

TNO-rapport

2008-U-R0074/B

**Toekomst van de Nederlandse grondwatervoorraad
in relatie tot klimaatverandering**

Datum	januari 2008
Auteur(s)	Roelof Stuurman Paul Baggelaar Wilbert Berendrecht Jelle Buma Perry de Louw Gualbert Oude Essink
Opdrachtgever	Ministerie van Verkeer en Waterstaat, DG Water
Projectnummer	034.79229
Aantal pagina's	85
Goedgekeurd door	Hans Gehrels

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

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

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

Samenvatting

In het licht van de klimaatdiscussie is een onderzoek verricht om de volgende vragen te beantwoorden;

Hoe gaat de zoete grondwatervoorraad in Nederland zich naar de toekomst ontwikkelen? Zal de grondwatervoorraad toe- of afnemen? Is het mogelijk dat er schaarste voor mens en natuur ontstaat?

Om deze vragen te beantwoorden is gebruik gemaakt van een grondwatermodel voor heel Nederland waarin dichtheidsstroming t.g.v. verschillen in zoutgehalte wordt beschouwd. Tevens is een bestaand gedetailleerd grondwatermodel gebruikt dat de provincies Groningen, Friesland, Drenthe, Overijssel en een deel van Gelderland omvat (MIPWA).

Met behulp van deze modellen is de huidige (referentie) grondwatersituatie (1976-2005) vergeleken met de grondwatersituatie die onder het W+ scenario (2036-2065) wordt berekend.

Uit deze analyse blijkt dat de totale zoetwater grondwatervoorraad in Nederland ca 1100 miljard m³ omvat. Deze totale voorraad zal de komende 100 jaar slechts weinig veranderen. Zonder klimaatverandering, zeespiegelrijzing en bodemdaling zou deze voorraad met ca 1.3% toenemen, terwijl deze voorraad bij het W+ scenario, een zeespiegelrijzing van 85 cm en een bodemdaling met maximaal 1.0% zal toenemen, een verschil van 0.3% oftewel 3 miljard m³ zoet grondwater. De komende tientallen jaren kan over het algemeen de zoetwatervoorraad in de duingebieden in het kustgebied groter worden, als gevolg van de afname van grondwateronttrekkingen. Daarna neemt de invloed van de zeespiegelstijging steeds meer toe, en zal de voorraad zeer langzaam weer afnemen. Op basis van de (MIPWA)modelberekeningen in Noord-Nederland wordt geconcludeerd dat de grondwaterstanden binnen infiltratiegebieden enkele decimeters tot meer dan 1 meter (Veluwe, Hondsrug) zullen toenemen. Dit kan leiden tot vernatting (wateroverlast door hoge grondwaterstanden, toename basisafvoer waterlopen, toename kwel) langs de randen van deze infiltratiegebieden. Binnen de ontwaterde gebieden uit de klimaatverandering zich in een grotere oppervlaktewaterafvoer in de winter en lage grondwaterstanden in de zomer. Hierdoor zou de beregeningsvraag in Noord-Nederland volgens MIPWA gemiddeld (over een periode van 30 jaar) met ca 15 % toenemen. Deze processen kunnen zondermeer vertaald worden naar de rest van Nederland. De invloeden kunnen kwantitatief wel binnen Nederland verschillen.

Om de modelresultaten te onderbouwen en te controleren is apart aandacht besteed aan de ontwikkeling van de grondwateraanvulling in relatie tot het W+ scenario. Hiervoor is een literatuurstudie verricht en hebben enkele eenvoudige berekeningen plaatsgevonden. Deze analyse onderschrijft grotendeels de modelresultaten. Op de hoge zandgronden zal de grondwateraanvulling met enkele tientallen millimeters toenemen, terwijl in de ontwaterde gebieden de aanvulling met enkele tientallen millimeters kan afnemen. Dit zal de vraag naar beregening sterk doen toenemen. Uit de analyse blijkt ook dat de gehanteerde grondwatermodellen goed bruikbaar zijn, ondanks dat enkele klimaatgerelateerde, en voor grondwateraanvulling relevante processen, zoals verdampingsafname t.g.v. CO₂ toename en bodemvochtveranderingen t.g.v. afname organische stof, niet zijn meegenomen.

Over de actuele grondwateronttrekking ten behoeve van beregening en de gevolgen voor natuur en het watersysteem is weinig bekend, laat staan over de beregeningsbehoefte in de toekomst. Doormiddel van interviews, literatuurstudie en enkele eenvoudige berekeningen is meer kennis verkregen over het beregeningsvraagstuk. In een jaar met een gemiddeld neerslagtekort wordt in Nederland momenteel ca 100 miljoen m³ grondwater voor beregening onttrokken. Dit is 8-9 % van de totale grondwateronttrekking in Nederland. In een droog jaar kan dit oplopen tot 150-200 miljoen m³ (12-15% van de totale onttrekking). Het bijzondere van deze onttrekking is dat deze binnen een zeer kort tijdbestel plaatsvindt (1 of meer perioden van enkele dagen). In deze korte periode is deze onttrekking voor beregening 2-3 maal groter dan alle andere onttrekkingen in Nederland. Klimaatsverandering kan leiden tot een toename van de jaarlijkse beregeningsvraag van 5% (G scenario) tot 70% (W+ scenario). Daarnaast kunnen andere factoren als schaalvergroting en verschuiving naar vollegrondsgroenten tot een toename leiden. Een toename kan leiden tot extra verdroging van natuurgebieden of droogval met waterlopen.

Het verschil in voorspelde toename van beregening door het MIPWA (Noord-Nederland model) en de statistische benadering (respectievelijk 15% en 70%) kan samenhangen met verschillen in berekeningsmethoden, maar ook omdat de laatste (70%) voor heel Nederland is bepaald. Vooral Zuid-Nederland kent een grotere beregeningsvraag.

Ten slotte is bestudeerd wat de effecten van klimaatsverandering zijn voor zogenaamde regenwaterlenzen in gebieden met brakke of zoute kwel (Zeeland, Hoekse Waard, Haarlemmermeer, Noord-Friesland en – Groningen etc.). Deze zoete waterlenzen maken landbouw (o.a. aardappelen) mogelijk en bepalen tevens de natuurwaarden. Door een afname van het neerslagoverschot in de zomer worden deze lenzen bedreigd. Ze kunnen significant in dikte afnemen waardoor de kans op zoutschade kan toenemen. Wel kan met lokale perceelsmaatregelen (slootpeilverlaging, kwelreductie) deze verzilting worden bestreden. Tevens mag worden verwacht de het oppervlaktewater in deze gebieden in de zomer zal verzilten omdat er minder zoet neerslagwater voor de verdunning van het zoute kwelwater beschikbaar komt.

Samenvattend en de hoofdvraag beantwoordend kan het volgende worden geconcludeerd. De grondwatervoorraad op landelijke schaal zal als gevolg van de klimaatverandering niet afnemen maar minder toenemen. De verklaring hiervoor is dat het neerslagoverschot in de winter zal toenemen en dat dit water in de zomer te ver is weggezaakt om door vegetatie te kunnen worden opgenomen. In infiltratiegebieden veroorzaakt dit een toename van de grondwateraanvulling dat o.a. leidt tot hogere grondwaterstanden ter plaatse en een toename van de verzoeting van het diepe brakke of zoute grondwater. De zoete grondwatervoorraad die van belang is voor drinkwatervoorziening en kwelafhankelijke natuur wordt aldus niet bedreigd. Gelijkertijd zal landbouw en natuur in de ontwaterde gebieden in de zomer echter lijden onder watertekorten. Hier wordt de winterneerslag namelijk snel via het oppervlaktewater afgevoerd en zal de verdamping in de zomer toenemen. Naar verwachting zal de vraag naar beregening uit grondwater in deze gebieden sterk toenemen. Natuur en basisafvoer van beken kan hieronder gaan lijden. In gebieden met brakke tot zoute kwel, maar waar nu wel zoete grondwaterlenzen aanwezig zijn, kan zomers zoutschade ontstaan. Ook het oppervlaktewater in deze gebieden zal verzilten.

Ter afsluiting moet nog worden gesteld dat bij deze studie uitsluitend gekeken is naar de fysisch hydrologische aspecten. Vermoedelijk zal klimaatverandering leiden tot veranderingen in het landgebruik en gebiedsbeheer en van significante invloed zijn voor het grondwatersysteem.

Inhoudsopgave

	Samenvatting.....	3
1	Inleiding.....	9
1.1	Doelstelling.....	9
1.2	Werkzaamheden.....	9
1.3	Gebruik van klimaatscenario's	10
1.4	Rapportage.....	12
2	Ontwikkeling volume zoet grondwater in Nederland.....	13
2.1	Inleiding.....	13
2.2	Huidige zoetwatervoorraad in Nederland	16
2.3	Grote zoetwaterlenzen in duingebieden:.....	17
2.4	Regionale veranderingen in zoetwatervoorraad in Nederland: een numeriek model	19
2.5	Conclusies.....	22
2.6	Literatuur	23
3	Verandering in grondwateraanvulling en freatische grondwaterstanden in Noord-Nederland	25
3.1	Inleiding.....	25
3.2	Korte modelbeschrijving.....	25
3.3	Resultaten	26
3.4	Literatuur	32
4	Ontwikkeling grondwateraanvulling	33
4.1	Inleiding.....	33
4.2	Definities en afbakening	33
4.3	Van neerslag naar grondwateraanvulling.....	34
4.4	Grondwateraanvulling in Nederland.....	36
4.5	Toekomstige ontwikkelingen onder het KNMI-2006 W+ scenario.....	38
4.6	Synthese en conclusie	46
4.7	Literatuur	50
5	Ontwikkeling berekening uit grondwater.....	53
5.1	Inleiding.....	53
5.2	Achtergronden van berekening.....	53
5.3	Omvang van berekening uit grondwater.....	56
5.4	Wat betekent berekening voor het grondwatersysteem?.....	62
5.5	Welke ontwikkelingen zijn er nog te verwachten?	64
5.6	Samenvattende conclusies	68
5.7	Literatuur	69
6	Zoetwaterlenzen in zout laag-Nederland	71
6.1	Inleiding.....	71
6.2	Typen zoetwaterlenzen en bepalende factoren	72
6.3	Effect van klimaatverandering op zoetwaterlenzen	79
6.4	Conclusies.....	83
6.5	Literatuur	84
7	Synthese en eindconclusies.....	85

1 Inleiding

1.1 Doelstelling

Deze studie is een vervolg op de eerdere studie die is uitgevoerd in opdracht van DG Water, “Schetsen van het Nederlandse grondwatersysteem in 2050”. Naar aanleiding van dit rapport heeft DG Water een drietal onderzoeksvragen geformuleerd;

- (1) een verkenning naar de ontwikkeling van de grondwatervoorraad,
- (2) een verkenning naar de ontwikkeling en effecten van Warmte-Koude Opslag en
- (3) de risico's voor opbarsting in relatie tot zee- en rivierpeilstijging.

Dit rapport probeert een antwoord te geven op de eerste vraag. De hoofddoelstelling van dit onderzoek luidt:

Hoe gaat de zoete grondwatervoorraad zich naar de toekomst ontwikkelen? Zal de grondwatervoorraad toe- of afnemen? Is het mogelijk dat er schaarste voor mens en natuur ontstaat?

1.2 Werkzaamheden

Het onderzoek is opgesplitst in verschillende (deel-)activiteiten. Al deze activiteiten hebben als doel om verschillende (schaalafhankelijke) processen te bestuderen. Tijdens de laatste activiteit wordt de ontwikkelde kennis vertaald naar de betekenis voor heel Nederland. Tijdens de analyse worden zowel de directe als de indirecte gevolgen van klimaatverandering op de grondwatervoorraad beschouwd. Bij directe invloeden wordt rekening gehouden met veranderde neerslag – en verdampingspatronen, zeespiegelrijzing en maaiveld daling. Indirecte invloeden bestaan uit de toename van irrigatie water (berekening uit grondwater) en toename van Warmte Koude Opslag (om CO₂ emissie terug te dringen).

Activiteit 1: ontwikkeling volume grondwatervoorraden in Nederland in relatie tot verschuiving zoet-brak-zout overgangen. TNO heeft recent een zoet-zout grondwatermodel voor heel Nederland opgezet om de effecten van zeespiegelrijzing op het grondwatersysteem in te schatten. Dit model kan worden gebruikt om de volgende vragen te beantwoorden:

- a. *In hoeverre zou de grondwatervoorraad (volume zoet water) veranderen als er geen sprake zou zijn van klimaatverandering?*
- b. *Hoe verandert de grondwatervoorraad daarnaast door klimaatverandering en zeespiegelrijzing?*

Gewenst resultaat: kennis over de verschuiving van de onderzijde (zoet-zout overgang) van de watervoorraad als gevolg van autonome- en klimaatsprocessen.

Activiteit 2: bepaling van de verandering in grondwateraanvulling en freatische grondwaterstanden in Noordoost Nederland (provincies Groningen, Drenthe, Friesland en Overijssel). Voor bovenstaande provincies is recent een zeer gedetailleerd grondwatermodel opgesteld. Met behulp van dit model is het effect van

klimaatverandering op het grondwatersysteem ruimtelijk doorgerekend. De berekeningen worden uitgevoerd voor het KNMI W+ scenario.

Gewenst resultaat: ruimtelijke informatie over het effect van klimaatverandering op het watersysteem voor een zeer groot gebied. Hierbij worden verschillen getoond in GLG, GHG en grondwatervoeding. Deze kennis kan worden 'geëxtrapoleerd' naar de rest van Nederland.

Activiteit 3: bepaling van de verandering in grondwateraanvulling en freatische grondwaterstand voor een aantal representatieve profielen; Tijdens deze activiteit wordt gedetailleerd onderzocht (incl., literatuurverkenning) wat het effect is van klimaatverandering op de grondwateraanvulling waarbij uitgegaan wordt van het W+ klimaatsscenario. Hierbij worden factoren als interceptieverdamping (verdamping in/op de boomkruinen), bodemvochtprocessen meegenomen.

Gewenst resultaat: procesmatige kennis over de grondwateraanvullingsverandering als gevolg van klimaatverandering.

Activiteit 4: ontwikkeling grondwateronttrekking ten behoeve van beregening en bepaling effect op grondwatervoorraden. In het Nederlandse zandgebied is het aantal grondwateronttrekkingen voor beregening van landbouwgronden de afgelopen decennia aanzienlijk toegenomen. Vooral na droge jaren werden veel nieuwe putten geïnstalleerd. Tijdens deze activiteit wordt getracht een schatting te maken van toename van beregeningsonttrekking t.g.v. klimaatverandering. Hiervoor wordt informatie verzameld bij provincies en gebruik gemaakt van bestaande modelstudies. Ten slotte wordt aangegeven wat het effect van deze onttrekkingen op het grondwatersysteem is.

Gewenst resultaat: inzicht over het effect van de actuele onttrekking ten behoeve van beregenen en verwachte onttrekking t.g.v. klimaatverandering.

Activiteit 5: ontwikkeling regenwaterlenzen in gebieden met een brak-zout ondergrond. Naast het begrijpen van de effecten van klimaatverandering op de regionale grondwatervoorraad is een beter begrip van het effect op lokale zoetwatervoorkomens gewenst. De zoetwaterlenzen zijn van belang voor terrestrische natuur en landbouwgewassen. In een tweedimensionaal model (een profiel tussen 2 sloten met en zonder buisdrainage) wordt de dynamiek van deze regenwaterlens t.g.v. klimaatverandering berekend.

Gewenst resultaat: kennis over de risico's voor verzilting van natuurlijke- en landbouwgewassen t.g.v. klimaatverandering (W+)

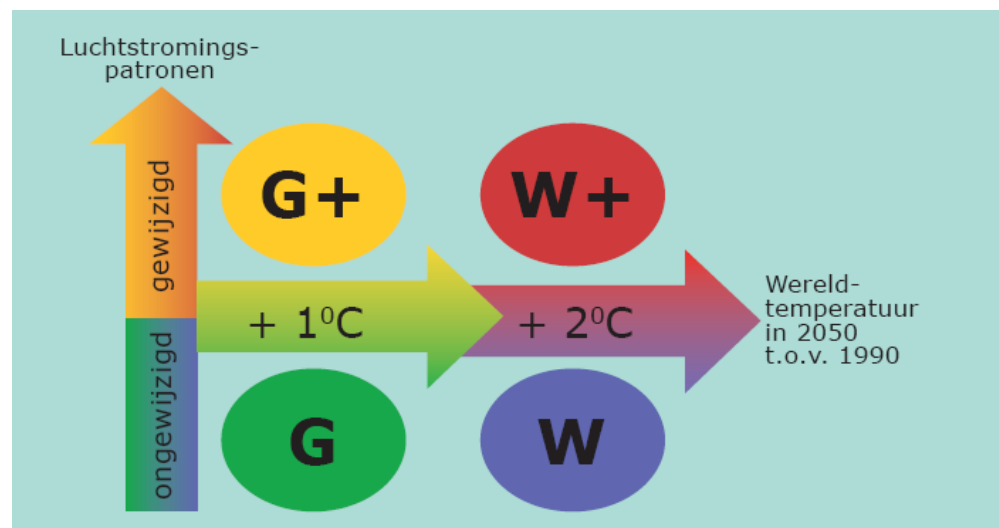
Activiteit 6: synthese. Tijdens deze eindactiviteit worden de resultaten uit de hierboven beschreven activiteiten vertaald naar de betekenis voor de toekomst van de Nederlandse grondwatervoorraad en het grondwatersysteem. Hierbij wordt voor de effecten van WKO onderscheid gemaakt naar de gevolgen voor de grondwatervoorraden en de gevolgen voor het grondwatersysteem.

1.3 Gebruik van klimaatscenario's

Deze paragraaf beschrijft kort welk klimaatscenario is gebruikt voor het bepalen van de verandering in grondwateraanvulling en freatische grondwaterstanden. Uitgebreide achtergrondinformatie over de totstandkoming van de KNMI'06 scenario's is onder andere te vinden in Lenderink et al. (2007), Van den Hurk et al. (2006) en op de KNMI website (<http://www.knmi.nl/klimaatscenario's>).

Het KNMI heeft een viertal klimaatscenario's ontwikkeld voor een mogelijk toekomstig klimaat (Figuur 1.1). In deze scenario's komt een aantal dezelfde kenmerken van de klimaatverandering in Nederland en omgeving naar voren:

- De opwarming zet door, hierdoor komen zachte winters en warme zomers vaker voor;
- De winters worden gemiddeld natter en ook de extreme neerslaghoeveelheden nemen toe;
- De hevigheid van extreme regenbuien in de zomer neemt toe, maar het aantal zomerse regendagen wordt juist minder;
- De berekende veranderingen in het windklimaat zijn klein ten opzichte van de natuurlijke grilligheid;
- De zeespiegel blijft stijgen.



Figuur 1.1 Schematisch overzicht van de vier KNMI'06 klimaatscenario's (bron: KNMI brochure "Klimaat in de 21^e eeuw – vier scenario's voor Nederland").

Voor deze studie is gebruik gemaakt van het W+ scenario. Dit scenario gaat dus uit van een wereldwijde temperatuurstijging in 2050 van 2 °C en een verandering in luchtstromingspatronen in West Europa. In Tabel 1.1 zijn enkele kentallen opgenomen die karakteristiek zijn voor dit scenario.

Tabel 1.1 Klimaatverandering in Nederland rond 2050 ten opzichte van het basisjaar 1990 volgens het W+ klimaatscenario. Het klimaat in het basisjaar 1990 is beschreven met gegevens van 1976 tot en met 2005. Onder “winter” wordt hier verstaan december, januari en februari, “zomer” staat gelijk aan juni, juli en augustus (bron: KNMI brochure “Klimaat in de 21^e eeuw – vier scenario’s voor Nederland”).

2050	W+
Wereldwijde temperatuurstijging	+2°C
Verandering in luchtstromingspatronen in West Europa	ja
Winter	
Gemiddelde temperatuur	+2,3°C
Koudste winterdag per jaar	+2,9°C
Gemiddelde neerslaghoeveelheid	+14%
Aantal natte dagen ($\geq 0,1$ mm)	+2%
10-daagse neerslagsom die eens in de 10 jaar wordt overschreden	+12%
Hoogste daggemiddelde windsnelheid per jaar	+4%
Zomer	
Gemiddelde temperatuur	+2,8°C
Warmste zomerdag per jaar	+3,8°C
Gemiddelde neerslaghoeveelheid	-19%
Aantal natte dagen ($\geq 0,1$ mm)	-19%
Dagsom van de neerslag die eens in de 10 jaar wordt overschreden	+10%
Potentiële verdamping	+15%

Voor het doorrekenen van effecten van klimaatverandering is een tweetal berekeningen nodig: een referentieberekening en een scenarioberekening. De referentieberekening is uitgevoerd voor de periode 1976-2005; de scenarioberekening voor de periode 2036-2065. Omdat het KNMI de scenariogegevens slechts voor enkele stations beschikbaar heeft, zijn de klimatologische gegevens van station Groningen gebruikt. Daggegevens van neerslag zijn rechtstreeks beschikbaar voor zowel de referentie- als de scenarioperiode. De verdamping voor de referentieperiode is berekend volgens Makkink (De Bruin, 1981) aan de hand van temperatuur en globale straling. Omdat de globale straling niet bekend is, is deze geschat uit de relatieve zonschijnduur. Voor de scenarioperiode is alleen de temperatuur beschikbaar. Om toch een schatting te kunnen maken van de verdamping, is de globale straling in de scenarioperiode gelijkgesteld aan die in de referentieperiode.

1.4 Rapportage

De volgorde in hoofdstukken is dusdanig gekozen dat aan het begin de landelijke en regionale grondwatermodelstudies worden behandeld. Daarna volgen de hoofdstukken over grondwateraanvulling en berekening die als aanvulling en nuancering dienen op de modelstudies. Ten slotte volgt de studie naar de toekomst van regenwaterlenzen in gebieden met brakke of zoute kwel.

2 Ontwikkeling volume zoet grondwater in Nederland

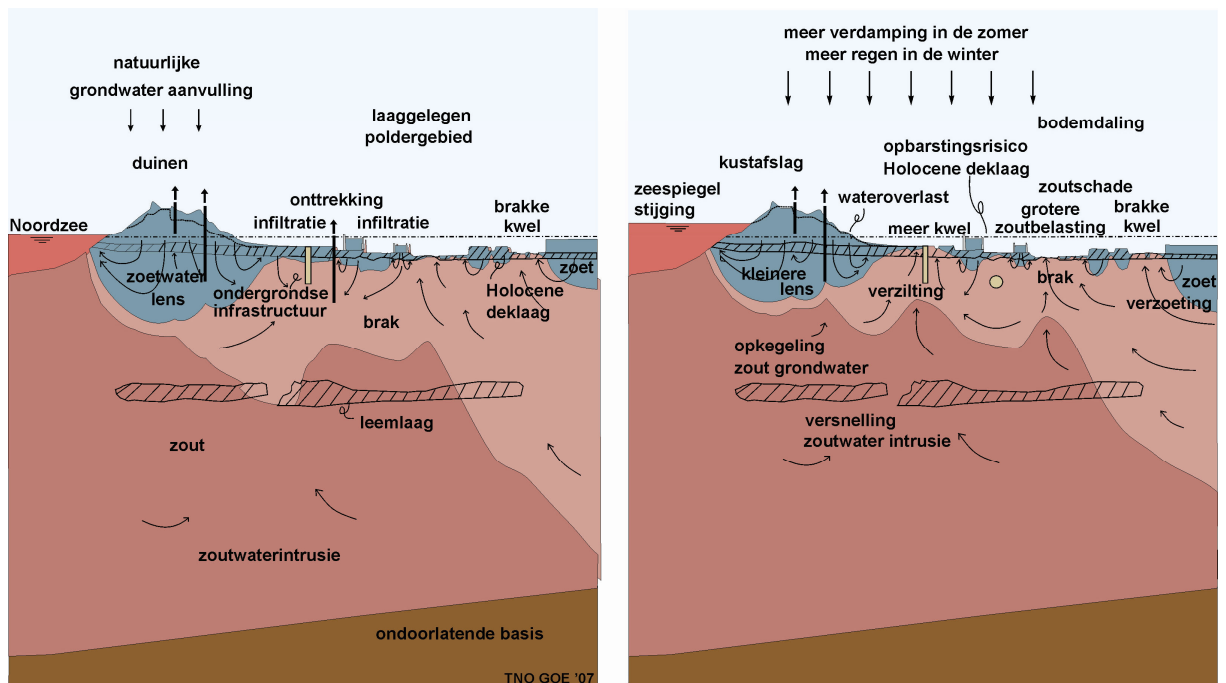
2.1 Inleiding

Toenemende menselijke activiteiten in onze delta, zowel aan het oppervlak als ondergronds zoals grondwateronttrekkingen en wijzigingen in landgebruik, leiden tot intensivering van het waterbeheer. Daarnaast wordt de druk op het watersysteem vergroot door fysische processen als bodemdaling, zeespiegelstijging en klimaatverandering in de vorm van een veranderd neerslag- en verdampingspatroon. Zo bevindt het grondwatersysteem in Nederland zich momenteel wat betreft de zoet-brak-zout verdeling nog niet in een dynamische evenwichtstoestand. Er liggen hier twee processen aan ten grondslag:

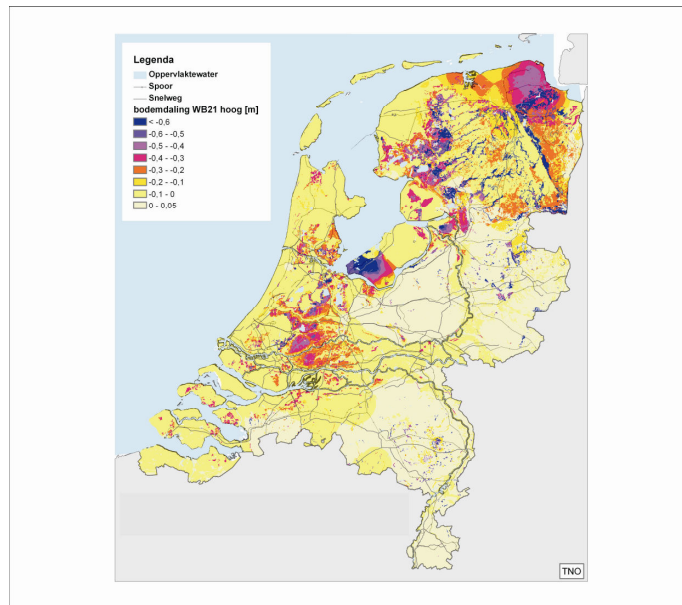
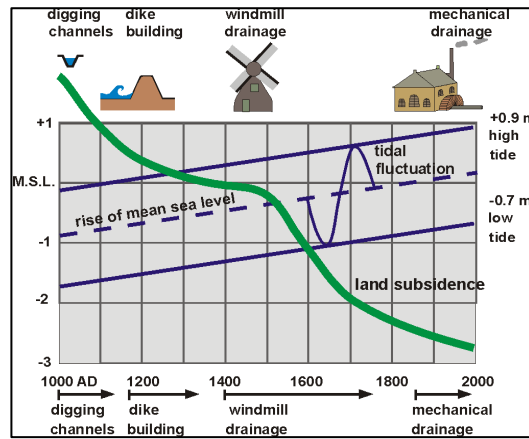
- (1) het autonome verziltingsproces in de laaggelegen gebieden: De verzilting van de ondergrond in de laaggelegen gebieden als diepe droogmakerijen is een omvangrijk, langzaam en nauwelijks omkeerbaar proces. Het peilverschil van één a twee meters tussen het zeeniveau en het achterliggende land veroorzaakt dat zeewater de watervoerende pakketten binnendringt en dat zout grondwater vanuit diepere (mariene) watervoerende pakketten opwelt (zie figuur 2.1). Dit verziltingsproces is al eeuwen aan de gang en wordt veroorzaakt door de continue daling van het maaiveld en daaraan gelieerd de daling van het oppervlaktewaterpeil. Natuurlijke ontwikkelingen en antropogene activiteiten liggen hieraan ten grondslag. Door ontwatering van de bodem (een traag en continu proces) en de aanleg van de laaggelegen droogmakerijen gedurende de 17de-19de eeuw (een relatief abrupte verandering in het maaiveld) is de bodem gedaald in de veen- en kleigebieden (figuur 2.2). Deze ontwikkelingen in het verleden hebben nog steeds invloed op de verdeling van zoet, brak en zout grondwater. Zelfs bij een constante zeespiegel zal het autonome verziltingproces nog een aantal eeuwen kunnen duren.
- (2) Grondwateronttrekkingen; Deze onttekkings hebben met name in het verleden op lokale schaal verzilting van de watervoerende pakketten veroorzaakt in de regio rondom de onttekkings. Zo hebben in de jaren 1950 in het duingebied van Waternet grote onttekkings in het eerste watervoerend pakket gezorgd voor een snelle opkegeling (upconing) van brak en zout grondwater (Stuyfzand, 1993) (figuur 2.3). Sindsdien is men overgeschakeld op kunstmatige infiltratie in het freatisch watervoerend pakket vanuit oppervlaktewater plassen. Grondwater werd vervolgens niet meer onttrokken uit het eerste watervoerend pakket. Het opgetrokken brakke en zout grondwater kon langzaam naar zeker wegzakken en/of zich in oostelijke richting naar de Haarlemmermeer verplaatsen.

