder gedane schattingen slechts indicatief kunnen zijn. Opgemerkt moet worden, dat als er in het modelinstrumentarium gebruik wordt gemaakt van meer details van het topsysteem (waaronder een fijner gediscetiseerde Holocene deklaag), deze voorspelling nauwkeuriger in beeld kan worden gebracht (zie ook hoofdstuk 7: Doorkijk naar mogelijk vervolgonderzoek).

Voor beregeningswater, dat wordt gebruikt bij het besproeien van de gewassen met in dit geval grondwater, wordt gekeken naar de diepte van de onttrekkingen in de bollenstreek. In tabel 2 kan de geohydrologische indeling van de watervoerende pakketten gevonden worden zoals gehanteerd door de Provincie Zuid-Holland. In tabel 3 is te zien dat de meeste onttrekkingen plaatsvinden in watervoerend pakket nummer 2, dus tussen de deklaag en de deformatie van Kedichem. In de Bollenstreek is de gemiddelde diepte van dit watervoerend pakket 27.5 m-NAP (bron: REGIS). Indien voor besproeiing van het land gebruik wordt gemaakt van grondwater uit de onttrekkingen is het van belang om de chloride concentraties op deze gemiddelde plaats van de onttrekkingen te bepalen.

Tabel 2: Geohydrologische indeling, zoals gehanteerd door de provincie Zuid-Holland.

Code	Beschrijving
	watervoerend pakket
1	Watervoerende onder Duinkerken klei en Hollandveen en boven Calais klei en Basisveen
2	Watervoerende lagen tussen de deklaag en de Formatie van Kedichem
3	Watervoerende lagen tussen de Formatie van Kedichem en de Formatie van Tegelen
4	Watervoerende lagen tussen de Formatie van Tegelen en de Formatie van Maassluis
5	Watervoerende lagen tussen de Formatie van Maassluis en de Formatie van Oosterhout
6	Toplaag bestaande uit Duinkerken klei en Hollandveen
7	Toplaag bestaande uit Holocene klei en Hollandveen

Tabel 3: Aantal onttrekkingen per watervoerend pakket voor de deelgebieden Bollenstreek en Zuid-Hollandse Eilanden.

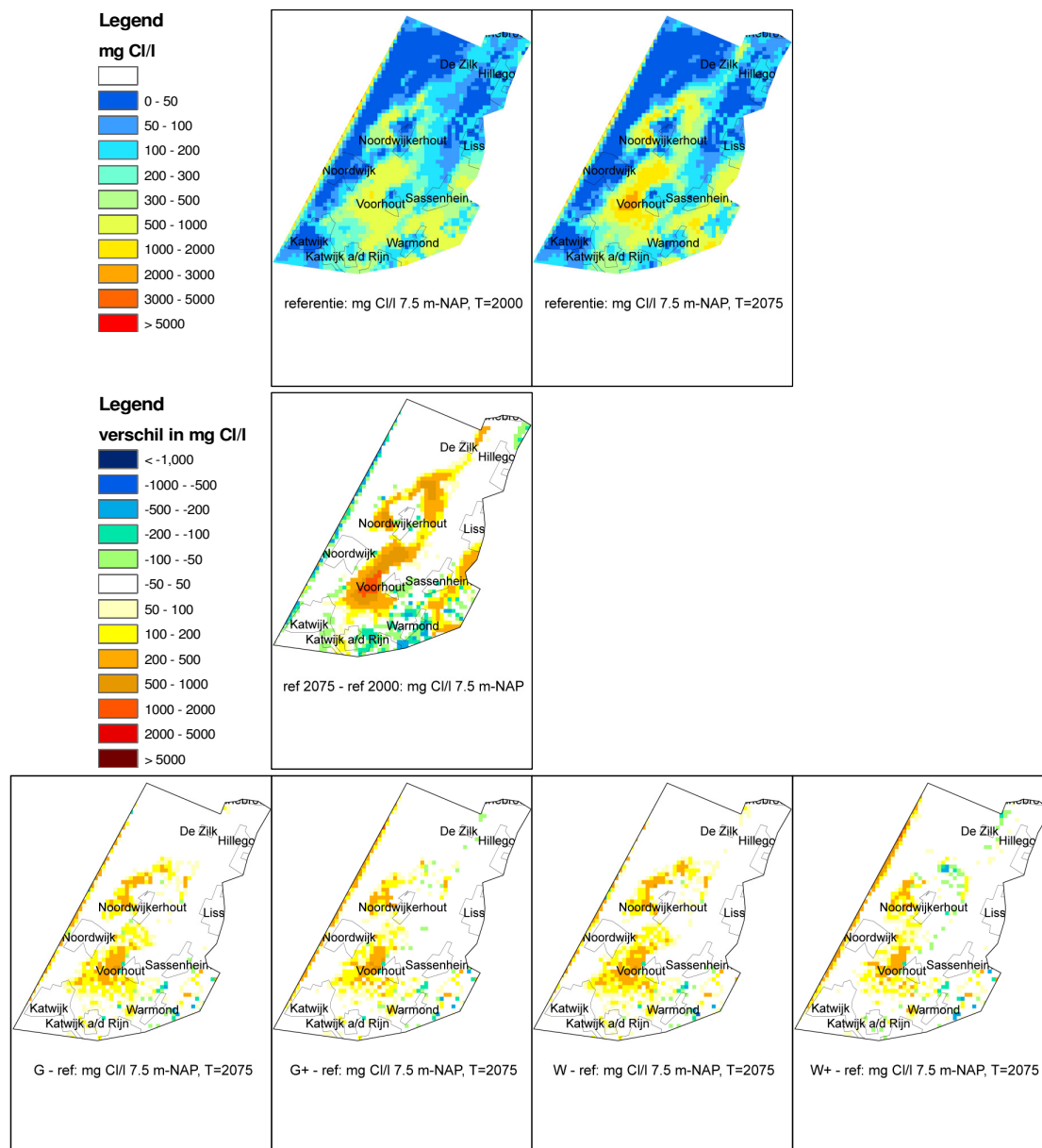
Code pakket	1	2	3	4	5	6	7
Bollenstreek	126	1708	7	0	0	4	66
Zuid-Hollandse Eilanden	531	992	0	16	5	6	118

Met behulp van de modellen van de verschillende KNMI klimaatscenario's G, G+, W en W+ kan een trend worden aangegeven van verzilting of verzoeting van de ondergrond. In dit onderzoek is gekeken naar verschillen tussen het referentiescenario waarbij geen klimaateffecten zijn meegenomen en de klimaatscenario's G, G+, W en W+ (zie bijlage C), waarbij trouwens ook bodemdaling is meegenomen. Figuur 9 toont de chloride concentraties aan de onderkant van de wortelzone van gewassen (7.5 m-NAP) en de effecten van de klimaatscenario's op deze concentraties. In figuur 10 zijn deze verschillen in chloride concentratie voor de gemiddelde onttrekkingsdiepte (27.5 m-NAP) in het eerste watervoerend pakket weergegeven.

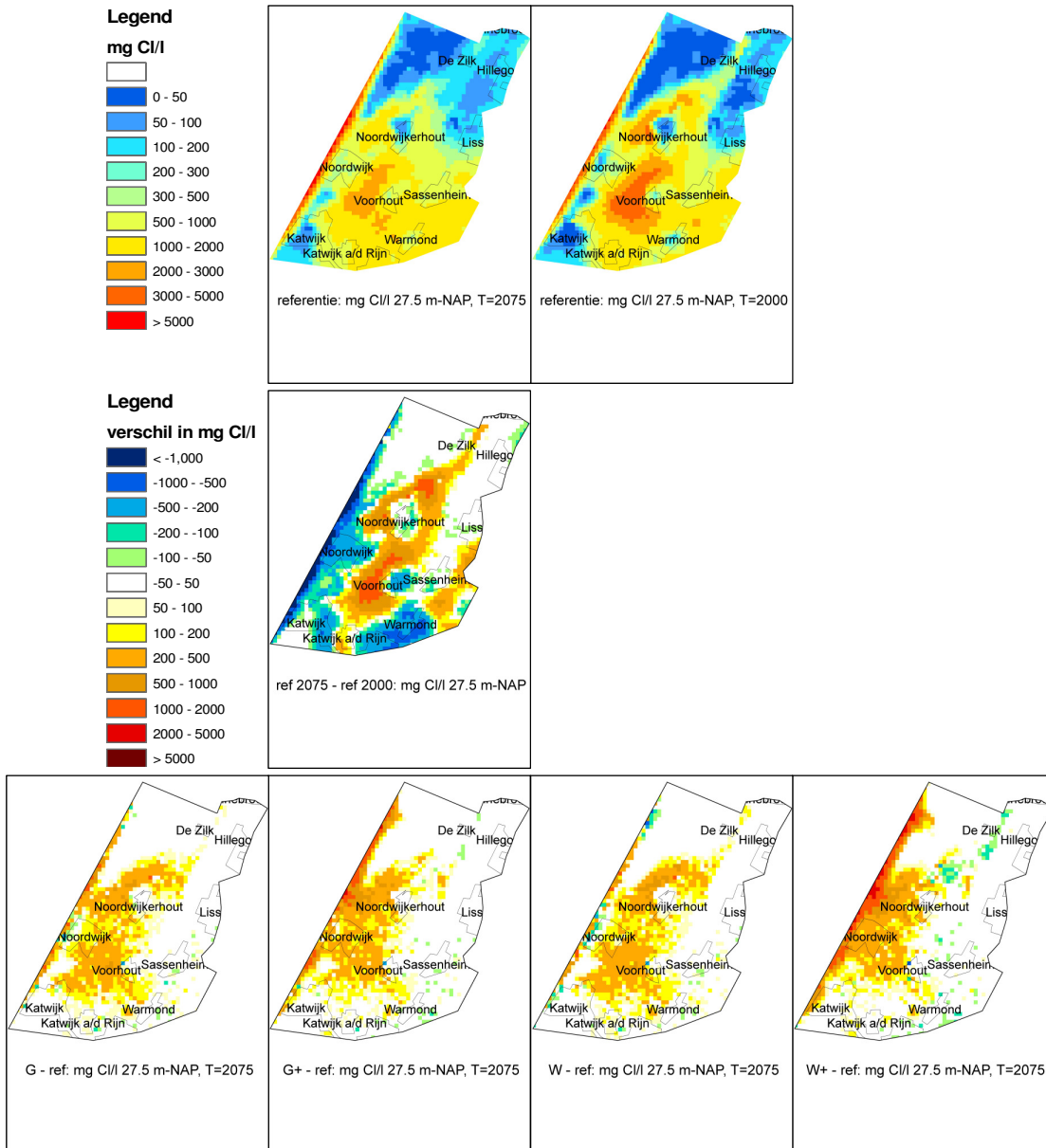
Figuur 9c en 10c laten de autonome trend van verzilting en verzoeting zien. Indien niets verandert aan het klimaat zal voor deze referentiecasse de chlorideconcentratie langs de kust en in de buurt van Katwijk, Katwijk a/d Rijn en Warmond afnemen. Meer landinwaarts, van Voorhout tot De Zilk zal verzilting optreden. Deze toename is maximaal 2000 mg Cl/l. Het doorlaatvermogen van het watervoerend pakket in dit gebied is trouwens significant doordat tot zo'n duizend jaar geleden hier de monding van de Oude Rijn te Katwijk liep.

In de figuren 9d t/m g en 10d t/m g is gekeken naar het effect van de klimaatveranderingen op de verzilting of verzoeting van het grondwater. Hierbij is het verschil tussen de referentiecasse in 2075 en het klimaatscenario in beeld gebracht. Een duidelijke trend is verzilting van het grondwater op zowel 7.5 m-NAP als op 27.5 m-NAP voor alle klimaatscenario's ten opzichte van de referentiecasse in 2075. Deze verzilting kan ontstaan door voornamelijk een verhoging van de zeespiegel en eventueel door het veranderende neerslagpatroon van de klimaatscenario's.

Naast de kuststrook zijn twee duidelijke risicogebieden te onderscheiden. De eerste ligt ten westen van Voorhout en de tweede ten westen en noorden van Noordwijkerhout. De verzilting door het autonome proces (figuren 9c en 10c) is hier al 200-2000 mg Cl/l. Daar moet de verzilting ontstaan door de klimaatscenario's (500 mg Cl/l) dan nog bij opgeteld worden.



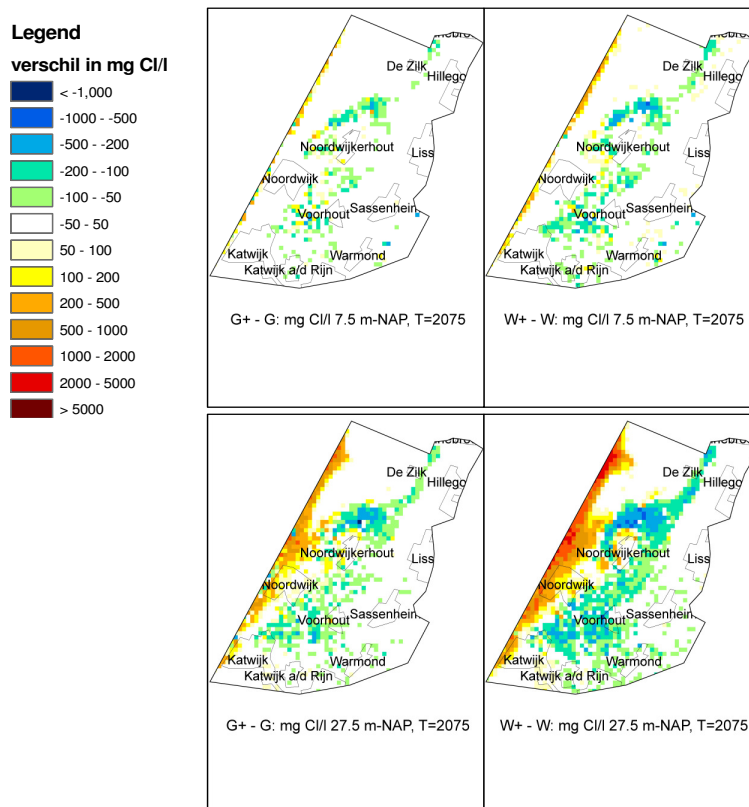
Figuur 9: a. en b. Chloride concentratie in de Bollenstreek, referentiecasi voor het jaar 2000 en 2075; en c.-g. De verschillen tussen de klimaatscenario's G, G+, W en W+ en de referentiecasi op 7.5 m-NAP; rood, oranje en geel betekent verzilting.



Figuur 10: a. en b. Chloride concentratie in de Bollenstreek, referentiecasi voor het jaar 2000 en 2075; en c.-g. De verschillen tussen de klimaatscenario's G, G+, W en W+ en de referentiecasi op 27.5 m-NAP; rood, oranje en geel betekent verzilting.

In figuur 11 wordt nog eens beter gekeken naar de verschillen tussen de klimaatscenario's. Voor het modelleren van de neerslagpatronen van de klimaatscenario's is gebruik gemaakt van een gemiddelde gesommeerde grondwateraanvulling (van zomer en winter waarden) in één jaar tijd. De over een geheel jaar gesommeerde grondwateraanvulling is bij de scenario's G en W groter dan bij respectievelijk G+ en W+. Deze gesommeerde grondwateraanvulling ligt voor het referentiescenario tussen de +-scenario's en de standaard scenario's in. De

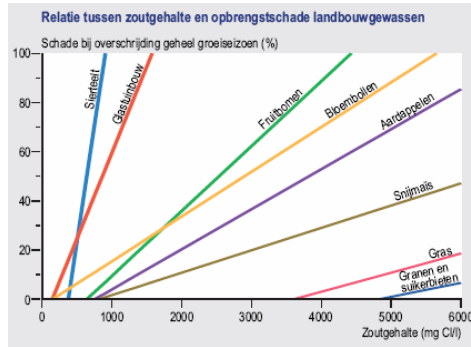
zeespiegelstijging is bij G en G+ en bij W en W+ hetzelfde waardoor het effect van de veranderende grondwateraanvulling goed bekeken kan worden. In figuur 11 is duidelijk te zien dat een grotere grondwateraanvulling leidt tot verzoeting bij de duinen en verzilting landinwaarts. De verzoeting bij de duinen ontstaat door de extra toevoer van zoet water. Door deze verhoogde grondwateraanvulling en de stroming van het grondwater landinwaarts stroomt meer zout water landinwaarts. Daardoor ontstaat landinwaarts verzilting bij een toename van de grondwateraanvulling. De resultaten van de klimaatscenario's liggen dicht bij elkaar in de buurt. De vraag komt op of bij de bepaling van de effecten op de verzilting van het grondwatersysteem wel zoveel scenario's nodig zijn om de verzilting in de toekomst in kaart te brengen.



Figuur 11: Verandering in chloride concentratie in de Bollenstreek tussen de + klimaatscenario's met een dynamischer neerslagpatroon en de standaard klimaatscenario's in het jaar 2075. Positieve getallen (rood, oranje en geel) betekenen verzilting +-scenario's t.o.v. standaard scenario's G en W.

4.2 Zoutschade aan bollenteelt

Literatuuronderzoek naar zoutschade van gewassen toont aan dat er nog geen enigheid bestaat over de zouttolerantie, maar dat in grote lijnen duidelijk is dat sommige gewassen zoals gras, suikerbieten en granen pas bij hoge zoutconcentraties schade vertonen.



Zouttolerantie gewassen verschilt sterk

In onderstaande tabel staan de schadepercentages voor beregemen met brakwater.

gewassen	Chloridegehalten (mg/l)								Schade
	300	600	900	1200	1500	1800	2100	2400	
Gras									0%
Suikerbieten									1 - 9%
Koolzaad									10 - 19%
Granen									20 - 29%
Andijvie									30 - 39%
Asperge									40 - 49%
Broccoli									50 - 100%
Snijmais									
Bloemkool									
Kool									
Witlof									
Aardappel									
Tuinbonen									
Vlas									
Erwtten									
Fruitbomen									
Uien									
Peen									
Lelie									
Tulp									
Gladiol									
Sierteelt									

Figuur 12: a. Zoutschadefuncties voor landbouwgewassen (MNP, 2005); Zouttolerantie gewassen verschilt sterk (personal communication Lodewijk Stuyt, 2007).

In Roest *et al.* (2003) zijn verschillende zoutschade bronnen vergeleken en is een keuze gemaakt voor de meest waarschijnlijk juiste waarde voor Nederlandse omstandigheden. In tabel 4 staan deze grenswaarden van de zouttolerantie voor verschillende gewassen. Boven deze grenswaarde zal schade ontstaan aan de gewassoort. Het percentage van het gewas dat beschadigd is kan worden berekend met behulp van de helling; de snelheid waarmee de verhoogde chloride concentratie invloed heeft op het beschadigen van een gewassoort.

Tabel 4: Gemiddelde grenswaarde en hellingshoek voor zoutschade per gewasgroep (Roest et al., 2003).

Gewas	Bodemvocht		Gietwater	
	grenswaarde mg/l Cl	hellingshoek %/mg/l Cl	grenswaarde mg/l Cl	hellingshoek %/mg/l Cl
Aardappelen	756	0.0163	202	0.0610
Gras	3606	0.0078	962	0.0294
Suikerbieten	4831	0.0057	1288	0.0212
Snijmais	815	0.0091	217	0.0343
Granen	4831	0.0058	1288	0.0218
Fruitbomen	642	0.0264	171	0.0991
Sierteelt	378	0.1890	101	0.7086
Groenten	917	0.0158	245	0.0591
Glastuinbouw	1337	0.0141	356	0.0527
Bloembollen	153	0.0182	41	0.0683

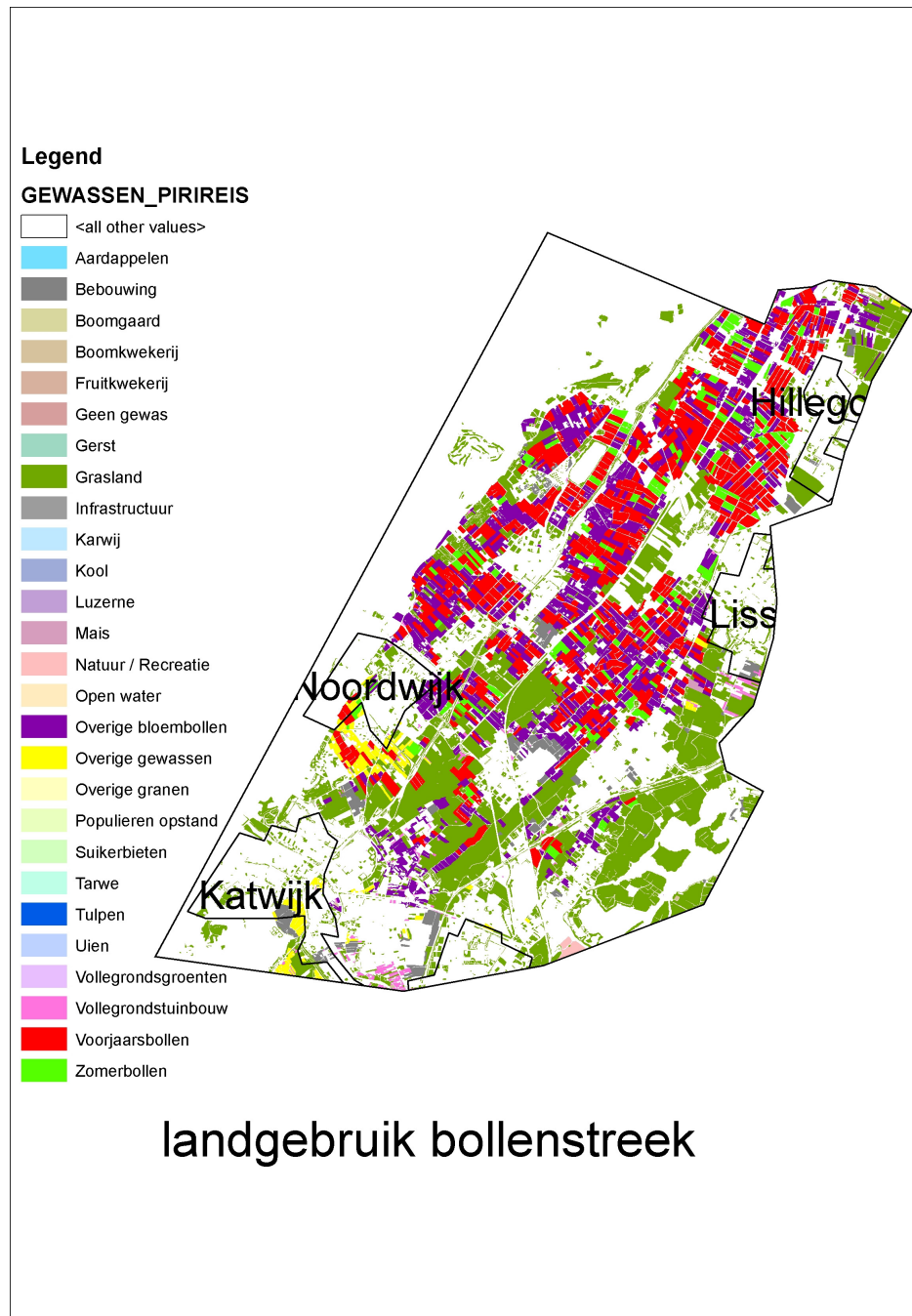
Daarnaast heeft Ploegman (1972-1981) onderzoek gedaan naar de gemiddelde grenswaarde en hellingshoek voor zoutschade voor de bloemsoorten gladiool, tulp, lelie en roos (tabel 5). De grenswaarden van al deze gewassoorten ligt tussen de 50 en 80 mg/l Cl. Deze grenswaarden liggen zodanig dicht bij elkaar dat, wat betreft de modelresultaten van de chloride concentratie, voor de bollenteelt één klasse is genomen.

Tabel 5: Gemiddelde grenswaarde en hellingshoek voor zoutschade per bloemsoort, Ploegman (1972-1981).

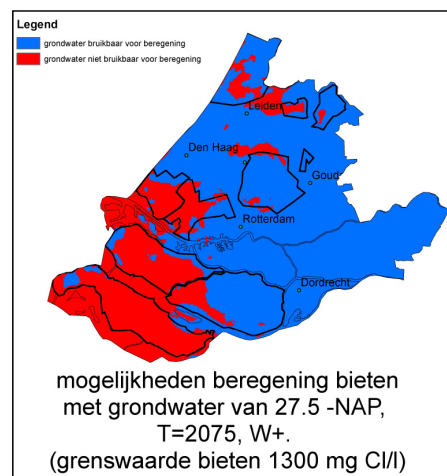
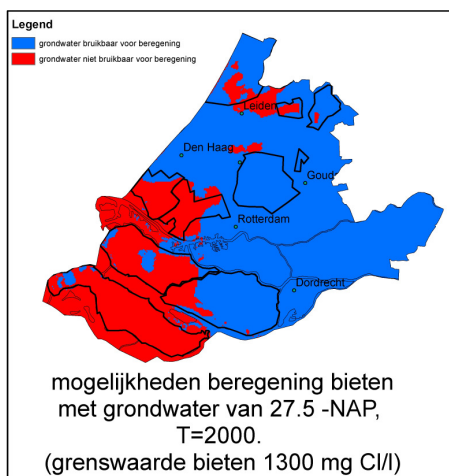
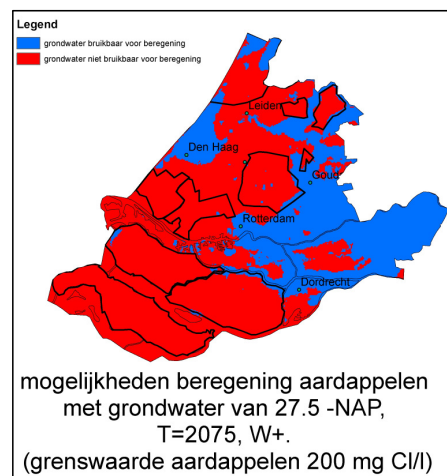
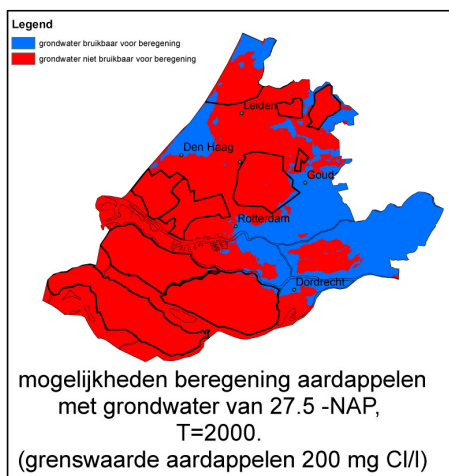
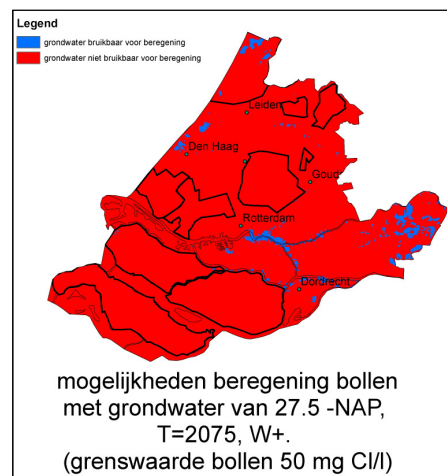
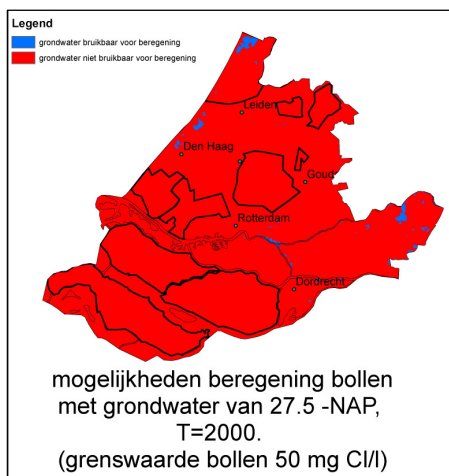
	grenswaarde	hellingshoek
Gewas	mg/l Cl	%/mg/l Cl
Gladiool	50	0.0800
Tulp	65	0.0500
Lelie	80	0.0260
Roos	50	0.0260

In figuur 13 is in beeld gebracht welke bolgewassen in de huidige situatie geteeld worden in de 2500 ha bestemd voor bollenteelt. In tabel 5 is te zien dat de grenswaarden van de bolsoorten gladiool, tulp en lelie dicht bij elkaar liggen. Om te onderzoeken in welke mate deze gewassen gevoelig zijn voor opkwellend brak/zout grondwater wordt daarom niet naar de afzonderlijke bolsoorten gekeken.

De zoutschade die ontstaat door hoge chloride concentraties in de wortelzone van de gewassen of door hoge chloride concentraties in het beregeningswater uit het eerste watervoerend pakket zouden in principe uitgerekend kunnen worden met het modelinstrumentarium, rekening houdend met de grenswaarden en hellingshoeken uit tabel 4. Enige terughoudendheid is echter geboden. Het instrumentarium is namelijk te grof, zijnde 250*250m², om het zoutgehalte in de onverzadigde zone of de toestroming van zoute kwel naar de waterlopen nauwkeurig te kunnen berekenen. Het in hoofdstuk 2 genoemde onderzoek in de Provincie Zeeland toont aan dat met name de zogenaamde regenwaterlenzen en de zoute kwel naar de sloten een veel fijnere detaillering noodzakelijk maken. Desalniettemin is een eerste globale inschatting mogelijk. In figuur 14 en 15 is weergegeven waar berekening met water uit het eerste watervoerend pakket van 27.5 m-NAP mogelijk is in de provincie Zuid-Holland voor de gewassen bloembollen, aardappelen en bieten.



Figuur 13: Typen landgebruik in de Bollenstreek. Bron: PIRIREIS.



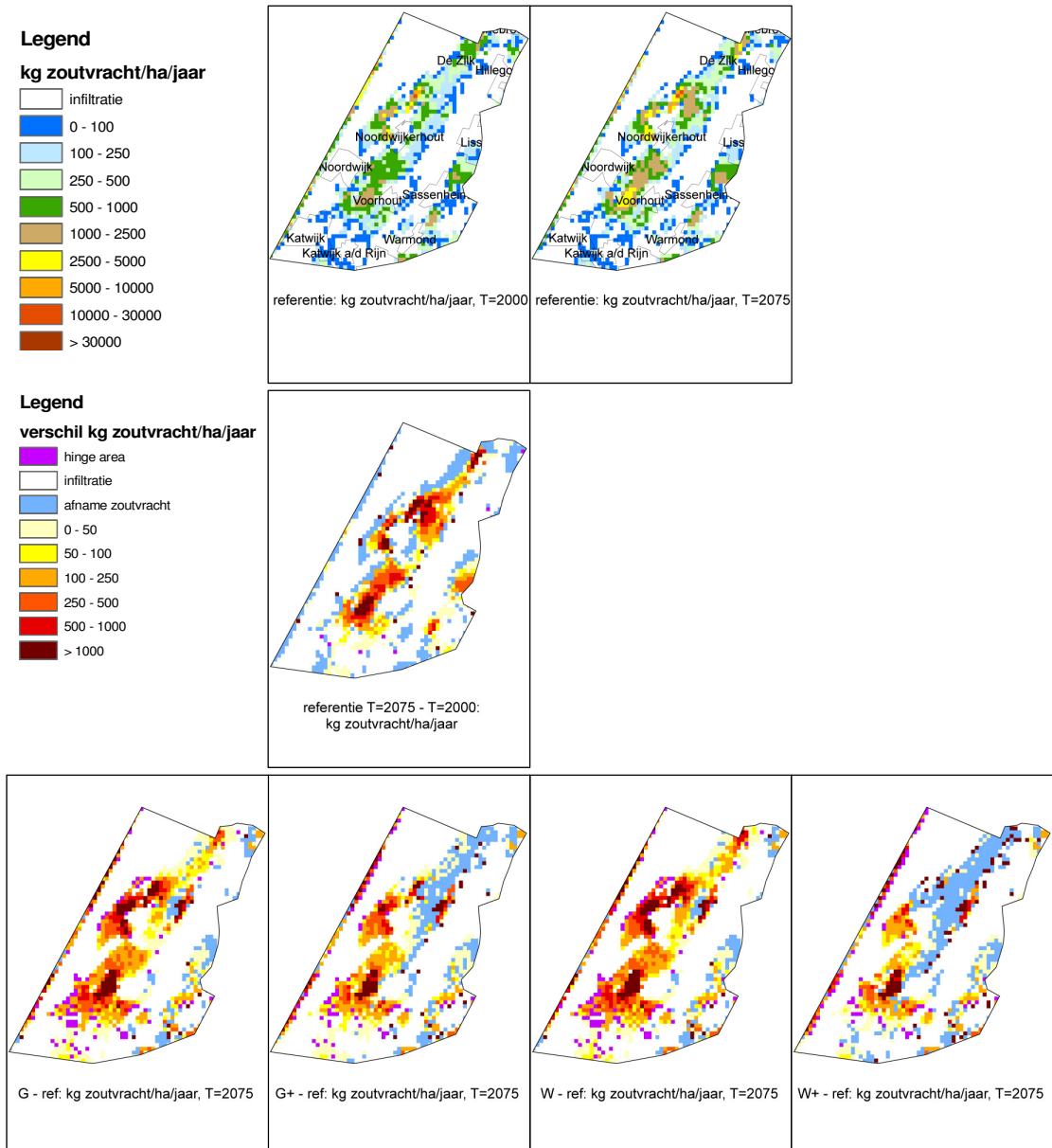
Figuur 14: op de met blauw aangegeven locaties kan grondwater van 27.5 m-NAP gebruikt worden voor beregening van (a) bloembollen, (b) aardappelen en (c) bieten in het jaar 2000.

Figuur 15: op de met blauw aangegeven locaties kan grondwater van 27.5 m-NAP gebruikt worden voor beregening van (a) bloembollen, (b) aardappelen en (c) bieten in het jaar 2075, klimaatscenario W+.

4.3 Zoutbelasting vanuit het grondwater naar het oppervlaktewater

De zoutbelasting vanuit het grondwater naar het oppervlaktewater wordt weergegeven in kg/ha/jaar. Hiervoor kan duidelijk een trend worden weergegeven van de effecten van de klimaatscenario's ten opzichte van het referentiescenario. In figuur 16a en b is de zoutvrucht weergegeven voor het referentiescenario in de jaren 2000 en 2075. In deze figuren is in het gebied landinwaarts tussen Katwijk a/d Rijn en De Zilk een maximale zoutvrucht van 2500 kg/ha/jaar te zien in het jaar 2000 (figuur 16a) en een maximale zoutvrucht van 5000 kg/ha/jaar in het jaar 2075 (figuur 16b). In figuur 16c zijn de twee eerder genoemde risicogebieden wederom te herkennen (het gebied ten westen en noorden van Noordwijkerhout en het gebied ten westen van Voorhout), deze keer aan de toename van de zoutvrucht door het autonome proces. In het kustgebied treedt alleen infiltratie op en wordt ook in de toekomst geen zoutvrucht naar het oppervlaktewater verwacht.

In figuur 16d t/m g is het verschil in zoutvrucht weergegeven tussen het referentiescenario in 2075 en de verschillende klimaatscenario's. Het duingebied blijft een infiltratiegebied voor alle klimaatscenario's. Een hinge area is gedefinieerd als een gebied dat infiltratiegebied was maar omslaat naar een gebied met een zoutvrucht van het grondwater naar het oppervlaktewater. Voor slechts beperkte delen ten zuiden van Voorhout is dit van toepassing. In figuur 16c was te zien dat de zoutvrucht voor de autonome case maximaal 1000 kg/ha/jaar toeneemt. In figuur 16d t/m g is te zien dat deze zoutvrucht voor de nattere (G en W) scenario's nog eens met 1000 kg/ha/jaar toe kan nemen. De drogere +-scenario's tonen een afname van de zoutvrucht ten noorden en oosten van Noordwijkerhout.



Figuur 16: Zoutvracht in de Bollenstreek, referentiecasi voor de jaren 2000 en 2075 en de verschillen tussen de klimaatscenario's G, G+, W en W+ en de referentiecasi in 2075.