Op dit moment (viz. 2002 AD) wordt iets meer dan 1500 miljoen m³ per jaar onttrokken, terwijl voor zo'n 250 miljoen m³ per jaar wordt geïnfilterd in bijvoorbeeld de duingebieden (netto 1250 miljoen m³ per jaar onttrokken) (data uit RIZA Grondwaterregister). Overigens is deze 1.25 miljard m³ per jaar een kleine speler in relatie tot de andere waterfluxen in het grondwatersysteem, zijnde de natuurlijke grondwateraanvulling (neerslag minus verdamping), toestroming vanuit de randen richting de laaggelegen delen, en tenslotte het afwateringssysteem dat via het drainagesysteem, sloten, boezems en rivieren veruit het meeste grondwater in Nederland afvoert.

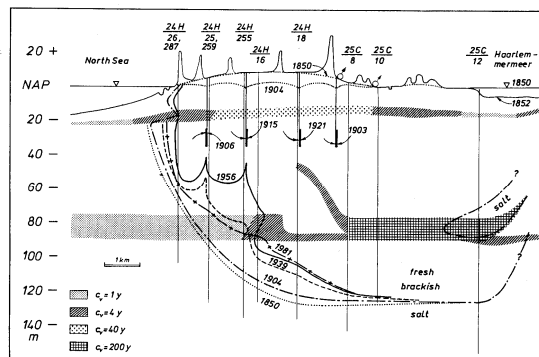
De verwachting is dat de verzilting van het grondwatersysteem op regionale schaal zal toenemen, vooral vanuit de diepere (mariene) watervoerende pakketten in de richting van de laaggelegen poldergebieden. Voorlopig zullen de verschillende inpolderingen en de voortgaande bodemdaling in deze droogmakerijen de grootste bijdrage aan het verziltingsproces leveren. Zeespiegelstijging zal op de middellange tot lange termijn in het westen van Nederland waarschijnlijk nog meer zout grondwater laten opwellen. Daarnaast treedt er lokaal op veel plaatsen verzoeting op: door het gecreëerde peilverschil tussen bijvoorbeeld de laaggelegen Flevopolders en de aangrenzende Veluwe stroomt zoet water het grondwatersysteem in; hetzelfde proces vindt waarschijnlijk plaats vanuit de duingebieden naar de laaggelegen poldersystemen (Stuurman et al., 2006). Lokaal is via dijkkwel een zoetwaterlens ter plaatse van de dijk te verwachten, terwijl in Zeeland in de zandige kreekruggen, die relatief hoog liggen t.o.v. de dalende kleiige platen zoet water gemakkelijker zal kunnen infiltreren (mits onttrekkingen beperkt blijven).



Figuur 2.1: Vereenvoudiging van het regionale grondwatersysteem in het kustgebied: a. huidige situatie, inclusief grondwateronttrekkingen en b. toekomstige situatie, met de processen die mogelijke zullen optreden. 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.



Figuur 2.2: a. Schets van de continue daling van het maaiveld en stijging van de zeespiegel gedurende de afgelopen 1000 jaar; lag 1000 jaar geleden het maaiveld nog gemiddeld 2.5 m boven het zeeniveau, momenteel ligt het land 2.5 m onder het zeeniveau (bron: G.P. van der Ven, 1993); b. verwachte bodemdaling in Nederland, tot het jaar 2050 AD conform WB21 Hoog scenario.

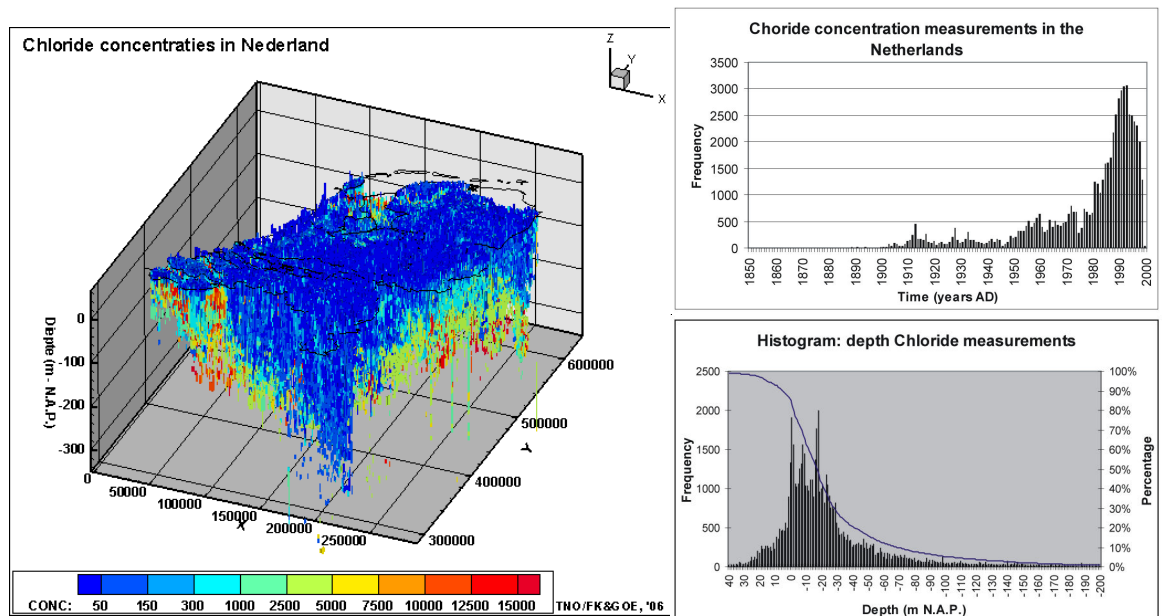


Figuur 2.3: Verandering in de positie van het brak-zout grensvlak in een geschematiseerd profiel over de duinen van Waternet ten zuiden van Zandvoort aan Zee (Stuyfzand, 1993).

2.2 Huidige zoetwatervoorraad in Nederland

Voor de bepaling van de huidige zoetwatervoorraad is gebruik gemaakt van de uitgebreide databestanden die bij TNO in beheer zijn (DINO Qua; zoet-zout REGIS, Kloosterman, 2007, concept), figuur 2.4:

- Chloride analyses. Ruim 60.000 in aantal, gemeten vanaf 1853. Slechts ongeveer 10% van de metingen ligt dieper dan -70m N.A.P., terwijl ongeveer 30% van de metingen brak of zout grondwater betreft (juist deze waarden zijn waardevol voor de bepaling van de zoet, brak en zout verdeling in Nederland).
- VES-metingen. Verticale Elektrische Sonderingen zijn geo-elektrische metingen vanaf het oppervlak die informatie geven over de lithologie en het zoutgehalte van grondwater. In combinatie met de temperatuur, het bicarbonaat (HCO_3)-gehalte ter plaatse en de geologische opbouw geeft een VES-meting een indicatie van het chloride-gehalte.
- Boorgatmetingen. Bij een boorgatmeting laat men een geofysisch apparaat (sonde) in een boorgat zakken en wordt de natuurlijke gamma straling en geo-elektrische weerstand gemeten. Op basis hiervan kan een schatting worden gemaakt van de hydrogeologische opbouw. Het chloride-gehalte is geschat op basis van een empirisch bepaalde relatie tussen het bicarbonaat-gehalte (HCO_3) en de elektrische geleidbaarheid (EC 20°C) inclusief temperatuurcorrectie van de elektrische weerstand van het grondwater (TNO, 1992).

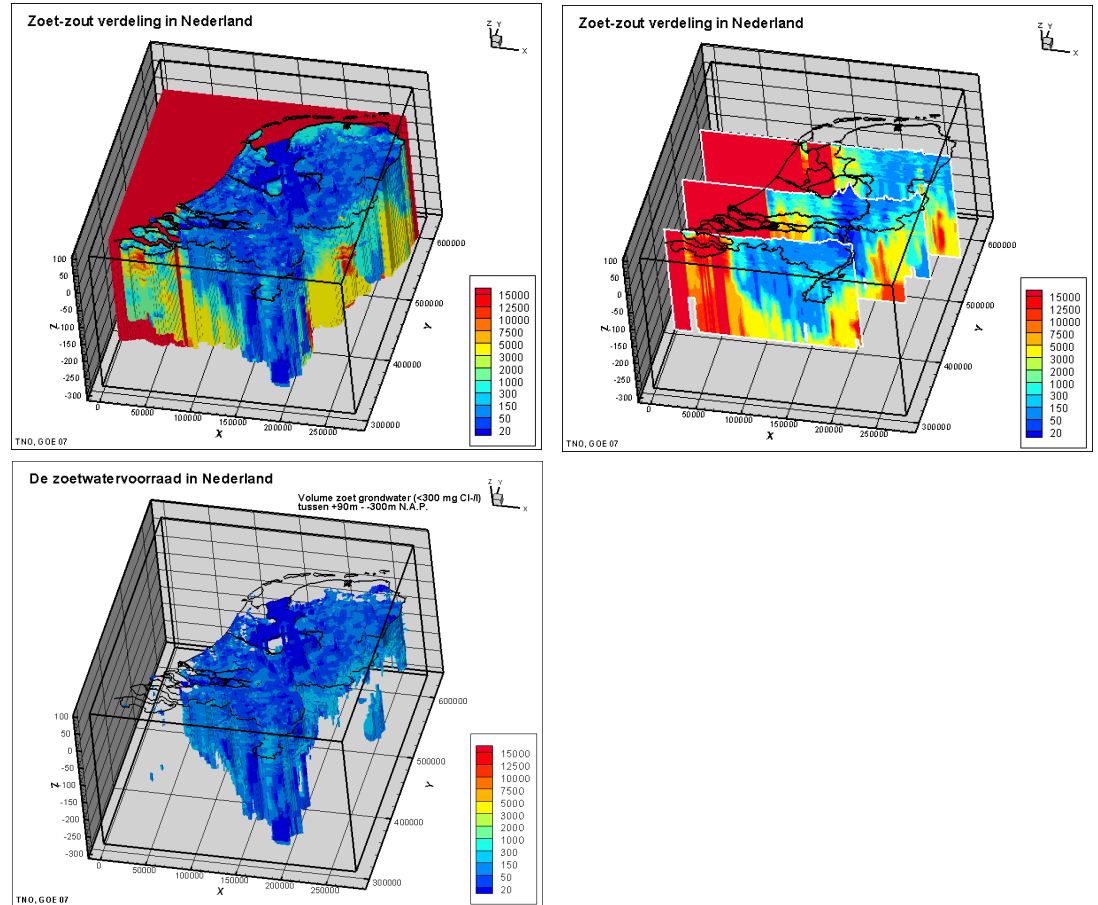


Figuur 2.4: a. Posities van alle typen metingen (analyses, VES en BGM) die geïnterpreteerd kunnen worden als chloride-gehalten; frequentie chloride analyses versus jaar van meting (b) en diepte (c).

Aan de hand van deze puntenwolk is een continue 3D veld van chloride-gehalten gecreëerd (figuur 2.5). Vooralnog is alleen het systeem van +90m tot -300 m N.A.P. bekeken, waarbij onder de hydrologische basis niet verder baar zoet water wordt gekeken. De totale hoeveelheid zoet grondwater (<300 mg Cl/l) in Nederland bedraagt iets meer dan 1100 miljard m^3 , terwijl tot 1000 mg Cl/l ongeveer 1475 miljard m^3 grondwater aanwezig is. Hiervan bevindt zich zeer weinig in Zeeland tot weinig in

Zuid-Holland (~10 miljard m³). De oostelijke provincie en vooral Noord-Brabant bezitten het meeste zoete grondwater.

De huidige grote voorraad laat zich verklaren door het proces 'tijd'. Over zeer lange tijd (duizenden tot tienduizenden jaar) is het mogelijk geweest voor grondwater te infiltreren.



Figuur 2.5: Zoet-zout verdeling en zoetwater voorraad in Nederland

2.3 Grote zoetwaterlenzen in duingebieden:

Speciale gevallen zijn de grote zoetwaterlenzen in duingebieden (figuur 2.6). Op dit moment zijn deze zoetwatersystemen onderhevig aan verschillende processen, waarvan we er hier drie noemen:

- langzaam herstel van de lenzen door stopzetting van de grote grondwateronttrekkingen uit de diepere watervoerende pakketten,
- implementatie 'artificial recharge', en vervolgens grondwateronttrekkingen uit de freatische watervoerende pakketten,
- laterale afstroming grondwater naar laaggelegen aangrenzende poldergebieden (hetgeen leidt tot asymmetrische zoetwaterlenzen)

Daarnaast bevinden de zoetwaterlenzen in de duinen zich binnen de invloedssfeer van een zeespiegelstijging (Oude Essink, 2007). Hierdoor is over lange tijd (orde van vele decennia) een kleiner volume van de zoetwaterlens te verwachten. Aan de andere kant

is het heel goed mogelijk dat door een toename van de natuurlijke grondwateraanvulling in het winterseizoen een vergroting van de zoetwatervoorraad plaatsvindt. De maaiveldhoogte moet dan wel zodanig zijn dat een overdruk kan worden opgebouwd, en een surplus aan water het grondwatersysteem kan binnenstromen. Bovendien moet het doorlaatvermogen van de al dan niet aanwezige deklaag groot genoeg zijn om de diepere zoete grondwatervoorraad aan te vullen. Welk proces dominant is valt op voorhand niet te zeggen.

De verwachting is dat menselijke activiteiten als grondwateronttrekkingen, bebouwen/afgraven infiltratiegebieden belangrijker zijn dan de 'natuurlijke' processen zeespiegelstijging en toename grondwateraanvulling, zeker op (middellange) termijn van tientallen jaren tot honderd jaar.

Met behulp van een analytische vergelijking kan getoond worden dat de diepte van een zoetwaterlens in het duingebied (figuur 2.6) gelijk is aan de wortel van de natuurlijke grondwateraanvulling (Oude Essink, 2001b):

$$H = \sqrt{\frac{f(0.25B^2 - x^2)}{k(1 + \alpha)\alpha}} \quad (1)$$

waarin:

H = dikte zoetwaterlens; afstand zoet-brak grensvlak tot referentie niveau [dag],

k = hydraulische doorlatendheid [m/dag],

B = breedte van zoetwaterlens [m],

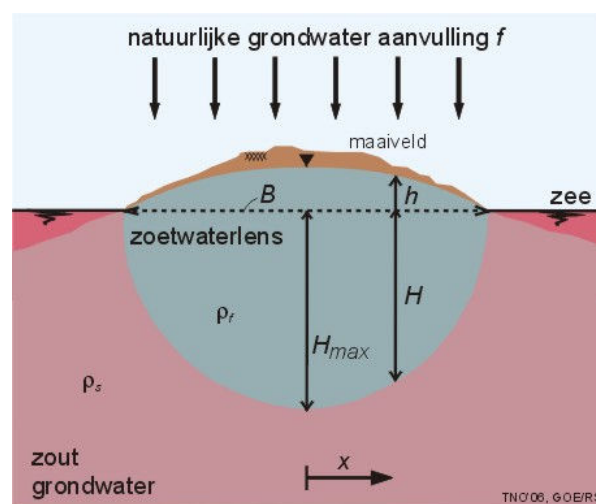
f = natuurlijke grondwater aanvulling [m/dag],

$\alpha = (\rho_s - \rho_f) / \rho_f = 0.025$, relatieve dichtheidsverschil [-],

ρ_s = dichtheid van zout grondwater, 1025 kg/m³,

ρ_f = dichtheid van zoet grondwater, 1000 kg/m³.

Duidelijk is dat de diepte van de zoetwaterlens gelijk is aan de wortel van f (natuurlijke grondwater aanvulling). Bij een toename van bijv. 44% meer natuurlijke grondwateraanvulling f ($f_{\text{nieuw}} = 1.44 * f_{\text{oud}}$), zie je nog maar 20% terug in een dikkere zoetwaterlens H ($H_{\text{nieuw}} = 1.2 * H_{\text{oud}}$).



Figuur 2.6: Schematische weergave van een dynamische zoetwaterlens die drijft op het zoute grondwater.

2.4 Regionale veranderingen in zoetwatervoorraad in Nederland: een numeriek model

In eerste instantie zou je verwachten dat op regionale schaal bij een droger klimaat (W+) de zoetwatervoorraad van zo'n 1100 miljard m³ eenduidig zal krimpen; echter het verhaal ligt genuanceerder. Bodemdaling versnelt weliswaar de toestroming van brak grondwater in de laaggelegen poldergebieden, maar op deze locaties is het grondwater meestal toch al minimaal licht brak (chloride-gehalte > 300 mg Cl/l); tot een afname van de zoetwatervoorraad zal het dus niet leiden. Daarnaast zullen veranderingen in landgebruik (met als gevolg een ander peilbeheer) en de zeer waarschijnlijke veranderingen in grondwateronttrekkingen ervoor zorgen dat de voorraad langzaam veranderen; deze ingrepen in het watersysteem laten zich moeilijk gedetailleerd voorspellen.

Alhier is echter getracht met behulp van een relatief grof numeriek model toch een gevoel te krijgen van de verandering in zoet-brak-zout grondwater in Nederland, als gevolg van zeespiegelstijging en een veranderend neerslagpatroon (zie ook Oude Essink, 2007 en Kwadijk et al., 2007).

Hieronder een korte beschrijving van het numerieke model:

- 3D niet-stationaire grondwaterstromings- en stoftransportmodel, gebaseerd op de softwarecode MOCDENS3D, die bestaat uit MODFLOW (McDonald & Harbaugh, 1988) en MOC3D (Konikow et al, 1996), en tevens aangepast voor dichtheidsverschillen (Oude Essink, 1997), figuur 2.7.
- Hydrogeologische parametrisering: REGIS (<http://www.dinoloket.nl/>), aangevuld met MIPWA parametrisering uit Snepvangers et al. (2007).
- Landelijk beeld 3D zoutconcentraties (analyses, VES, BGM & dummy filters) grondwater uit Zoet-Zout REGIS (Kloosterman, 2007);
- Maaiveldhoogtebestand en inschattingen van drooglegging uit REGIS en concept Nationaal Hydrologisch Instrumentarium (NHI);
- Bodemdalingsschattingen voor het jaar 2050 van RIZA (o.a. Haasnoot, 1999);
- Het model is in het horizontaal opgedeeld in grove cellen van 1000x1000 m. In het verticaal beslaat het model 290m: van +10m N.A.P. tot -280m N.A.P. In de diepte zijn 31 modellagen aangebracht met dikten van ondiep naar diep 2*5m; 10*2m; 8*5m en 11*20m.

In totaal zijn twee scenario's doorgerekend:

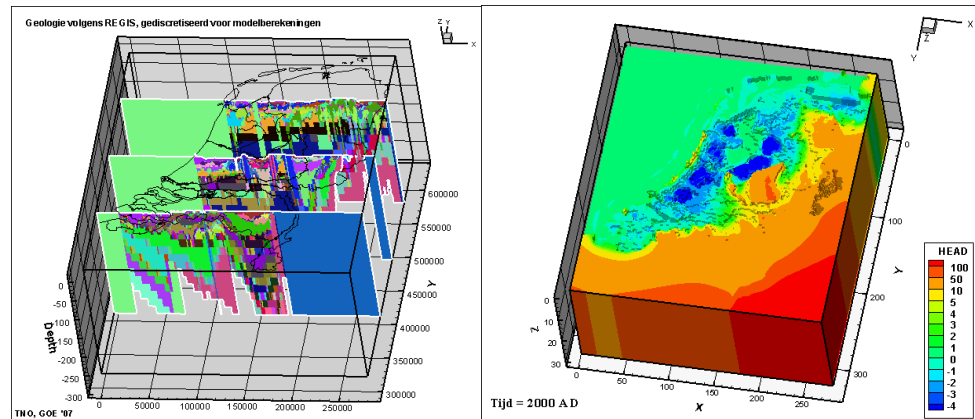
1. huidige situatie = referentie, gedurende 100 jaar (autonome ontwikkeling),
2. één zeespiegelstijgingsvariant van +85cm (gelijk aan bovenwaarde W+ KNMI'06 scenario) en één bodemdalingsvariant (twee keer WB21 voor 2050) (figuur 2.2b).

Naast een stijging van het waterniveau in de Noordzee en de Waddenzee zijn met het model ook stijgingen van de gemiddelde rivierstanden (op basis van resultaten van WL/Delft Hydraulics, Kwadijk et al., 2007) en een stijging van het IJsselmeerpeil doorgevoerd. Het IJsselmeerpeil stijgt mee tot +0.85 m;

Het model zoals het nu ontwikkeld is geeft slechts een eerste schatting van de effecten omdat:

- het een grof model betreft met cellen van 1000x1000 m.
- de ijking van stijghoogten, kwel fluxen en zoutbelastingen naar met name de diepe polders slechts heeft plaatsgevonden op basis van expert-judgement,

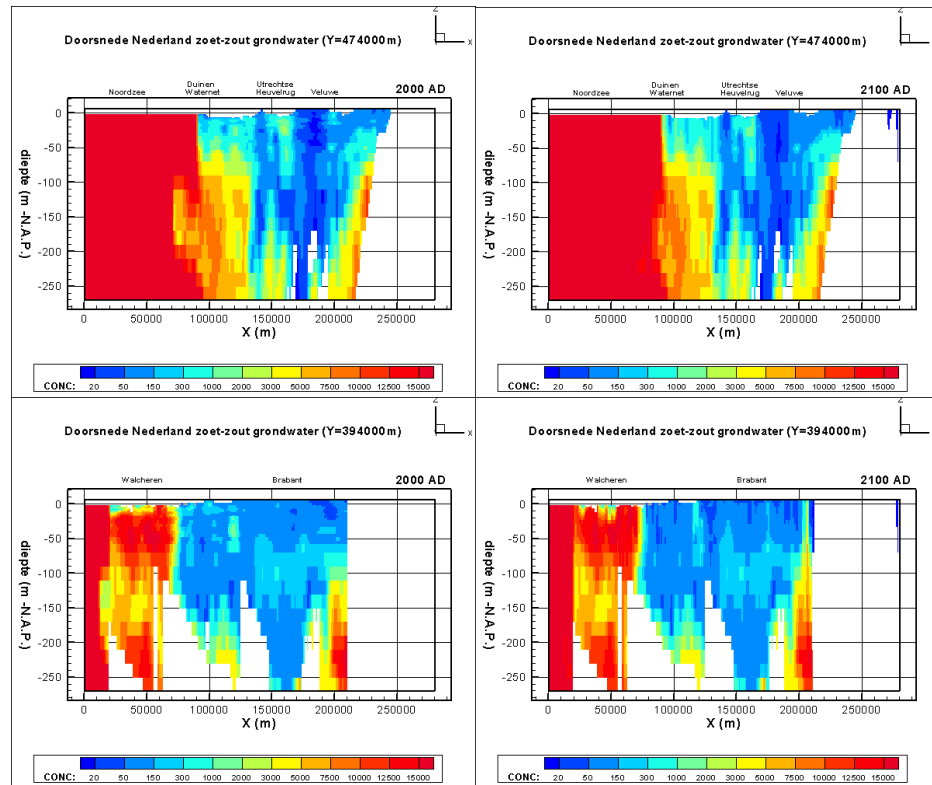
- de ingevoerde initiële 3D zoet-brak-zout verdeling nog niet voldoende is gecorrigeerd voor numerieke instabiliteiten en numerieke inversies,
- het topsysteem relatief grof is geïmplementeerd.



Figuur 2.7: Impressie numeriek model: a. bodemopbouw volgens REGIS II; b. berekende zoetwaterstijghoogte.

Tabel 2.1 toont de verandering in zoetwatervoorraad, gebaseerd op de modelberekening waarbij de situatie gedurende 100 jaar hetzelfde blijft (er vinden géén veranderingen plaats in zeeniveau, maaiveldniveau of natuurlijk grondwateraanvulling). De zoetwatervoorraad neemt in 100 jaar slechts iets meer dan één procent toe. Deze verandering is niet spectaculair. Duidelijk is dat grondwaterstroming een traag proces is en dat het daarbij horende verplaatsen van zout grondwater tijd nodig heeft. Daarnaast is de voorraad in de ondergrond groot.

Weliswaar zal in de laaggelegen poldergebieden verzilting optreden, op de Veluwe en in de duingebieden lijkt de voorraad zich te vergroten. Oorzaken zouden kunnen zijn de afname in grondwateronttrekkingen uit de watervoerende pakketten (uit de jaren 1950), en de infiltratie van zoet oppervlaktewater op locaties waar diepe polders worden omgeven door omringend hooggeleden land en plassen.



Figuur 2.8: Zoet-zout verdeling in een tweetal profielen: de verschillen in chloride-gehalte op regionale schaal zijn nauwelijks traceerbaar.

Ook de processen zeespiegelstijging, een ander neerslagpatroon (W+) en bodemdaling lijken de zoetwatervoorraad op de termijn van 100 jaar in beperkte mate te beïnvloeden. In Tabel 2.2. is te zien dat de toename in zoetwatervoorraad minder is dan in het geval van de referentie situatie (gelijkblijvende omstandigheden). Zo valt de grootste zoetwatervoorraad buiten de invloedssfeer van een zeespiegelstijging; die is namelijk beperkt tot eerste kilometers vanaf de kust, afhankelijk van geologische parameters, Oude Essink, 2007).

Als we de twee scenario's met elkaar vergelijken dan neemt de groei van de voorraad wel af als gevolg van de combinatie zeespiegelstijging, ander neerslagpatroon en bodemdaling, te weten 3 miljard m³ over honderd jaar (gemiddeld 30 miljoen m³ per jaar), minder dan één procent (Tabel 2.3).

Tabel 2.1: Verandering in de totale zoetwatervoorraad in Nederland (tussen +10m en -300m N.A.P.), bij gelijkblijvende omstandigheden.(autonome ontwikkeling)

Tijd AD	Voorraad (miljard m ³)	Toename { % }
2000	1013	-
2050	1024	1.2%
2100	1025	1.3%

Tabel 2.2: Verandering in de totale zoetwatervoorraad in Nederland (tussen +10m en -300m N.A.P., in geval van zeespiegelstijging en het neerslagpatroon à la KNMI06 W+ scenario en bodemdaling à la WB21.

Tijd AD	Voorraad (miljard m ³)	Toename { % }
2000	1013	-
2050	1022	1.0%
2100	1022	1.0%

Tabel 2.3: Afname van de groei van de de totale zoetwatervoorraad in Nederland (tussen +10m en -300m N.A.P. als gevolg van zeespiegelstijging en neerslagpatroon à la KNMI06 W+ scenario en bodemdaling à la WB21, t.o.v. gelijkblijvende omstandigheden als er geen klimaatverandering zou optreden.

Tijd AD	Afname voorraad (miljard m ³)
2050	1.9
2100	3.2

Als er naar specifieke deelgebieden wordt gekeken, is het verhaal iets genuanceerder. De zoetwatervoorraden op Texel; onder Hoorn; op de Veluwe en de Utrechtse Heuvelrug; en in de duingebieden van Noord-Holland (boven én beneden het Noordzeekanaal), Zuid-Holland en Zeeland zijn daarbij apart bekeken.

De komende tientallen jaren kan over het algemeen de zoetwatervoorraad in de duingebieden in het kustgebied behoorlijk groter worden, o.a. als gevolg van de afname van grondwateronttrekkingen. Daarna neemt de invloed van de zeespiegelstijging steeds meer toe, en zal de voorraad zeer langzaam weer afnemen. De snelheid van afname is zodanig dat over 100 jaar de meeste zoetwatervoorraden in het kustgebied nog steeds (iets) groter zullen zijn dan op dit moment.

De zoete grondwatervoorraden op de Veluwe (zo'n 96 miljard m³) en de Utrechtse Heuvelrug (zo'n kleine 26 miljard m³) lijken op dit moment in evenwicht te zijn. Ze liggen zodanig buiten de invloedssfeer van een zeespiegelstijging dat hiervan geen effect is te verwachten. Een verandering in neerslagpatroon heeft wel effect, maar zo'n verandering is klein in relatie tot de huidige totale voorraden in deze gebieden; op een termijn van 100 jaar minder dan 0.5%.

2.5 Conclusies

De zoetwatervoorraad (chloride-gehalte < 300 mg Cl/l) in Nederland is zo'n 1100 miljard m³ groot, en bevindt zich met name in de oostelijke en zuidelijke provincies, exclusief de Provincie Zeeland. De grondwateronttrekkingen van 1.25 miljard m³ is in relatie tot de voorraad klein te noemen. Aan de hand van een grove modellering lijkt het erop dat de zoetwatervoorraad over 100 jaar, als het klimaat en zeespiegel niet zouden veranderen slecht iets meer dan procent toeneemt. Dit proces verloopt traag, waarbij activiteiten in het verleden nog steeds invloed hebben. Zo zal waarschijnlijk de afname van grondwateronttrekkingen in de watervoerende pakketten nog steeds doorwerken op het volume van zoetwatervoorraad. Bovendien is de verwachting, dat naast verzilting in de laaggelegen poldergebieden, in beperkte mate verzoeting zal optreden in gebieden waar hooggelegen delen grenzen aan laaggelegen delen: op de overgang vindt dan infiltratie van zoet oppervlaktewater plaats (denk aan de overgang van de Veluwe naar de Flevopolders). Ook dit is een traag proces.

In geval van klimaatverandering zijn drie processen van belang: zeespiegelstijging, verandering in neerslagpatroon en bodemdaling. De processen zeespiegelstijging en de afname in neerslag in geval van het scenario KNMI06-W+ hebben tot gevolg dat de zoetwatervoorraad minder sterk toeneemt dan in het geval van de referentie situatie. In de duingebieden langs de Nederlandse kust is echter de afname in grondwateronttrekkingen vooralsnog dominant. Over het algemeen lijken de effecten op de termijn van 100 jaar marginaal.

2.6 Literatuur

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

Kloosterman, F.H. Kartering zoet/brak/zout verdeling Nederland; Beschrijving van de ZZ-REGIS software suite. TNO-rapport, Concept.

Kwadijk et al. (2007). Gevolgen van grote zeespiegelstijging op de Nederlandse zoetwaterhuishouding, in opdracht van het Milieu en Natuurplan Bureau, Deltares.

Minnema, B., Kuijper, B. en Oude Essink, G.H.P. (2004). Bepaling van de toekomstige verzilting van het grondwater in Zuid-Holland, NITG 04-189-B, 86 p., TNO Bouw en Ondergrond, Utrecht.

Oude Essink, G.H.P., R. H. Boekelman, et al. (1993). Physical impacts of sea level change, State of the Art Report UNESCO Workshop SEACHANGE'93. Sea Level Changes and their Consequences for Hydrology and Water Management, April, 1993, Noordwijkerhout, the Netherlands, UNESCO, IHP-IV Project H-2-2. Noordwijkerhout, the Netherlands: 1-137.

Oude Essink, G.H.P. (1996). Impact of sea level rise on groundwater flow regimes, A sensitivity analysis for the Netherlands, <http://repository.tudelft.nl/file/182852/152470>, Delft University of Technology, 411 pp.

Oude Essink, G.H.P. (2001a). Density dependent groundwater flow: salt water intrusion and heat transport. Lecture notes Utrecht University, Institute of Earth Sciences, The Netherlands, p. 136.

Oude Essink, G.H.P., 2007, Effect zeespiegelstijging op het grondwatersysteem in het kustgebied, H2O, nr 19, 60-64.

Snepvangers, J.J.J.C. en Berendrecht, W.J. (2007); MIPWA - Methodiekontwikkeling voor Interactieve Planvorming ten behoeve van Waterbeheer. TNO rapport in concept, 234pp.

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.

Stuyfzand, P. J. (1993). Hydrochemistry and hydrology of the coastal dune area of the Western Netherlands. Proefschrift Vrije Universiteit Amsterdam, p. 366.

Ven, G.P., van de (1993), Man-made lowlands; History of water management and land reclamation in the Netherlands, Uitgeverij Matrijs, Utrecht, 294 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.

3 Verandering in grondwateraanvulling en freatische grondwaterstanden in Noord-Nederland

3.1 Inleiding

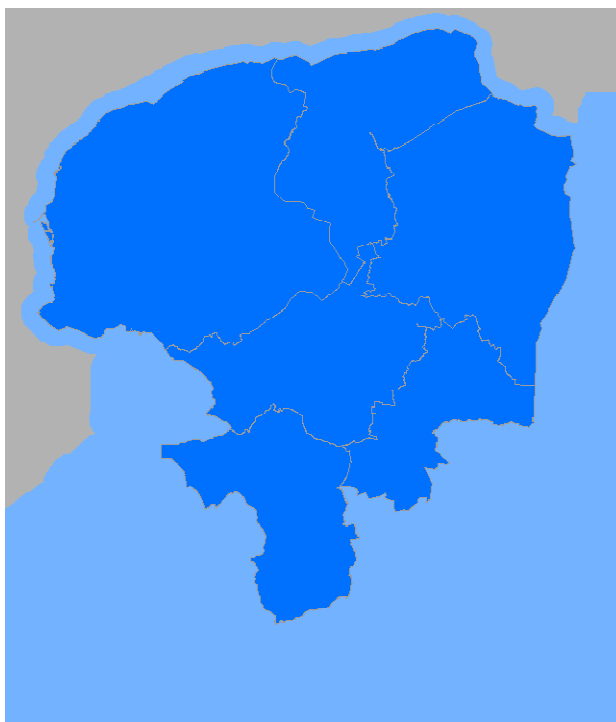
De verwachte klimaatverandering heeft tot gevolg dat er veranderingen zullen optreden in het grondwatersysteem. Sinds het voorjaar van 2007 is er een regionaal hoge-resolutie grondwatermodel beschikbaar voor Noord-Nederland. Met dit model – dat de provincies Friesland, Groningen, Drenthe en Overijssel omvat – is het mogelijk om een indicatie te verkrijgen waar en in welke mate er veranderingen optreden in het watersysteem.

Dit hoofdstuk bevat de resultaten van een indicatieve studie naar de effecten van klimaatverandering op het grondwatersysteem in Noord-Nederland. In deze studie is het grondwatermodel doorgerekend met het KNMI'06 W+ scenario voor 2050. Dit staat beschreven in paragraaf 1.3. Paragraaf 3.2 bevat een korte beschrijving van het grondwatermodel. Paragraaf 3.3 beschrijft de resultaten van de berekeningen.

3.2 Korte modelbeschrijving

De modelberekeningen zijn uitgevoerd met het nieuwe grootschalige grondwatermodel van Noord-Nederland (Snepvangers en Berendrecht, 2007). Dit model is ontwikkeld binnen het project MIPWA (Methodiekontwikkeling voor Interactieve Planvorming ten behoeve van Waterbeheer), in opdracht van een groot aantal waterpartners in Noord-Nederland (drinkwaterbedrijven, provincies, waterschappen, gemeenten en DLG) en uitgevoerd door een consortium van vier partijen: TNO, Alterra, Royal Haskoning en Tauw.

Het modelgebied is weergegeven in figuur 3.1. Het interessegebied – het gebied waar het model voor ontwikkeld is – is in donkerblauw aangegeven en beslaat de 6 noordelijke waterschappen. De lichtblauwe zone is meegenomen om te voorkomen dat randvoorwaarden een waarneembaar effect hebben binnen het interessegebied.



Figuur 3.1: Ligging modelgebied bestaande uit interessegebied (blauw) en modelgebied (lichtblauw).

Het grondwatermodel is beschikbaar op een resolutie van 25×25m. Het grondwatermodel is gekoppeld aan een onverzadigde zone model (Capsim). Het onverzadigde zone model berekent de grondwateraanvulling op basis van de hoeveelheid bodemvocht en de grondwaterstand. Tevens berekent het model op vooraf vastgestelde locaties de berekeningsgift.

In deze studie is er om rekentechnische redenen voor gekozen om de berekeningen uit te voeren op een resolutie van 250×250m. Het model is tweemaal doorgerekend. Eerst is de referentiesituatie doorgerekend op basis van de neerslag en verdamping over de periode 1976-2005. Vervolgens is hetzelfde model doorgerekend op basis van de neerslag en verdamping over de periode 2036-2065. Het effect van klimaatverandering is vervolgens bepaald als het verschil tussen de berekeningsresultaten.

3.3 Resultaten

In de figuren 3.2 t/m 3.9 zijn de effecten van klimaatverandering volgens het W+ scenario op de freatische grondwaterstanden, grondwateraanvulling, afvoeren en kwel- en infiltratiefluxen weergegeven.

In aanvulling op de figuren geeft onderstaand overzicht een korte beschrijving van enkele karakteristieken en gemiddelden.

Freatische grondwaterstand:

- De GHG stijgt in infiltratiegebieden 10-20 cm met uitschieters op de Veluwe en Hondsrug van meer dan een meter;
- In overige gebieden stijgt de GHG enkele centimeters;

- De GLG in infiltratiegebieden stijgt in het algemeen ook, zij het in minder mate dan de GHG;
- In de overige gebieden daalt de GLG enkele centimeters tot lokaal 1-2 decimeter.

Grondwateraanvulling:

- In de winter neemt de grondwateraanvulling met ca. 0.3 mm/d toe (0.2 mm/d in stedelijk gebied). Dit is ca. 15% van de oorspronkelijke grondwateraanvulling en is rechtstreeks gerelateerd aan de toename van de gemiddelde neerslaghoeveelheid in het W+ scenario (zie Tabel);
- In de zomer neemt de grondwateraanvulling af (hogere verdamping) met 0.1-0.2 mm/d in de infiltratiegebieden en 0.2-0.3 mm/d in de overige gebieden.

Afvoer:

- In de winter neemt de afvoer gemiddelde 0.1-0.2 mm/d toe;
- In de zomer neemt de aanvoer toe / afvoer af met gemiddeld 0.05-0.1 mm/d.

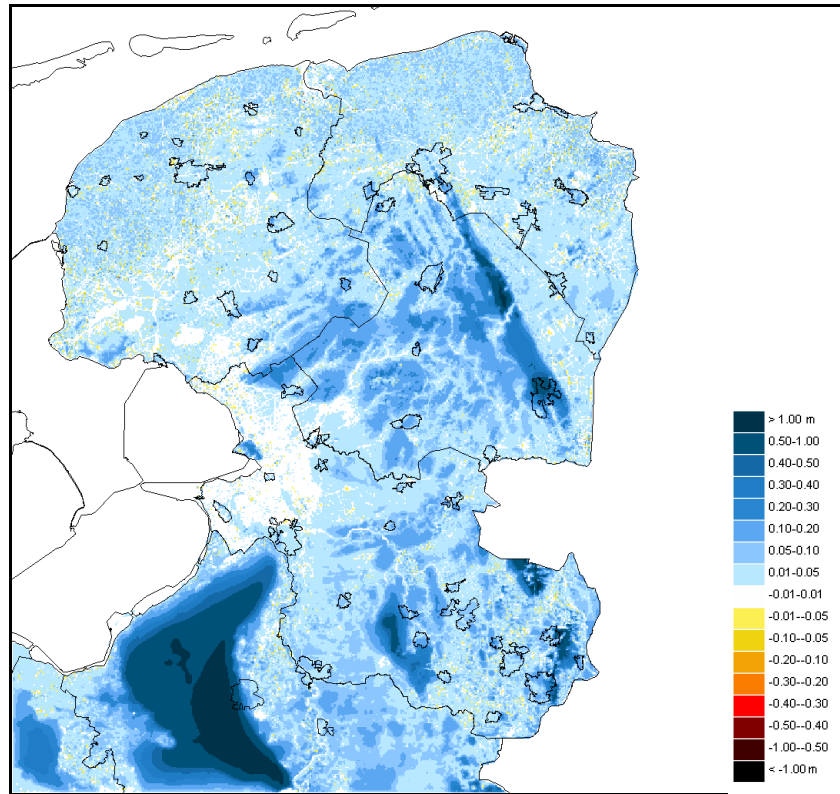
Op basis van het grondwatermodel van Noord-Nederland is een schatting gemaakt van de jaarlijkse beregeningsgift. Deze beregeningsgift wordt bepaald op basis van het vochttekort in de wortelzone en heeft een maximum van 2 mm/d.

De schatting van de gemiddelde jaarlijkse beregening is gebaseerd op de klimaatperiode 1976-2005 (dit is de referentieperiode in de klimaatstudie). Onderstaande tabel geeft per provincie de gemiddelde jaarlijkse hoeveelheid beregening uit zowel grondwater als oppervlaktewater.

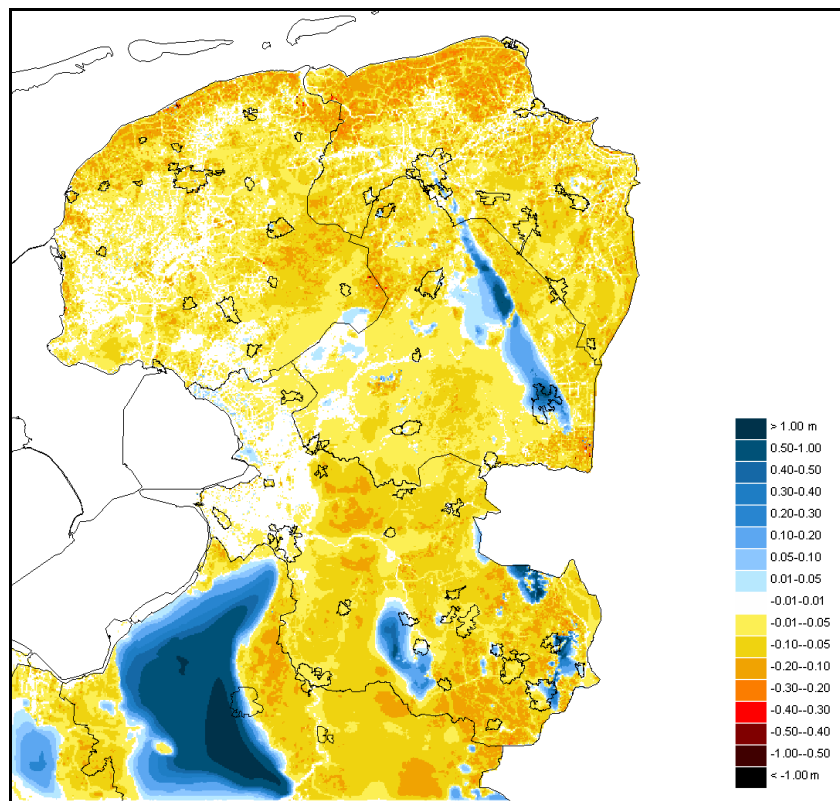
Tabel 3.1 De beregening volgens basis MIPWA-model. Deze gegevens zijn berekend op basis van de aanname dat het verdampingstekort binnen cultuurgrond wordt aangevuld m.b.v. beregening. Het zijn vermoedelijk maximale hoeveelheden.

<i>Miljoen m³/jaar</i>	Grondwater	Oppervlaktewater	Totaal
Friesland	1.4	2.2	3.6
Groningen	1.3	4.9	6.2
Drenthe	10.0	4.9	14.9
Overijssel	14.2	8.4	22.6

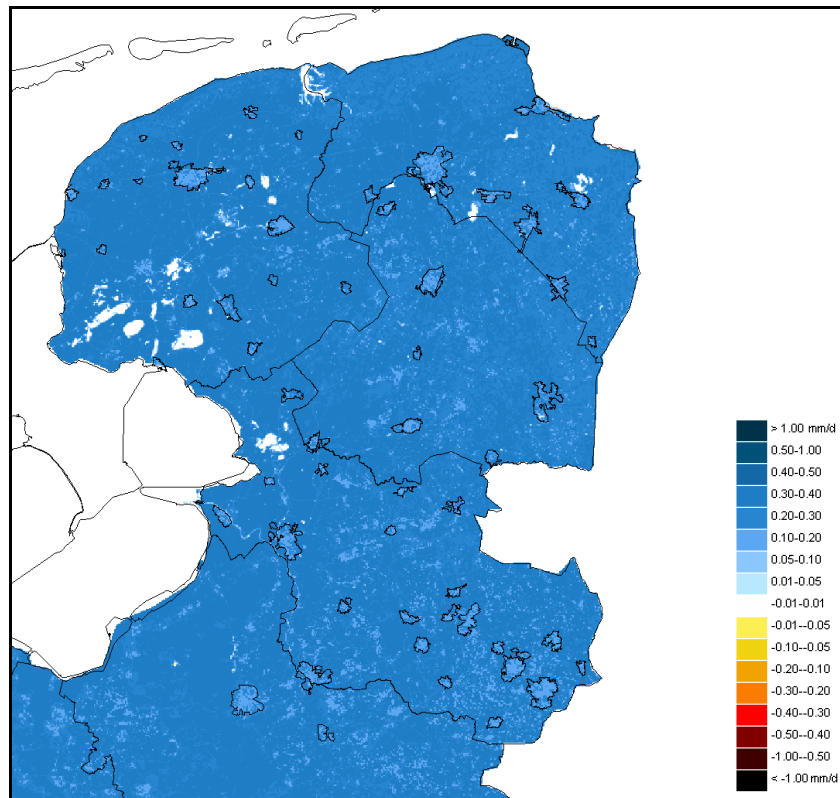
Naast bovenstaande variabelen is ook het effect van klimaatsverandering op de beregeningsvraag uit oppervlaktewater en grondwater berekend. Hieruit blijkt dat op basis van het W+ scenario de beregeningsvraag met ca. 15% toeneemt.



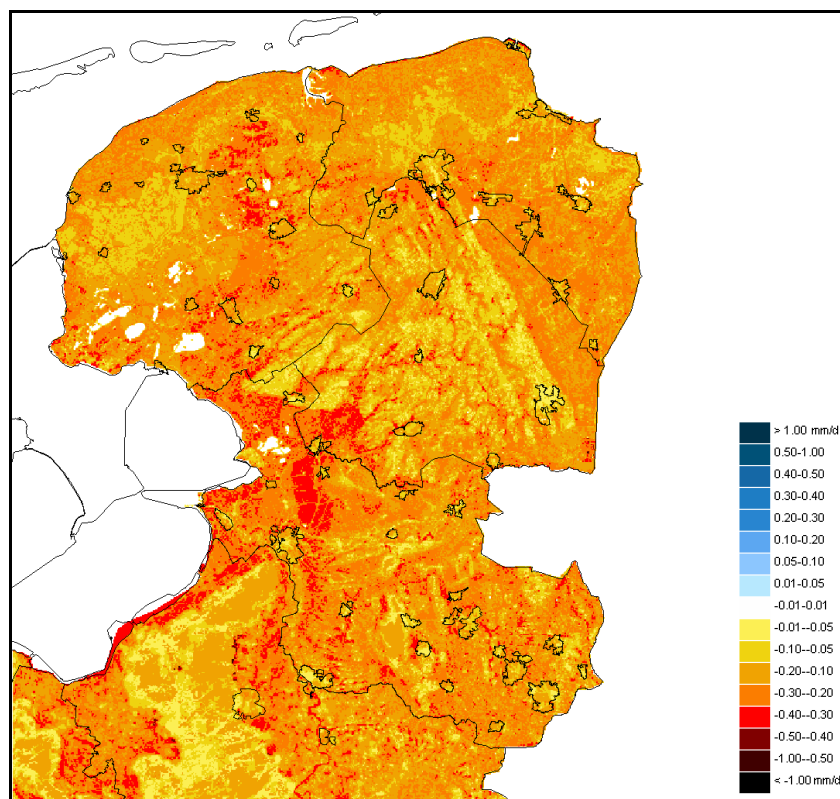
Figuur 3.2: Effect op GHG (positief is een stijging van de GHG)



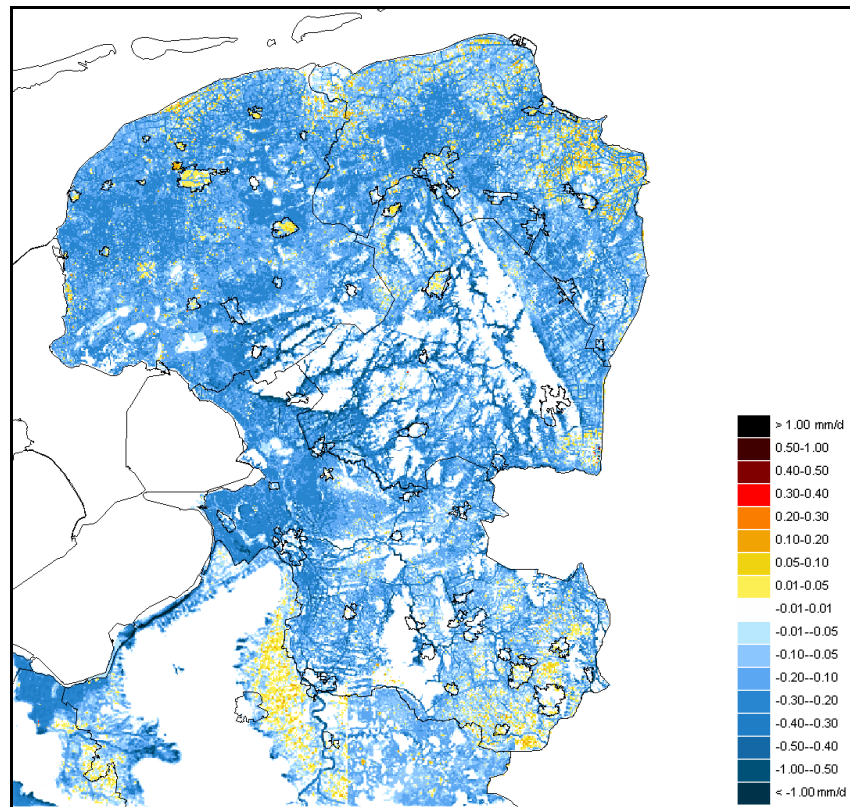
Figuur 3.3: Effect op GLG (positief is een stijging van de GLG)



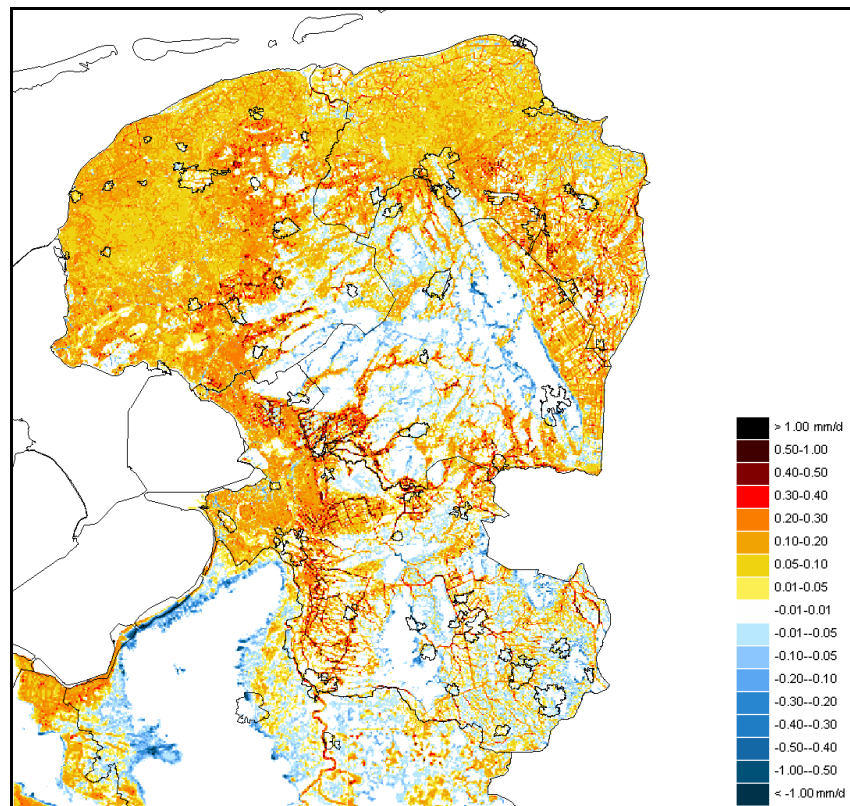
Figuur 3.4: Effect op grondwateraanvulling in winter (positief = grotere grondwateraanvulling)



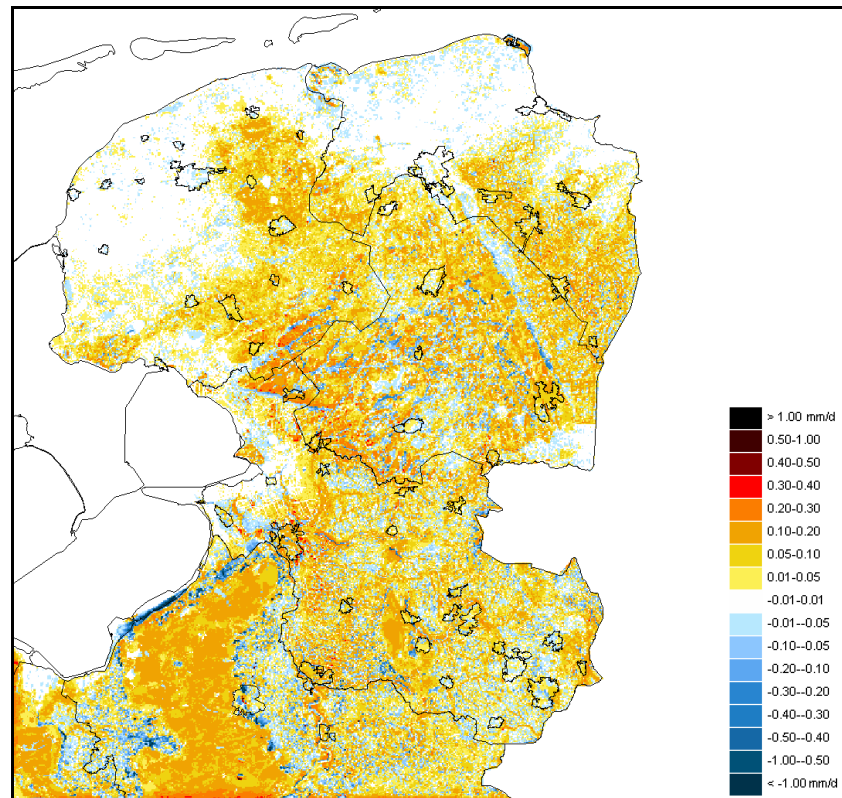
Figuur 3.5: Effect op grondwateraanvulling in zomer (positief = grotere grondwateraanvulling)



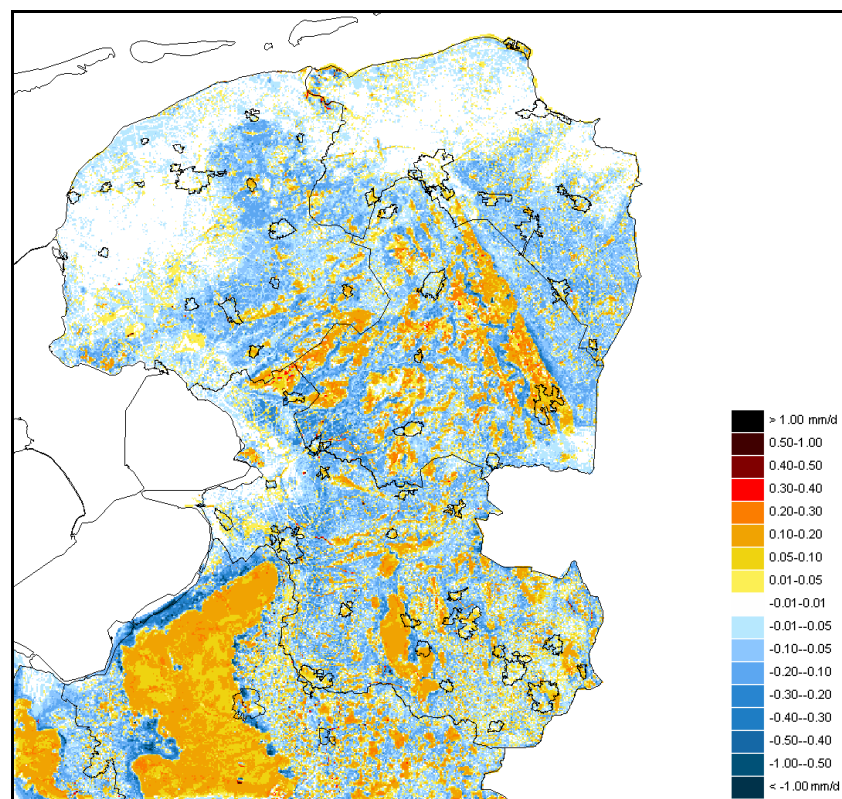
Figuur 3.6: Effect op winterafvoer (positieve waarde = minder afvoer / meer aanvoer)



Figuur 3.7: Effect op zomerafvoer (positieve waarde = minder afvoer / meer aanvoer)



Figuur 3.8: Effect op verticale flux in winter (positieve waarde = meer infiltratie / minder kwel)



Figuur 3.9: Effect op verticale flux in zomer (positieve waarde = meer infiltratie / minder kwel)

3.4 Literatuur

De Bruin, H.A.R. (1981). The determination of (reference crop) evapotranspiration from routine weather data, Comm. Hydrol. Research TNO, Den Haag, Proc. and Inform. 28, 25-37.

Lenderink G., A. van Ulden, B. van den Hurk en F. Keller (2007), A study on combining global and regional climate model results for generating climate scenarios of temperature and precipitation for the Netherlands, *Climate Dynamics*, 29, 157-176, doi:10.1007/s00382-007-0227-z.

Van den Hurk, B., A. Klein Tank, G. Lenderink, A. van Ulden, G.J van Oldenborgh, C. Katsman, H. van den Brink, F. Keller, J., G. Burgers, G. Komen, Wilco H. en S. Drijfhout (2006), KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands, KNMI Scientific Report WR 2006-01, KNMI, De Bilt.

4 Ontwikkeling grondwateraanvulling

4.1 Inleiding

Grondwateraanvulling is cruciaal voor de aanvulling van grondwatervoorraden. Het ligt dan ook voor de hand om de gevolgen van klimaatverandering op de grondwateraanvulling te willen vaststellen. De primaire vraag die in dit hoofdstuk wordt beantwoord is dan ook:

Kunnen er in de toekomst procesmatige veranderingen plaatsvinden vanaf de regendruppel tot aan het grondwater, waardoor de grondwateraanvulling zal wijzigen ?

Een belangrijke secundaire vraag is of de effecten van klimaatverandering op de grondwateraanvulling door de huidige generatie grondwatermodellen afdoende worden beschreven. Het beschikbare onderzoek naar de invloed van klimaatverandering op de grondwateraanvulling is beperkt in vergelijking met het aantal studies naar de effecten van klimaatverandering op de oppervlaktewaterhuishouding (IPCC, 2001). Het onderzoek dat er wel naar is uitgevoerd, richt zich vooral op kwantificering van de waarschijnlijke, directe gevolgen van veranderingen in neerslag, temperatuur en verdamping voor landgebruiksfuncties (Holman, 2006). Dit is vaak ingegeven door de functionaliteit van de voor deze kwantificering gebruikte hydrologische modellen. Ook de modelberekeningen in de andere hoofdstukken van dit rapport beperken zich tot de genoemde, directe gevolgen. De grondwateraanvulling wordt echter ook op indirecte manieren beïnvloed door tal van processen die zich in de bodem en de vegetatie afspelen (Holman, 2006). In dit hoofdstuk worden deze processen geïnventariseerd, op hoofdlijnen gekwantificeerd, en wordt beoordeeld of het niet meenemen ervan in modelstudies tot significante fouten leidt.