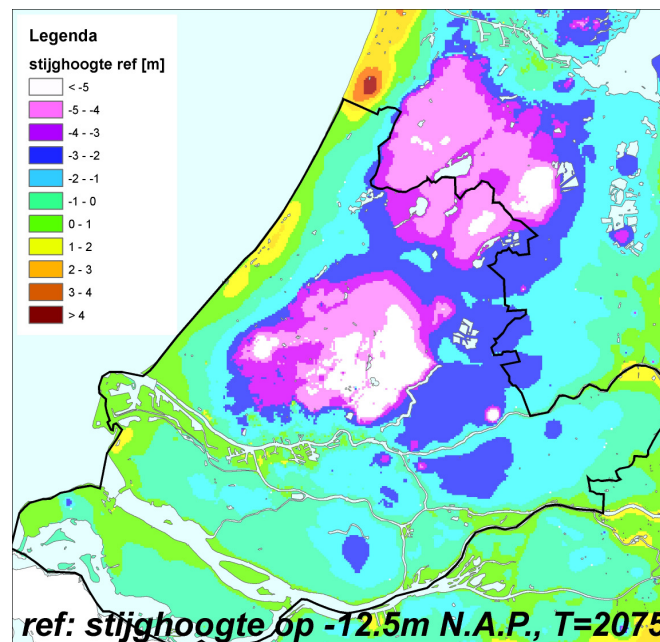
5 Uitwerking TNO 2004 studie voor Zuid-Hollandse Eilanden

In dit hoofdstuk wordt in beeld gebracht welke gebieden gevoelig zijn voor verzilting als gevolg van verschillende KNMI'06 scenario's voor zeespiegelstijging. Rekening wordt gehouden met de verwachte toename in stijghoogte in het watervoerend pakket en de kwel en chloride concentratie vanuit het grondwater naar het oppervlaktewatersysteem.

5.1 Invloedsfeer van een zeespiegelstijging op het grondwatersysteem

Figuur 17 toont de zoetwaterstijghoogte² op 12.5m-NAP in de Provincie Zuid-Holland. De twee systemen met lage zoetwaterstijghoogten zijn duidelijk zichtbaar: de Haarlemmermeerpolder inclusief de Polder Groot-Mijdrecht in het noorden, en het Veenweidegebied, de DSM onttrekking onder Delft en de Alexanderpolder in het zuiden.

De invloedssfeer van de zeespiegelstijging en de bodemdaling is te zien in figuur 18, bij vier scenario's van zeespiegelstijging: +60cm (G+ minus referentiecasi) en +85cm (W+ minus referentiecasi), +100cm (C+ minus referentiecasi), en +200cm (W+ & 2m zss minus referentiecasi). Het betreft de regionale verandering in stijghoogte in het eerste watervoerend pakket op 12.5 m-NAP.



Figuur 17: Zoetwaterstijghoogte op 12.5m-NAP in geval van de referentiecasi voor het jaar 2075.

Direct langs de Noordzeekustlijn in het zuiden, in de Zuid-Hollandse Eilanden en in het Rotterdamse Havengebied is in alle gevallen een significante verhoging van de stijghoogte te verwachten. Het effect van een zeespiegelstijging dempt echter altijd

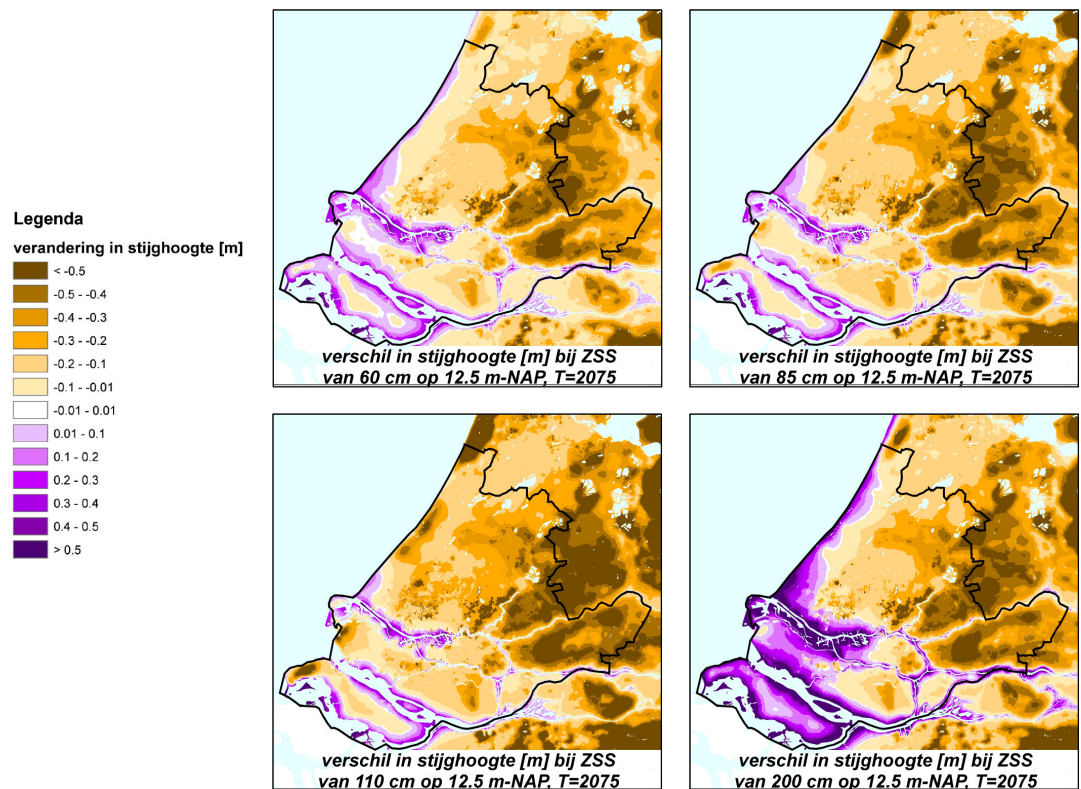
² Voor korte uitleg over zoetwaterstijghoogte: zie Bijlage B.

richting het binnenland relatief snel uit; binnen 6 km vanaf de Noordzee is over het algemeen de invloed te verwaarlozen (zie ook Oude Essink, 1996 en Kwadijk et al., 2007). De dunne deklaag en de daarbij horende lage hydraulische weerstand nabij de Noordzeekustlijn en de Zeeuwse estuaria veroorzaken deze snelle demping (figuur 19). Daarnaast zorgen zandbanen in het gebied ervoor dat lokaal de hydraulische weerstand significant kleiner is.

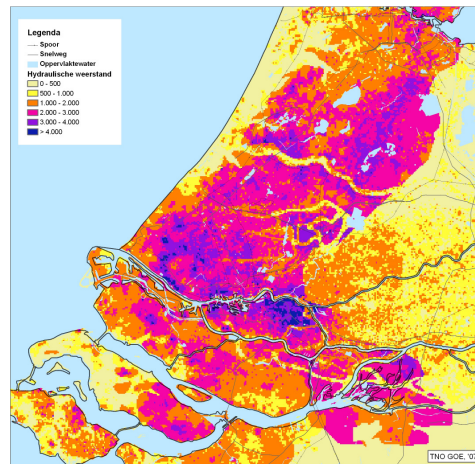
Langs de Noordzeekustlijn boven Den Haag is de stijghoogteverandering ook onderhevig aan de grondwateraanvulling die flink verschilt bij de verschillende klimaatscenario's: hoe extremer het klimaatscenario (van G+→W+→C+), hoe groter het neerslagtekort en hoe groter de afname in stijghoogte t.o.v. de referentie case.

In voornamelijk het oostelijke deel van de provincie veroorzaakt de bodemdaling een regionale verlaging van de stijghoogte. Verder is in de figuren te zien dat de verschillende klimaatscenario's effect hebben op de natuurlijke grondwateraanvulling (neerslag-verdamping) en de daarbij horende grondwaterstand en stijghoogte. Daarnaast is aangenomen dat landbouwkundige wensen en daarmee waterhuishoudkundige instellingen, zoals ontwateringdiepte en drooglegging, onveranderd blijven. Dit betekent dat polderpeilen lokaal evenredig dalen met de bodem. De daling van polderpeilen beïnvloedt tevens de stijghoogte. Deze gaat, enigszins gedempt door de weerstand van de Holocene deklaag, mee met het polderpeil (figuur 19).

Toegespitst op Zuid-Hollandse Eilanden blijkt dat de invloed van een zeespiegelstijging significant is. Zo neemt de stijghoogte aan de randen van Goeree-Overflakkee flink toe: in het grootste deel van het eiland is immers het open water altijd dichtbij.



Figuur 18: De invloedssfeer van een zeespiegelstijging en bodemdaling in de provincie Zuid-Holland bij verschillende klimaatscenario's (referentiecase t.o.v. G+, W+, C+ en W+&2mZSS): verschil stijghoogte (m) op een diepte van 12.5 m-NAP.



Figuur 19: De hydraulische weerstand c van de Holocene deklaag.

5.2 Opbarstingsrisico van slechtdoorlatende weerstandslagen

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 ter plaatse van de scheur of zogenaamde wel, met verslechtering van de oppervlaktewaterkwaliteit.

De opbarstingsindex is gedefinieerd als de verhouding tussen de lithostatische druk die door de weerstandslaag (bestaande uit veen, zand, klei met verschillende dichtheden) wordt uitgeoefend op het watervoerende pakket ($P_{\text{lithostatisch}}$) 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 de praktijk blijkt dat opbarsting kan plaatsvinden indien de verhouding $P_{\text{lithostatisch}} / P_{\text{waterspanning}}$ kleiner is dan 1.1 (NEN 6740, 1991).

Het risico van opbarsten van de Holocene deklaag zal toenemen door een significante verhoging van de stijghoogte, vooral in gebieden waar de deklaag dun is en waar zandbanen veelvuldig voorkomen (figuur 19 en 25). Dit risico neemt toe bij een zeespiegelstijging. Uit figuur 18 valt op te maken dat het de eerste kilometers betreft vanaf het open water. Daarnaast zou het aantal wellen, dat waarschijnlijk een grote bijdrage levert aan de waterkwaliteit van het oppervlaktewatersysteem, significant kunnen toenemen (Louw, *et al.*, 2007).

Funderingsrisico's in bestaand stedelijk kustgebied kunnen worden verwacht doordat drukverandering zou kunnen leiden tot zettingverschillen in de zandlaag waarop gefundeerd is. De stabiliteit van waterkeringen, met name op risicolocaties als de dijkvoet langs rivieren en polders, kan mogelijk in gevaar komen met consequenties voor de veiligheid van het achterliggende gebied, zeker in die gebieden waar een significante bodemdaling leidt tot grote stijghoogte gradiënten en wegzakkende dijkfundamenten. Daarnaast krijgt ondergrondse infrastructuur (tunnels, garages, kelders) een hogere druk te verwerken met lekkages en opdrijven tot gevolg.

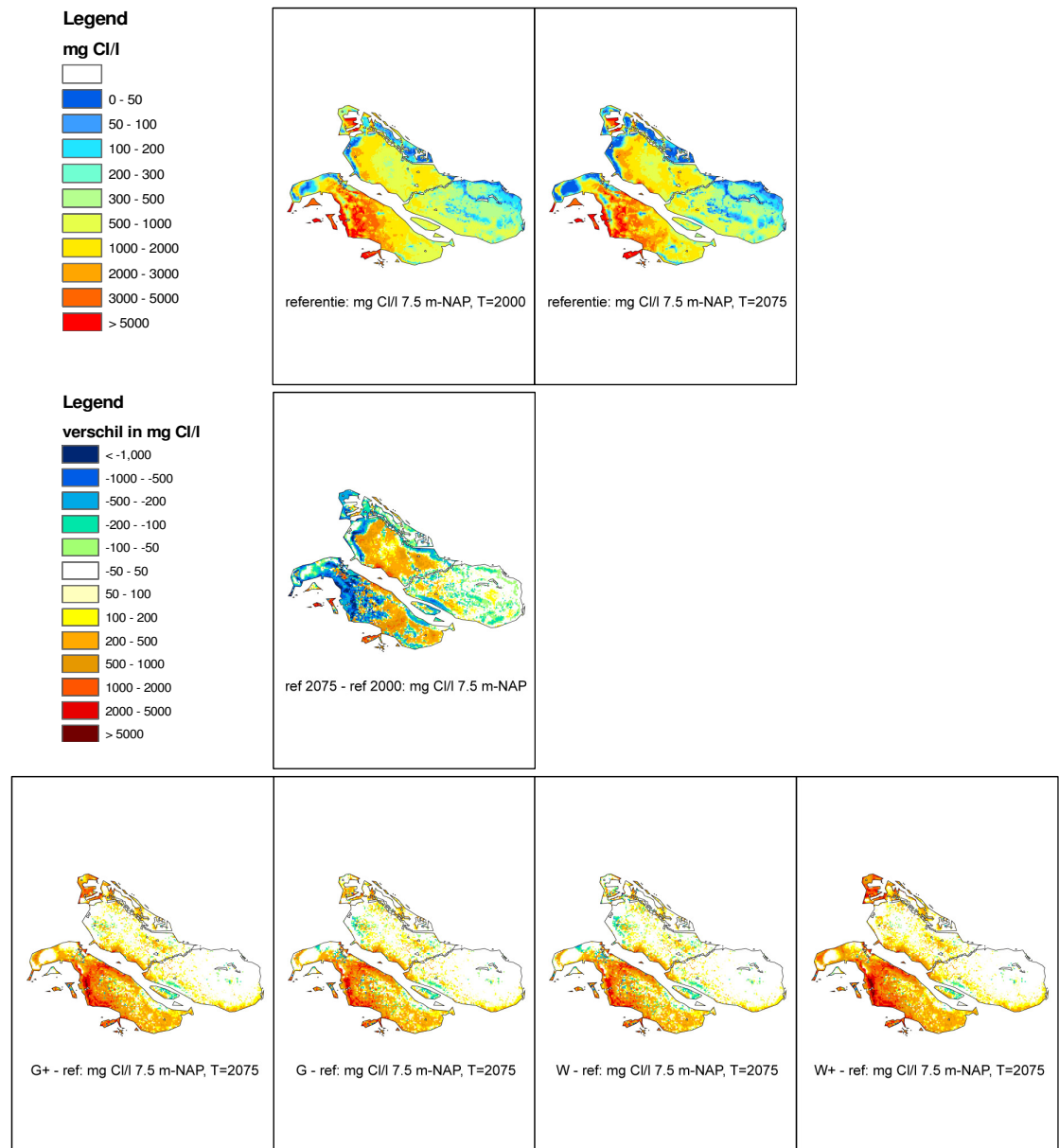
De uitkomsten van de modellering (op 250x250 m² schaal) lijken vooralsnog te grof om echte risicoschattingen te kunnen berekenen. Om het opbarstingsgevaar van met name waterkeringen nauwkeurig in kaart te brengen, moet gemodelleerd worden met meer detail dan gebruikt in de TNO 2004 studie. Daarnaast dient rekening te worden gehouden met extreme afvoeren in de rivieren of met extreme weersituaties (langdurige droogten). Overigens geven de resultaten van de MNP verkenning van 2007 geen aanleiding om te veronderstellen dat gebruiksfuncties op grote schaal door opbarsten van de bodem zullen worden beïnvloed (Kwadijk et al., 2007; Oude Essink, 2007).

5.3 Verzilting van het grondwatersysteem op de Zuid-Hollandse Eilanden

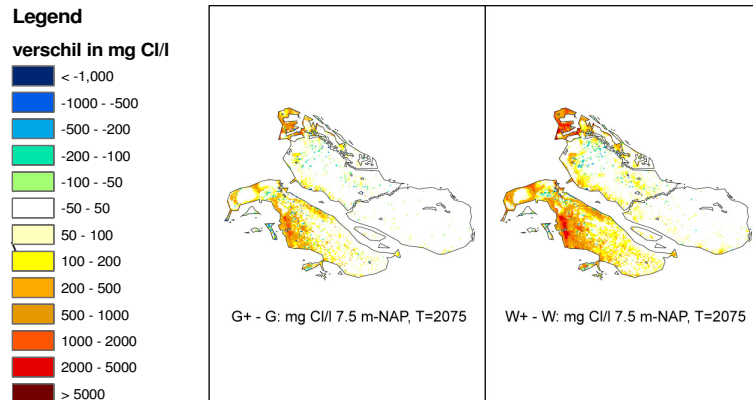
De chloride concentraties, berekend voor de referentie case uit de TNO 2004 studie, geven een goed beeld van de zoete en zoute gebieden en de toekomstige veranderingen in de provincie Zuid-Holland. Inzoomen op kleine deelgebieden van de provincie gaf echter een minder goed beeld. Met de verbeterde initiële chloride verdeling zoals gebruikt in dit onderzoek en beschreven in hoofdstuk 3 is dit sterk verbeterd. In figuur 20a is de chlorideconcentratie op 7.5 m-NAP op de Zuid-Hollandse eilanden weergegeven voor het jaar 2000. Op Goeree-Overflakkee, rond Dirksland, zijn nu al hoge (5000 mg Cl/l) chloride concentraties te vinden. Voor de autonome case zullen deze concentraties in het westen afnemen (figuur 20c) en meer landinwaarts toenemen tot het jaar 2075.

Als de invloed van klimaatscenario's op de chloride concentraties op een diepte van 7.5 m-NAP wordt bekeken dan lijkt in alle gevallen een verzilting op te treden ten opzichte van de referentiecasse in 2075. Op de meeste locaties is de verzilting gering, maar soms, bijvoorbeeld ter plaatse van Goedereede of Dirksland, is de toename in chloride concentratie significant (figuur 20d t/m g). In figuur 18 was te zien dat de verhoging van de zeespiegel veel invloed heeft op de stijghoogte langs de kust, hierdoor zal de kuststreek (verder) verzilten als de zeespiegel stijgt.

Een +-scenario (met een dynamischer neerslagpatroon maar gesommeerd over het jaar een kleinere grondwateraanvulling) zorgt voor verzoeting van het grondwater, met name langs de kust op Goeree-Overflakkee (figuur 21).