4.2 Definities en afbakening

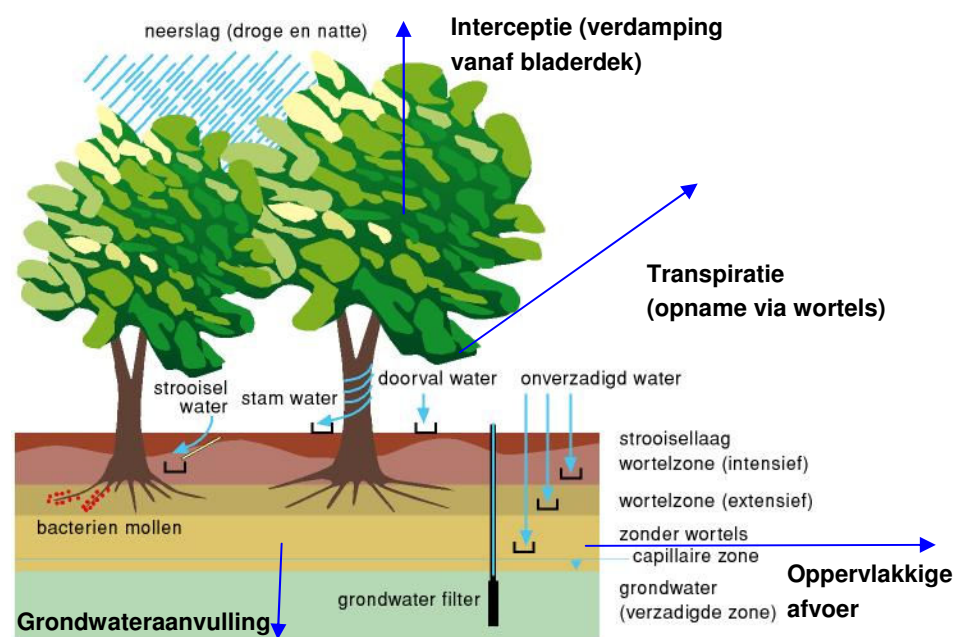
Het begrip grondwateraanvulling wordt nog wel eens op verschillende manieren uitgelegd. Vaak wordt onder grondwateraanvulling verstaan al het regenwater dat in de bodem infiltreert, de invloedssfeer van de wortelzone passeert en vervolgens percoleert naar de met grondwater verzadigde zone. Het is echter beter om hier te spreken van 'neerslagoverschot', en zo is het ook gedefinieerd in de Verklarende Hydrologische Woordenlijst (CHO-TNO 1986). Vervolgens kan het alsnog oppervlakkig, of over slecht doorlatende lagen dicht onder het oppervlak, afstromen naar een greppel, sloot, buisdrainage of grotere waterloop. In kwelgebieden gebeurt dit met het gehele neerslagoverschot, maar ook in zandige infiltratiegebieden met slecht doorlatende lagen dicht onder het maaiveld kan een deel van het neerslagoverschot op deze manier het grondwatersysteem verlaten. In gebieden zonder oppervlakkige afvoer is de grondwateraanvulling wel gelijk aan het neerslagoverschot (Meinardi et al., 1998).

Grondwateraanvulling wordt derhalve gedefinieerd als het neerslagoverschot verminderd met de lokale oppervlakkige afvoer. Uiteindelijk wordt een regionaal, niet-freatisch grondwaterlichaam bereikt. Deze definitie van grondwateraanvulling houdt in dat de analyse in dit hoofdstuk zich beperkt tot de regionale infiltratiegebieden in Nederland. Een verdere beperking is dat brakke en zoute grondwatervoorraden niet

worden beschouwd. Daarentegen wordt wel separaat aandacht besteed aan een bijzondere vorm van grondwateraanvulling, namelijk vanuit oppervlaktewateren. Infiltratie vindt in dit geval plaats vanuit de uiterwaarden of rechtstreeks vanuit de bedding. De reden om hier apart aandacht aan te besteden is dat het in sommige regio's een bepalende factor is voor de aanvulling van de zoete grondwatervoorraad. Zo bestaat in de Overbetuwe het diepe grondwater grotendeels uit geïnfiltreerd rivierwater (Meinardi et al, 1998-2).

4.3 Van neerslag naar grondwateraanvulling

Zoals in het voorgaande is aangegeven, bereikt slechts een beperkt aandeel van de neerslag het grondwater. De grootte van dit aandeel wordt bepaald door de volgende processen, zoals geïllustreerd in figuur 4.1.

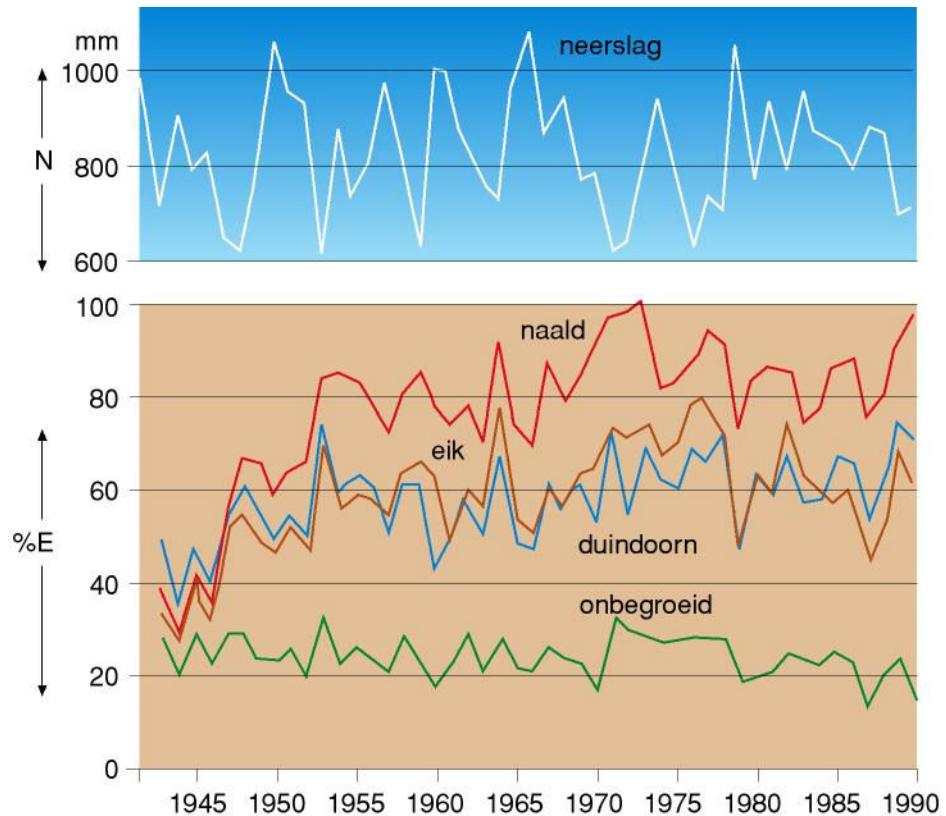


Figuur 4.1: Processen die in het traject van regendruppel naar grondwater een rol spelen.

4.3.1 Interceptie

Een vallende regendruppel kan worden onderschept door het bladerdek van de vegetatie. De vegetatie heeft een buffer beschikbaar voor het vasthouden van deze ingevangen regendruppels. Als deze buffer vol is zal nieuw inkomend regenwater niet meer kunnen worden geborgen, en doorvallen tot de bodem. Deze buffer kan, net als een grondwatersysteem, worden voorgesteld met een waterbalans: inkomende neerslag = verdamping + doorval + verandering in berging. Ook tijdens neerslag vindt er verdamping plaats, welke o.a. afhankelijk is van windsnelheid, relatieve luchtvochtigheid, specifiek oppervlak, en aerodynamische ruwheid van de vegetatie. Hoe groter de verdamping, hoe meer de buffer tijdens de neerslag weer aangevuld kan worden, dus hoe groter het interceptie percentage. Relatief veel neerslag wordt opgevangen tijdens langdurige, gelijkmatige neerslag in warme perioden. Interceptie is het minst efficiënt bij intensieve neerslag.

De hoogste interceptiepercentages komen in naaldbossen voor, omdat de gezamenlijke naalden een groot specifiek verdampingsoppervlak hebben, en omdat ze gedurende het hele jaar aanwezig zijn. Interceptie vormt dan een groot aandeel in de verdamping. Zie onderstaande figuur.



Figuur 4.2: De verdamping (interceptie + transpiratie) onder verschillende gewassen op de lysimeters van Castricum als percentage van de neerslag. De lysimeters werden in de Tweede wereldoorlog beplant. Een lysimeter is een betonnen bak waarmee de afvoer van het geïnfiltreerde water (grondwateraanvulling) kan worden gemeten.

Behalve door de vegetatie zelf kan interceptie ook plaatsvinden als er een strooisellaag (dode bladeren en andere plantendelen) op de bodem aanwezig is. Interceptie in de strooisellaag is een enigszins onderschatte component, en kan tot 15% van de bruto neerslag doen verdampen.

4.3.2 *Verdamping vanuit de bodem*

Verdamping van regenwater kan ook direct uit de bodem plaatsvinden, maar dit gebeurt alleen vanuit de bovenste centimeters. De betekenis van dit proces is dan ook beperkt, en bedraagt ruwweg een kwart van de totale verdamping door vegetatie (Huinink, 1998). Op braakliggend land is het de enige vorm van verdamping, verdamping vanuit plassen niet meegerekend.

4.3.3 *Transpiratie*

Eenmaal in de bodem geïnfiltreerd komt het regenwater beschikbaar voor plantenwortels. De wortels nemen het bodemvocht op en transporteren het naar de bovengrondse plantendelen. Het water verlaat de plant grotendeels via de huidmondjes (stomata). Dit proces heet transpiratie.

Plantenwortels zijn in staat om grote zuigspanningen te genereren, waardoor het bodemvocht aan vrij kleine bodemporiën kan worden onttrokken. Ook kunnen ze het bodemvocht van grotere diepten aanzuigen. Daarom is dit proces veel belangrijker voor de bodemwaterbalans dan verdamping direct uit de bodem.

Bij diepe grondwaterstanden en droge bodemvochtcondities treedt er verdampingsreductie op, omdat dan de plantenwortels niet meer (goed) bij het grondwater kunnen komen. Dit betekent dat de actuele verdamping kleiner wordt dan de potentiële verdamping; de begroeiing kan niet meer optimaal verdampen.

4.3.4 *Oppervlakkige afvoer*

De Nederlandse landbouwgebieden zijn in variërende mate ontwaterd door sloten, greppels en buisdrainage. Het gaat daarbij uiteraard vooral om van oudsher natte gebieden, vaak met slecht doorlatende bodems (klei, veen, leem), en dit zijn vaak de kwelgebieden. Voor de onderhavige vraagstelling zijn deze gebieden dan ook niet van belang. Toch zijn er ook infiltratiegebieden waar (een sterke) ontwatering aanwezig is. Dit zijn de Hollands-Utrechtse veenweidegebieden, maar ook de zgn. intermediaire gebieden in het Oost- en Zuid-Nederlandse zandgebied. Deze gebieden liggen tussen de beekdalen (kwel) en dekzandruggen of stuwwallen (infiltratie), kennen van oudsher een seizoenale afwisseling tussen kwel en infiltratie, en zijn meestal in gebruik als landbouwgebied. De aanwezigheid van slecht doorlatende lagen dicht onder het maaiveld speelt een belangrijke rol bij dit proces.

Meinardi et al. (1998) hebben de oppervlakkige afvoer als percentage van het neerslagoverschot geschat, op basis van de grondwatertrappen. Daaruit blijkt dat het neerslagoverschot volledig wordt afgevoerd bij Gt's I en II. Volledige grondwateraanvulling vindt plaats bij Gt's IV, VI en VII, en de GT's III en V nemen een tussenpositie in.

Als gevolg van o.a. peilverlaging in de beekdalen en grondwateronttrekkingen zijn deze gebieden vaak veranderd van intermediair in permanent infiltratiegebied.

4.4 **Grondwateraanvulling in Nederland**

De grondwateraanvulling in Nederland varieert ruimtelijk sterk, onder invloed van bodem en landgebruik. Gemiddeld valt er in Nederland ongeveer 800 mm per jaar neerslag, waarvan 550 mm verdampt bij voldoende waterbeschikbaarheid. Het gemiddelde neerslagoverschot is dus 250 mm per jaar (www.knmi.nl). Lokaal kunnen hier grote afwijkingen van optreden, als gevolg van onder meer specifieke vegetaties (invloedsfactoren o.a. interceptieverdamping, aerodynamische ruwheid), bodems en grondwaterstanden (invloedsfactoren o.a. verdampingsreductie door onvoldoende beschikbaarheid van bodemvocht) en ontwateringssituatie (invloedsfactoren o.a. ondiepe slecht doorlatende lagen, waterlopen, buisdrainage).

Volgens Bastiaanssen en Roozkrans (2003) is de werkelijke verdamping in bosgebieden tot ca. 200 mm groter dan de potentiële Makkink-verdamping. In het kader van het boshydrologieproject van Alterra zijn waarden voor verdamping, inclusief interceptie, gemeten variërend van 451 tot 990 mm per jaar. In stedelijk gebied daarentegen bleek de werkelijke verdamping tot ca. 280 mm kleiner, in landbouwgebieden veelal rond 100 mm kleiner.

Meinardi et al. (1998) hebben voor een aantal locaties de werkelijke jaarlijkse grondwateraanvulling bepaald, voornamelijk op basis van tritiumprofielen¹. In landbouwgebieden op zandgronden bleek de werkelijke grondwateraanvulling 50 à 60 mm/jr hoger te zijn dan verwacht zou worden op basis van de potentiële Makkink-verdamping. Op locaties in Bavel (N-Br) en Dalen (Dr) bleek oppervlakkige afvoer het neerslagoverschot te verminderen met respectievelijk 85 en 177 mm/jr. In een gemengd bos in Laag-Soeren bleek de grondwateraanvulling 63 mm/jr lager te zijn dan de potentiële Makkink-verdamping. Dit verschil is veel kleiner dan de 200 mm van Bastiaanssen & Roozkrans (2003). Een waarschijnlijke verklaring is hier verdampingsreductie, aangezien de Veluwe gekenmerkt wordt door lage grondwaterstanden. Verdampingsreductie in landbouwgebieden zal vaak worden bestreden met beregening uit dezelfde grondwatervoorraad als waar het niet-verdampte water aan ten goede zou zijn gekomen.

De grondwateraanvulling in stedelijk gebied wordt vaak onderschat. De enige studie waarin dit is gekwantificeerd, is een waterbalansstudie voor een naoorlogse wijk in Lelystad (SBR / TU Delft, 2007). Op basis hiervan wordt de grondwateraanvulling geschat op 40% (ca. 300 mm per jaar), en de werkelijke verdamping op 37% (ca. 290 mm per jaar, dit komt ruwweg overeen met de 280 mm lagere verdamping t.o.v. de potentiële Makkink-verdamping volgens Bastiaanssen & Roozkrans). In dichter bebouwd gebied zoals binnensteden zal de grondwateraanvulling aanzienlijk minder zijn, maar ook daar kan ze niet worden verwaarloosd. In tegenstelling tot wat vaak wordt gedacht, kan regenwater goed door klinker- en tegelverhardingen infiltreren. Bovendien zal dit water, eenmaal geïnfiltrerd, minder makkelijk terug kunnen verdampen dan bij onverharde of begroeide oppervlakken (Tibbals, 1978). Volgens waterbalansberekeningen is de grondwateraanvulling onder dit type verharding 150 tot 200 mm per jaar (Van de Ven, 1998).

Gezien de grote ruimtelijke variatie van zowel de verdampingsreductie als de ontwatering, is de bespreking van de effecten van klimaatverandering op de grondwateraanvulling, in paragraaf 4.5, in twee stappen gesplitst:

1. Bepaling van het effect van de veranderingen in neerslag en verdamping, volgens het W+-scenario, op het potentiële neerslagoverschot (Tabel 4.1). Hiertoe is een verandering per seizoen berekend, gemiddeld over de 5 stations waarvoor verdampingswaarden in de KNMI-Klimaatatlas (2006) staan.
2. Een inschatting van de beïnvloeding van deze effecten door lokale processen die niet in stap 1 kunnen worden berekend: interceptie, verdampingsreductie, ontwatering en indirecte invloeden. Afhankelijk van de beschikbare literatuurgegevens is deze inschatting meer of minder kwantitatief.

Ten behoeve van de tweede stap is Nederland opgedeeld in de onderstaande deelgebieden, op basis van bodem, landgebruik en ontwateringssituatie.

¹ Tritium is in relatief jong grondwater aanwezig als gevolg van kernproeven in de zestiger jaren. Bij het gebruik van tritiumprofielen worden op 1 locatie op verschillende diepten (ca 0-25 m –mv) grondwatermonsters verzameld. Hiervan worden de tritiumconcentraties bepaald. Ten slotte wordt m.b.v. geschatte grondwateraanvullingshoeveelheden geprobeerd dit tritium-diepte profiel te verklaren. Als deze curve na enkele iteraties goed kan worden beschreven is de grondwateraanvulling op jaarbasis bepaald.

Tabel 4.1 Deelgebieden grondwateraanvulling.

Deelgebied nr.	Infiltratie-deelgebied	Bodemprofiel	Gw-situatie	Dominant landgebruik
A	Hooggelegen zandgebieden (o.a. duingebieden, Veluwe, Utrechtse en Sallandse Heuvelrug, Hondsrug, dekzandruggen)	Zand	Droog	Bos, struweel, heide
B	Intermediaire zandgebieden (landbouwgebieden Pleistoceen Nederland en Veenkoloniën)	Zand, leem	Variabel, drainage	Gras, maïs, aardappelen, vollegrondsgroenten
C	Fossiele stroom- en kreekruigen op zoetwater (Rivierengebied, Kromme Rijngebied, Zuid-Beveland)	(klei / zavel op) zand	Variabel	Boomgaarden
D	Veenweidegebieden (Utrecht, Zuid-Holland)	veen (op klei op basisveen) op zand	Nat, drainage	Gras
E	Stedelijk gebied	(ophoog)zand	Variabel, drainage	Bebouwing
F	Infiltrerende oppervlaktewateren (grote rivieren, IJsselmeer, kanalen, meren en plassen, (ring)vaarten, uiterwaarden en boezemlanden)	n.v.t.	n.v.t.	Open water, grasland, rietland

4.5 Toekomstige ontwikkelingen onder het KNMI-2006 W+ scenario

Allereerst is een opmerking met betrekking tot de in deze paragraaf gepresenteerde getallen op zijn plaats. De berekeningen zijn gebaseerd op sterk gegeneraliseerde resultaten uit een zeer beperkt aantal studies. De getallen dienen vooral om de relatieve aandelen van alle beschreven processen te illustreren, zijn daarmee niets meer dan een gedachte-experiment, en zijn zeker niet geschikt om zonder meer op specifieke locaties toe te passen in bijvoorbeeld modelstudies.

Verder moet vooraf worden bedacht dat andere ontwikkelingen dan klimaatveranderingen veruit doorslaggevend kunnen zijn. Hierop wordt in paragraaf 4.6 teruggekomen.

4.5.1 Directe effecten: bruto neerslag, verdamping en potentieel neerslagoverschot

Onder directe invloeden worden verstaan de veranderingen in neerslag en verdamping (via o.a. temperatuur). Deze veranderingen zijn afgeleid door de veranderingspercentages voor neerslag en verdamping uit de scenario's te vermenigvuldigen met langjarige gemiddelden voor de KNMI-stations De Kooy, De Bilt, Eelde, Vlissingen en Maastricht. Het bleek dat de voor deze stations afgeleide waarden onderling niet veel van elkaar verschillen (maximaal 3 mm). Om de analyse

overzichtelijk te houden zijn de waarden van de vijf stations gemiddeld en in onderstaande tabel weergegeven. Op jaarbasis is er volgens tabel 4.3 sprake van een toename van het neerslagoverschot in de winter van 24 mm, en in de overige seizoenen een afname met 108 mm.

Tabel 4.2 Langjarige gemiddelden van klimaatvariabelen De Bilt, en veranderingen daarin, gemiddeld over de KNMI-stations De Kooy, De Bilt, Eelde, Vlissingen en Maastricht (S5), KNMI-scenario W+, jaar 2050. Alle waarden in millimeters. Brongegevens: KNMI-Klimaatatlas Nederland en KNMI-scenario's 2006, m.u.v. de potentiële neerslagoverschot cijfers, welke zijn berekend als het verschil tussen bruto neerslag en potentiële verdamping. Winter=december t/m februari, voorjaar = maart t/m mei, zomer = juni t/m augustus, najaar = september t/m november.

Klimaatvariabele	Winter	voorjaar	zomer	Najaar
Bruto neerslag (De Bilt)	191	171	200	230
Potentiële verdamping (De Bilt)	29	169	258	86
Potentieel neerslagoverschot (De Bilt)	+ 162	+2	-58	+144
W+ verandering Bruto neerslag (S5)	+25	+3	-36	-14
W+ verandering Potentiële verdamping (S5)	+1	+12	+40	+9
W+ verandering Potentieel neerslagoverschot (S5)	+ 24	-9	-76	-23

4.5.2 *Effect interceptieverdamping, verdampingsreductie en oppervlakkige afvoer*

DEELGEBIED A (hoge zandgronden)

Dit deelgebied wordt gekenmerkt door bos, heide en struweelvegetaties, hooggelegen zandgronden, goed doorlatend, over het algemeen arm aan nutriënten en organisch materiaal, en zonder oppervlakkige afvoer. Het neerslagoverschot blijft daardoor niet lang hangen in de wortelzone. Dit betekent dat de W+-neerslagtoename in de winter grotendeels ten goede komt aan de grondwateraanvulling, ongeacht de vegetatie aangezien de absolute verdamping gering is. In de huidige situatie is er in dit deelgebied al sprake van droogtestress in de zomer: de werkelijke verdamping is kleiner dan de potentiële. Een grotere potentiële verdamping in W+ zal dan ook nauwelijks afname van de grondwateraanvulling tot gevolg hebben: het winterneerslagoverschot dat het benodigde water zou moeten verschaffen, is al tot buiten het bereik van de wortelzone gepercoleerd. Samengevat is er op jaarbasis in dit deelgebied sprake van een toename van de grondwateraanvulling die gelijk is aan de toename van het neerslagoverschot in de winter (in W+: 24 mm/jr). Naarmate de huidige omstandigheden lokaal natter zijn, bijvoorbeeld in geval van leem of klei dicht onder het oppervlak, wordt de toename van de grondwateraanvulling kleiner, of kan deze omslaan in een afname.

DEELGEBIED B (intermediaire zandgronden)

Dit deelgebied ligt lager dan deelgebied A en het dominante landgebruik is landbouw. Als gevolg van drainage, ontwateringsmiddelen en/of ondiepe slecht doorlatende lagen kan de oppervlakkige afvoer aanzienlijk zijn. Het neerslagoverschot in de winter zal daardoor in beperkte mate ten goede komen aan de grondwateraanvulling. Dit geldt dus ook voor de toename van het neerslagoverschot onder W+. Anderzijds zal men een W+-

toename in de potentiële verdamping niet ten koste willen laten gaan van het gewas, en overgaan tot beregening uit het grondwater. Samengevat is er, met inbegrip van deze beregening, dan ook sprake van een afname van de grondwateraanvulling die in het meest ongunstige geval gelijk is aan de toename van de potentiële verdamping in het groeiseizoen (meer dan 100 mm/jaar).

DEELGEBIED C (stroom- en kreekruggen)

Dit deelgebied lijkt op deelgebied A, zij het met een paar belangrijke verschillen. In het algemeen zijn de gronden rijker en zaveliger, en zijn de hoogteverschillen kleiner, en daarmee ook de infiltratiesnelheden naar het diepe grondwater. Het neerslagoverschot zal dan ook langer in het bereik de wortelzone blijven. De winterse toename onder W+ zal dan ook voor een groter deel dan bij A terugverdampen in het groeiseizoen. Ook kunnen ontwateringsmiddelen een deel van het neerslagoverschot afvoeren. Voor zover de W+-toename in potentiële verdamping niet door de bodemvochtvoorraad kan worden bijgehouden, zal er beregend moeten worden. Aanvankelijk zal dit wellicht uit het oppervlaktewater kunnen (niet in Zuid-Beveland), maar bij extremere droogte zal de beschikbaarheid daarvan beperkend kunnen worden, en moet alsnog uit het grondwater beregend worden. Samengevat zal de verandering in grondwateraanvulling liggen tussen deelgebied A en B.

DEELGEBIED D (veenweidegebied)

Dit deelgebied lijkt voor wat betreft het grote aandeel oppervlakkige afvoer op deelgebied B. Het toegenomen neerslagoverschot in de W+-winter zal grotendeels oppervlakkig worden afgevoerd. Toenemende watertekorten kunnen in eerste instantie met oppervlaktewateraanvoer, in combinatie met beregening daaruit, gelenigd worden. Bij extremere droogten (zoals 2003) zal, om stabiliteit van veenkaden te waarborgen, brak water worden aangevoerd, maar de veenweiden hebben zoet water nodig. Gezien de commotie rond dit thema in 2003 is het de vraag hoe in de toekomst met dergelijke situaties zal worden omgegaan. Een complicerende factor is dat de voornaamste infiltratiegebieden in dit deelgebied rond drinkwaterwinningen (Groenekan, Bergambacht, Vijfheerenlanden) liggen. Beregening uit grondwater is dan ook niet een vanzelfsprekend alternatief, maar anderzijds kan het ook zeker niet uitgesloten worden. Als dit wel aan de orde is, zal er in droge jaren een aanzienlijke afname van de grondwateraanvulling (ruwe schatting: enkele tientallen mm/jr) aan de orde zijn. Zo niet, dan zijn de effecten op de grondwateraanvulling beperkt als gevolg van de grote dempende werking van het oppervlaktewater.

DEELGEBIED E (stedelijk gebied)

In stedelijk gebied zal het toegenomen W+-winterneerslagoverschot grotendeels worden afgevoerd door riolering en drainage. Toch zal er per saldo een lichte toename van de grondwateraanvulling overblijven, omdat de toename in potentiële verdamping in het groeiseizoen zich, juist door aanwezigheid van verharding en relatief weinig vegetatie, zich slechts beperkt zal vertalen in een toename van de werkelijke verdamping (en afname van de grondwateraanvulling).

DEELGEBIED F (infiltrerend oppervlaktewater)

In dit deelgebied zijn de veranderingen in rivierwaterstanden maatgevend (bij ongewijzigd beleid). Dit betekent: meer dynamiek, 's winters periodiek hogere standen dus meer infiltratie naar het diepe grondwater, 's zomers lagere standen en minder infiltratie. Het netto effect op de grondwateraanvulling zal afhangen van de duur van de hogere en lagere standen.

4.5.3 *Effect verandering neerslagintensiteit*

Een directe invloed die minder goed kwantificeerbaar is, is de verandering in neerslagintensiteit. In het KNMI-2006 W+ scenario neemt in de winter de 10-daagse neerslagsom die eens per 10 jaar wordt overschreden ($T=10$) in 2050 met 12% toe. In de zomer neemt de $T=10$ -dagsom met 10% toe. Met andere woorden de neerslag valt heviger en geconcentreerder. Ook hier is het onderscheid in deelgebieden belangrijk, omdat de effecten tegengesteld kunnen zijn.

- Deelgebieden A (hoge zandgronden) en C (stroom- en kreekruggen): als gevolg van de hogere neerslagintensiteiten zal het relatieve aandeel van interceptieverdamping afnemen. Omdat in de winter deze verdamping toch al gering is, zal het effect op de grondwateraanvulling zeer beperkt blijven. In de overige seizoenen zal het surplus aan water dat infiltreert alsnog door de wortels worden opgenomen. Voor zover er lokaal meer oppervlakkige afvoer zal ontstaan onder invloed van de hogere intensiteiten, zal dit in deze deelgebieden, met overwegend doorlatende gronden en een beperkt of afwezig ontwateringsstelsel, naar verwachting elders alsnog infiltreren.
- Deelgebieden B (intermediaire zandgronden), D (veenweidegebied) en E (stedelijk gebied): verhoudingsgewijs zal meer neerslag oppervlakkig afstromen of stagneren op ondiepe, slecht doorlatende lagen c.q. verharding, en zijwaarts afstromen naar de ontwateringsmiddelen c.q. riolering. De grondwateraanvulling neemt (verder) af.
- Deelgebied F (infiltrerend oppervlaktewater): geen effect

4.5.4 *Indirecte invloed : toename CO₂-concentratie*

Een toename van CO₂-concentraties beïnvloedt de verdamping van vegetaties. Twee tegengestelde processen kunnen hierin een rol spelen. Ten eerste een versnelde fotosynthese, waardoor meer biomassa (leaf area) wordt geproduceerd die de verdamping doet toenemen. Dit proces wordt het LAI-effect (Leaf Area Index) genoemd. Een mogelijk bijkomend verschijnsel is een dikkere strooisellaag, waarin meer vocht blijft hangen en die de verdamping dan ook extra zou kunnen bevorderen. Ten tweede een efficiënter gebruik van water als gevolg van een aanpassing van de stomata aan de CO₂-toename. Dit proces wordt het WUE-effect (Water Use Efficiency) genoemd.