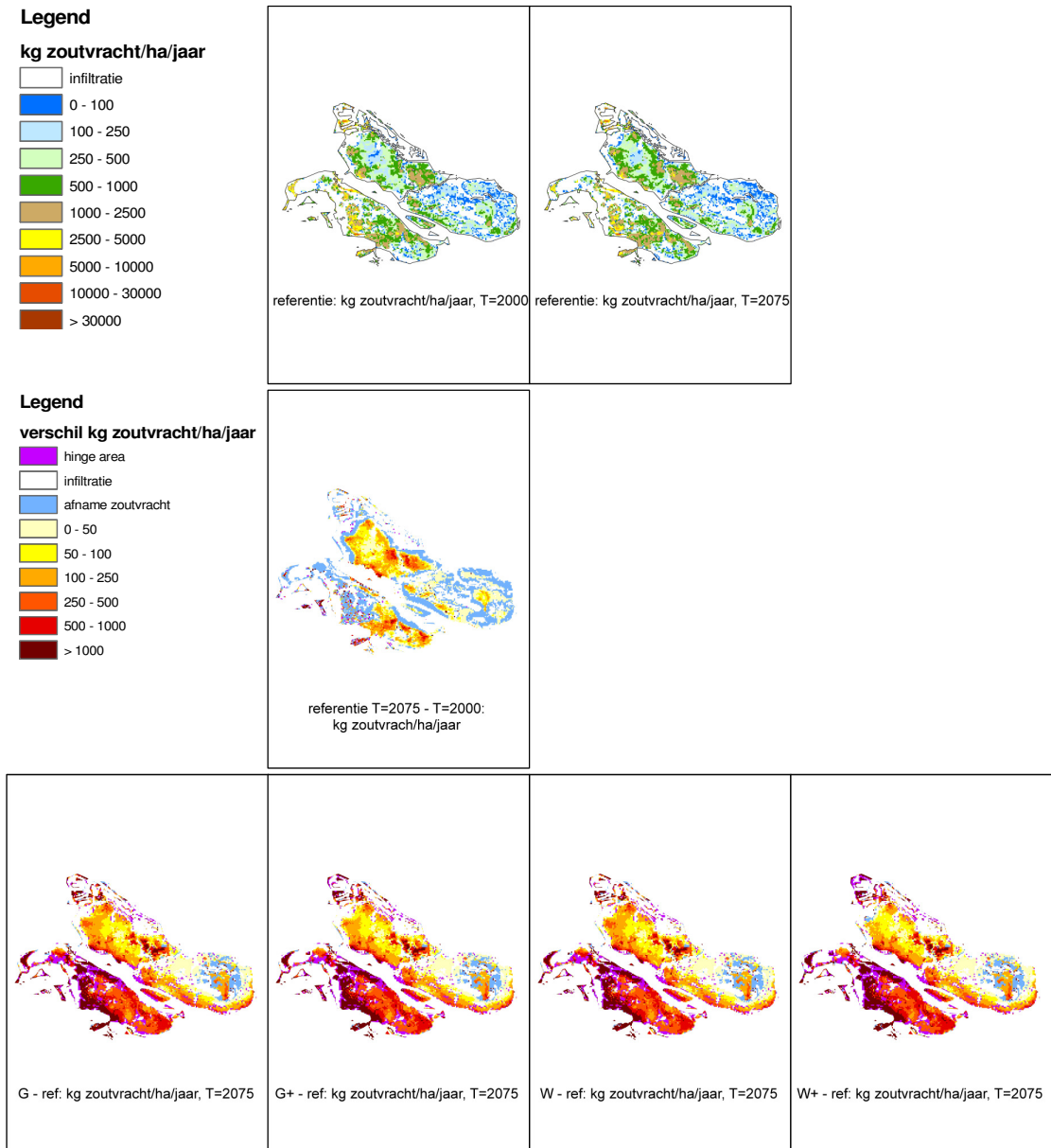
Figuur 20: a. en b. Chloride concentratie in het gebied van de Zuid-Hollandse Eilanden, referentiecasi voor het jaar 2075; en c.-g. De verschillen tussen de klimaatscenario's G, G+, W en W+ en de referentie case op 7.5 m-NAP; rood, oranje en geel betekent verzilting.



Figuur 21: Verandering in chloride concentratie in het gebied van de Zuid-Hollandse Eilanden tussen de + scenario's met een dynamischer neerslagpatroon en de standaard scenario's in het jaar 2075. Rood betekent verzilting voor de +-scenario's t.o.v. de standaard scenario's

Figuur 22 toont de resultaten van de zoutvracht berekeningen van het grondwater naar het oppervlaktewater. In het jaar 2000 zijn de zoutvrachten in het midden van Goeree-Overflakkee (bij Dirksland) 2500 tot 5000 kg/ha/jaar, het duingebied in het westen van Goeree-Overflakkee is een infiltratiegebied. Door het autonome proces zal de zoutvracht in het oosten van Goeree-Overflakkee en in het gebied tussen Hellevoetsluis, Spijkenisse en Oud-Beijerland toenemen. In de rest van het gebied neemt de zoutvracht af (figuur 22c).

Door de stijging van de zeespiegel neemt de zoutvracht langs de kust op Goeree-Overflakkee toe en worden sommige gebieden zelfs hinge areas (figuren 22 d t/m g). Er zijn twee risicogebieden te onderscheiden. Het eerste gebied ligt in het midden van Goeree-Overflakkee, bij Dirksland, waar nu al grote zoutvrachten optreden, die weliswaar in het autonome geval iets kunnen afnemen, maar door de stijging van de zeespiegel van de klimaatscenario's tot 1000 kg/ha/jaar zullen toenemen. Ook zijn hier kleine deelgebieden te onderscheiden die omslaan van infiltratie- naar kwelgebieden. Het tweede risicogebied ligt rond Hellevoetsluis. De zoutvracht is op dit moment niet zo groot, maar zal door de autonome omstandigheden toenemen en door de klimaatscenario's nog meer toenemen.



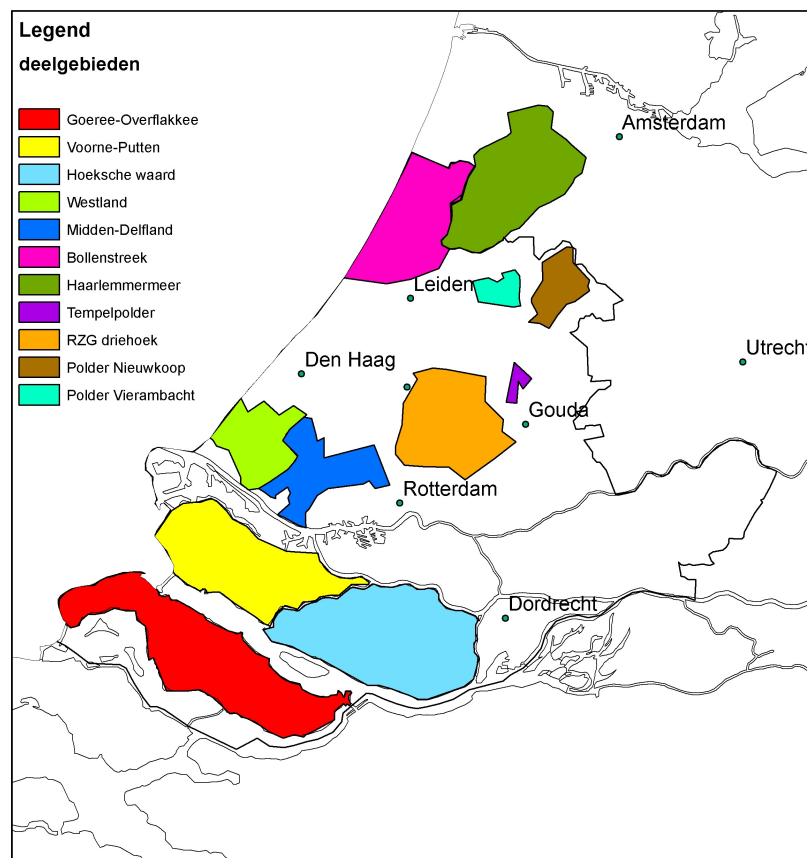
Figuur 22: Zoutvracht in het gebied van de Zuid-Hollandse Eilanden, referentiecasi voor de jaren 2000 en 2075 en de verschillen tussen de klimaatscenario's G, G+, W en W+ en de referentie case.

6 Zoutvracht naar het oppervlaktewatersysteem

De verandering van zoutvracht van het grondwater naar het oppervlaktewater is voor de volgende deelgebieden berekend (figuur 23):

1. Goeree-Overflakkee
2. Voorne-Putten
3. Hoeksche Waard
4. Westland
5. Midden-Delfland
6. Bollenstreek
7. Haarlemmermeer
8. Tempelpolder
9. RZG driehoek (driehoek Rotterdam-Zoetermeer-Gouda, met de Zuidplaspolder)
10. Polder Nieuwkoop
11. Polder Vierambacht

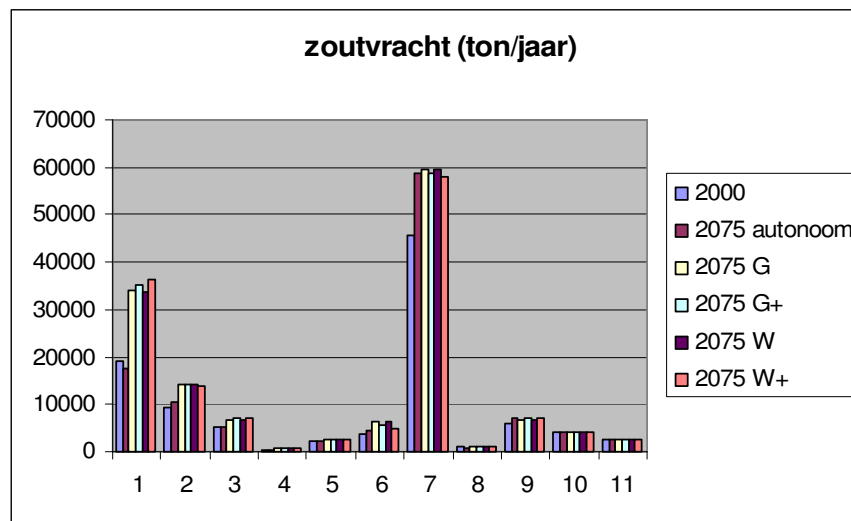
De resultaten zijn berekend voor zowel autonome processen als de klimaatscenario's G, G+, W en W+. Voor de scenario's G en G+ is de zeespiegelstijging 60 cm tot het jaar 2100 en voor de scenario's W en W+ 85 cm. De +-scenario's zijn de zogenaamde droge scenario's met een kleinere jaarlijkse grondwateraanvulling.



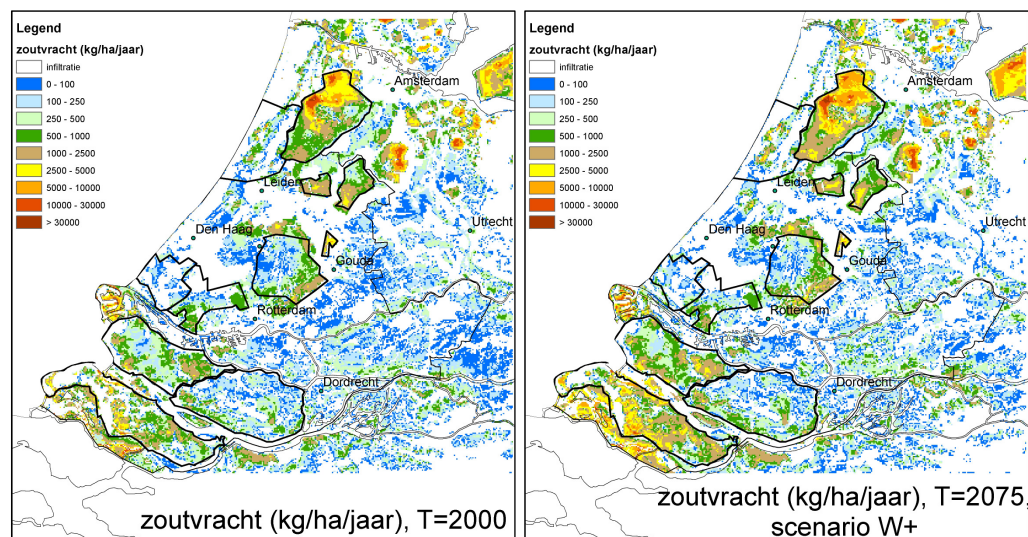
Figuur 23: Ligging van de deelgebieden Goeree-Overflakkee, Voorne-Putten, Hoeksche Waard, Westland, Midden-Delfland, Bollenstreek en Haarlemmermeer.

6.1 Totale zoutvracht per deelgebied

In figuur 24 is de totale zoutvracht in ton/jaar weergegeven voor alle klimaatscenario's voor het jaar 2075. Los van het feit dat in een aantal deelgebieden verzilting door autonome processen dominant is, zijn er geen grote verschillen in zoutvracht tussen de genoemde klimaatscenario's. Tussen de deelgebieden zijn de verschillen echter groot. Zo is de totale zoutvracht in de Haarlemmermeer bijna 55000 ton/jaar en in het Westland (grotendeels infiltratie gebied) maximaal 700 ton/jaar. Voor de exacte waarden van de zoutvrachten behorende bij de genoemde klimaatscenario's wordt verwezen naar appendix E. Figuur 25 geeft een gedetailleerder beeld van de locaties met een grote zoutvracht van het grondwater naar het oppervlaktewater.



Figuur 24: Zoutvracht in ton/jaar voor de deelgebieden 1. Goeree-Overflakkee, 2. Voorne-Putten, 3. Hoeksche Waard, 4. Westland, 5. Midden-Delfland, 6. Bollenstreek, 7. Haarlemmermeer, 8. Tempelpolder, 9. RZG driehoek, 10. Polder Nieuwkoop, 11. Polder Vierambacht.



Figuur 25: Zoutvracht in kg/ha/jaar voor het jaar 2000 en het jaar 2075 (klimaatscenario W+). De deelgebieden uit figuur 23 zijn weergegeven.

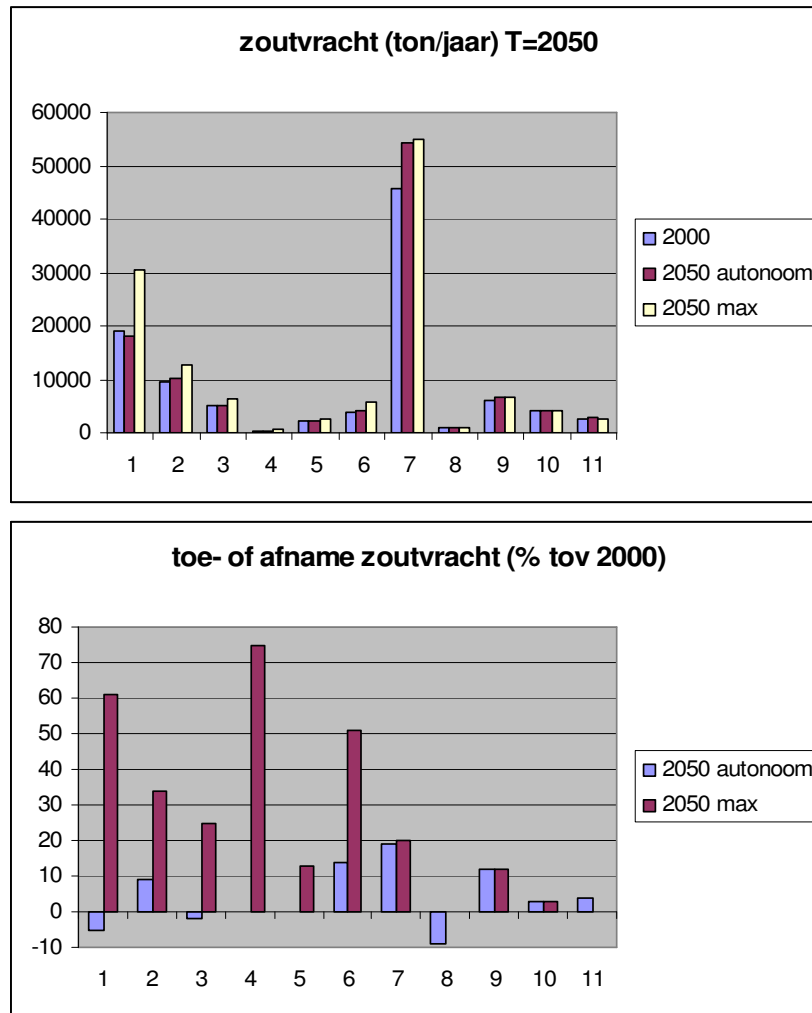
In tabel 7 zijn alle berekende resultaten omgezet naar zoutvrachten voor het jaar 2050. Hierbij is een lineaire toe- of afname van de zoutvracht van het jaar 2000 tot het jaar 2075 aangenomen. Voor de elf deelgebieden is de zoutvracht in de jaren 2000 en 2050 weergegeven waarbij voor het jaar 2050 onderscheid gemaakt is tussen een toe- of afname in zoutvracht door autonome processen en een maximale toename door klimaatverandering. Deze maximale toename in zoutvracht wordt veroorzaakt door het scenario met de grootste zoutvracht (zie tabel).

Voor de deelgebieden Goeree-Overflakkee, Hoeksche Waard, Tempelpolder, RZG driehoek en Polder Nieuwkoop zorgt het 'drogere' W+-scenario voor de grootste toename in zoutvracht. Voor de deelgebieden Voorne-Putten, Bollenstreek en Haarlemmermeer zorgen de scenario's met een grotere grondwateraanvulling (G, W) voor de grootste toename in zoutvracht. In het Westland, Midden-Delfland en de Polder Vierambacht zijn nauwelijks verschillen in zoutvracht te onderscheiden tussen de klimaatscenario's.

De zoutvracht in de Haarlemmermeer neemt vooral toe door autonome processen (19%) en zal slechts een beperkte extra toename hebben door klimaatverandering, hetzelfde geldt voor de RZG driehoek en de Polder Nieuwkoop. De zoutvracht van de Polder Vierambacht zal toenemen door autonome processen, en bij verandering van het klimaat weer afnemen. De zoutvracht naar het oppervlaktewater in de Tempelpolder zal iets afnemen door de autonome processen (-9%) en de 'natte' scenario's G en W en gelijk blijven in het G+ en W+ scenario. In figuur 26 zijn de resultaten van tabel 7 grafisch weergegeven.

Tabel 7: Totale zoutvracht in ton/jaar voor het jaar 2000 en 2050 voor de deelgebieden (figuur 23) en de toename van zoutvracht in procenten tov het jaar 2000.

zoutvracht	2000 (ton/ jaar)	2050 autonoom (ton/ jaar)	% 2050 tov 2000	Grootste zoutvracht	2050 max G,G+,W,W+ (ton/ jaar)	% max tov 2000
1. Goeree-Overflakkee	19000	18000	-5 %	W+	30600	61%
2. Voorne-Putten	9400	10200	9%	G en W	12600	34%
3. Hoeksche Waard	5200	5100	-2%	W+	6500	25%
4. Westland	400	400	0%	G,G+,W,W+	700	75%
5. Midden-Delfland	2300	2300	0%	G,G+,W,W+	2600	13%
6. Bollenstreek	3700	4200	14%	W	5600	51%
7. Haarlemmer-meer	45600	54400	19%	W	54900	20%
8. Tempelpolder	1100	1000	-9%	G+,W+	1100	0%
9. RZG driehoek	6000	6700	12%	W+	6700	12%
10. Polder Nieuwkoop	4000	4100	3%	W+	4100	3%
11. Polder Vierambacht	2600	2700	4%	G,G+,W,W+	2600	0%



Figuur 26: Grafische weergaven van tabel 7: (a) Totale zoutvracht in ton/jaar voor het jaar 2000 en 2050, (b) toe- of afname zoutvracht in procenten tov het jaar 2000 voor de deelgebieden 1. Goeree-Overflakkee, 2. Voorne-Putten, 3. Hoeksche Waard, 4. Westland, 5. Midden-Delfland, 6. Bollenstreek, 7. Haarlemmermeer, 8. Tempelpolder, 9. RZG driehoek, 10. Polder Nieuwkoop en 11. Polder Vierambacht.

6.2 Gemiddelde zoutvracht per deelgebied

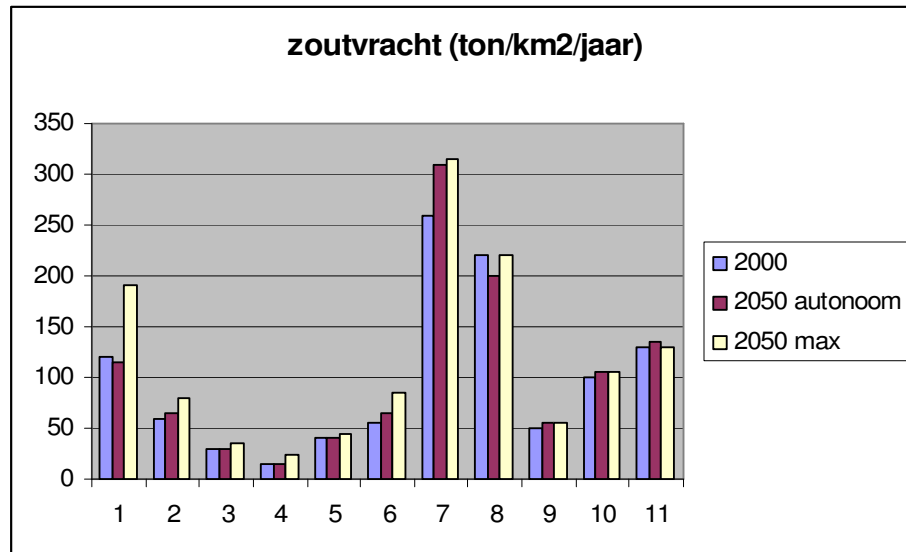
In figuur 26a was een grote absolute zoutvracht in de Haarlemmermeer te zien en in figuur 26b een grote relatieve toename in het Westland. Om de gegevens representatiever te maken is voor elk deelgebied het oppervlak bepaald van de kwelgebieden. Vervolgens is een gemiddelde waarde berekend per deelgebied voor de zoutvracht in de kwelgebieden. De resultaten van de gemiddelde zoutvracht in ton/km²/jaar ⁽³⁾ voor het jaar 2000, 2050 autonoom en 2050 max. (grootste zoutvracht door één van de klimaatscenario's) staan weergegeven in tabel 8. Figuur 27 geeft de resultaten uit deze tabel grafisch weer.

In de huidige situatie is de zoutvracht in de Haarlemmermeer de grootste (260 ton/km²/jaar) en zal door zowel autonome processen als klimaatscenario's toenemen tot maximaal 315 ton/km²/jaar. Daarnaast heeft de Haarlemmermeer nauwelijks infiltratiegebieden (100% kwelgebied). De zoutvracht in de Tempelpolder is al 220 ton/km²/jaar maar zal niet toenemen. Goeree-Overflakkee heeft een zoutvracht van 120 ton/km²/jaar welke door klimaatscenario W+ kan toenemen tot 190 ton/km²/jaar.

Tabel 8: Gemiddelde zoutvracht in ton/km²/jaar voor de kwelgebieden van de deelgebieden.

Kwelgebieden	Oppervlakte gebied (km ²)	% kwelgebied	zoutvracht 2000 (ton/km ² /jaar)	zoutvracht 2050 autonoom (ton/km ² /jaar)	Zoutvracht 2050 max (ton/km ² /jaar)
1. Goeree-Overflakkee	260	60	120	115	190
2. Voorne-Putten	200	80	60	65	80
3. Hoeksche Waard	260	70	30	30	35
4. Westland	80	40	15	15	25
5. Midden-Delfland	90	60	40	40	45
6. Bollenstreek	150	40	55	65	85
7. Haarlemmermeer	180	100	260	310	315
8. Tempelpolder	7	70	220	200	220
9. RZG driehoek	140	90	50	55	55
10. Polder Nieuwkoop	40	100	100	105	105
11. Polder Vierambacht	20	100	130	135	130

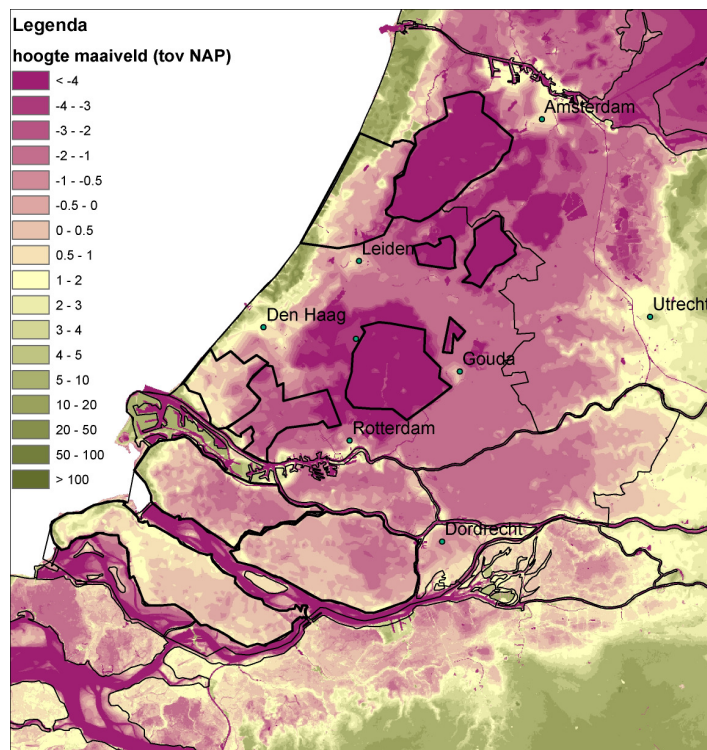
³ Ter vergelijking: 1 ton/km²/jaar is gelijk aan 10 ton/ha.jaar.



Figuur 27: Zoutvracht in ton/km²/jaar voor de kwelgebieden van de deelgebieden 1. Goeree-Overflakkee, 2. Voorne-Putten, 3. Hoeksche Waard, 4. Westland, 5. Midden-Delfland, 6. Bollenstreek, 7. Haarlemmermeer, 8. Tempelpolder, 9. RZG driehoek, 10. Polder Nieuwkoop, 11. Polder Vierambacht.

6.3 Oorzaken toe- of afname zoutvracht

In figuur 28 zijn de deelgebieden uit figuur 23 weergegeven in de kaart met de hoogte van het maaiveld. De polders zijn te herkennen als laaggelegen gebieden. In de laaggelegen polders (met name Haarlemmermeer, RZG driehoek, Polder Nieuwkoop en Polder Vierambacht) groeit de zoutvracht slechts door autonome oorzaken, zoals de al aanwezige en nog steeds bewegende zoutvrachten in het grondwater. Verandering van het klimaat heeft slechts een kleine invloed op dit proces en zal dus niet bepalend zijn voor de zoutvracht in deze polders.



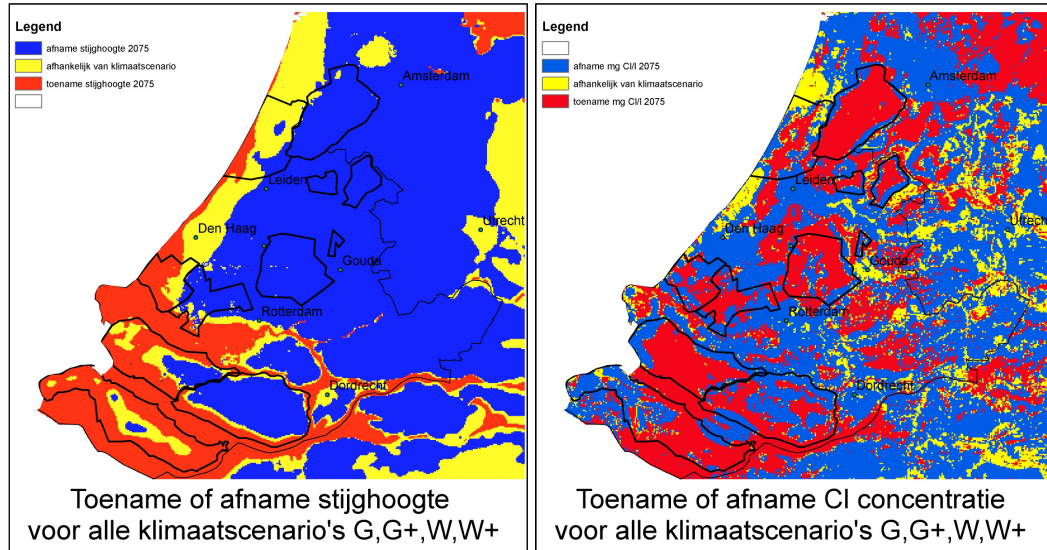
Figuur 28: maaiveld (m NAP).

De toename van de zoutvracht van het grondwater naar het oppervlaktewater is afhankelijk van de verzilting van het grondwater en van de hoeveelheid water dat van het grondwater naar het oppervlaktewater stroomt. Dit laatste aspect kan toenemen door een toename van de stijghoogte van het grondwater. In figuur 29a is weergegeven in welke gebieden een toename van de stijghoogte zal plaatsvinden voor alle klimaatscenario's (rood). Deze gebieden liggen vooral langs de kust en deze toename zal veroorzaakt worden door een zeespiegelstijging. In de blauwe gebieden zal de stijghoogte in het watervoerend pakket afnemen door bodemdaling en de verlaging van het water peil in de poldergebieden⁴. In de gele gebieden neemt de stijghoogte toe of af afhankelijk van het klimaatscenario.

In figuur 29b is te zien welke gebieden op -12.5 m NAP verzilten voor alle klimaatscenario's (rood) of verzoeten (blauw) tov het jaar 2000. Dit is een behoorlijk

⁴ Duidelijk moet zijn dat in deze modelberekeningen uitgegaan is van het principe "peilwijziging volgt bodemdaling".

complex patroon geworden. Deze resultaten zijn bovendien minder eenvoudig te verklaren. Wel is te zien dat de Zuid-Hollandse eilanden Goeree-Overflakkee en Voorne-Putten en de Haarlemmermeer sterk verzilten voor alle klimaatscenario's (inclusief de autonome processen).



Figuur 29: (a) Toename (rood, door zeespiegelstijging) en afname (blauw, door bodemdaling) van de stijg- of afname op 12.5 m-NAP voor alle klimaatscenario's. In de gele gebieden neemt de stijg- of afname toe of af afhankelijk van het klimaatscenario. (b) toename (rood) en afname (blauw) van de chlorideconcentratie op 12.5 m-NAP voor alle klimaatscenario's (inclusief de autonome effecten).

Per deelgebied is getracht de oorzaken van de toe- of afname van de zoutvracht te beschrijven:

1. Goeree-Overflakkee

Figuur 29a toont op Goeree-Overflakkee een toename van de stijg- of afname voor alle klimaatscenario's. Deze toename wordt voor een groot deel veroorzaakt door de zeespiegelstijging. Figuur 30 laat zien dat een kleinere grondwateraanvulling op Goeree-Overflakkee zorgt voor een grotere zoutvracht (minder neerslag, meer zoute kwel). Deze gevolgen tesamen van de klimaatverandering zorgen voor een toename in de zoutvracht van maximaal 61% in het jaar 2050 bij klimaatscenario W+. De huidige zoutvracht is 120 ton/km²/jaar.

2. Voorne-Putten

Op Voorne-Putten is de verhoging van de stijg- of afname door de zeespiegelstijging de voornaamste reden voor de toename van de zoutvracht met maximaal 34% (figuur 29a). Het grootste gedeelte van het grondwater op 12.5 m-NAP van Voorne-Putten verzilt voor alle klimaatscenario's, dus onafhankelijk van de toe- of afname van de grondwateraanvulling (figuur 29b).

3. Hoeksche Waard

In de Hoeksche Waard is de toename in zoutvracht maximaal 25%, deze toename wordt voor een groot deel veroorzaakt door zeespiegelstijging (figuur 29a).

4. Westland

In het Westland is de toename in zoutvracht maximaal 75%, deze toename wordt voor een groot deel veroorzaakt door zeespiegelstijging (figuur 29a). Opgemerkt kan worden dat de zoutvracht in het jaar 2000 slechts 15 ton/km²/jaar was in het Westland. Het Westland heeft grote infiltratiegebieden; slechts 40% van het oppervlak is kwelgebied.

5. Midden-Delfland

In Midden-Delfland wordt de toename in zoutvracht slechts veroorzaakt door klimaatverandering. De meest waarschijnlijke oorzaak is de invloed van de zeespiegelstijging in het zuiden van dit deelgebied (figuur 29a). 40% van Midden-Delfland is infiltratiegebied.

6. Bollenstreek

In de Bollenstreek zorgt een grotere grondwateraanvulling van het W-scenario voor verzoeting in de duinen maar meer in het binnenland voor een toename van de kwel en daarmee van de zoutvracht (figuur 30 of figuur 16 voor meer details). De verzoeting van de duinen door de grotere grondwateraanvulling heeft echter weinig invloed op de zoutvracht omdat dit een kwelgebied is en blijft (figuur 25 a en b). De zeespiegelstijging veroorzaakt een verhoging van de stijghoogte langs de kust (figuur 29a). Deze verhoging van de stijghoogte heeft echter weinig invloed op de zoutvracht omdat het kustgebied in de Bollenstreek een infiltratiegebied is en blijft (figuur 25a en b). Het verschil in zoutvracht tussen het G en W scenario is dan ook klein (figuur 24 of appendix E). De maximale toename van de zoutvracht in de Bollenstreek is 51%.

7. Haarlemmermeer

In de Haarlemmermeer wordt de zoutvracht voornamelijk door autonome effecten groter (19% tot 2050). Deze autonome effecten bestaan uit het al aanwezig zijn van zout in het (diepere) grondwater en de nog steeds aanwezige beweging van dit zout. De Haarlemmermeer is een laaggelegen gebied (figuur 28) waardoor de zoutvracht hier sneller naar het oppervlaktewatersysteem zal kunnen stromen. Deze autonome effecten spelen nu ook al een rol waardoor de zoutvracht in het jaar 2000 al 260 ton/km²/jaar was.

8. Tempelpolder

Een kleinere grondwateraanvulling van de scenario's G+ en W+ zorgt voor verzilting van het grondwater op 7.5 m-NAP (figuur 30). Deze toename wordt echter gecompenseerd door autonome processen die zorgen voor een afname van de zoutvracht in de Tempelpolder. De huidige zoutvracht in de Tempelpolder is 220 ton/km²/jaar.

9. RZG driehoek

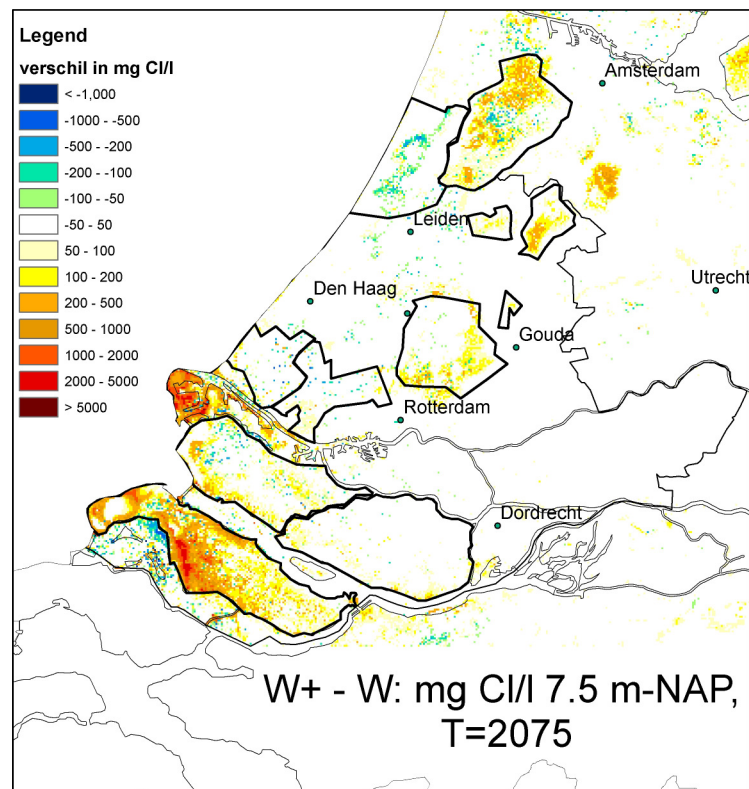
In de RZG driehoek wordt de zoutvracht slechts door autonome processen groter. Deze autonome effecten bestaan uit het al aanwezig zijn van zout in het (diepere) grondwater en de nog steeds aanwezige beweging van dit zout. Daarnaast is het autonome proces bodemdaling (figuur 6) van invloed op de toename van de zoutvracht. De autonome effecten zorgen voor een toename van de zoutvracht met 12%.