In de literatuur worden soms grote verdampingstoename als gevolg van het LAI-effect gemeten. Het betreft dan veelal pot- of kasexperimenten onder goed geventileerde omstandigheden. Volgens Witte et al. (2006) is het LAI-effect in de praktijk echter verwaarloosbaar, omdat onder veldomstandigheden (bv. monoculturen) de planten elkaar zodanig beconcurreren dat groeiruimte beperkend lijkt te zijn. Of dit ook voor open, gemengde bossen geldt is minder duidelijk. Zo wordt wel gesuggereerd dat de bijgroei van bossen met 10-30% kan toenemen².

Witte et al. (2006) hebben correctiefactoren voor de verdamping onder klimaatverandering berekend voor verschillende typen begroeiing. Voor het jaar 2050 zijn de berekende gemiddelde reducties 4% voor loofbos, struweel, maïs en overige natuur, 3% voor andere landbouwgewassen en naaldbos, en 2% voor grasland en voedselarme, droge gebieden. De variaties worden onder meer veroorzaakt door het

² Alterra: <http://www.dow.wau.nl/msa/nopimpact/landgebruik/FactsheetBosbouw-def.doc.doc>

type fotosynthese (maïs is een zgn. C4-gewas en reageert sterker op CO₂-variaties), aerodynamische ruwheid (bij loofbos en struweel is de uitwisseling met de atmosfeer efficiënter). De relatief lage reductie in voedselarme gronden wordt toegeschreven aan het feit dat planten op zoek gaan naar o.a. stikstof om te profiteren van de sterkere toevoer van koolstof uit de atmosfeer, en daartoe hun wortelstelsels uitbreiden, hetgeen de verdamping juist weer doet toenemen (Witte et al., 2006). Volgens Lankreijer (1998) echter reageren de stomata van naaldbomen 'vaak' niet op hogere CO₂-concentraties, en zou er dan ook geen verdampingsafname aan de orde zijn.

Uit het bovenstaande blijkt dat nog niet op alle fronten eensgezindheid bestaat over de invloed van deze processen. De studie van Witte et al. (2006) lijkt wel alle relevante mechanismen en terugkoppelingen te hebben beschouwd, waarbij men overigens zelf aangeeft dat sommige daarvan niet onderzocht konden worden. De berekende percentages zijn dan ook omgeven met de nodige onzekerheden.

Wat betekent dit voor de deelgebieden:

Deelgebied A (hoge zandgronden): voor zover de begroeiing inderdaad efficiënter water gaat gebruiken, zal dat hooguit betekenen dat later in het groeiseizoen een vochttekort op gaat treden, m.a.w. er zal langer optimaal verdampt kunnen worden. Op de grondwateraanvulling zal dit geen noemenswaardig effect hebben.

Deelgebied B (intermediaire zandgronden): bij een efficiënter watergebruik zal minder snel beregend hoeven te worden uit het grondwater. Uitgaande van een 3 tot 4% efficiënter verbruik, en een potentiële verdamping van 570 mm in voorjaar, zomer en najaar onder W+³ kan dit een besparend effect in de orde van grootte van 15 tot 20 mm opleveren.

Deelgebied C (stroom- en kreekruigen): Analoog aan de argumentatie in paragraaf 4.5.2 zal het besparend effect inliggen tussen deelgebied A en B.

Deelgebied D (veenweidegebied): De effecten op de grondwateraanvulling zullen beperkt zijn als gevolg van de sterke wisselwerking met het oppervlaktewater, zie ook paragraaf 4.5.2. De behoefte aan beregening uit het grondwater zal eventueel af kunnen nemen met ca. 10 mm, uitgaande van een 2% efficiënter waterverbruik en 570 mm potentiële verdamping per jaar.

Deelgebied E,F (stedelijk gebied en infiltrerend oppervlaktewater): Gezien de beperkte rol van begroeiing zijn de besproken effecten in deze deelgebieden niet van betekenis.

4.5.5 *Indirecte invloed: lengte groeiseizoen*

Als gevolg van een temperatuurstijging kan de lengte van het groeiseizoen veranderen. Verwacht wordt dat het in Zuid-Europa korter wordt onder invloed van hogere verdamping, en in Noord-Europa juist langer vanwege geringere beperkingen door vorstschade (Olesen & Bindi, 2002; Rötter & Van de Geijn, 1999). Voor tussenliggende gebieden zoals Nederland bestaat geen eensgezindheid in de verwachtingen. RIVM/MNP (2000) verwachten een verlenging van het groeiseizoen met 5 tot 10 dagen, terwijl andere bronnen juist uitgaan van een verkorting, als gevolg van een versnelde veroudering van het gewas⁴. Zhang & Liu (2005) gaan voor het (klimatologisch gematigde) löss-plateau in China uit van 5 dagen verkorting. Van belang lijkt hierbij te zijn het onderscheid tussen zgn. 'determinate' en 'indeterminate crops'. Bij eerstgenoemd type is het groeitraject tot aan de rijping veel meer vastgelegd: op zeker moment is het gewas 'klaar' en moet het geoogst worden. Dit is bv. het geval

³ Tabel 4.2: 513 mm huidig exclusief de winter, vermeerderd met 61 mm toename onder W+

⁴ Alterra: <http://www.dow.wau.nl/msa/nopimpact/landgebruik/FactsheetLandbouw.defdoc.doc>

bij wintertarwe en maïs, maar binnen gewassen kunnen ook onderrassen van beide typen vóórkomen, bv. aardappelen (Olesen & Bindi, 2002). Bij ‘indeterminate crops’ kan de plant min of meer onbeperkt doorgroeien (bv. wortels, gras), en hier lijkt dan ook eerder een verlenging van het groeiseizoen aan de orde te zijn, op voorwaarde dat het benodigde water beschikbaar is of kan worden gemaakt.

Wat betekent dit voor de deelgebieden:

Deelgebied A (hoge zandgronden): het langer of korter worden van het groeiseizoen is in deze droge gebieden sterk gerelateerd aan de optredende vochttekorten / verdampingsreductie. Op de grondwateraanvulling zal er geen noemenswaardig effect zijn.

Deelgebied B (intermediaire zandgronden): Afhankelijk van het gewas, en uitgaande van bovengenoemde schattingen voor verlenging / verkorting en een gemiddelde (potentiële) dagverdamping in het groeiseizoen van 2.5 mm, zal de waterbehoefte met 10 tot 15 mm kunnen toe- of afnemen. Ook hier geldt dat dit effect veelal via de beregeningsbehoefte zal doorwerken.

Deelgebied C (stroom- en kreekruigten): Te verwachten valt dat fruitbomen bij voldoende vochtvoorziening langer in blad staan. Bij extremere droogten is het nog maar de vraag of dat gebeurt, en juist dan valt het grootste effect op de grondwateraanvulling te verwachten als gevolg van de noodzaak tot beregening uit grondwater (zie paragraaf #45.2). Het te verwachten effect is dan ook onduidelijk, maar het is denkbaar dat het zeer beperkt blijft.

Deelgebied D (veenweidegebied): Te verwachten valt dat het groeiseizoen voor grassen langer wordt. De effecten op de grondwateraanvulling zullen beperkt zijn als gevolg van de sterke wisselwerking met het oppervlaktewater, zie ook paragraaf 4.5.2. De behoefte aan beregening uit het grondwater zal iets kunnen toenemen met 10-15 mm.

Deelgebied E,F (stedelijk gebied en infiltrerend oppervlaktewater): Gezien de beperkte rol van begroeiing zijn de besproken effecten in deze deelgebieden niet van betekenis.

In onderstaande tabel 4.4 zijn voor de verschillende deelgebieden de effecten van veranderingen in CO₂-concentraties en lengte van het groeiseizoen samengevat.

Tabel 4.3 Effecten van toename CO₂-concentratie en verandering lengte groeiseizoen op de grondwateraanvulling (- = minder , + = meer grondwateraanvulling, 0 = geen noemenswaardig effect)

Klimaatvariabele	Effecten van toename CO ₂ -concentratie	Effect van verandering lengte groeiseizoen
Deelgebied A	0	0
Deelgebied B	+	+ of – afhankelijk van gewas
Deelgebied C	+	0
Deelgebied D	+ bij beregening uit grondwater	- bij beregening uit grondwater
Deelgebied E	0	0
Deelgebied F	0	0

4.5.6 Indirecte invloed: organisch stofgehalte in de bodem

Het organisch stofgehalte in de bodem beïnvloedt de capaciteit om water vast te houden (o.a. Rounsevell, 1999), en daarmee de verhouding tussen neerslagoverschot en grondwateraanvulling.

Ook ten aanzien van het organisch stofgehalte zijn er tegengestelde effecten denkbaar. Enerzijds kunnen hogere CO₂ concentraties de groei van vegetatie stimuleren, waardoor er meer biomassa ontstaat dat op zijn beurt het organisch stofgehalte in de bodem kan verhogen. Overigens is in paragraaf 4.5.4. al aangegeven dat deze groei in de praktijk tegen zal vallen vanwege een beperkte fysieke groeiruimte, met name bij landbouwgewassen. Anderzijds zal de afbraaksnelheid van organisch materiaal toenemen wanneer de bodem warmer wordt onder invloed van klimaatverandering. De huidige opinie neigt naar het toekennen van een overwicht aan het effect op de afbraaksnelheid, met andere woorden netto zal het organisch stofgehalte in de bodem afnemen (DEFRA, 2005). Dit geldt met name voor gematigde streken waar afbraaksnelheden nu laag zijn (Rounsevell et al. , 1999). Een ander effect van lagere organische stofgehalten is het verlies aan bodemkwaliteit, -stabiliteit en -structuur (Holman, 2005). Een toename in stagnatie van infiltrerend regenwater is dan denkbaar.

Wat betekent dit voor de deelgebieden:

Deelgebied A (hoge zandgronden): De bodems in deze gebieden zijn momenteel al arm aan organisch materiaal. Als er al een toename van het organisch stofgehalte plaats zou vinden – wat niet waarschijnlijk is gezien het gebrek aan nutriënten in deze bodems – ligt het voor de hand dat dit teniet wordt gedaan door zowel uitloging door het neerslagoverschot in de winter als versnelde afbraak door hogere bodemtemperaturen. In droge bodems zal de bodemtemperatuur relatief sterk toenemen. Samengevat zal het effect in dit deelgebied zeer gering zijn.

Deelgebied B (intermediaire zandgronden): Voor zover het organisch stofgehalte in deze gebieden niet sterk wordt bepaald door externe mestgiften, is er op grond van het bovenstaande een netto afname te verwachten. Dit betekent een afname in de bergingscapaciteit van de bodem. Dit betekent dat de kans op percolatie van geïnfiltreerd regenwater groter wordt, er blijft minder hangen in de wortelzone. Er zal weliswaar meer grondwateraanvulling zijn, maar dit wordt teniet gedaan doordat er (nog) eerder beregening uit grondwater nodig is, omdat de vochtbeschikbaarheid voor planten lager wordt. Een verlies aan bodemkwaliteit – voor zover dat niet wordt bestreden door de boer - kan een toename van het aandeel oppervlakkige afvoer tot gevolg hebben. Samengevat zou dit proces een beperkte extra afname van de grondwateraanvulling kunnen betekenen, die overigens niet kwantificeerbaar is.

Deelgebied C (stroom- en kreekruigen): Op grond van het bovenstaande is er een netto afname van het organisch stofgehalte te verwachten, met als gevolg een toename van de grondwateraanvulling, maar ook mogelijk een eerder optredend bodemvochttekort. In niet al te droge jaren wordt dit gecompenseerd met beregening uit het oppervlaktewater, en zal het netto effect op de grondwateraanvulling positief zijn. In droge jaren zal eerder moeten worden overgegaan tot beregening uit het grondwater, en lijkt het proces weinig effect te hebben. Ook hier geldt dat het proces niet kwantificeerbaar is, en dat aanpassingen in mestgiften etc. de effecten waarschijnlijk zullen compenseren.

Deelgebied D (veenweidegebied): Aangezien de bodems hier uit veen bestaan, is dit proces hier niet relevant.

Deelgebied E,F (stedelijk gebied en infiltrerend oppervlaktewater): Gezien het zeer beperkte areaal natuurlijke bodems zijn de besproken effecten in deze deelgebieden niet van betekenis.

4.5.7 *Krimpscheurvorming en veenoxidatie*

Door diverse onderzoekers wordt de toename van krimpscheurvorming in klei en oxidatie van veen in droge perioden als mogelijk probleem van klimaatverandering gesignaleerd. Via krimpscheuren kunnen grote hoeveelheden infiltrerend regenwater ongehinderd de wortelzone passeren en de grondwateraanvulling aanzienlijk vergroten (Rounsevell, 1999). Als gevolg van klimaatverandering, en in het bijzonder de droge W+-zomers, is het goed denkbaar dat dergelijke scheuren vaker gaan ontstaan en/of zich uitbreiden. In combinatie met de verwachting dat W+-zomerneerslag geconcentreerder en geïsoleerder gaat vallen, kan dit tot gevolg hebben dat een groot deel hiervan snel via krimpscheuren percoleert. Hierbij gelden echter nog wel een paar voorwaarden: (1) de krimpscheuren reiken tot relatief diep in de klei- of veenlaag, hetgeen in de praktijk betekent dat de slecht doorlatende deklaag maximaal enkele meters dik is; en (2) er is geen sprake van kwel. Iets soortgelijks geldt voor veenoxidatie. Als een deel van de veenlaag in rook op gaat betekent dat in theorie een verlaging van de weerstand dus meer grondwateraanvulling. Hoe dikker de deklaag, hoe kleiner de relatieve afname van de weerstand, zeker als het zeer slecht doorlatende Basisveen aan de onderkant aanwezig is.

Naar verwachting kan een toename van de grondwateraanvulling onder invloed van krimpscheuren / veenoxidatie in Nederland slechts op een beperkte oppervlakte aan de orde zijn, namelijk daar waar de kleiige of venige deklaag dun is, op zand ligt, en waar sprake is van infiltratie. Een dergelijke situatie is lokaal aan de orde in deelgebieden C (stroom- en kreekkruggen) en D (veenweidegebied), bijvoorbeeld in delen van het Kromme en Oude Rijngebied, de Betuwe, en rond grondwaterwinningen in de overgangsgebieden tussen Pleistoceen en Holoceen Nederland. Het is denkbaar dat het netto effect zeer beperkt blijft, omdat de kans groot is dat er eerder uit het grondwater beregend moet worden. De extra grondwateraanvulling gaat immers ten koste van het bodemvochtgehalte in de wortelzone.

4.5.8 *Zoet-zout interactie processen*

Duingebieden maken deel uit van deelgebied A, waar een toename in grondwateraanvulling te verwachten is. Lokaal kunnen hier aanvullende processen een rol spelen, die dit effect enigszins tegenwerken:

- Als gevolg van de zeespiegelstijging kan de (zoete) grondwaterstand zodanig stijgen dat verdampingsreductie in droge perioden afneemt: de grondwaterspiegel komt dichterbij de wortelzone te liggen waardoor er meer verdampt kan worden. De grondwateraanvulling neemt hierdoor af.
- Duinversmalling betekent een forse verkleining van de zoetwaterzak in duingebieden. De breedte waarover hemelwater kan infiltreren en tot grondwateraanvulling kan komen, is kleiner, en daarmee dus ook de grondwateraanvulling.

Het resulterende effect van de beschreven processen hangt niet alleen af van hun intensiteit, maar ook van de doorwerking volgens de Ghyben-Herzberg relatie. Volgens deze relatie heeft elke cm verandering in de opbolling van zoet water t.o.v. het referentievlak, een verandering van 40 cm in de dikte van de zoetwaterlens beneden dit vlak tot gevolg. In de praktijk is dit vaak minder als gevolg van de aanwezigheid van slecht doorlatende lagen. Uit de zoet-zoutmodellering in het kader van deze studie

(hoofdstuk 6) zal duidelijk worden in welke gebieden de grondwatervoorraad onder invloed van de genoemde processen toe – of afneemt.

Overigens is de inschatting dat beide effecten slechts zeer lokaal relevant zijn. Het eerstgenoemde proces is alleen relevant als de grondwaterstand stijgt van buiten naar binnen de invloedssfeer van de wortelzone. In veel gevallen zal het grondwater echter zo diep staan dat de vegetatie er ondanks een stijging nog steeds niet bij kan. Het optreden van duinversmallingen is grotendeels afhankelijk van het rijksbeleid inzake de kustontwikkeling, en het uitgangspunt daarbij is het consolideren van de kustlijn of zelfs beperkt zeewaarts gaan.

4.6 Synthese en conclusie

4.6.1 Algemeen

In de voorgaande paragrafen is een overzicht gegeven van directe en indirecte invloeden van klimaatverandering op de grondwateraanvulling in Nederland, onderscheiden in zes deelgebieden. In deze concluderende paragraaf wordt eerst per deelgebied, en vervolgens voor heel Nederland de balans opgemaakt, voor zover de beschikbare informatie dat toelaat.

Hierbij is het toch noodzakelijk geacht om één en ander in perspectief te plaatsen. Hiertoe is een aantal relevante toekomstige beleids- en economische ontwikkelingen, die al dan niet door klimaatverandering worden ingegeven, beschouwd. Zonder een dergelijke beschouwing is elke klimaateffectstudie met betrekking tot water incompleet (Holman, 2005). Zo is het denkbaar dat op klimaateffecten in landbouwgebieden, zowel op regionale als globale schaal, zal worden geanticipeerd door middel van het overschakelen op andere teelten, aanpassingen in bodem- en waterhuishouding op bedrijfsniveau, etc. Volgens Rounsevell (1999) zijn door klimaat geïnduceerde aanpassingen in landgebruik en gebiedsbeheer wellicht zelfs dominant.

4.6.2 *Klimaatverandering en grondwateraanvulling: de balans opgemaakt per deelgebied.*

Deelgebied A (hoge zandgronden):

De grote infiltratiesnelheden en diepe grondwaterstanden zijn in deze gebieden doorslaggevend. In de winter neemt de grondwateraanvulling toe, terwijl in de zomer de werkelijke verdamping niet groter zal worden omdat de waterbeschikbaarheid beperkend is. De besproken indirecte effecten lijken niet of nauwelijks relevant. De verwachting is dan ook dat in deze gebieden de grondwateraanvulling per saldo groter wordt met enkele tientallen mm per jaar (neerslagoverschot winter volgens W+).

Ogenschijnlijk tegenstrijdig met de toenemende grondwateraanvulling is het optreden van een hoger neerslagtekort. Het surplus aan water valt echter 's winters, en is al buiten het bereik van de vegetatie geïnfiltrerd op het moment dat verdamping wezenlijk van belang wordt. In de zomer zal er dan ook net zo weinig water beschikbaar zijn als nu, maar wordt de watervraag wel groter als gevolg van de hogere temperaturen. Hoewel de aanwezige vegetatie als gevolg van het hogere neerslagtekort onder grotere druk zal komen te staan, ligt het niet voor de hand dat hier beheersmaatregelen op zullen volgen om dit tekort te verminderen. Veeleer is een

geleidelijke verschuiving naar droogtetolerante soorten te verwachten (Lasch et al., 2002).

De tendens om bossen op natuurlijker wijze te gaan beheren zal het beschreven effect mogelijk nog iets versterken, aangezien commerciële opstanden van naaldbomen dan in areaal zullen verminderen ten gunste van natuurlijker, open bos met een groter aandeel loofbomen.

Deelgebied B (intermediaire zandgronden):

Deelgebied B reageert naar verwachting tegengesteld aan deelgebied A: een surplus aan neerslag in de winter wordt oppervlakkig afgevoerd, terwijl de grotere watervraag in de zomer zal worden gecompenseerd met beregening uit de grondwatervoorraad. Het gevolg is een afname in grondwateraanvulling met vele tientallen mm per jaar. Dit wordt versterkt door een verwachte toename in de neerslagintensiteit, en voor een beperkt deel gecompenseerd door een efficiënter watergebruik van landbouwgewassen bij verhoogde CO₂-concentraties. Indirecte invloeden via de lengte van het groeiseizoen en het organisch stofgehalte in de bodem zijn onduidelijk en/of niet kwantificeerbaar en bij sterk overschaduw door aanpassingen in bedrijfsvoering, teelt of landbewerking. Samengevat zal er per saldo een afname in de grondwateraanvulling met vele tientallen mm per jaar aan de orde zijn, die voornamelijk uitwerkt via een toegenomen beregening uit het grondwater.

Zoals aangegeven zullen aanpassingen in bedrijfsvoering, teelt, landbewerking, of ruimtelijk beleid (landbouwgrond wordt natuur of stad) de beschreven effecten sterk beïnvloeden of zelfs kunnen domineren. Deze hoeven niet per se gunstig te zijn of te zijn ingegeven door reacties op klimaatverandering, gelet op de verwachte verschuiving naar (meer waterbehoefte) vollegrondsgroenten. Daarnaast zijn aanpassingen in het beleid t.a.v. beregening een belangrijke factor.

Deelgebied C (stroom- en kreekruigten):

In droge zomers zal de grondwateraanvulling naar verwachting afnemen omdat in toenemende mate een beroep moet worden gedaan op beregening uit het grondwater om aan de verdampingsvraag van het gewas (m.n. fruitteelt) te voldoen. Dit wordt in beperkte mate gecompenseerd door een efficiënter watergebruik. Verder staat er een beperkte toename van de grondwateraanvulling in de winter tegenover. In Zuid-Beveland is de situatie relatief ongunstig, omdat sneller uit grondwater berekend moet worden (het aan te voeren oppervlaktewater is brak tot zout), en omdat de zoete grondwatervoorraad beperkt in omvang is. De overige, indirecte effecten zijn naar verwachting zeer beperkt, of worden teniet gedaan door compensatie in de vorm van beregening uit het grondwater. Per saldo is de verwachting dat de grondwateraanvulling op jaarbasis niet sterk zal veranderen, maar dat er wel verschillen tussen de seizoenen zullen optreden. Net als voor deelgebied B geldt dat landbouwkundige aanpassingen een grote of dominante invloed kunnen hebben.

Deelgebied D (veenweidegebied):

Dankzij de sterke interactie met het oppervlaktewater zal de grondwateraanvulling niet veel veranderen, hoewel een beperkte afname te verwachten valt als gevolg van toenemende neerslagintensiteiten waardoor relatief meer oppervlakkige afvoer plaats zal vinden. Dit alles geldt zolang het niet te droog wordt zoals in 2003. Is dat wél het geval, dan wordt het oppervlaktewater ongeschikt voor de aanwezige gebruiksfuncties, en wordt het al dan niet toestaan van beregening uit het grondwater in deze gebieden

een cruciale factor. Wordt dit wél toegestaan, dan kan de grondwateraanvulling in droge jaren met enkele tientallen mm per jaar afnemen, wat nog versterkt kan worden door een langer groeiseizoen voor gras.

Deelgebied E (stedelijk gebied):

In stedelijk gebied wordt het effect op de grondwateraanvulling sterk gedempt door de aanwezige verharding. Dit geldt zowel voor een hoger neerslagoverschot in de winter (dat grotendeels oppervlakkig zal worden afgevoerd), als een toegenomen verdamping in de zomer (regenwater dat eenmaal geïnfiltrerd is door verharding, verdampst moeilijk terug naar de atmosfeer).

In veel stedelijk gebied is weinig oppervlaktewater aanwezig. Drogere zomers zullen dan leiden tot meer beregning van tuinen en parken. Veelal gebeurt dit met leidingwater of tankwagens. Op macroniveau zijn deze te beschouwen als onttrekkingen aan de grondwatervoorraad, maar met lokale grondwateraanvulling heeft dit weinig meer te maken.

De komende decennia zullen veel bestaande riolen worden vervangen, waarbij regenwater zal worden afgekoppeld middels IT-riolen. Dit heeft tot gevolg dat in droge perioden meer grondwateraanvulling zal plaatsvinden. Deze ontwikkeling zal een eventueel effect van klimaatverandering op grondwater in stedelijk gebied waarschijnlijk overschaduwen.

Deelgebied F (infiltrerend oppervlaktewater):

Het effect van klimaatverandering op grondwateraanvulling in de vorm van infiltratie vanuit de grote (en ook kleinere) rivieren zal sterk afhangen van veranderingen in de afvoerregimes. Conform de voorspellingen zullen winterrivierstanden toenemen en zomerstanden afnemen, en wordt de dynamiek groter. Hoe dit netto uitwerkt voor de grondwateraanvulling staat nog te bezien. Feit is wel dat het oppervlak van deelgebied F zeer beperkt is vergeleken bij de andere deelgebieden.

Het rijksbeleid voor veiligheid tegen overstromingen (Ruimte voor de Rivieren) kan een aanzienlijk positief effect hebben op de grondwateraanvulling onder het omliggende gebied (bv. Overbetuwe, zie paragraaf #.2). In dit kader staan tal van verbredingen van het rivierbed op het programma, eventueel in combinatie met het verdiepen ervan, en het afgraven van uiterwaarden. Het (periodiek) geïnundeerd oppervlak neemt toe, terwijl de ondergrondse weerstand tegen percolatie afneemt.

4.6.3 *Klimaatverandering en grondwateraanvulling: de balans opgemaakt voor Nederland.*

Alles bij elkaar ontstaat het volgende beeld:

- Op de droge en hoge zandgronden neemt de grondwateraanvulling met enkele tientallen mm per jaar toe;
- Op de intermediaire zandgronden, vaak landbouwgebied, neemt de grondwateraanvulling af met tientallen mm per jaar via beregning.
- Op de stroom- en kreekruggen in het rivierengebied is het effect minder uitgesproken, in droge jaren is een vermindering van de grondwateraanvulling via beregning vermoedelijk dominant.
- In het veenweidegebied is het effect beperkt. Afhankelijk van toekomstig beleid ten aanzien van beregning kan er in droge jaren een afname in de

grondwateraanvulling van enkele tientallen mm per jaar aan de orde zijn.

Beleidsontwikkeling ten aanzien van beregening in deze gebieden lijkt een cruciale factor.

- In stedelijk gebied is het effect zeer beperkt, en gedomineerd door andere ontwikkelingen.
- Langaars de (grote) rivieren is het netto effect op jaarbasis onduidelijk, en gedomineerd door andere ontwikkelingen.

De hoge en intermediaire zandgronden hebben verreweg het grootste aandeel in het totale oppervlak aan infiltratiegebied in Nederland. Dit zijn ook de gebieden waar de meest uitgesproken effecten te verwachten zijn. Veel drinkwaterwinningen zijn op de hoge zandgronden gesitueerd, en een toename in de grondwateraanvulling op die locaties is dan ook gunstig. Op de intermediaire zandgronden lijkt het een kwestie van afwegen: gaat de toenemende watervraag ten koste van de onderliggende grondwatervoorraad of passen we het landgebruik aan? In het eerste geval zal de grondwatervoorraad in die gebieden sterk afnemen naarmate het aantal droge jaren frequenter gaat vóórkomen. Het is goed denkbaar dat het de toename in deelgebied A zal overtreffen, met andere woorden dat de grondwatervoorraad zal afnemen.

Een belangrijke conclusie is verder dat grondwateraanvulling en beregening sterk met elkaar verweven blijken te zijn.

4.6.4 *Beantwoording vragen*

Primaire vraag: Kunnen er in de toekomst procesmatige veranderingen plaatsvinden vanaf de regendruppel tot aan het grondwater, waardoor de grondwateraanvulling zal wijzigen? *Antwoord:* Ja, met name in het Pleistocene zandgebied van Noordoost-, Oost-, Midden- en Zuid-Nederland. Op de hogere zandgronden is een toename van de grondwateraanvulling met enkele tientallen mm per jaar te verwachten, op de intermediaire zandgronden – bij ongewijzigd beleid – een afname die kan oplopen tot vele tientallen mm per jaar.

Secundaire vraag: Kunnen de effecten van klimaatverandering op de grondwatervoorraden afdoende worden beschreven door de huidige generatie grondwatermodellen? *Antwoord:* De beschreven indirecte effecten lijken over het algemeen beperkt, en als ze al relevant zijn worden ze veelal sterk gereduceerd door compensatie in de vorm van beregening, of landbouwkundige bedrijfsvoering (bv. mestgift, teelt- en raskeuze, bodemverbetering). Voor de numerieke modelberekeningen in de onderhavige studie leidt het niet-meenemen van deze indirecte effecten niet tot onjuiste conclusies, omdat de studie op nationaal schaalniveau wordt uitgevoerd. Naarmate lokale omstandigheden doorslaggevend worden verdient het wél aanbeveling om in ieder geval de informatie die beschikbaar is, mee te nemen. Het detailniveau van de vraag die met het model wordt beantwoord is daarbij leidend. Zo is het aanpassen van verdampingscijfers op basis van de kentallen van Witte et al. (2006) een relatief eenvoudige opgave, die behoorlijk andere uitkomsten zou kunnen genereren voor bijvoorbeeld wateraanvoerbehoeften in de zomer. Overigens: als het gaat om het verkrijgen van een volledig en integraal gekwantificeerd beeld van klimaat effecten op waterbehoeften, valt er meer winst te behalen met het gekoppeld doorrekenen van macro-economische, agronomische en klimaathydrologische scenario's.

4.7 Literatuur

Bastiaanssen, W. & Roozkrans, H. (2003) Vlakdekkende actuele verdamping van Nederland operationeel beschikbaar. *Stromingen* (2003), no. 4, 5-19.

CHO-TNO (1986) Verklarende hydrologische woordenlijst. Rapporten en nota's no. 16, 's-Gravenhage.

DEFRA (2005) Impacts of climate change on soil functions. Final project report SP0538, Department for Environment, Food and Rural Affairs, London.

Holman, I.P. (2006) Climate change impacts on groundwater recharge – uncertainty, shortcomings, and the way forward? *Hydrogeology Journal* (2006), 14: 637-647.

Huinink, J.T.M. (1998) Neerslag, verdamping en neerslagoverschotten: regionale verschillen binnen Nederland. Ede: Informatie- en Kenniscentrum Landbouw (IKC).

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2001): Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of IPCC.

Lankreijer, J.M.L. (1998) The water balance of forests under elevated atmospheric CO₂. Proefschrift Rijks Universiteit Groningen.

Lasch, P., Lindner, M., Erhard, M., Suckow, F. & Wenzel, A. (2002) Regional impact assessment on forest structure and functions under climate change – the Brandenburg case study. *Forest Ecology and Management* 162 (2002), 73-86.

Meinardi, C.R., Schotten, C.G.J., & De Vries, J.J. (1998) Grondwateraanvulling en oppervlakkige afstroming in Nederland. Langjaarlijkse gemiddelden voor de zand- en leemgebieden. *Stromingen* (1998), no. 3, 27-41.

Meinardi, C.R., Van den Eertwegh, G.A.P.H. van den, & Schotten, C.G.J. (1998-2) Grondwateraanvulling en oppervlakkige afstroming in Nederland. Deel 2: De ontwatering van de kleigronden. *Stromingen* (1998), no. 4, 5-19.

Olesen, J.E. & Bindi, M. (2002) Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *European Journal of Agronomy* 16 (2002), 239-262.

RIVM / MNP (2000) Milieuverkenning 5. Samsom H.D. Tjeenk Willink b.v., Alphen a/d Rijn.

Rötter R. & Van de Geijn, S.C. (1999) Climate change effects on plant growth, crop yield and livestock. *Climate Change* 43, 651-681.

Rounsevell, M.D.A., Evans, S.P. & Bullock, P. (1999) Climate change and agricultural soils: impact and adaptation. *Climatic Change* 43: 683-709.

SBR / Projectbureau TU Delft (2007) Ontwatering in stedelijk gebied. Groeidocument project Beter Bouw- en Woonrijp Maken. www.bouwrijp.nl.

Tibbals, C.H. (1978) Effects of paved surfaces on recharge to the Floridan Aquifer in East-Central Florida -- a conceptual model. U.S. Geological Survey Water-resources investigations report 78-76, Tallahassee FL.

Van de Ven, F.H.M. (1998) Waterbeheersing stedelijke gebieden. Collegedictaat CTIw5510, Faculteit Civiele Techniek, TU Delft.

Werkgoep HELP-tabel (1987) Invloed van de waterhuishouding op de landbouwkundige productie; rapport van de Werkgoep HELP-tabel, Mededeling Landinrichtingsdienst no. 176.

Witte, J.P.M., Kruijt, B. & Maas, C. (2006) Effecten van CO₂-toename op de verdamping. KIWA-rapport KWR06.003, Nieuwegein.

Zhang, X.-C. & Liu, W.-Z. (2005) Simulating potential response of hydrology, soil erosion, and crop productivity to climate change in Changwu tableland region on the Loess Plateau of China. *Agricultural and Forest Meteorology* 131 (2005) 127-142.

5 Ontwikkeling beregening uit grondwater

5.1 Inleiding

Een belangrijke, maar seizoensgebonden, vorm van watergebruik is beregening van graslanden en akkerbouwgewassen. Hiervoor kan zowel oppervlaktewater als grondwater worden gebruikt. Beregening met grondwater vindt vooral plaats op zandgronden, aangezien daar – zeker in droge perioden - weinig oppervlaktewater voorhanden is. Deze aanslag op de grondwatervoorraad is doorgaans weliswaar van beperkte duur en ook van relatief beperkte omvang, maar vindt juist plaats als de natuur het toch al extra moeilijk heeft door de droogte. Wat is de omvang van beregening uit grondwater, wat betekent dit voor het grondwatersysteem en welke ontwikkelingen richting 2050 zijn er nog te verwachten? In dit hoofdstuk wordt getracht antwoorden op deze vragen te formuleren. We starten echter met een korte beschrijving van de achtergronden van beregening.

5.2 Achtergronden van beregening

Beregening wordt vooral in perioden van droogte toegepast op graslanden, op akkerbouwgronden (met name als daarop aardappelen, suikerbieten of snijmaïs worden geteeld), op tuinbouwgronden (zowel op open grond als in kassen) en op sport- en recreatieterrainen. De aanleiding is doorgaans dat het vocht in de wortelzone zo gering is geworden dat er droogtestress voor de gewassen dreigt. Deze kan leiden tot een vermindering van de omvang en/of kwaliteit van de productie.

Andere redenen voor beregening kunnen zijn het voorkómen van vorstschade bij fruitteelt in het voorjaar, het voorkómen van broeien (bijvoorbeeld bij houtsnippers van gekapte bomen), stofbestrijding bij sloopwerkzaamheden en het beter bespeelbaar maken van kunstvelden (Boerefijn en Aarts, 2007). Verder is ook nog als reden genoemd het koelen van grond voor de champignonteelt (Meeusen et al., 2000) of de aardappelteelt (Stuurman et al., 2007).

Het meest wordt beregening toegepast om het vochttekort in de wortelzone te verminderen, zodat droogtestress kan worden voorkomen. Er is geschat dat hiervoor gemiddeld 4-6 keer per jaar wordt beregend, met een gemiddelde gift van circa 25 mm per keer (Royal Haskoning, 2005). Deze toepassing van beregening hangt af van: (1) de grondsoort, (2) het grondgebruik en (3) de weersomstandigheden, zoals hieronder toegelicht.

Ad 1. Grondsoort

De toepassing van beregening wordt ondermeer bepaald door het vermogen van de grond om bodemvocht vast te houden. Doordat zandgronden minder bodemvocht kunnen vasthouden, is beregenen daar sneller nodig dan op andere grondsoorten. Het kan zelfs in natte jaren nog nodig zijn om op zandgronden te beregenen. Aangezien oppervlaktewater in zandgrondgebieden doorgaans slechts beperkt beschikbaar is, bestaat circa tweederde van het voor beregening gebruikte water uit grondwater (Hoogeveen et al., 2003). Dit ondanks het in de meeste provincies geldende voorschrift dat voor beregening in principe oppervlaktewater moet worden gebruikt. Pas als daarvan onvoldoende beschikbaar is mag grondwater worden gebruikt.

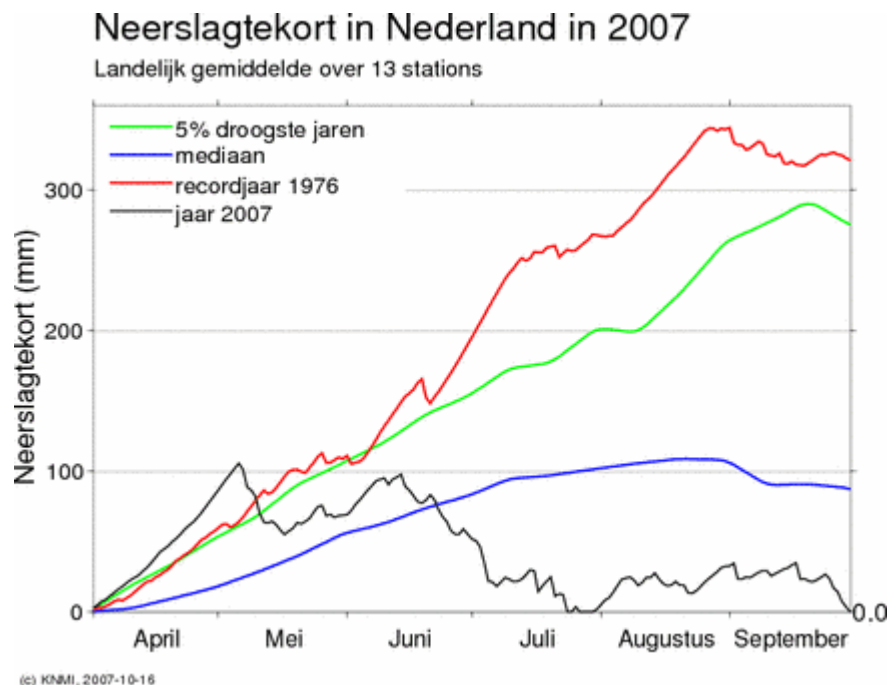
Ad 2. Grondgebruik

De toepassing van beregening hangt ook samen met het grondgebruik. Uit gegevens over de beregening naar gewas in 1997 constateerden (Hoogeveen et al., 2003) dat vollegrondsgroenten veruit de hoogste gift aan grondwater kregen, namelijk 140 mm. De meeste andere gewassen kregen rond de 50 – 60 mm, maar gras en maïs kregen iets minder, namelijk circa 40 mm.

Ad 3. Weersomstandigheden

De belangrijkste aanleiding voor beregening is droogte. Een geschikte maat om de droogte in een bepaald jaar te karakteriseren, is het (doorlopende potentiële) neerslagtekort. Dit wordt berekend uit de referentiegewasverdamping en de hoeveelheid gevallen neerslag. De referentiegewasverdamping – ook wel aangeduid als Makkink-verdamping – is overigens een theoretische grootheid, die voornamelijk wordt berekend uit de gemeten hoeveelheid zonnestraling en de gemeten temperatuur. Het (doorlopende potentiële) neerslagtekort is het cumulatieve verschil van de dagelijkse referentiegewasverdamping en de dagelijkse neerslag. Deze wordt berekend over het groeiseizoen, dat door het KNMI is gedefinieerd als de periode van 1 april tot en met 30 september. Bij wijze van afspraak wordt de berekening stopgezet indien het doorlopend tekort op nul uitkomt en weer hervat zodra er een tekort optreedt.

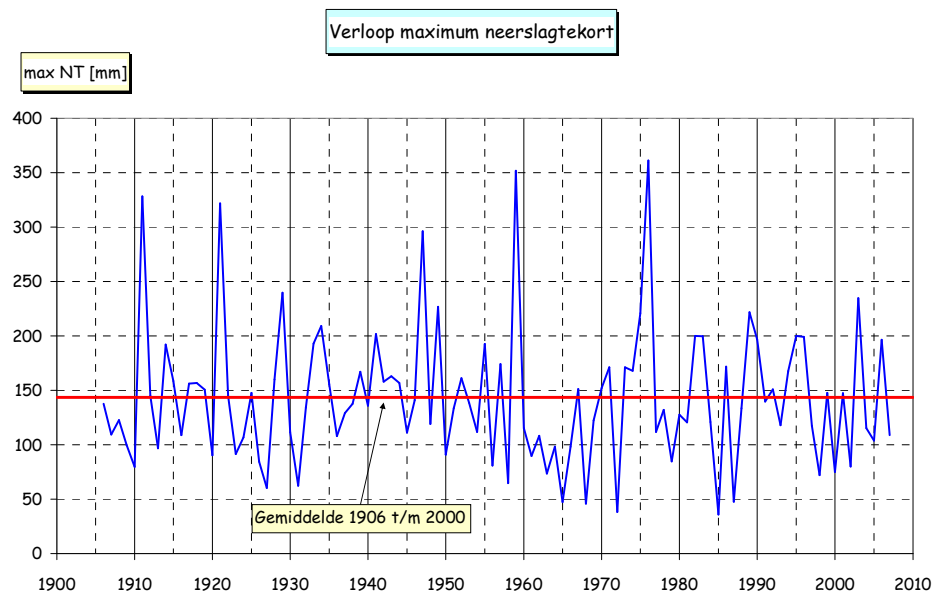
Het verloop van het neerslagtekort in de tijd zal ook een beeld geven van het verloop van de vochtvoorraad van de bodem. De onderstaande figuur toont enkele kenmerkende verlopen van het neerslagtekort, zoals berekend uit de gemiddelde cijfers van 13 Nederlandse meteostations.



Figuur 5.1: Verloop van het neerslagtekort in 2007 en enkele andere kenmerkende verlopen, zoals volgt uit de gemiddelde cijfers van 13 Nederlandse meteostations. Bron: website van het KNMI.

Figuur 5.1 toont het verloop voor het jaar 2007, het mediane verloop⁵, het verloop voor een extreem droog jaar (1976) en het verloop voor een droog jaar met 5% overschrijdingskans. Het verloop van het neerslagtekort in 2007 vertoont van medio juni tot eind juli een dalende tendens, doordat er in die periode meer neerslag dan verdamping was. De meeste droogte trad op in het voorjaar van 2007, van april tot medio juni.

De maximale waarde van het neerslagtekort is een geschikte maat voor de droogtestress die het milieu in dat jaar heeft ondergaan. Over de periode 1906 – 2000 bedroeg het maximale neerslagtekort gemiddeld 144 mm, maar in zeer droge jaren kan het oplopen tot meer dan 300 mm, dus ruim tweemaal het gemiddelde (zie figuur 5.2). In het extreem droge jaar 1976 bedroeg het zelfs 361 mm.



Figuur 5.2: Tijdreeks van het maximale neerslagtekort van 1906 t/m 2006. Tevens is het rekenkundig gemiddelde over de periode 1906 t/m 2000 weergegeven (144 mm). Deze cijfers zijn afgeleid uit de neerslag op 13 neerslagstations en de Makkink-verdamping op het hoofdstation te De Bilt. Bron: Klimaatdesk van het KNMI.

Recente droge jaren waren 2003, toen het neerslagtekort maximaal 235 mm bedroeg en 2006, toen het maximaal 197 mm bedroeg.

Naast het maximaal neerslagtekort zal ook het verloop van het neerslagtekort binnen het groeiseizoen van belang zijn voor de berekening, doordat de waterbehoefte van jong gewas groter is. Zo is de berekening vanaf augustus doorgaans nog maar gering. En verder zal ook de vochtsituatie van de bodem aan het begin van het groeiseizoen een rol spelen.⁶

Doordat de referentiegewasverdamping geldt voor grasland onder ideale beheersomstandigheden (optimale vochtvoorziening en dankzij bemaaiing altijd kort gras), kan de werkelijke verdamping lager uitvallen, zelfs nog bij een optimale vochtvoorziening. De werkelijke verdamping kan circa 30% lager uitvallen dan de

⁵ Dit is het verloop dat in 50% van de jaren wordt overschreden en in 50% van de jaren wordt onderschreden.

⁶ Persoonlijke mededeling van Jan Leunk, beleidsmedewerker Bureau Grondwater, Provincie Noord-Brabant.

referentiegewasverdamping, zodat het werkelijke neerslagtekort ook circa 30% (jaarbasis) lager kan uitvallen dan het potentiële neerslagtekort (Boerefijn en Aarts, 2007).

Het vochttekort voor gewas zal doorgaans kleiner zijn dan het neerslagtekort, doordat er ook water wordt opgenomen dat al vóór het begin van het groeiseizoen in de bodem aanwezig was. Verder kan er door capillaire nalevering via de onverzadigde zone water ter beschikking komen aan de wortels. Dit laatste zal vooral optreden bij veen- en kleibodems. Bij zandbodems kan dit verschijnsel alleen optreden bij ondiepe grondwaterstanden.

Van het toegediende beregeningswater gaat circa 20% direct verloren, doordat het verdampt, of terechtkomt op verharding of in oppervlaktewater. Van de overige 80% wordt in een gemiddeld jaar ongeveer de helft opgenomen door het gewas. De resterende 40% zal eerst het bodemvochtgehalte verhogen en na langdurige regenval uitspoelen naar het grondwater. Meestal gebeurt dit echter pas in het najaar (Boerefijn en Aarts, 2007). Doordat ongeveer 40% van het onttrokken grondwater weer terugvloeit, bedraagt in een gemiddeld jaar de netto-onttrekking op jaarbasis – en daarmee de aanslag op de grondwatervoorraad - circa 60% van de bruto-onttrekking. In een droog jaar zal de effectiviteit van beregening echter veel groter zijn en de netto-onttrekking zal dan dichterbij de bruto-onttrekking liggen.

5.3 Omvang van beregening uit grondwater

Vooralsinds het extreem droge jaar 1976 heeft het toepassen van beregening in Nederland een vlucht genomen. De droogte bleek toen namelijk een grote impact te hebben, vooral op de gebieden waar het water versneld werd afgevoerd dankzij de waterhuishoudkundige ingrepen die in het kader van de ruilverkavelingen in de jaren '50 en '60 waren uitgevoerd. Veel agrariërs hebben toen winputten laten slaan om hun land te kunnen beregenen. Het aantal winputten en beregeningsinstallaties nam vanaf dat jaar bij elke droge periode toe. Hierbij zullen overigens ook bedrijfseconomische ontwikkelingen een rol hebben gespeeld.

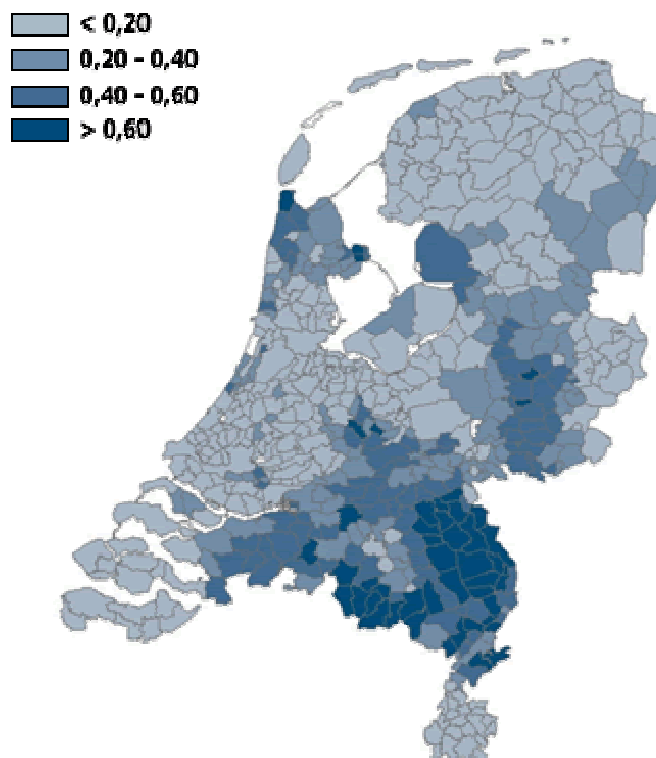
Volgens een studie van het Landbouw-Economisch Instituut (LEI) schommelde de totale oppervlakte die wordt berekend van 1976 – 1997 tussen de 85.000 hectare (1987) en 320.000 hectare (1995) (Hoogeveen et al., 2003).⁷ De beregening was voor ongeveer tweederde deel afkomstig uit grondwater. Uit gegevens over de beregening naar gewas in 1997 schatten de auteurs dat bijna 70% van het met grondwater beregende oppervlak uit grasland bestond, 10% uit aardappelen, 10% uit maïs en de overige 10% uit overige gewassen.

Door CBS/LEI zijn ook ramingen opgesteld van de jaarlijkse hoeveelheid grondwater-onttrekking voor beregening in Nederland (zie tabel 5.2, de tweede kolom). De ramingen voor elk van de jaren 1992 en 1995 t/m 1999 zijn afkomstig van (Brouwer et al., 2000) en voor elk van de jaren 2001 t/m 2005 zijn deze afkomstig van (Van der Veen en Vrolijk, 2007). Volgens deze ramingen kan de jaarlijkse grondwater-onttrekking voor beregening in Nederland variëren van 24 miljoen m³ in een nat jaar tot 193 miljoen m³ in een droog jaar.

⁷ Deze studie is gebaseerd op gegevens van de Landbouwtellingen, het informatienet van het LEI en uitvoerige enquêtes naar het watergebruik onder agrariërs, die zijn gehouden in 1992 en 1997, aangevuld met literatuuronderzoek en expertkennis van diverse deskundigen.

Deze landelijke ramingen van CBS/LEI lijken aan te geven dat de grondwateronttrekking voor beregening vanaf 2001 doorgaans lager is dan daarvoor. Zo was de onttrekking in 1997 (76 miljoen m³) duidelijk hoger dan in 2004 (29 miljoen m³), ondanks het feit dat het maximale neerslagtekort in deze jaren vrijwel gelijk was (circa 115 mm). En in het droge jaar 1995 is 193 miljoen m³ grondwater onttrokken, duidelijk meer dus dan in het droge jaar 2003, toen 107 miljoen m³ is onttrokken, terwijl 2003 nog droger was dan 1995 (maximaal neerslagtekort in 2003 was 235 mm en in 1995 200 mm). Maar het is praktisch uitgesloten dat de grondwateronttrekking voor beregening sinds 1999 is afgenomen, zodat we moeten concluderen dat de twee landelijke studies onvergelykbare cijfers hebben opgeleverd. Dit moet worden toegeschreven aan het feit dat er verschillende schattingsmethoden zijn gebruikt en aan de grote onzekerheid die resulteert bij het vertalen van een – relatief beperkte – steekproef naar een landelijk beeld.

De studie van (Hoogeveen et al., 2003) geeft ook enig inzicht in de regionale verspreiding van beregening, zij het dat daarbij geen onderscheid is gemaakt tussen beregening met oppervlaktewater en beregening met grondwater. Onderstaande figuur 5.3 laat zien dat de gemeenten met een hoog relatief oppervlak potentieel te beregenen cultuurgrond vooral geconcentreerd zijn in Brabant en Limburg en in lichtere mate ook in Gelderland, Overijssel en Drenthe. De potentieel te beregenen oppervlakte is hierbij gedefinieerd als de oppervlakte die naar verwachting zal worden beregend in een droge periode (volgens de betreffende agrariër). In Friesland, Groningen, Noord- en Zuid-Holland en Zeeland wordt naar verwachting relatief weinig areaal beregend.



Figuur 5.3: Verwachte relatieve oppervlakte te beregenen cultuurgrond per gemeente. Het betreft zowel beregening met oppervlaktewater, als beregening met grondwater (Hoogeveen et al., 2003).

Volgens de genoemde studie is de beregening het meest intensief in het Zuidelijk veehouderijgebied (het midden en oosten van Noord-Brabant en het noordelijk deel van Limburg). Dit gebied omvat slechts 11% van het landbouwareaal, maar zorgt wel voor

39% (in een droog jaar) tot 69% (in een nat jaar) van het totale Nederlandse waterverbruik voor beregening (zie tabel 5.1).

Tabel 5.1: Oppervlakte cultuurgrond en geschat waterverbruik voor beregening (met oppervlaktewater en grondwater) op landbouwbedrijven (exclusief tuinbouw), voor de 14 landbouwgebieden in Nederland (Hoogeveen et al., 2003).⁸ De laatste kolom (*d/n*) geeft de verhouding tussen de beregening in het droge jaar (1996) en het natte jaar (1998).

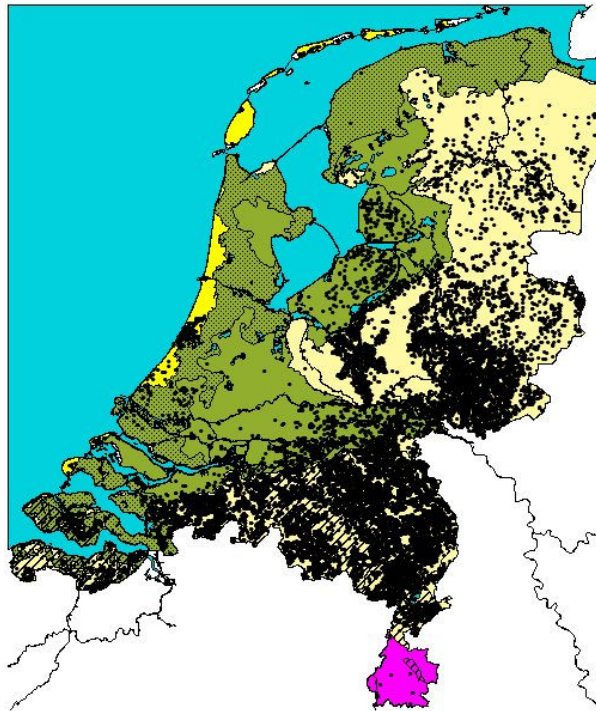
Landbouwgebied	Cultuur- grond [1.000 ha]	%	Verbruik 1998 (nat) [miljn m ³]	%	Verbruik 1999 (gem.) [miljn m ³]	%	Verbruik 1996 (droog) [miljn m ³]	%	<i>d/n</i>
Bouwhoek en Hogeland	105	6	0.2	0	1.8	2	2.2	1	11.2
Veenkoloniën en Oldambt	195	11	1.0	2	3.4	4	11.4	5	11.6
Noordelijk weidegebied	308	17	0.4	1	4.3	6	14.6	7	36.2
Oostelijk veehouderijgebied	328	18	7.4	15	7.8	10	54.9	26	7.5
Centraal veehouderijgebied	53	3	0.6	1	0.1	1	5.8	3	10.4
IJsselmeerpolders	109	6	1.1	2	6.2	8	5.4	3	4.7
Westelijk Holland	96	5	0.03	0	0.8	1	1.5	1	44.4
Waterland en Droogmakerijen	28	2	-	0	0.1	0	1.1	1	
Hollands/Utrechts weidegebied	92	5	-	0	1.1	1	3.0	1	
Rivierengebied	64	4	0.9	2	1.4	2	19.8	9	22.8
Zuidwestelijk akkerbouwgebied	173	9	0.6	1	2.0	3	0.6	0	0.9
Zuidwest Brabant	21	1	3.3	7	3.1	4	8.5	4	2.6
Zuidelijk veehouderijgebied	210	11	34.7	69	44.9	56	84.8	39	2.4
Zuid Limburg	48	3	0.1	0	0.8	1	1.1	1	12.7
Nederland (opp.+grondwater)	1.831	100	50.3	100	76.3	100	214.9	100	4.3
Nederland (grondwater)			41.9		57.1		151.1		3.6

Uit bovenstaande tabel blijkt dat in een droog jaar veel meer water wordt gebruikt dan in een nat jaar. Dit komt niet alleen doordat er dan per oppervlakte meer water wordt gebruikt, maar ook doordat er dan een grotere oppervlakte wordt beregend (er wordt tevens door meer agrariërs beregend). Ook de grondsoort en het soort gewas spelen een belangrijke rol.

Het verschil tussen een droog jaar en een nat jaar is in het Zuidelijk veehouderijgebied en Zuidwest-Brabant relatief gering, doordat daar altijd een groot percentage van het gebied wordt beregend. In deze gebieden wordt in een droog jaar circa 2,5 maal meer beregend dan in een nat jaar, terwijl die verhouding in bijvoorbeeld het Oostelijk veehouderijgebied (delen van Gelderland en Overijssel) circa 7,5 bedraagt. Het Zuidelijk veehouderijgebied bestaat namelijk uit zandgronden waar snel verdroging optreedt en in Zuidwest-Brabant worden veel aardappelen verbouwd, die slecht tegen droogte kunnen. Daardoor ligt in natte jaren ongeveer de helft van het totale Nederlandse beregende areaal in het Zuidelijk veehouderijgebied, terwijl dat aandeel in droge jaren op een derde ligt. In veel gebieden wordt in een nat jaar zelfs niet of nauwelijks beregend (Hoogeveen et al., 2003).

Figuur 5.4 toont de locaties van de bij de provincies geregistreerde beregeningsputten. Hieruit blijkt dat de beregeningsputten voornamelijk voorkomen op zandgronden en dan het meest in Noord-Brabant, het noorden en midden van Limburg en het oosten van Gelderland.

⁸ Het LEI hanteert voor Nederland een indeling in 14 landbouwgebieden, op basis van regio, grondsoort en de belangrijkste landbouwfunctie.



Figuur 5.4: Locaties van de bij de provincies geregistreerde beregeningsputten. Gegevens van de provincie Utrecht ontbreken.

De studie van (Hoogeveen et al., 2003) maakte voor wat betreft regionale verspreiding van beregening nog geen onderscheid tussen beregening met oppervlaktewater en beregening met grondwater. Daarom hebben wij zelf getracht om de beregening met grondwater per regio te kwantificeren. Hiertoe hebben wij gegevens over de grondwateronttrekking voor beregening opgevraagd bij de provincies waar relevante arealen zandgronden voorkomen, namelijk Drenthe, Friesland, Gelderland, Limburg, Noord-Brabant, Overijssel en Utrecht. De resultaten van deze inventarisatie zijn vermeld in tabel 5.2 (de blauw gekleurde cellen). Voor de periode vanaf 2000 zijn de ontbrekende provinciale onttrekkingen door ons geraamd op basis van de onderlinge verhoudingen van de beschikbare onttrekkingen, waarbij we ook rekening hielden met de regionale verschillen in beregening tussen natte en droge jaren, zoals deze blijken uit tabel 5.1.

Uit het in tabel 5.2 vermelde subtotaal blijkt dat de som van de provinciale ramingen in elk van de jaren 2001 t/m 2005 duidelijk hoger uitkomt dan de landelijke raming voor dat jaar, afkomstig van de tweede studie van CBS/LEI (Van der Veen en Vrolijk, 2007). Wij leiden hieruit af dat die laatste studie onderschattingen heeft opgeleverd. Aangezien de landelijke ramingen van CBS/LEI voor de jaren t/m 1999 goed lijken aan te sluiten op de som van de provinciale ramingen in de jaren vanaf 2000, gaan we er van uit dat deze twee reeksen kunnen worden samengevoegd tot één tijdreeks van landelijke ramingen. Deze tijdreeks is vermeld in de voorlaatste kolom van tabel 5.2 (*Synthese Nederland*) en tevens weergegeven in figuur 5.5.