10. Polder Nieuwkoop

In de Polder Nieuwkoop wordt de zoutvracht slechts door autonome processen groter. Deze autonome effecten bestaan uit het al aanwezig zijn van zout in het (diepere) grondwater en de nog steeds aanwezige beweging van dit zout. Ook deze autonome effecten zijn echter klein, de zoutvracht neemt met slechts 3% toe tot het jaar 2050. De Polder Nieuwkoop is in zijn geheel een kwelgebied. De scenario's G en W met grotere grondwateraanvulling zorgen voor een verkleining van de zoutvracht (figuur 24 of appendix E) doordat deze grotere grondwateraanvulling zorgt voor verzoeting van het grondwater op 7.5 m-NAP (figuur 30).

11. Polder Vierambacht

In Polder Vierambacht verandert de zoutvracht nauwelijks. Doordat deze polder een laaggelegen gebied is (figuur 28) neemt de zoutvracht door autonome effecten 4% toe.



Figuur 30: Verandering in chloride concentratie tussen het ('drogere') W+ en ('nattere') W scenario. Hiermee kan de invloed van de toe- of afname van de grondwateraanvulling of de verzoeting of verzilting van het grondwater op 7.5 m-NAP inzichtelijk gemaakt worden.

7 Bepalen van neerslagoverschot voor duingebieden Den Haag-Katwijk

Voor het vaststellen van de huidige natuurlijke grondwateraanvulling is gebruik gemaakt van data van het RIZA. De kaarten voor de toekomstige grondwateraanvulling zijn berekend op basis van de geprojecteerde veranderingen in neerslag en verdamping voor de vier KNMI'06 scenario's: G, G+, W, W+. Een nadere toelichting van de KNMI'06 scenario's is opgenomen in box 1. Aan de hand van de verandering in het verschil in neerslag en verdamping (neerslagoverschot) voor de klimaatscenario's voor de toekomstige situatie ten opzichte van de huidige situatie en de huidige natuurlijke grondwateraanvulling zijn kaarten gemaakt van natuurlijke grondwateraanvulling voor het gebied Den Haag-Katwijk voor 2050 en 2100 (figuren 31 en 32). De witte arcering geeft het stedelijk gebied aan. Voor de huidige situatie is te zien dat de natuurlijke grondwateraanvulling in het duingebied en de polders duidelijk hoger is in vergelijking tot het stedelijke gebied. Dit verschil kan oplopen tot meer dan 0.3 mm/dag.

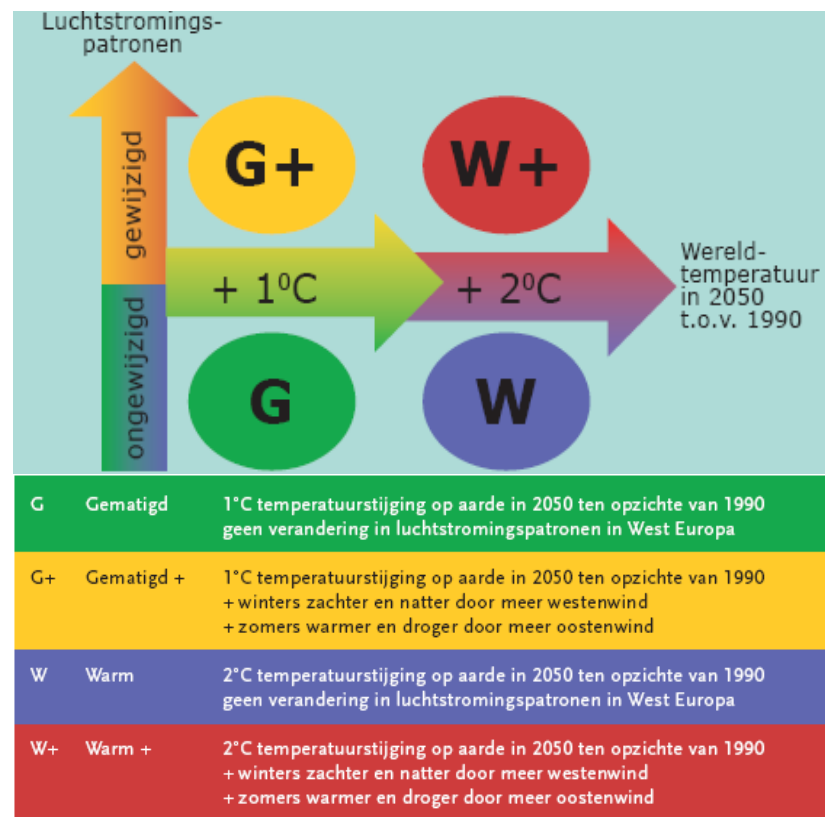
Een vergelijking van de natuurlijke grondwateraanvulling voor de KNMI'06 scenario's in 2050 ten opzichte van de huidige situatie toont voor het G en W scenario een toename in grondwateraanvulling in het gebied als gevolg van een hogere toename in neerslag dan verdamping op jaarbasis. Deze toename is sterker voor het W scenario dan voor het G scenario, omdat de gemiddelde toename in jaarneerslag hoger is volgens het W scenario. Voor het G+ en W+ scenario wordt ondanks de sterke toename in neerslag tijdens winter op jaarbasis een afname in natuurlijke grondwateraanvulling verwacht. Dit is het gevolg van een sterke toename in verdamping en afname in neerslag tijdens de zomer, wat vooral het sterkst is voor het W+ scenario.

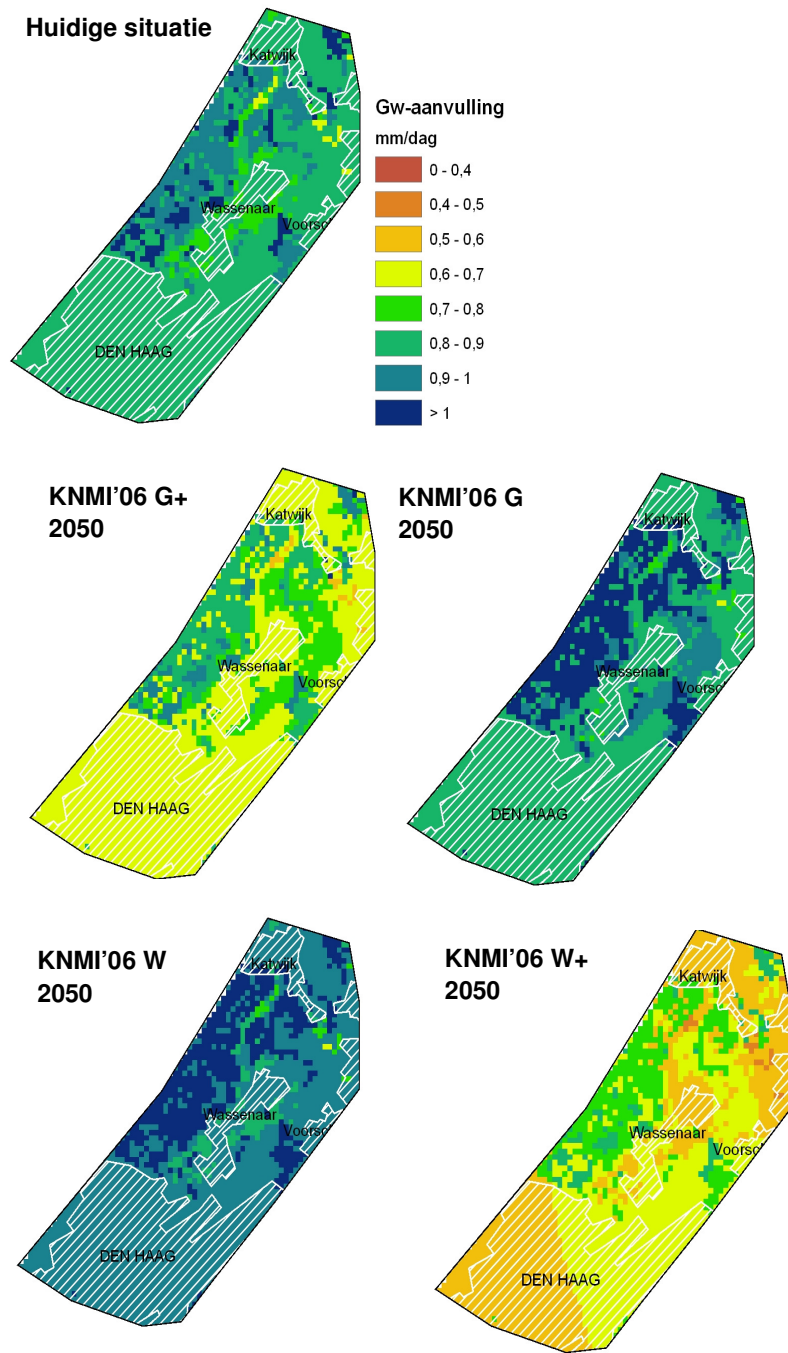
Voor de situatie van 2100 is uitgegaan van een verdubbeling van de veranderingen in neerslag en verdamping volgens de vier KNMI'06 scenario's voor 2050. Dit resulteert in een sterkere toename in grondwateraanvulling voor het G en W scenario en een sterkere afname voor het G+ en W+ scenario op jaarbasis (figuur 32).

Box 1: KNMI'06 scenario's

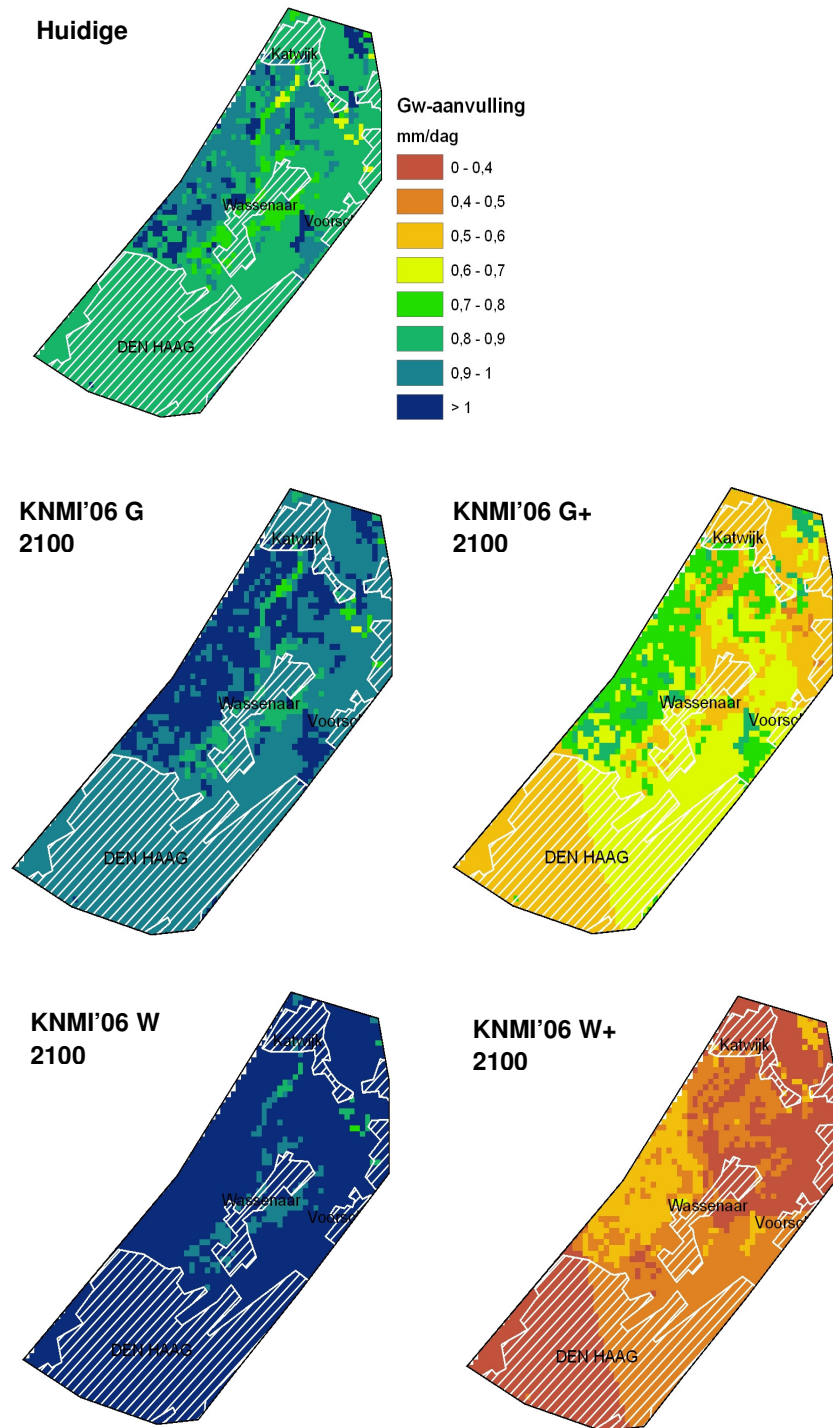
Het KNMI heeft in 2006 vier nieuwe klimaatscenario's gepresenteerd voor Nederland: de KNMI'06 scenario's (Van der Hurk et al., 2006). De scenario's geven een beeld van de veranderingen in temperatuur, neerslag, wind en zeespiegel voor een klimatologische periode van 30 jaar. De scenario's voor 2050 zijn dus representatief voor het klimaat in de periode rond dat jaar (tussen 2036 en 2065). Als referentie is het basisjaar 1990 gebruikt dat beschreven is aan de hand van gegevens van 1976 tot en met 2005. De KNMI'06 scenario's vervangen de WB21 scenario's die in 2000 zijn opgesteld door de Commissie Waterbeheer 21^e eeuw.

Het KNMI is voor klimaatverandering in Nederland uitgegaan van twee aspecten waarvan verwacht wordt dat ze het meest bepalend zullen zijn: de mondiale temperatuurstijging (+1 of +2 °C in 2050 t.o.v. 1990) en mogelijke veranderingen in stromingspatronen (meer westenwind tijdens winter en meer oostenwind tijdens zomer). De indeling van de KNMI'06 scenario's is daarom ook op deze twee aspecten gebaseerd, wat heeft geresulteerd in vier scenario's die volgens het KNMI allemaal even waarschijnlijk zijn. Een overzicht van de vier KNMI'06 scenario's en de geprojecteerde veranderingen in temperatuur, neerslag en zeespiegelstijging hieronder weergegeven.





Figuur 31: Grondwateraanvulling (mm/dag) voor huidige situatie en berekend op basis van KNMI'06 scenario's voor 2050.

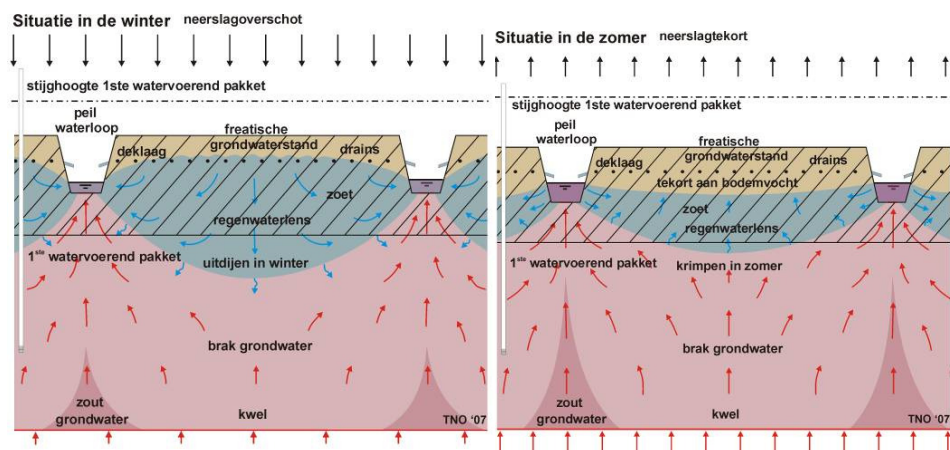


Figuur 32: Grondwateraanvulling (mm/dag) voor huidige situatie en berekend op basis van KNMI'06 scenario's voor 2100.

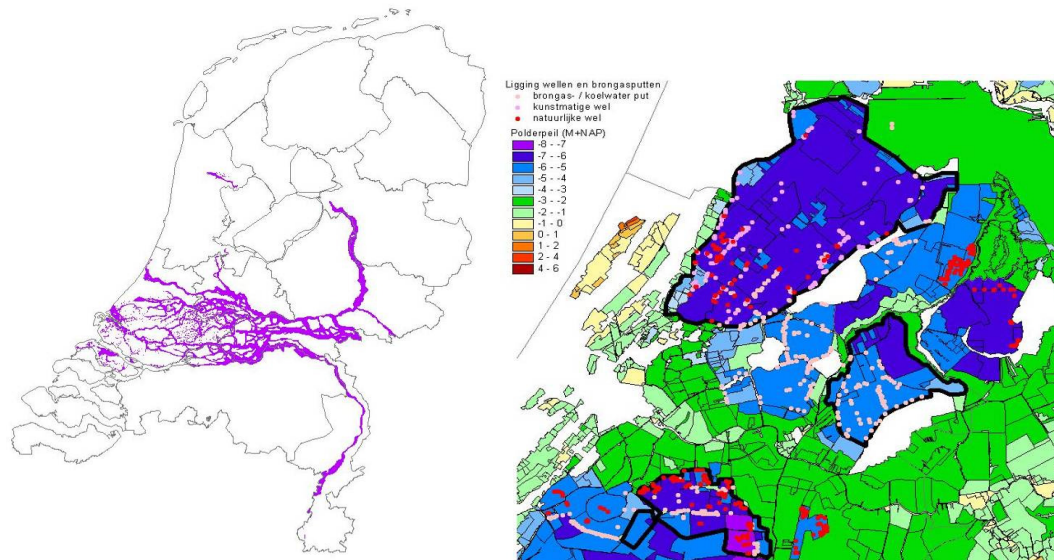
8 Doorkijk naar mogelijk vervolgonderzoek

De TNO 2004 studie was bedoeld om uitspraken te doen over het diepere grondwater (dieper dan 10m-NAP). In deze verkennende studie is met het modelinstrumentarium juist gekeken naar het topsysteem, zijnde ondieper dan 10m-NAP, zoals zoutbelasting op het oppervlaktewatersysteem en zoutschade aan gewassen. Met name op het gebied van zoutschade valt er nog het een en ander te verbeteren, waarbij de zoetwatervoorraad in de ondiepe dynamische regenwaterlenzen meegenomen zou moeten worden (Oude Essink *et al.*, 2007; figuur 33). Het vermogen van het instrumentarium om accurate voorspellingen te doen over veranderingen in (de top van) het grondwatersysteem als gevolg van klimaatverandering, zeespiegelstijging, bodemdaling en waterbeheersmaatregelen zal flink toenemen als de volgende activiteiten zouden worden uitgevoerd:

- 1. Verbetering van de geo(hydro)logie van het topsysteem:** voldoende detail van het stromingsproces van grondwater en zout is noodzakelijk om zoutbelasting naar het oppervlaktewater of zouttransport naar de (onverzadigde) wortelzone en daaraan gelieerd de zoutschade te kunnen voorspellen. In de TNO 2004 studie is de schematisatie van de geo(hydro)logie van het topsysteem redelijk grof. Weliswaar is REGIS 1 gebruikt, maar zijn zandbanen onvoldoende (figuur 34a) en wellen niet meegenomen (figuur 34b). Aandachtspunten ter verbetering van het modelinstrumentarium zijn wat betreft de geo(hydro)logie: nauwkeuriger geologisch model (inclusief zandbanen en evt. aanwezige wellen) en verfijnde modeldiscretisatie (d.m.v. meer modellagen en kleinere modelcellen); Overigens kan met het verbeterde instrumentarium het opbarstingsrisico van de Holocene deklaag in kwetsbare gebieden worden gekwantificeerd.
- 2. Verfijning temporele discretisatie:** om de effecten van bijvoorbeeld seizoensale verschillen op het grondwater en oppervlaktewatersysteem te detecteren, waardoor de dynamiek van het gehele watersysteem in ogenschouw wordt genomen.
- 3. Implementatie van gegeneerde toekomstige weervoorspellingen** in het modelinstrumentarium, rekening houdend met de karakteristieke eigenschappen van de parameters in de KNMI'06 klimaatscenario's (Bijlage C): met name extreme events in neerslag en verdamping zullen kunnen leiden tot kritieke situaties (grondwateroverlast, opbarsten bij extreme rivierafvoeren, droogte in combinatie met verzilting).