Tabel 5.2: Ramingen van de grondwateronttrekking voor beregening in geheel Nederland en in provincies waar relevante arealen zandgronden voorkomen. De laatste kolom (*max NT*) vermeldt het maximale neerslagtekort, zoals verstrekt door de KNMI-Klimaatdesk.

Jaar	Grondwateronttrekking voor beregening [miljoen m ³]									Synthese Nederland	max NT [mm]
	CBS/LEI Nederland	Drenthe	Friesland	Gelderl	Limburg	N-Br	Overijss	Utrecht	Subtotaal		
1992	131.0									131.0	150.8
1993											117.9
1994											167.5
1995	192.5									192.5	199.9
1996	151.5									151.5	199.2
1997	75.5									75.5	117.5
1998	42.0									42.0	72.1
1999	57.5									57.5	147.6
2000		5.0	1	3	6	19.8	4	3	40.8	40.8	75.1
2001	31.8	6.6	3	6	17.5	42.0	5.0	3.3	83.0	83.0	147.3
2002	31.9	10.4	1.0	4	6.3	19.5	4	2.5	47.2	47.2	80.1
2003	106.9	21.7	2.5	26	23.0	70.0	18	8.6	169.8	169.8	234.7
2004	29.4	7.8	2.5	4.0	10	24.4	4	3	55.7	55.7	115.2
2005	24.2	9.4	2.5	4.0	13.3	30.8	5	3	68.0	68.0	103.8
2006		17.9	2.7	18	20	59.4	12	8	137.4	137.4	196.5

Toelichting op tabel 5.2

CBS/LEI Nederland: ramingen door CBS/LEI voor geheel Nederland, op basis van enquêtes onder agrarische bedrijven. Voor de jaren 1992 en 1995 t/m 1999 afkomstig van (Brouwer et al., 2000) en voor de jaren 2001 t/m 2005 afkomstig van (Van der Veen en Vrolijk, 2007).⁹

Drenthe: ramingen op basis van alle grondwateronttrekkingen met meldingsplicht (pompcapaciteit > 1 m³/uur). De betrokkenen moeten jaarlijks opgeven hoeveel grondwater is onttrokken.

Friesland: door Provincie geraamd uit vergunningen, meldingen en pompcapaciteiten.

Gelderland: door Provincie geraamd op basis van expertise. Deze ramingen komen hoger uit dan de cijfers in het register grondwateronttrekkingen, aangezien dat niet alle onttrekkingen omvat.

Limburg: de cijfers voor de jaren 2001 t/m 2003 zijn afkomstig van de Provincie, die heeft geregistreerd hoeveel grondwater er wordt onttrokken voor beregening. Vanaf 2005 is de registratie overgegaan naar de waterschappen Peel en Maasvallei (omvat het grootste deel van Limburg) en het waterschap Roer en Overmaas.

Noord-Brabant: sinds 2000 is door de Provincie geregistreerd hoeveel grondwater er wordt onttrokken voor beregening. Deze cijfers zijn zeer betrouwbaar te achten. Het niet opgeven leidt namelijk tot een ambtelijke vaststelling van de hoeveelheid onttrekking waarover de heffing wordt berekend. Met steun van de ZLTO worden ook betrouwbare metingen verricht van de hoeveelheid beregening in het kader van de programma's *Beregenen op Maat* en *Agrarisch Grondwaterbeheer*.

Overijssel: door ons geraamd uit het geregistreerde aantal beregenars (circa 1.000) en een gemiddelde onttrekking van circa 5.000 m³ per beregenaar in een gemiddeld jaar (zoals 2001).

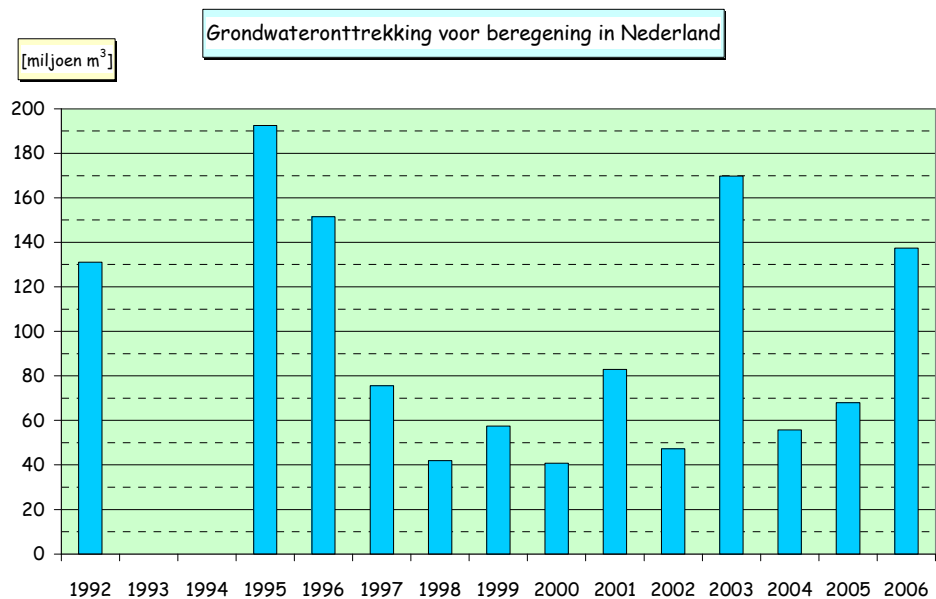
Utrecht: ramingen afkomstig uit (Boerefijn en Aarts, 2007). In dit rapport is het gebruik geschat voor een gemiddeld jaar (3,3 miljoen m³), een droog jaar (8,6 miljoen m³) en een nat jaar (2,5 miljoen m³). Deze hebben wij in de tabel toegewezen aan respectievelijk de jaren 2001, 2003 en 2002.

Ongekleurde waarden: de ontbrekende onttrekkingen in deze provincies in de periode vanaf 2000 hebben wij geraamd op basis van de onderlinge verhoudingen van de wel beschikbare waarden (in de blauw gekleurde cellen), waarbij we ook rekening hielden met de regionale verschillen in beregening tussen natte en droge jaren, zoals deze blijken uit tabel 5.1. Onze ramingen zijn cursief gedrukt, met een kleiner lettertype, in ongekleurde cellen.

Subtotaal: som van de provinciale ramingen.

Synthese Nederland: ramingen voor geheel Nederland, dit betreft t/m 1999 de ramingen van CBS/LEI voor geheel Nederland en vanaf 2000 de som van de provinciale ramingen.

⁹ De in deze studies vermelde mengpost 'Grondwater / oppervlaktewater' hebben wij voor de helft opgeteld bij de post 'Grondwater', om tot de totale hoeveelheid grondwateronttrekking voor beregening te komen.



Figuur 5.5: Verloop van de hoeveelheid grondwateronttrekking voor beregening in Nederland over de periode 1992 t/m 2006. Door ons afgeleid op basis van ramingen van CBS/LEI voor geheel Nederland en ramingen voor de provincies.

Uit tabel 5.2 blijkt dat veruit het meeste grondwater voor beregening wordt onttrokken in Noord-Brabant. Dit bedraagt doorgaans tussen 40 en 50% van de totale grondwateronttrekking voor beregening in Nederland. Op enige afstand volgen Limburg, met tussen 13 en 20% van het totaal en Drenthe en Gelderland, met elk tussen 8 en 15% van het totaal.

Het ruimtelijke beeld dat naar voren komt uit de cijfers van tabel 5.2, met het zwaartepunt in Noord-Brabant en Limburg, sluit overigens redelijk aan op het beeld van (Hoogeveen et al., 2003), zoals dat naar voren komt uit de cijfers van tabel 5.1.

Uit tabel 5.2 en figuur 5.5 blijkt duidelijk de invloed van de droge jaren 1992, 1995, 1996, 2003 en 2006. Er is toen respectievelijk 131, 193, 152, 170 en 137 miljoen m³ grondwater onttrokken voor beregening. In een jaar met gemiddeld neerslagtekort bedraagt de grondwateronttrekking voor beregening circa 100 miljoen m³ (dit volgt uit regressieanalyse, zie ook § 5.5, ad 1), zodat er volgens bovenstaande cijfers in droge jaren vaak anderhalf tot tweemaal meer wordt onttrokken dan in een gemiddeld jaar.

De totale grondwateronttrekking in Nederland bedraagt in een jaar met gemiddeld neerslagtekort momenteel vermoedelijk ergens tussen de 1.000 en 1.200 miljoen m³/jaar, waarvan circa 70% wordt onttrokken door de drinkwaterbedrijven en circa 15% door industrieën (Stuurman et al., 2007). Als we afgaan op de bovenvermelde hoeveelheden, dan wordt in een jaar met gemiddeld neerslagtekort circa 10% van de totaal onttrokken hoeveelheid grondwater onttrokken voor beregening. Maar dit percentage kan in een droog jaar oplopen tot 15%.

We wijzen er op dat deze jaarcijfers de relevantie van de grondwateronttrekking voor beregening sterk onderschatten, aangezien die onttrekking geheel plaatsvindt in slechts enkele weken. Als bijvoorbeeld al het grondwater voor beregening in drie weken wordt onttrokken, dan bedraagt deze onttrekking in die periode twee- à driemaal meer dan alle overige grondwateronttrekkingen in Nederland samen !

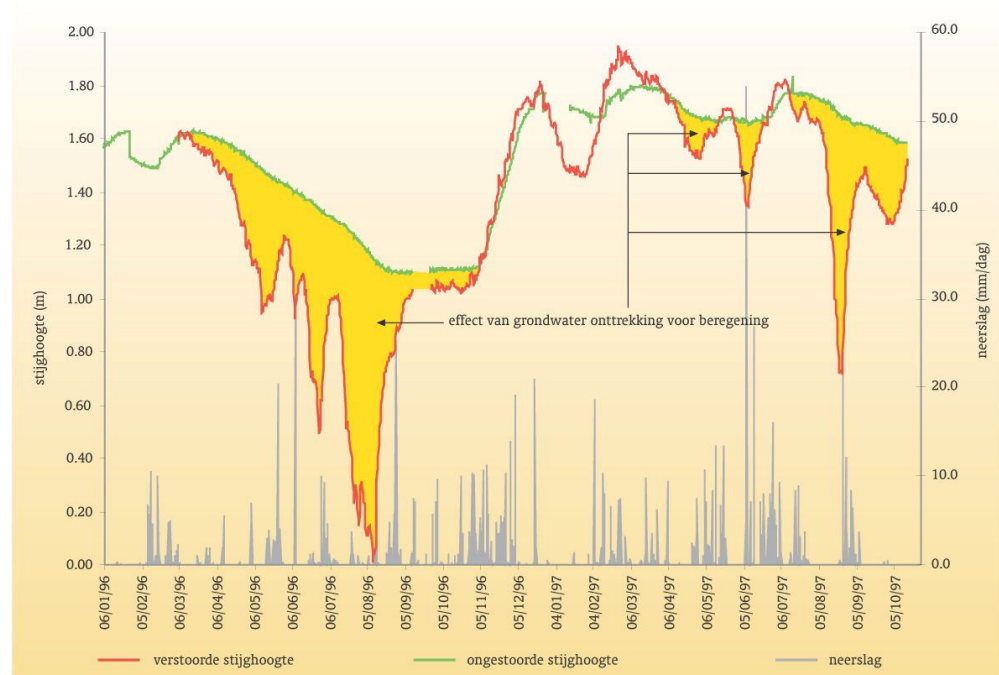
Vanaf ongeveer 1994 à 1995 zijn veel veehouders in het zuiden en oosten van Nederland ook eigen grondwaterwinningen gestart voor veedrenking en reiniging, als gevolg van de stijgende drinkwaterprijs (door de invoering van de grondwaterbelasting). Deze winningen onttrekken nu vermoedelijk 30 à 35 miljoen m³ grondwater per jaar, wat dus circa driemaal kleiner is dan de huidige grondwateronttrekking voor beregening in een jaar met gemiddeld neerslagtekort. De klimatologische invloed op de grondwateronttrekking voor veedrenking en reiniging zal veel geringer zijn dan die op de grondwateronttrekking voor beregening. Verder zal er veel minder invloed zijn op het grondwatersysteem, doordat deze onttrekking is gespreid over het jaar, terwijl de gehele onttrekking voor beregening zich in slechts enkele weken voltrekt.

5.4 Wat betekent beregening voor het grondwatersysteem?

Doordat de jaarlijkse grondwateronttrekking voor beregening zich geheel afspeelt in één of meer perioden van droogte en dan twee- à driemaal meer onttrekt dan alle overige grondwateronttrekkingen samen, zal dit in deze perioden een grote invloed hebben op het grondwatersysteem. De uitwerking van deze invloed zal echter afhangen van lokale factoren, zoals de geohydrologische opbouw van de ondergrond (met name het al of niet aanwezig zijn van een ondoorlatend pakket boven de pompfilters) en de ligging ten opzichte van kwetsbare natuurgebieden. Als de winning zich bijvoorbeeld afspeelt onder een slecht doorlatend pakket resulteren er forse verlagingen van de stijghoogte over een groot gebied, die kunnen leiden tot kwelvermindering en uiteindelijk ook tot meer verdroging van natuurgebieden.

In Noord-Brabant wordt gevreesd dat tijdens droge jaren door beregening een groot deel van de herstelde beken volledig kan gaan droogvallen (mond. med. Jan Leunk).

De wellicht bekendste uitingsvorm van de invloed van grondwateronttrekking voor beregening op het grondwatersysteem vormt het zogenaamde 'Extreem Lage Standen'-effect (het 'ELS'-effect), dat is gekenmerkt als het kortstondig optreden van extreem grote verlagingen van de stijghoogte (zie figuur 5.6). Dit effect is vooral geconstateerd in het zuiden en zuidwesten van Noord-Brabant (zie bijvoorbeeld Van Geer en Lourens, 2001).



Figuur 5.6: Voorbeeld van de invloed van grondwateronttrekking voor beregening op het stijghoogteverloop, zoals gemeten in een peilfilter onder een slecht doorlatend pakket in West-Brabant. De beregening tijdens droge perioden veroorzaakt tijdelijk grote verlagingen, die hier tot 1,2 meter kunnen oplopen.

Uit het feit dat het ELS-effect pas vanaf 1976 optreedt, alleen 's zomers voorkomt en dan hooguit enkele weken duurt, is afgeleid dat het wordt veroorzaakt door grondwateronttrekking voor beregening. Het hydrologische effect hiervan is in Noord-Brabant zo merkbaar doordat wordt onttrokken aan spanningswater. De pompfilters bevinden zich namelijk onder slecht doorlatende pakketten. De forse verlagingen van de stijghoogte kunnen leiden tot kwelvermindering en uiteindelijk ook doorwerken naar de freatische grondwaterstanden bovenin het profiel, wat kan leiden tot meer verdroging van natuurgebieden.

Aangezien de watervoerendheid van beekdalen tijdens het droge seizoen volledig afhankelijk is van de toestroom van kwelwater kan deze stijghoogteverlaging het risico op droogstand doen ontstaan (Everts, de Vries, de Louw, Stuurman en Stooker, 2002) Op verzoek van de Provincie Noord-Brabant heeft Kiwa het ELS-effect onderzocht en kwam daarbij tot de volgende conclusies (Cirkel et al., 2004):

1. Het ELS-effect heeft zich sinds 1976 sterk verbreid. In de periode 1976-1986 treedt het vooral op rond Etten-Leur, maar in de jaren negentig wordt het in de gehele provincie aangetroffen. Het effect is het sterkst in het gebied langs de Belgische grens bij Hooge Mierde en Reusel en in het gebied rond Etten-Leur. Bij Reusel en Hooge Mierde bedraagt het gemiddelde effect 1,7 meter verlaging van de stijghoogte, met uitschieters tot 2,5 meter.
2. Het ELS-effect kan voorkomen tot op 200 meter onder maaiveld, maar het komt vrijwel niet bovenin het profiel voor.
3. Na het stoppen van de onttrekking kan het nog 20 à 30 dagen duren voordat de verlagingskegel is verdwenen.

Er is ook onderzoek uitgevoerd naar de gevolgen van grondwateronttrekking voor beregening in de provincie Utrecht. Die onttrekking vindt voornamelijk plaats aan de westflank van de Utrechtse Heuvelrug en nabij de Langbroekerwetering. Met een grondwatermodel is berekend dat aan het eind van het groeiseizoen van een gemiddeld jaar de grondwaterstand in dit gebied op regionale schaal 1 tot 5 centimeter is verlaagd door de beregening (die bedraagt 3,3 miljoen m³/jaar in een gemiddeld jaar). Nabij beregeningsputten kan de verlaging oplopen tot 1 à 2 meter, waarbij de invloedstraal (gebied met verlaging > 5 centimeter) 200 à 300 meter bedraagt. Nabij de Heuvelrug kan het door de traagheid van het grondwatersysteem weken tot maanden na het stopzetten van de beregening duren tot de verlaging weer is opgeheven (Boerefijn en Aarts, 2007).

5.5 Welke ontwikkelingen zijn er nog te verwachten?

De toekomstige ontwikkeling van de omvang van de grondwateronttrekking voor beregening zal afhangen van een aantal factoren, zoals:

1. de klimaatverandering, waardoor het watertekort in de zomer zal toenemen, evenals de kans op extreme droogtes,
2. de schaalvergroting van agrarische bedrijven,
3. de verschuiving in gewaskeuze naar vollegrondsgroenten.

Maar beperkende factoren kunnen zijn:

4. het beleid en
5. het afnemende areaal landbouwgrond.

In het nu volgende geven we bij elke factor een korte schets van zijn mogelijke ontwikkeling en van de invloed die dat kan hebben op de omvang van de grondwateronttrekking voor beregening.

ad 1. *Invloed klimaatverandering*

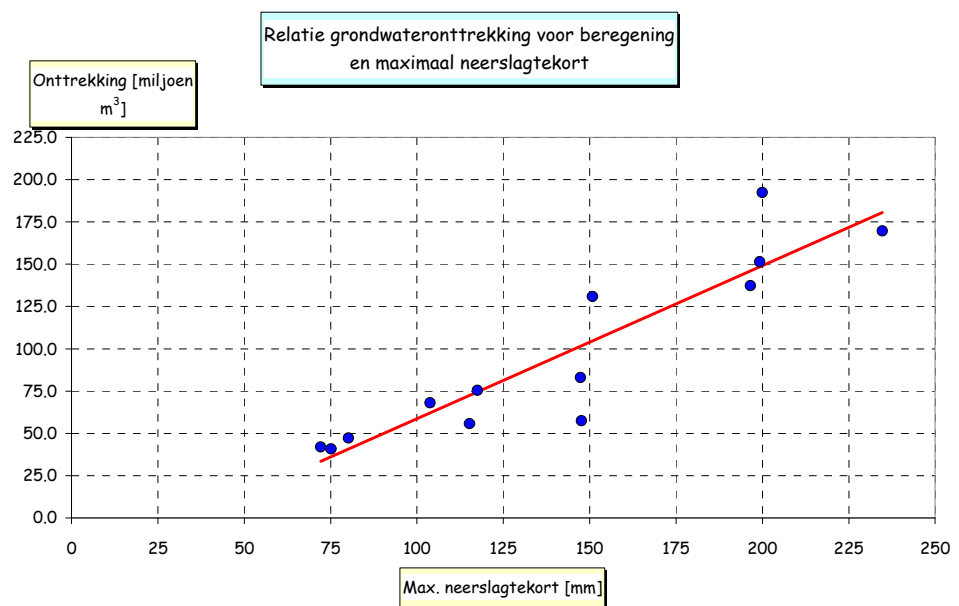
In 2006 heeft het KNMI vier klimaatscenario's voor de lange termijn uitgewerkt, die verschillen in: (1) de gemiddelde temperatuurstijging op mondiale schaal (van 1990 tot 2050 +1 °C in scenario G of + 2 °C in scenario W)¹⁰ en (2) het wél (scenario met toevoeging '+') of níet veranderen van de luchtstromingspatronen boven Europa (KNMI, 2006). Volgens al deze vier scenario's zal de potentiële verdamping in de zomer toenemen, wat resulteert in een toename van het maximale neerslagtekort. In tabel 5.3 zijn de scenario-uitkomsten vermeld voor het gemiddelde van het (maximale) neerslagtekort en de herhalingsdij voor een (maximaal) neerslagtekort zoals in het droge jaar 2003.

¹⁰ De 'G' staat hier voor 'Gematigd' en de 'W' voor 'Warm'.

Tabel 5.3: Gemiddelde van het (maximaal) neerslagtekort in de huidige situatie en in de vier KNMI'06 scenario's in 2050, alsmede de verandering in herhalingstijd voor een (maximaal) neerslagtekort zoals in 2003 (235 mm).

	huidig	G	G+	W	W+
Gemiddeld neerslagtekort (mm)	144	151 (+5%)	179 (+24%)	158 (+10%)	220 (+53%)
Herhalingstijd voor een neerslagtekort zoals in 2003 (jaren)	9,7	7,9	4,1	6,5	2,0

Het toenemen van het neerslagtekort zal uiteraard leiden tot meer beregning. Om deze klimaatsinvloed te kunnen ramen hebben we de relatie tussen de totale grondwateronttrekking voor beregning in Nederland en het (maximale) neerslagtekort afgeleid met lineaire regressie, aan de hand van de in tabel 5.2 vermelde gegevens van deze grootheden. Daarbij bleek dat de totale grondwateronttrekking voor beregning redelijk kan worden verklaard met het neerslagtekort, namelijk voor 84% (zie figuur 5.7). De modelafwijkingen zullen mede zijn veroorzaakt door: (1) de onzekerheden van de geraamde hoeveelheden grondwateronttrekking voor beregning en (2) het niet verdisconteren van de relatie tussen het verloop van het neerslagtekort over het jaar en de hoeveelheid grondwateronttrekking voor beregning.



Figuur 5.7 Lineair regressiemodel dat de totale grondwateronttrekking voor beregning in Nederland beschrijft met het (maximaal) neerslagtekort.

Uitgaande van dit regressiemodel en de in tabel 5.3 vermelde voorspelde neerslagtekorten, resulteert dat de totale grondwateronttrekking voor beregning in Nederland in een gemiddeld jaar kan toenemen van circa 100 miljoen m³ in de huidige situatie, tot 105 miljoen m³ in het scenario G, 111 miljoen m³ in het scenario W, 130 miljoen m³ in het scenario G+, of zelfs 168 miljoen m³ in het scenario W+, alle in het jaar 2050. Aangezien elk van de vier klimaatscenario's vooralsnog even waarschijnlijk

is te achten en het KNMI heeft aangegeven dat ze gezamenlijk het grootste deel van alle mogelijke toekomstspannen, kunnen we constateren dat de klimaatverandering ertoe kan leiden dat de grondwateronttrekking voor beregening in een gemiddeld jaar rond 2050 ergens tussen de 5% en 70% meer kan bedragen dan momenteel.

Het klimaatseffect kan lokaal groter uitvallen, als in zeer droge perioden brak oppervlaktewater moet worden ingelaten in gebieden waar normalerwijs wordt beregend met oppervlaktewater. Daar zal men dan immers moeten overgaan tot het beregenen met grondwater. We kunnen hierbij denken aan de veenweidegebieden van Utrecht en Zuid-Holland. Maar gezien de in tabel 5.1 vermelde omvang van de beregening in dit gebied – hooguit 3 miljoen m³ in een droog jaar – zal dit slechts een gering effect zijn.

We zien in tabel 5.3 ook dat een droog jaar als 2003 veel vaker kan gaan voorkomen. Momenteel bedraagt die herhalingsperiode nog circa 10 jaar, maar door de klimaatverandering kan die afnemen tot ergens tussen 8 jaar en 2 jaar. In dat laatste geval zal een situatie als in 2003, met de relatief grote hoeveelheden grondwateronttrekking voor beregening, gemiddeld om het jaar gaan optreden.

ad 2. Invloed schaalvergroting agrarische bedrijven

Er is al enige tijd een schaalvergroting van agrarische bedrijven (toename van de bedrijfsgrootte) op gang gekomen, door strengere milieuregeling, internationale concurrentie en de zogenaamde 'reconstructie'. Doordat grotere bedrijven makkelijker kunnen investeren in beregeningsinstallaties, mogen we veronderstellen dat door de schaalvergroting ook de beregening zal toenemen. Verder kan de beregening nog toenemen doordat nieuwe installaties een hogere effectieve pompcapaciteit hebben.

ad 3. Invloed verschuiving in gewaskeuze naar vollegrondsgroenten

Het aandeel vollegrondsgroenten zal vermoedelijk toenemen ten opzichte van de meer traditionele gewassen zoals aardappelen, granen en suikerbieten. Doordat de vollegrondsgroenten een veel grotere waterbehoefte hebben dan de traditionele gewassen zal de hoeveelheid beregening toenemen.

ad 4. Invloed beleid

De meeste provincies hanteren een vergunningsplicht voor grondwateronttrekkingen met een capaciteit van meer dan 60 m³ per uur, maar voor lagere pompcapaciteiten gelden doorgaans slechts meldings- en/of registratieplichten.

In Noord-Brabant, de provincie waar het meeste grondwater wordt onttrokken voor beregening, is een vergunning nodig als de pompcapaciteit meer dan 10 m³/uur bedraagt, of als op meer dan 30 meter diepte wordt onttrokken. In gebieden met een zogenaamde 'natte groene hoofdstructuur' geldt een vergunningsplicht voor alle onttrekkingen, ongeacht capaciteit of diepte. Sinds 2000 worden zelfs geen vergunningen voor grondwateronttrekking voor beregening meer verstrekt, om de voorraad van het diepe grondwater niet verder aan te tasten en om een verdere achteruitgang van natte natuurwaarden te voorkomen.

Ook in Limburg, de tweede provincie in de ranglijst van grondwateronttrekkingen voor beregening, zal een dergelijk 'standstill'-principe worden ingevoerd (per januari 2008). In deze provincie geldt al een vergunningsplicht voor grondwateronttrekking voor beregening van open teelt nabij zogenaamde 'prioritaire natuurgebieden', ongeacht de pompcapaciteit.

In Drenthe en Overijssel gelden restricties voor bepaalde gebieden, perioden in het jaar en gewassen. In Zeeland, waar zoet water schaars is, geldt veel aanvullende regelgeving.

In enkele provincies wordt het project *Agrarisch Grondwaterbeheer* (vroeger *Beregening op Maat* genaamd) gepropageerd, wat neerkomt op een strategie voor optimale beregening met behulp van de 'beregenningsplanner', zodat water wordt bespaard. Dit kan per beregenaar leiden tot een besparing van 20 à 25%. Vooral in Noord-Brabant wordt dankzij het actieve stimuleringsbeleid van de Provincie de beregenningsplanner veel ingezet. De deelname aan het project wordt daar namelijk gestimuleerd door een subsidie van 50% op de kosten van deelname. In Limburg en Gelderland is deelname aan het project zelfs verplicht voor de grotere onttrekkers.

Volgens (Boerefijn en Aarts, 2007) kunnen de *Kaderrichtlijn Water* en *Natura 2000*, die zijn gericht op een betere waterkwaliteit en het opheffen van verdroging van beschermde natuurgebieden, leiden tot minder beregening uit grondwater nabij kwetsbare gebieden. Maar zij verwachten niet dat dit zal leiden tot minder beregening, wel dat er ruimtelijk verschuivingen zullen optreden.

ad 5. Invloed afnemende areaal landbouwgrond

Het Nederlandse landoppervlak bestaat momenteel voor 69% uit agrarisch gebied, maar volgens een recente scenariostudie van drie Nederlandse planbureaus zal het agrarisch gebied in de periode tot 2040 in elk van de vier scenario's blijven dalen, doordat 10 à 15% van het gebied geleidelijk een andere functie krijgt (CPB, MNP en RPB, 2006). De afname zal vooral plaatsvinden rondom de Randstad, maar ook rondom stedelijke gebieden in Noord-Brabant, Utrecht en Gelderland. Dit zal tot een beperkte vermindering leiden van grondwateronttrekking voor beregening, aangezien er rond de Randstad weinig wordt berekend met grondwater en het relatief beperkte arealen betreft rondom de stedelijke gebieden in Noord-Brabant, Utrecht en Gelderland.

Conclusies ten aanzien van de te verwachten ontwikkeling van de grondwateronttrekking voor beregening

Afgaande op de boven beschreven ontwikkelingen van deze vijf factoren en op hun relatieve invloeden, mogen we verwachten dat de grondwateronttrekking voor beregening zal toenemen. Alleen al door de klimaatverandering kan deze tussen de 5% en 70% toenemen ten opzichte van de huidige situatie. Daarnaast zal het toenemen van de grondwateronttrekking voor beregening worden bevorderd door schaalvergroting van de agrarische bedrijven en een verschuiving in gewaskeuze naar vollegrondsgroenten. We verwachten niet dat de overige twee factoren de toename geheel teniet kunnen doen. Zo zal het afnemende areaal landbouwgrond de toename slechts in beperkte mate temperen. En aangezien de grondwateronttrekking voor beregening ook maatschappelijk van belang is, is het niet denkbaar dat er zodanige beleidsmatige drempels zullen worden opgeworpen dat de toename volledig wordt tegengegaan. Maar het beleid zal wel een tempering van de toename kunnen bewerkstelligen, door een grotere efficiëntie – en daarmee waterbesparing – op te leggen aan alle grondwateronttrekkers voor beregening, wellicht ondersteund door een hogere provinciale leges. Ook kan het beleid de gevolgen van de toenemende grondwateronttrekking voor beregening enigszins temperen, middels restricties voor grondwateronttrekking nabij kwetsbare natuurgebieden, gericht op een herschikking van de ruimtelijke verdeling van de grondwateronttrekkingen en middels

waterhuishoudkundige maatregelen. Een mogelijke oplossing kan ook bestaan uit het extra aanvoeren van oppervlaktewater.