Figuur 33: Regenwaterlens in winter- en zomer situatie.



Figuur 34: a. Zandbanen in Nederland en b. Locaties van wellen in o.a. de Noordplaspolder en Het Hoogheemraadschap van Rijnland.

- 4. Verbetering initiële zoet-brak-zout verdeling in de ondergrond.** Weliswaar is de initiële zoet-brak-zout verdeling op regionale schaal flink verbeterd, op lokale schaal is de ruimtelijke verdeling vaak nog steeds gebrekkig. In die gebieden waar verzilting van het grond- en oppervlaktewatersysteem te verwachten is zou een additionele meetcampagne met bijv. de T-EC prikstok of met de EM Simflex⁵ tool (in alle bestaande één-duims-PVC-buizen) kunnen leiden tot een betere voorspelling van de toekomstige verzilting.

Met een verbeterd modelinstrumentarium is dus een betrouwbare doorvertaling voor de overige vier (kleinschalige) deelgebieden mogelijk. Lokale processen spelen in deze gebieden een belangrijke rol: Leiden-Katwijk (oude Rijnmond, met daarbij horende specifieke geologische en hydrologische omstandigheden), Zuidplaspolder (effect zandbanen en wellen), Greenport Boskoop (zoutbelasting oppervlaktewater en gevoeligheid in het gebied voor zoutschade) en verzilting oevergrondwaterwinningen / innamepunten oppervlaktewater (zoutbelasting oppervlaktewater en toename zoutvrucht door interne verzilting achterliggend gebied). Een laatste punt dat interessant is voor vervolgonderzoek betreft:

5. Onderzoek naar de stuurbaarheid van de processen.

Welke (waterbeheers)maatregelen zullen invloed hebben op de verzilting? Is daarmee de verzilting van de ondergrond te beïnvloeden? Of hebben deze mogelijke maatregelen weinig invloed op de verzilting moeten we het proces accepteren? Hierbij kan gedacht worden aan de effecten van interne verzilting door grondwater maar met name de effecten van het veranderen van externe verzilting door oppervlaktewater (veroorzaakt door hogere chloride concentraties bij innamepunten zoals bij Gouda).

⁵ <http://www.tno.nl/downloads/EM-SLIMFLEX%20def%20uGB%20067%2003%2007ENG.pdf> of http://www.tno.nl/content.cfm?&context=markten&content=product&laag1=188&laag2=137&item_id=1132&Taal=1

9 Conclusies

In deze verkennende studie is de TNO 2004 studie opnieuw tegen het licht gehouden. Een drietal vragen is centraal gesteld bij het beantwoorden van de effecten van klimaatverandering op de verzilting van het grondwater: 1. in hoeverre brengt het rapport uit 2004 de problematiek van verzilting van het opkwellend ondiepe grondwater op lokale schaal in beeld?; 2. wat is het verschil in neerslagoverschot in 2050 en 2100, voornamelijk in de duingebieden?; 3. in hoeverre barst de Holocene deklaag open als gevolg van toenemende kweldruk door zeespiegelstijging (en klimaatverandering)?

Dit verkennende onderzoek beperkt zich tot drie deelgebieden waar verzilting van het grond- en oppervlaktewatersysteem mogelijk een rol zal spelen: 1. de Bollenstreek, 2. Zuid-Hollandse Eilanden en 3. de duingebieden Den Haag-Katwijk. Voor deze studie is een sterk verbeterd initiële chloride concentratie verdeling gebruikt, gebaseerd op analyses, VES (verticale elektrische sonderingen) en boorgatmetingen.

De chloride concentratie verdeling in het gehele studiegebied is het hoogst in het westen en neemt af richting het zuidoosten. Diepe polders vertonen een verhoogde chloride concentratie ten opzichte van hun omgeving. Chloride concentraties nemen meestal toe met de diepte en kunnen lokaal sterk variëren. Uit de TNO 2004 studie is gebleken dat op regionale schaal zowel plaatselijke verzilting als verzoeting optreedt.

In de eerste kilometers vanaf de kustlijn, in bijvoorbeeld de duingebieden van Den Haag-Katwijk en Goeree-Overflakkee, is de invloed van de zeespiegelstijging merkbaar in termen van een verhoogde stijghoogte. De invloed van de zeespiegelstijging is afhankelijk van het doorlaatvermogen van het watervoerend pakket en de weerstand van de deklaag. De invloedssfeer dempt snel uit en is op 6-10 km vanaf de kust nauwelijks nog merkbaar.

Voor de Bollenstreek is onderzoek gedaan naar de zoutvracht van het grondwater naar het oppervlaktewater en de zoutschade ten gevolge van berekening met grondwater. De grondwaterstroming onder invloed van autonome ontwikkelingen zorgt voor zowel verzilting als verzoeting van gebieden. Een duidelijke trend voor alle KNMI'06 klimaatscenario's is de verzilting van het grondwater ten opzichte van de referentiecasi in 2075 AD. Voor deze regio is het klimaatscenario W het meest extreme scenario, met de grootste zoutvracht van het grondwater naar het oppervlaktewater.

Er zijn in de Bollenstreek twee duidelijke risicogebieden te onderscheiden (figuur 34). De eerste ligt ten westen van Voorhout en de tweede ten westen en noorden van Noordwijkerhout. Het autonome verziltingsproces (figuren 9c en 10c) heeft hier al geleid tot chloride concentraties in de range van 200-2000 mg Cl/l. Daar moet de verzilting die zal ontstaan door de klimaatscenario's (tot ongeveer 500 mg Cl/l) dan nog bij opgeteld worden.

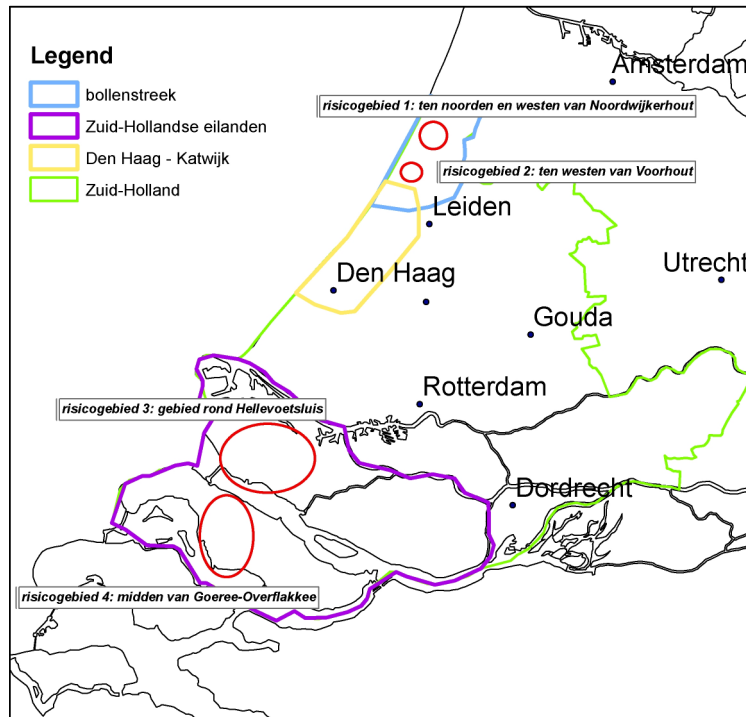
Ook in het gebied van de Zuid-Hollandse eilanden zijn twee risicogebieden te onderscheiden (figuur 34). De eerste ligt in het midden van Goeree-Overflakkee, bij Dirksland, waar nu al grote zoutvrachten optreden. Deze zoutvrachten kunnen weliswaar in het autonome geval iets afnemen, maar zullen door de zeespiegelstijging, zoals weergegeven in de klimaatscenario's, tot 1000 kg/ha/jaar toenemen. Hier zijn zelfs kleine deelgebieden te onderscheiden die omslaan van infiltratie- naar kwelgebieden. Het tweede risicogebied ligt rond Hellevoetsluis. De zoutvracht is hier op dit moment niet zo groot, maar zal door het autonome verziltingsproces toenemen.

Voor tien deelgebieden en de Haarlemmermeer (figuur 23) is de verandering in zoutvracht berekend. Voor de deelgebieden Goeree-Overflakkee, Hoeksche Waard, Tempelpolder, RZG driehoek en Polder Nieuwkoop zorgt het 'drogere' W+-scenario voor de grootste toename in zoutvracht. Voor de deelgebieden Voorne-Putten, Bollenstreek en Haarlemmermeer zorgen de scenario's met een grotere grondwateraanvulling (G, W) voor de grootste toename in zoutvracht. In het Westland, Midden-Delfland en de Polder Vierambacht zijn nauwelijks verschillen in zoutvracht te onderscheiden tussen de klimaatscenario's. In de huidige situatie is de zoutvracht in de Haarlemmermeer de grootste (260 ton/km²/jaar) en zal door zowel autonome processen als klimaatscenario's toenemen tot maximaal 315 ton/km²/jaar. Daarnaast heeft de Haarlemmermeer nauwelijks infiltratiegebieden (100% kwelgebied). De zoutvracht in de Tempelpolder is al 220 ton/km²/jaar maar zal niet toenemen. Goeree-Overflakkee heeft een zoutvracht van 120 ton/km²/jaar welke door klimaatscenario W+ kan toenemen tot 190 ton/km²/jaar.

De resultaten van de klimaatscenario's liggen dicht bij elkaar in de buurt. Het is de vraag of bij de bepaling van de effecten op de verzilting van het grondwatersysteem wel zoveel scenario's nodig zijn om de verzilting in de toekomst in kaart te brengen. Het autonome verziltingsproces heeft grotere consequenties voor de chloride concentraties in het grondwater dan de klimaatscenario's hebben.

Voor de huidige situatie is de natuurlijke grondwateraanvulling in het duingebied Den Haag – Katwijk en de polders hoger in vergelijking tot het stedelijke gebied. Voor de situatie van 2100 is uitgegaan van een verdubbeling van de veranderingen in neerslag en verdamping volgens de vier KNMI'06 scenario's voor 2050. Dit resulteert in een sterkere toename in grondwateraanvulling voor het G en W scenario en een sterkere afname voor het G+ en W+ scenario op jaarbasis.

De uitkomsten van de TNO 2004 studie (250x250 m² schaal) lijken vooralsnog te grof om de volgende onderdelen in detail te kunnen berekenen: 1. zoute kwel in de buurt van zandbanen en wellen, 2. zoutschade aan gewassen in de onverzadigde zone en 3. echte risicoschattingen van het opbarstingsgevaar.



Figuur 35: Risicogebieden betreffende verzilting voor de deelgebieden Bollenstreek en Zuid-Hollandse eilanden.

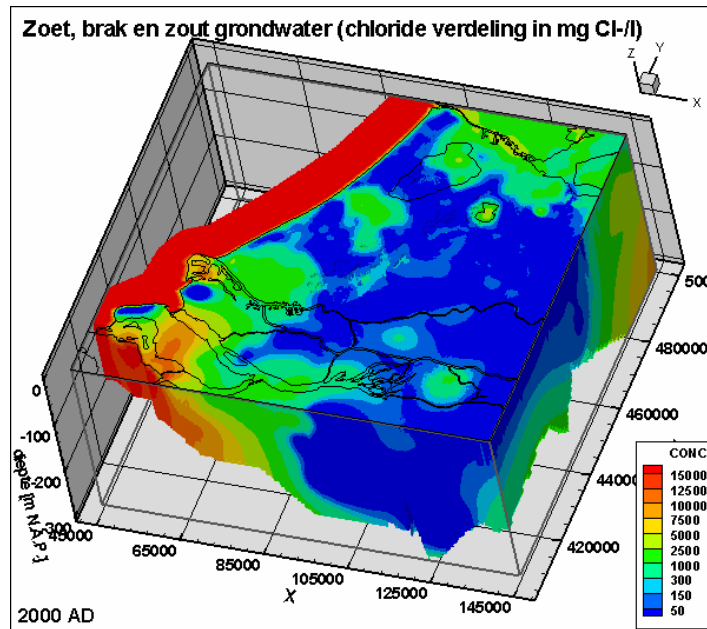
10 Literatuur

- Haas, S. de, Niemeijer, A., 2007, Investeringsruimte voor toekomstige droogte, Verkenning van de hydrologische effecten en economische schade in de KNMI '06 klimaatscenario's. Haskoning, in opdracht van Rijkswaterstaat/RIZA, 4 juli 2007, Eindconcept rapport, 9S6323.
- Haasnoot, M., J.A.P.H. Vermulst en Middelkoop, H., 1999, Impacts of climate change and land subsidence on the water systems in the Netherlands. Terrestrial areas, RIZA, Lelystad.
- Hoogvliet, M., R. van Ek, J. Heemstra, J. Icke, R. van der Krogt, J. Kwadijk, G. de Lange, E. van Leeuwen, G. Oude Essink, A. van der Spek en R. Stuurman, 2007, Inventarisatie van effecten van klimaatverandering op fysiek systeem Hoogheemraadschap van Delfland, TNO rapport 2007-U-R01023/A, in opdracht van Hhrs. van Delfland, 117 p.
- Kloosterman, F.H., 2007, Kartering zoet/brak/zout verdeling Nederland; Beschrijving van de ZZ-REGIS software suite. Concept TNO-rapport.
- Kwadijk et al., 2007, Gevolgen van grote zeespiegelstijging op de Nederlandse zoetwaterhuis-houding, concept, in opdracht van het Milieu en Natuurplan Bureau, DELTARES
- Louw, P. de, Oude Essink, G.H.P. en Maljaars, P. 2007: Achtergrondstudie kwelreductietechnieken, TNO rapport 2007-U-R0357/B, 82 p., april 2007.
- Minnema, B., Kuijper, B., & Oude Essink, G.H.P., 2004, Bepaling van de toekomstige verzilting van het grondwater in Zuid-Holland, NITG 04-189-B, 86 p., Utrecht, TNO Bouw en Ondergrond.
- MNP, 2005, Effecten van klimaatverandering in Nederland. Milieu- en Natuur Planbureau, oktober 2005. MNP-rapportnummer: 773001034.
- NEN 6740 (1991), Geotechniek TGB 1990 Basiseisen en belastingen, Nederlands Normalisatie-instituut.
- Oude Essink, G.H.P., Houtman, H. & B.J.M. Goes, 2005, Chloride-concentratie onderkant deklaag in Nederland, NITG 05-056-A, 17 p., Utrecht, TNO Bouw en Ondergrond.
- Oude Essink, G.H.P., 2007, Effect zeespiegelstijging op het grondwatersysteem in het kustgebied, H2O, nr 19, 60-64.
- Oude Essink, G.H.P., Stevens, S., de Veen, B., de Prevo, C., Marconi, V., Goes, B. & de Louw, P., Meetcampagne naar het voorkomen van regenwaterlenzen in de Provincie Zeeland, 2007-U-R0925/A, 127p.
- Ploegman, C., 1972, De invloed van zout beregeningswater bij de gladiool c.v. 'Peter Pears', Nota 687, ICW, Wageningen; Ploegman, C., 1973, De invloed van zout beregeningswater op de groei en de projectie van de roos var. 'Carol', Nota 729, ICW, Wageningen; Ploegman, C., 1976, Invloed van infiltratie bij kasrozen, Nota 913, ICW, Wageningen; Ploegman, C., 1978, Het chloride-ion in de grond in relatie tot de opbrengst bij tulpen, Landbouwkundig Tijdschrift 90-2; Ploegman, C., 1981, Invloed van de zoutconcentratie van het bodemwater op de productie van drie lelie cultivars, Nota 1248, ICW, Wageningen.
- Roest, C.W.J., P.J.T. van Bakel en A.A.M.F.R. Smit, 2003, Actualisering van de zouttolerantie van land- en tuinbouwgewassen ten behoeve van de berekening van de zoutschade in Nederland met het RIZA-instrumentarium, Alterra.
- Stuurman, R.J., Oude Essink, G.H.P., et al., 2006, Monitoring zoutwaterintrusie naar aanleiding van de Kaderrichtlijn Water "verzilting door zoutwaterintrusie en

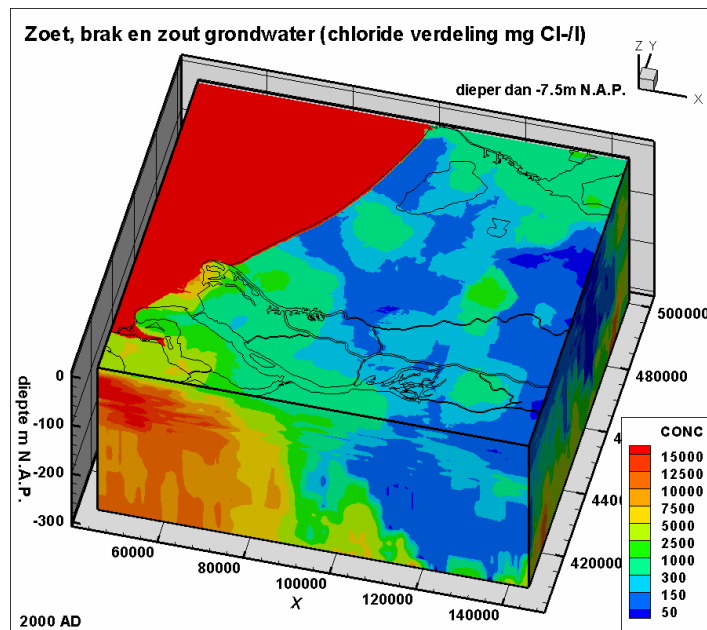
chloridevervuiling", TNO rapport 2006-U-R0080/A, 84 p., TNO Bouw en Ondergrond, Utrecht.

- Stuyt, L.C.P.M., *et al.*, 2006, Transitie en toekomst van Deltalandbouw, Indicatoren voor de ontwikkeling van de land- en tuinbouw in de Zuidwestelijke Delta van Nederland, Alterra-rapport 1132, Wageningen, 2006.
- Stuurman, R. et al., 2007, Toekomst van de Nederlandse grondwatervoorraad in relatie tot klimaatverandering, TNO rapport, concept, in opdracht van VROM, 81 p.
- Vliet, M., van, 2007, Impact of climate change on groundwater, Review, IGRAC (International Groundwater Resources Assessment Center), 34 p.

A Initiële chloride concentratie verdelingen



Figuur A1: Ruimtelijk verdeling chloride concentraties (mg Cl-/l) in de provincie Zuid-Holland, zoals gebruikt in de TNO 2004 studie.



Figuur A2: Sterk verbeterde ruimtelijk verdeling chloride concentraties (mg Cl-/l) in de provincie Zuid-Holland zoals gebruikt in deze verkennende studie. Behalve analyses zijn ook VES en boorgatmetingen meegenomen. Bovendien is een andere interpolatietechniek gebruikt.

B Korte beschrijving MOCDENS3D

MOCDENS3D

De softwarecode die gebruikt wordt voor dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming en gekoppeld stoftransport is MOCDENS3D (Oude Essink, 1998, 2000; Vugt *et al.*, 2003). De code is gebaseerd op de volgende twee codes, die volledig geïntegreerd zijn: 1. MODFLOW (McDonald en Harbaugh, 1988) aangepast voor dichtheidafhankelijke grondwaterstroming, en 2. MOC3D (Konikow *et al.*, 1996) voor de verplaatsing van zoet, brak en zout grondwater. De code is een samenvoeging van state-of-the-art software op het gebied van zowel grondwaterstroming als stoftransport. Met MOCDENS3D is het mogelijk niet-stationaire stroming van zoet, brak en zout grondwater te modelleren. Deze code bestaat uit een module voor grondwater en een module voor stoftransport die aan elkaar gekoppeld zijn.

Voorafgaand is MOCDENS3D toegepast in een flink aantal zoet-zout studies in Nederland, zoals Project Groot Geohydrologisch Onderzoek Texel (in samenwerking met Witteveen+Bos, 2000), Project Het Zout der Aarde (verziltiononderzoek Hoogheemraadschap van Rijnland, in samenwerking met KIWA, 2005); bij de bepaling van de toekomstige verzilting van het grondwater in Zuid-Holland (Minnema *et al.*, 2004); de effectenberekening van Bodemdaling in Barradeel II, Friesland (Wetterskip Fryslân, 2005); bij de bepaling van de effecten van de Hoofdwegverbinding A6-A9 op zoet-zout grondwater nabij het Naardermeer (Oude Essink *et al.*, 2006); bij de bepaling van de effecten van zomerbedverdieping van het stuwpand Sambeek op de drinkwaterwinning (Oude Essink, G.H.P. & Kleine, M., 2006); en bij de bepaling van de Nederlandse grondwatervoorraad in relatie tot klimaatverandering, (Stuurman, R. *et al.*, concept, 2007).

Dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming

In het grondwatersysteem van de provincie Zuid-Holland is de dichtheidsverdeling in de kustzone zodanig dat er rekening moet worden gehouden met het effect van dichtheidverschillen op de grondwaterstroming. Omdat zout grondwater zwaarder is dan zoet (of brak) grondwater, beïnvloedt het de stroming van water in de ondergrond. Zo kan zout grondwater in een natuurlijk hydrogeologisch systeem (dus zonder externe spanningen als onttrekkingen of peilverlagingen) door drukverschillen zoet grondwater wegdrücken (de welbekende zoutwaterintrusie in watervoerende pakketten). Aan de andere kant kan zoet grondwater, doordat het lichter is, juist op het zoute grondwater blijven drijven en in grote mate een min of meer geïsoleerd grondwatersysteem in stand houden. Zo drijft in het Nederlandse duingebied zoet grondwater (dichtheid van 1000 kg/m³) op zout grondwater (dichtheid van ongeveer 1022 kg/m³), in de vorm van een zoetwaterlens.

Correcties naar zoetwaterstijghoogte

Terwijl onder normale omstandigheden (d.w.z. met een dichtheid van zoet grondwater) gewerkt kan worden met 'gewone' stijghoogten, moet je in een situatie met zoet, brak en zout grondwater alles omrekenen naar drukken. Opgeloste stoffen in het grondwater verhogen namelijk de druk. De meeste hydro(geo)logen vinden het werken met stijghoogte echter prettiger. Daarom worden alle gemeten stijghoogten waar het grondwater niet zoet is gecorrigeerd voor de dichtheid. Om dit aspect mee te nemen moet de stijghoogte worden omgerekend naar een zogenaamde equivalente *zoetwaterstijghoogte*.

De zoetwaterstijghoogte is eigenlijk een fictieve parameter zonder fysische betekenis. De fysische interpretatie van zoetwaterstijghoogten patronen is niet gemakkelijk. Zo staan zoetwaterstijghoogten niet meer loodrecht op stroomlijnen als de dichtheid varieert, en betekent een gradiënt in zoetwaterstijghoogte niet automatisch dat er stroming van grondwater optreedt. De noodzakelijke correcties voor de dichtheid kunnen significant zijn: een filterbuis gevuld met 20 m zout grondwater heeft een equivalente zoetwaterstijghoogte van 20.5 m: een verschil van 0.5m (Santing, 1980; Oude Essink, 2001).

Referenties:

- KIWA (2005), Het zout der aarde: kwantificeren van de toekomstige vraag naar en beschikbaarheid van goed water voor Rijnland; onderzoeksrapport in opdracht van het Hoogheemraadschap van Rijnland.
- Konikow, L.F., D.J. Goode & G.Z. Hornberger (1996), A three-dimensional method-of-characteristics solute-transport model (MOC3D); U.S.G.S. Water-Resources Investigations Report 96-4267, 87 p.
- McDonald, M.G. & A.W. Harbaugh (1988), A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model; U.S.G.S. Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, Chapter A1, 586 pp.
- Minnema, B., Kuijper, B., & Oude Essink, G.H.P., 2004, Bepaling van de toekomstige verzilting van het grondwater in Zuid-Holland, NITG 04-189-B, 86 p., Utrecht, TNO Bouw en Ondergrond.
- Oude Essink, G.H.P. (1998), Simuleren van 3D dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming: MOCDENS3D. Stromingen 4(1): 5-23.
- Oude Essink, G.H.P. (2000), Zoutwaterintrusie in het grondwatersysteem van de Kop van Noord-Holland, Een toepassing van de driedimensionale computer code MOCDENS3D, Stromingen, 6(3), 9-21.
- Oude Essink, G. H. P. (2001). Density dependent groundwater flow: salt water intrusion and heat transport. Lecture notes, Utrecht University, Institute of Earth Sciences, The Netherlands, 136 p.
- Oude Essink, G.H.P. & R.J. Stuurman, (2006), Onderzoek naar de effecten van de Hoofdwegverbinding A6-A9 op zoet-zout grondwater nabij het Naardermeer, 2006-U-R0072/A, 37 p.
- Santing, G. (1980). "Een probleem bij de stroming van zoet en zout grondwater: de correcties op de stijghoogten, (in Dutch)." H2O 13(22): 544-548.
- Stuurman, R. et al., 2007, Toekomst van de Nederlandse grondwatervoorraad in relatie tot klimaatverandering, TNO rapport, concept, in opdracht van VROM, 81 p.
- Vugt, A., van, Oude Essink, G.H.P. & Biesheuvel, A. (2003), Modelleren van het zoet-zout grondwatersysteem op Texel, Stromingen, 9(1), 33-46.
- Wetterskip Fryslân (2005), Bodemdaling Barradeel II Inrichtingsplan, samenwerking tussen Arcadis en TNO.
- Witteveen & Bos (2000), Groot Geohydrologisch Onderzoek Texel; onderzoeksrapport in opdracht van Provincie Noord-Holland, Waterschap Hollands Kroon, Hoogheemraadschap van Uitwaterende Sluizen en Gemeente Texel.

C KNMI' 06 klimaatscenario's

Tabel C.1: Klimaatscenario's rond 2050 voor Nederland ten opzichte van 1990 (KNMI, 2006).

2050		G	G+	W	W+
Wereldwijde temperatuurstijging		+1°C	+1°C	+2°C	+2°C
Verandering in luchtstromingspatronen in West Europa		nee	ja	nee	ja
Winter	gemiddelde temperatuur	+0,9°C	+1,1°C	+1,8°C	+2,3°C
	koudste winterdag per jaar	+1,0°C	+1,5°C	+2,1°C	+2,9°C
	gemiddelde neerslaghoeveelheid	+4%	+7%	+7%	+14%
	aantal natte dagen (≥0,1 mm)	0%	+1%	0%	+2%
	10-daagse neerslagsom die eens in de 10 jaar wordt overschreden	+4%	+6%	+8%	+12%
	hoogste daggemiddelde windsnelheid per jaar	0%	+2%	-1%	+4%
	Zomer	gemiddelde temperatuur	+0,9°C	+1,4°C	+1,7°C
	warmste zomerdag per jaar	+1,0°C	+1,9°C	+2,1°C	+3,8°C
	gemiddelde neerslaghoeveelheid	+3%	-10%	+6%	-19%
	aantal natte dagen (≥0,1 mm)	-2%	-10%	-3%	-19%
	dagsom van de neerslag die eens in de 10 jaar wordt overschreden	+13%	+5%	+27%	+10%
	potentiële verdamping	+3%	+8%	+7%	+15%
Zeespiegel	absolute stijging	15-25 cm	15-25 cm	20-35 cm	20-35 cm

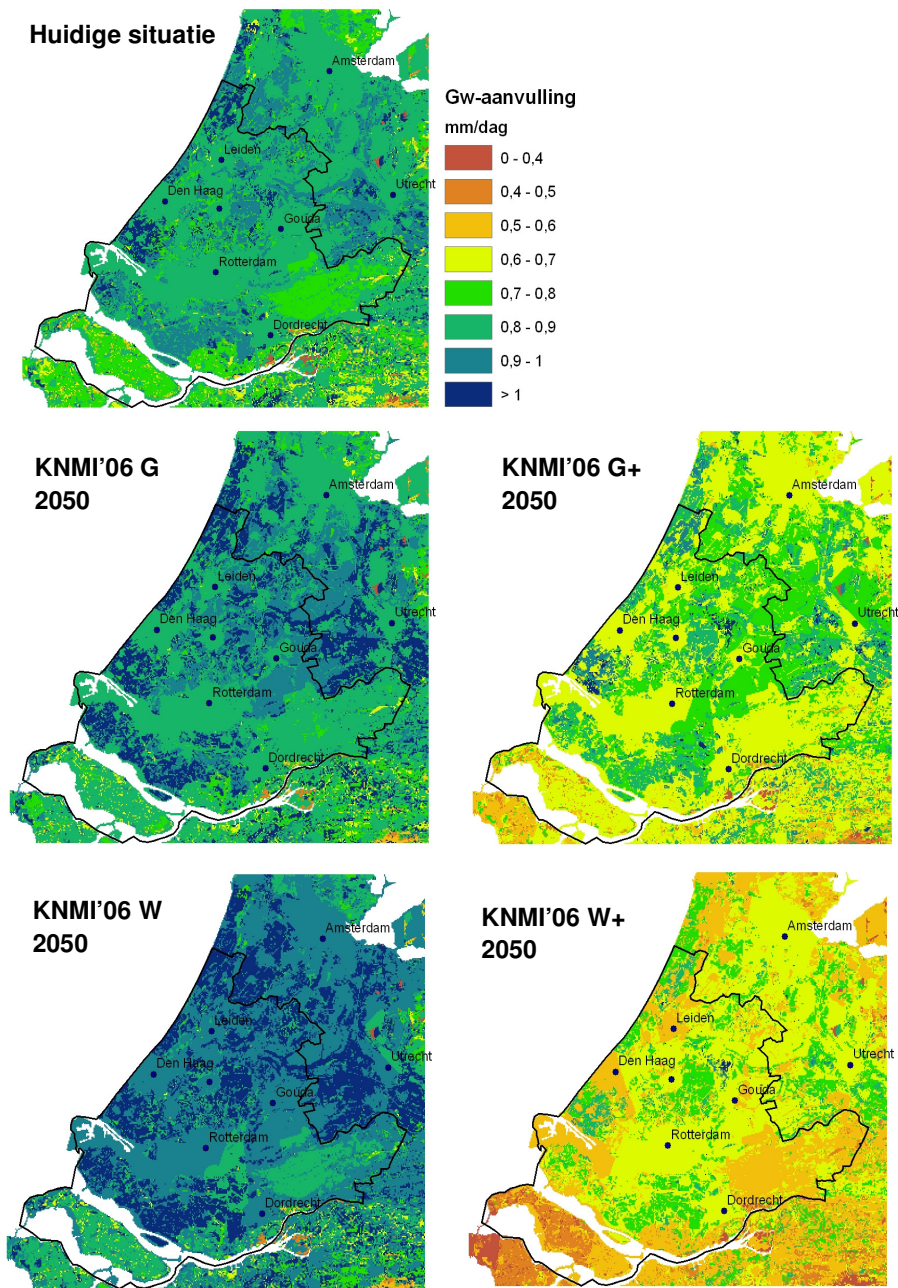
Tabel C.2: Klimaatscenario's rond 2100 voor Nederland ten opzichte van 1990 (KNMI, 2006).

2100		G	G+	W	W+
Wereldwijde temperatuurstijging in 2050		+1°C	+1°C	+2°C	+2°C
Wereldwijde temperatuurstijging in 2100		+2°C	+2°C	+4°C	+4°C
Verandering in luchtstromingspatronen in West Europa		nee	ja	nee	ja
Winter	gemiddelde temperatuur	+1,8°C	+2,3°C	+3,6°C	+4,6°C
	koudste winterdag per jaar	+2,1°C	+2,9°C	+4,2°C	+5,8°C
	gemiddelde neerslaghoeveelheid	+7%	+14%	+14%	+28%
	aantal natte dagen (≥ 0,1 mm)	0%	+2%	0%	+4%
	10-daagse neerslagsom die eens in de 10 jaar wordt overschreden	+8%	+12%	+16%	+24%
	hoogste daggemiddelde windsnelheid per jaar	-1%	+4%	-2%	+8%
Zomer	gemiddelde temperatuur	+1,7°C	+2,8°C	+3,4°C	+5,6°C
	warmste zomerdag per jaar	+2,1°C	+3,8°C	+4,2°C	+7,6°C
	gemiddelde neerslaghoeveelheid	+6%	-19%	+12%	-38%
	aantal natte dagen (≥ 0,1 mm)	-3%	-19%	-6%	-38%
	dagsom van de neerslag die eens in de 10 jaar wordt overschreden	+27%	+10%	+54%	+20%
	potentiële verdamping	+7%	+15%	+14%	+30%
Zeespiegel	absolute stijging	35-60 cm	35-60 cm	40-85 cm	40-85 cm

De zeespiegelstijging (zss) en veranderende neerslag en verdamping zijn als volgt verwerkt in het model:

	Zss tot 2050	Zss tot 2100	Neerslag 2050 (tov 2000)	Verdamping 2050 (tov 2000)	Neerslag 2100 (tov 2000)	Verdamping 2100 (tov 2000)
G	+30 cm	+60 cm	+3.5%	+1.5%	+6.5%	+3.5%
G+	+30 cm	+60 cm	-1.5 %	+4%	-2.5%	+7.5%
W	+42.5 cm	+85 cm	+6.5%	+3.5%	+13%	+7%
W+	+42.5 cm	+85 cm	-2.5 %	+7.5%	-5%	+15%

D Grondwateraanvulling



Figuur D1: Grondwateraanvulling (mm/dag) voor huidige situatie en berekend op basis van KNMI'06 scenario's voor 2050.

E Zoutvracht naar het oppervlaktewatersysteem 2075

Tabel E1: Totale zoutvracht in ton/jaar voor de deelgebieden zoals gedefinieerd in figuur 23.

zoutvracht in ton/jaar	2000	2075 autonoom	2075 G	2075 G+	2075 W	2075 W+
1. Goeree-Overflakkee	19000	17500	34100	35300	33700	36400
2. Voorne-Putten	9400	10600	14200	14100	14200	14000
3. Hoeksche Waard	5200	5100	6900	7100	6900	7200
4. Westland	400	400	800	800	800	800
5. Midden-Delfland	2300	2300	2700	2700	2700	2700
6. Bollenstreek	3700	4400	6300	5600	6500	5000
7. Haarlemmermeer	45600	58800	59400	58700	59600	58000
8. Tempelpolder	1100	900	1000	1100	1000	1100
9. RZG driehoek	6000	7000	6800	6900	6800	7000
10. Polder Nieuwkoop	4000	4200	4000	4100	3900	4200
11. Polder vierambacht	2600	2700	2600	2600	2600	2600