5.6 Samenvattende conclusies

1. De belangrijkste aanleiding voor beregening is dreigende droogtestress voor gewassen.
2. Doordat zandgronden minder bodemvocht kunnen vasthouden, is beregening in zandgrondgebieden sneller nodig dan in andere gebieden.
3. Op zandgronden wordt meestal beregend met grondwater, doordat oppervlaktewater daar doorgaans slechts beperkt beschikbaar is, vooral in droge perioden.
4. Van het toegediende beregeningswater zal in een gemiddeld jaar circa 40% worden opgenomen door de plant, 20% zal verdampen of afspoelen en de resterende 40% zal eerst het bodemvochtgehalte verhogen en na langdurige regenval uitspoelen naar het grondwater, meestal in het najaar. Op jaarbasis bedraagt de netto-onttrekking dus circa 60% van de bruto-onttrekking. In een droog jaar zal de effectiviteit van beregening echter veel groter zijn en de netto-onttrekking zal dan dichter bij de bruto-onttrekking liggen.
5. In een jaar met gemiddeld neerslagtekort wordt er circa 100 miljoen m³ grondwater voor beregening onttrokken, dit is circa 10% van de totale hoeveelheid grondwateronttrekking in Nederland. Dit percentage kan in een droog jaar oplopen tot circa 15%.
6. Jaarcijfers zullen de relevantie van de grondwateronttrekking voor beregening sterk onderschatten, aangezien die onttrekking geheel plaatsvindt in slechts enkele weken. Als bijvoorbeeld al het grondwater voor beregening in drie weken wordt onttrokken, dan bedraagt deze onttrekking in die periode twee- à driemaal meer dan alle overige grondwateronttrekkingen in Nederland samen !
7. De hoeveelheid grondwateronttrekking voor veedrenking en reiniging bedraagt vermoedelijk 30 à 35 miljoen m³ per jaar. Er zal weinig klimatologische invloed zijn op deze onttrekking. Verder zal deze onttrekking veel minder invloed hebben op het grondwatersysteem dan de onttrekking voor beregening, doordat deze is gespreid over het jaar, terwijl de gehele onttrekking voor beregening zich in slechts enkele weken voltrekt.
8. Veruit het meeste grondwater voor beregening wordt onttrokken in Noord-Brabant, namelijk tussen 40 en 50% van de totale grondwateronttrekking voor beregening in Nederland. Op enige afstand volgen Limburg, met tussen 13 en 20% van het totaal en Drenthe en Gelderland, met elk tussen 8 en 15% van het totaal.
9. Doordat de jaarlijkse grondwateronttrekking voor beregening zich geheel afspeelt in één of meer perioden van droogte, zal dit in deze perioden het grondwatersysteem beïnvloeden. De ernst van deze invloed zal afhangen van lokale factoren, zoals de geohydrologische opbouw van de ondergrond (met name het al of niet aanwezig zijn van een ondoorlatend pakket boven de pompfilters) en de ligging ten opzichte van kwetsbare natuurgebieden. Als de winning zich bijvoorbeeld afspeelt onder een slecht doorlatend pakket resulteren er forse verlagingen van de stijghoogte over een groot gebied, die kunnen leiden tot kwelvermindering en uiteindelijk ook tot meer verdroging van natuurgebieden.
10. De grondwateronttrekking voor beregening zal toenemen, niet alleen door de klimaatverandering (deze kan leiden tot een toename ergens tussen de 5% en 70%), maar ook door de schaalvergroting van de agrarische bedrijven en een verschuiving in gewaskeuze naar vollegrondsgroenten.

11. Het afnemende areaal landbouwgrond zal de toename slechts in beperkte mate temperen. En het is niet denkbaar dat er zodanige beleidsmatige drempels zullen worden opgeworpen dat de toename volledig wordt tegengegaan.
12. Het beleid zal wel een tempering van de toename kunnen bewerkstelligen, door een grotere efficiëntie – en daarmee waterbesparing – op te leggen aan alle grondwateronttrekkers voor beregening, wellicht ondersteund door een hogere provinciale leges.
13. Het beleid kan ook de gevolgen van de toenemende grondwateronttrekking voor beregening enigszins temperen, middels restricties voor grondwateronttrekking nabij kwetsbare natuurgebieden, gericht op een herschikking van de ruimtelijke verdeling van de grondwateronttrekkingen en middels waterhuishoudkundige maatregelen.

5.7 Literatuur

Boerefijn en Aarts (2007). Omvang en effecten van beregening uit grondwater in de provincie Utrecht. Tauw-rapport R001-4470035MPB-dmj-V01-NL, 10 januari 2007, Utrecht, 81 blz.

Brouwer, F.M., Van Bruchem, C., Haag, D.M. en Pleijsier, L.K. (red.) (2000). Landbouw, Milieu en Economie 1999. Centraal Bureau voor de Statistiek/Landbouw-Economisch Instituut, Voorburg / Heerlen / Den Haag.

Cirkel, D.G., Maas, C. en Von Asmuth, J.R. (2004). What ELS? Evaluatie van het voorlopige meetnet voor Extreem Lage Stijghoogten van de provincie Noord-Brabant. Rapport KWR 04.073, Kiwa N.V., Nieuwegein, september 2004, 51 blz.

CPB, MNP en RPB (2006). Welvaart en Leefomgeving – een scenariostudie voor Nederland in 2040. Centraal Planbureau, Milieu- en Natuurplanbureau, Ruimtelijk Planbureau, september 2006, 239 blz.

Everts, H., N. de Vries, P. de Louw, R. Stuurman en G. Stoker (2002). ..Van Moerdistel tot Boomkikker, gebiedsvisie Merkske.

Hoogeveen, M.W., Van Bommel, K.H.M. en Cotteleer, G. (2003). Beregening in land- en tuinbouw. Rapport voor de Droogtestudie Nederland. Landbouw-economisch Instituut, rapport 3.03.02, Den Haag, januari 2003, 64 blz.

KNMI (2006). KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands. KNMI Scientific Report WR 2006-01. KNMI, De Bilt, 22 mei 2006, 82 blz.

Meeusen, M.J.G., Hoogeveen, M.H. en Visee, H.C. (2000). Waterverbruik in de Nederlandse land- en tuinbouw in 1997. Landbouw-economisch Instituut, rapport 2.00.02, Den Haag, 2000, 75 blz.

Royal Haskoning (2005). Basisdocument locale detaillering waterdoelenmodel: van grof naar fijn.

Stuurman, R., Baggelaar, P., Van Oostrom N., Van der Meulen, M. en Oude Essink, G. (2007). Schetsen van het Nederlandse grondwatersysteem in 2050. TNO-rapport, Utrecht, januari 2007.

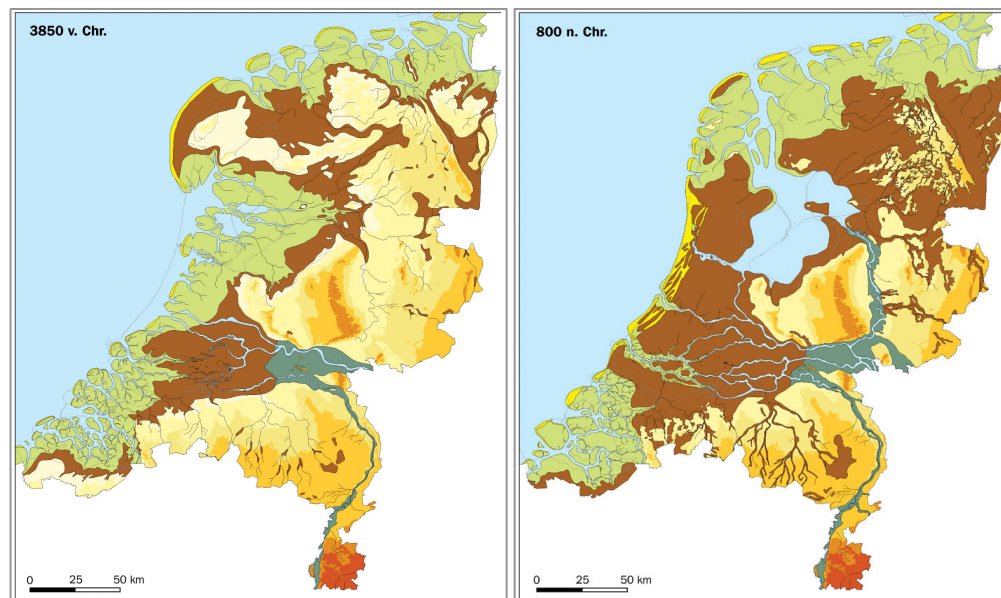
Van Geer, F.C. en Lourens, A. (2001). Trends in de stijghoogte en relatie tussen verschillende dieptes, versie 2. Rapport NITG 01-125-B, NITG-TNO, Delft.

Van der Veen, H. en Vrolijk, H. (2007). Watergebruik in de agrarische sector. Landbouw-Economisch Instituut, projectcode 31105, Den Haag, mei 2007, 23 blz.

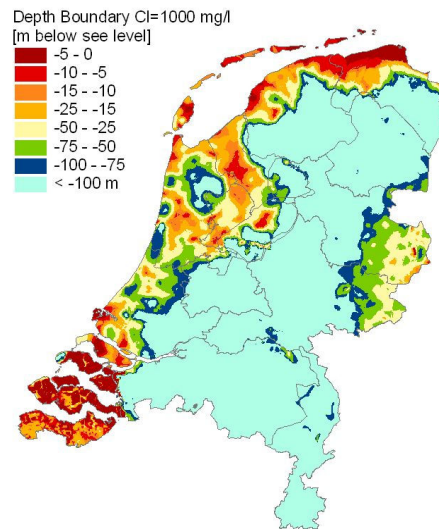
6 Zoetwaterlenzen in zout laag-Nederland

6.1 Inleiding

Een groot deel van Nederland ligt onder de huidige zeespiegel. Dit lage land is sinds de laatste ijstijd gedurende het Holoceen regelmatig overstroomd door de zee waarbij mariene kleien zijn afgezet (figuur 6.1). Tijdens deze transgressies kon het zeewater in de onderliggende zandpakketten infiltreren. De duur en periode van deze holocene transgressies bepalen in hoofdzaak de huidige zoet-zoutverdeling van het grondwater in de ondergrond van laag-Nederland (Post, 2004) (zie figuur 6.2). Sinds 1200 AC zijn we intensief land gaan bedijken, hebben we land teruggewonnen van de zee en pompten we het overtollige water uit deze laaggelegen gebieden: de polders. Sinds deze periode zijn we het grondwatersysteem flink gaan beïnvloeden. Door de lage polderpeilen stroomt het holocene transgressiewater weer richting het oppervlak met verzilting van het oppervlaktewater, het ondiepe grondwater en soms de wortelzone tot gevolg. Oppervlaktewater en het grondwater kunnen hierdoor ongeschikt zijn voor het beregemen van gewassen. Gewassen kunnen ook direct zoutschade ondervinden wanneer het zoute kwelwater via capillaire opstijging de wortelzone bereikt. Gelukkig kent Nederland een neerslagoverschot waardoor er zoetwaterlenzen op het brakke tot zoute grondwater bestaan. De dikte, vorm en dynamiek van deze zoetwaterlenzen verschilt van gebied tot gebied. Verschillende factoren zoals de geohydrologische opbouw, de ontwatering, het peilbeheer, de kwelintensiteit en het zoutgehalte hebben hier invloed op. Door klimaatverandering gaat het neerslagoverschot drastisch veranderen en dit heeft grote invloed op de zoetwaterlenzen. Het voorkomen van verschillende typen zoetwaterlenzen in Nederland, de factoren die deze bepalen en de verandering ervan als gevolg van klimaatverandering worden in dit hoofdstuk behandeld.



Figuur 6.1: De holocene transgressies bepalen de huidige zoet-zoutverdeling van het grondwater in laag-Nederland



Figuur 6.2: De diepte van het brak-zoute grensvlak (chloride concentratie = 1000 mg/l)

6.2 Typen zoetwaterlenzen en bepalende factoren

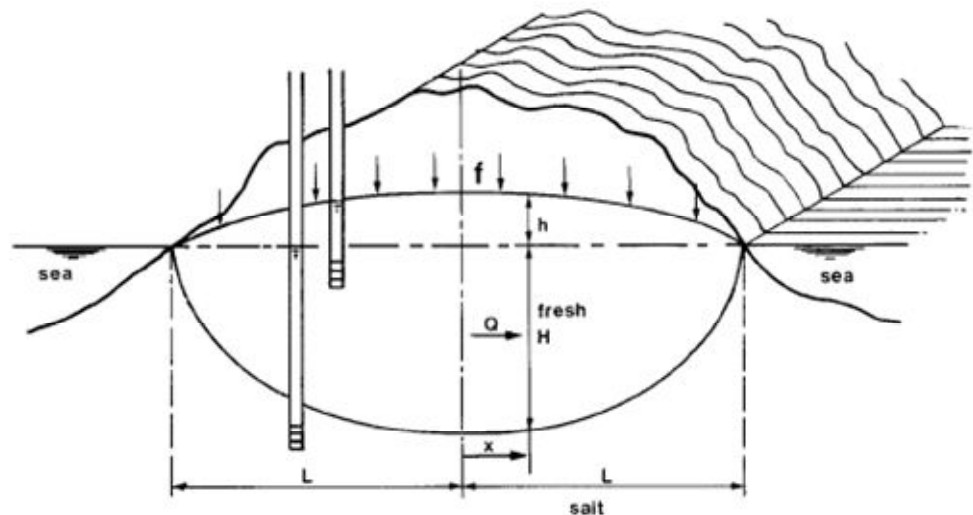
Globaal kunnen er twee hoofdtypen zoetwaterlenzen worden onderscheiden:

Type 1: zoetwaterlenzen op zout grondwater zonder duidelijke kwelcomponent

Type 2: zoetwaterlenzen op zout grondwater met duidelijke kwelcomponent

6.2.1 Type 1: zoetwaterlenzen op zout grondwater zonder duidelijke kwelcomponent

De zoetwaterlenzen in de duinen zijn een duidelijk voorbeeld van type 1. Door de hoge ligging en de afwezigheid van ontwatering kunnen de duinen als een infiltratiegebied worden aangemerkt. De dikte van deze zoetwaterlens laat zich eenvoudig beschrijven door de Ghyben Herzberg relatie. Deze houdt in dat de dikte van de zoetwaterbel (H) 40 keer zo dik is dan de hoogte van de grondwaterstand boven zeeniveau (h) (zie figuur 6.3, uit: Meinardi, 1983).



Figuur 6.3: Relatie tussen de grondwaterstand en de dikte van de zoetwaterlens (uit Meinardi, 1983). Deze relatie is alleen geldig als de ontwateringslengte L , in dit geval breedte van de duinen, groot is.

De dikte van deze zoetwaterlenzen is relatief constant in de tijd en kunnen als stationair worden beschouwd. Ze zijn weinig afhankelijk van het neerslagoverschot en worden dan ook nauwelijks bedreigd door een veranderend neerslagoverschot als gevolg van klimaatverandering. Veel van deze zoetwaterlenzen worden intensief gebruikt voor de zoetwatervoorziening zoals drinkwater waardoor de lens dunner wordt.

Andere hoger gelegen elementen in het zoute-lage land zoals bijvoorbeeld kreekruggen kunnen, mits de ontwateringslengte L (oftewel breedte van de kreekrug) groot genoeg, tot hetzelfde type worden gerekend.

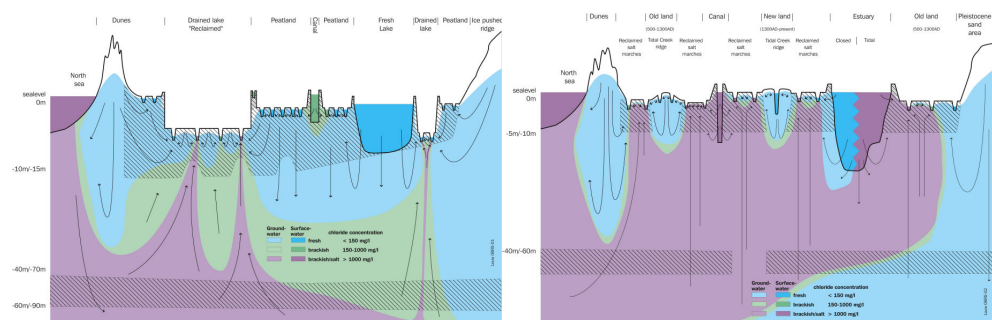
De zoetwaterlenzen van type 1 worden nauwelijks bedreigd door veranderend neerslagoverschot en zullen dan ook niet verder worden behandeld.

6.2.2 *Type 2: zoetwaterlenzen op zout grondwater met duidelijke kwelcomponent*

In kwelgebieden kunnen de zoetwaterlenzen aanzienlijk dunner zijn dan van het duintype. De kwelgebieden kenmerken zich door een sterke ontwatering met een polderpeil lager dan de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket. Het polderpeil ligt altijd lager dan zeeniveau. De brakzoute kwelgebieden van Nederland kunnen met betrekking tot zoetwaterlenzen in twee typen worden onderverdeeld. Het onderscheidend verschil is het zoutgehalte van het kwelwater of wel het holocene transgressiewater.

Type 2a: zoetwaterlenzen in relatief oude transgressiegebieden

Type 2b: zoetwaterlenzen in recente transgressiegebieden

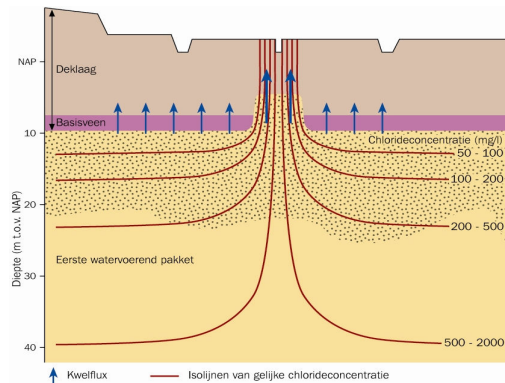


Figuur 6.4: Grondwatersysteem in relatief oude holocene transgressiegebieden (type 2a, links), grondwatersysteem in recente transgressiegebieden (type 2b, rechts)

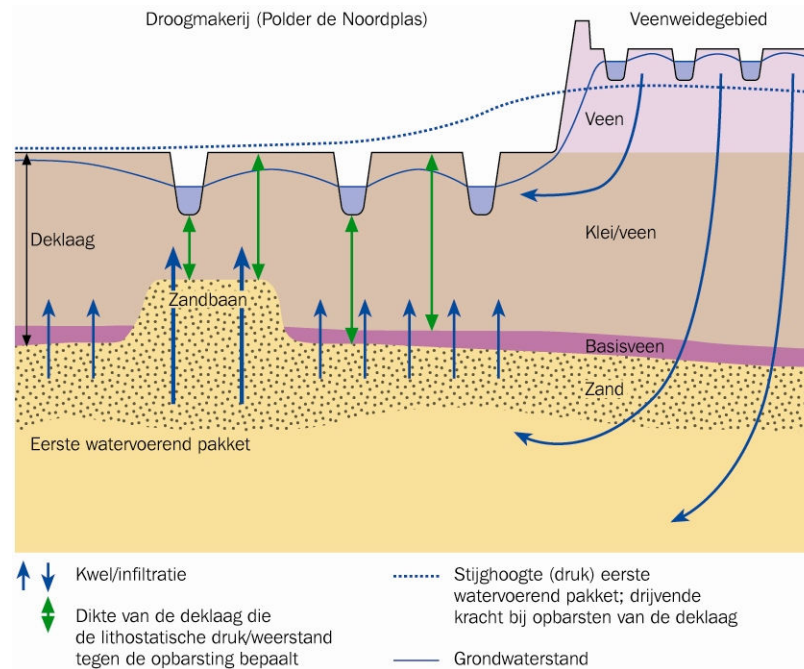
Type 2a: zoetwaterlenzen in relatief oude transgressiegebieden

Type 2a lenzen komen vooral voor in de (diepe) polders van west Nederland en de Flevopolders. Deze gebieden werden ongeveer 4000 jaar geleden door het ontstaan van de duinen in West-Nederland beschermd tegen de zee, met uitzondering van enkele zeegaten. Hierdoor trad veenvorming op en kon gedurende een lange periode zoet regenwater infiltreren. Het grondwater is hier dan ook tot een diepte van ongeveer 15 tot 75 meter zoet tot brak. Voor de meeste gebieden vond infiltratie van zoet water plaats tot het moment dat de polders zijn ontstaan. Peilverlaging in deze polders veroorzaakte een omkering van de grondwaterstroming, het holocene grondwater stroomde weer naar boven. Voor het grootste deel was en is dit kwelwater dus zoet tot licht brak, echter op locaties waar de holocene deklaag is doorsneden door zandbanen en oude getijdegeulen, vinden grotere snelheden plaats waardoor dieper en brakker grondwater wordt aangetrokken (zie figuur 6.4 en 6.5). Recent onderzoek in Polder de Noordplas heeft aangetoond dat zogenaamde wellen een grote bijdrage hebben aan de verzilting van het oppervlaktewater (De Louw e.a., 2006), door de grote stroomsnelheid

trekken wellen nog dieper en daardoor zouter grondwater aan. Wellen ontstaan met name in sloten aan de rand van diepe polders waar de waterdruk in het eerste watervoerende pakket groter is dan de tegendruk die de holocene deklaag biedt en er opbarsting plaatsvindt (zie figuur 6.6).



Figuur 6.5: Het opkegelen van dieper en zouter grondwater als gevolg van hogere kwelintensiteiten rondom zandbanen en wellen.



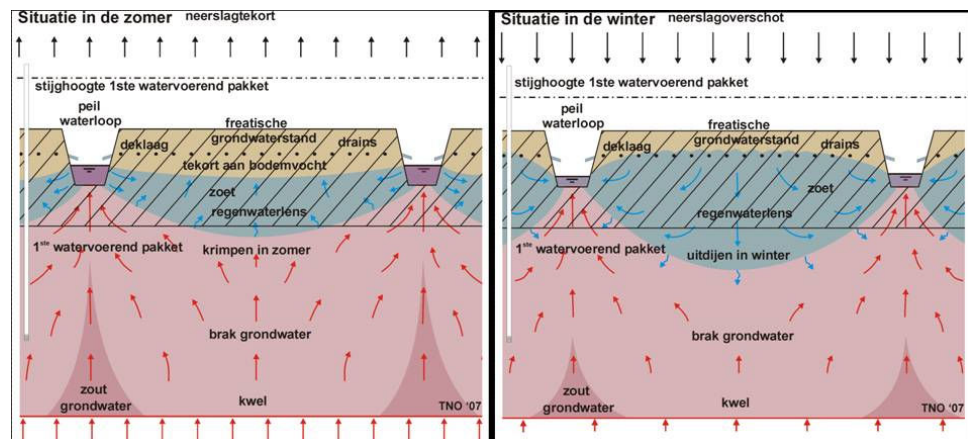
Figuur 6.6: Kwel en kans op opbarsting in diepe polders

De bovengenoemde gebieden van het type 2a kennen dus een duidelijke verzilting van het oppervlaktewater door heterogene kwel via zandbanen en wellen (zie figuur 4). Echter, in de meeste percelen vindt kwel van een zoeter type grondwater plaats waardoor niet echt kan worden gesproken van een zoetwaterlens door regenwater op zout grondwater. In veel polders van dit type wordt daarom, met uitzondering van enkele locaties, zoet tot licht brak grondwater tot op grotere diepte (15-75m) aangetroffen. Verzilting van de wortelzone speelt in deze gebieden daarom ook geen rol.

Door het kwelproces in deze polders verplaatst het diepere zoute grondwater langzaam maar gestaag steeds meer naar het oppervlak en wordt het kwelwater steeds zouter. De verzilting zal door dit autonome proces, dat sinds de inpoldering in gang is gezet, de komende 50 jaar ongeveer met 30% zal toenemen.

Type 2b: zoetwaterlenzen in recente transgressiegebieden

Zoetwaterlenzen van het type 2b komen vooral voor op de Zeeuwse en Zuid-Hollandse eilanden, het noorden van Friesland en Groningen en de polders op enkele Waddeneilanden (met name Texel). Deze gebieden hebben recentelijk onder invloed van de zee gestaan en in de meeste gevallen heeft de mens het land teruggewonnen van de zee door het te bedijken en te bemalen. De kwelgebieden kenmerken zich door het voorkomen van zoutwater op geringe diepte (zie figuur 6.2 en 6.4). In de ontwateringsmiddelen treedt het zoute grondwater uit en in het perceel tussen de sloten bestaat in de meeste gevallen een zoetwaterlens op het zoute grondwater. Lokale factoren zoals ontwatering, peilbeheer, geohydrologische opbouw, maaiveldhoogte, neerslagoverschot, kwelintensiteit en zoutgehalte van het kwelwater bepalen de dikte, vorm en dynamiek van de regenwaterlens. De dikte van de zoetwaterlens varieert sterk met de seizoenen zoals in figuur 6.7 is te zien. In de winter bouwt de zoetwaterlens zich op door het overschot aan neerslag en in de zomer wordt deze dunner door verdamping. Dit type zoetwaterlenzen zijn zeer gevoelig voor veranderend neerslagoverschot als gevolg van klimaatverandering. In de volgende paragraaf wordt hier middels enkele modelberekeningen dieper op in gegaan. Ook de andere genoemde lokale factoren hebben een duidelijke invloed op de zoetwaterlens en zullen in de onderstaande paragraaf worden besproken.



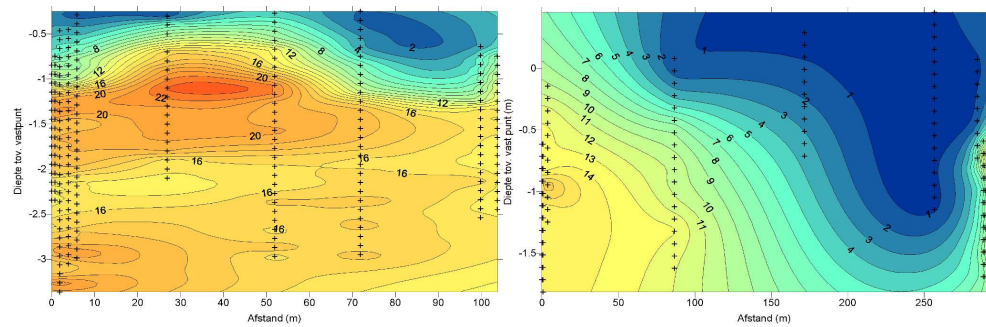
Figuur 6.7: De regenwaterlens in een zomer en een wintersituatie

6.2.3 Factoren die invloed hebben op de zoetwaterlens

In de afgelopen 2 jaar heeft TNO uitgebreid veldonderzoek gedaan naar het voorkomen van zoetwaterlenzen in zoute kwelgebieden. Voor ongeveer 40 percelen in Friesland (De Louw e.a., 2006) en Zeeland (Oude Essink e.a., 2007) is de zoutverdeling in de ondiepe ondergrond met behulp van metingen in kaart gebracht. De ruimtelijke verschillen zijn groot. Een belangrijke conclusie uit beide veldstudies betreft het feit dat er in de kwelgebieden nauwelijks sprake is van een zoetwaterlens. Het bovenste grondwater bleek in de meeste gevallen chloridenconcentraties te bevatten groter dan 500 mg/l. In de onverzadigde zone werd vaker zoet water aangetroffen. Het zoutgehalte neemt voor alle kwelpercelen geleidelijk maar sterk toe met de diepte zoals bijvoorbeeld in figuur 6.8 is te zien. Er vindt dus over een grote zone menging plaats van het zoete regenwater en het zoute kwelwater. Deze mengzone wordt vermoedelijk

veroorzaakt door de dynamiek van het bovenste grondwater als gevolg van neerslag, verdamping en drainage.

Van belang voor gewassen is het zoutgehalte in de wortelzone. Veldmetingen laten een duidelijke relatie zien tussen het gemeten zoutgehalte in de onverzadigde bodem en het zoutgehalte van het bovenste grondwater. Zout bodemvocht wordt alleen aangetroffen op percelen waar het bovenste grondwater heel zout is (>5000 mg/l) terwijl zoet water in de wortelzone kan voorkomen boven brak grondwater (300-4000 mg/l).



Figuur 6.8: Metingen van de elektrische geleidbaarheid (bodem en water) voor twee percelen in Zeeland. Blauw is zoet en rood is zout grondwater. Duidelijk zijn de verschillen tussen en in een perceel.

Met behulp van de veldmetingen en verschillende modelberekeningen is onderzocht welke factoren in welke mate van invloed zijn op de dikte van regenwaterlens. Op basis van modelberekeningen met de MOCDENS3D modelcode stelde De Louw en Oude Essink (2006) de onderstaande tabel op.

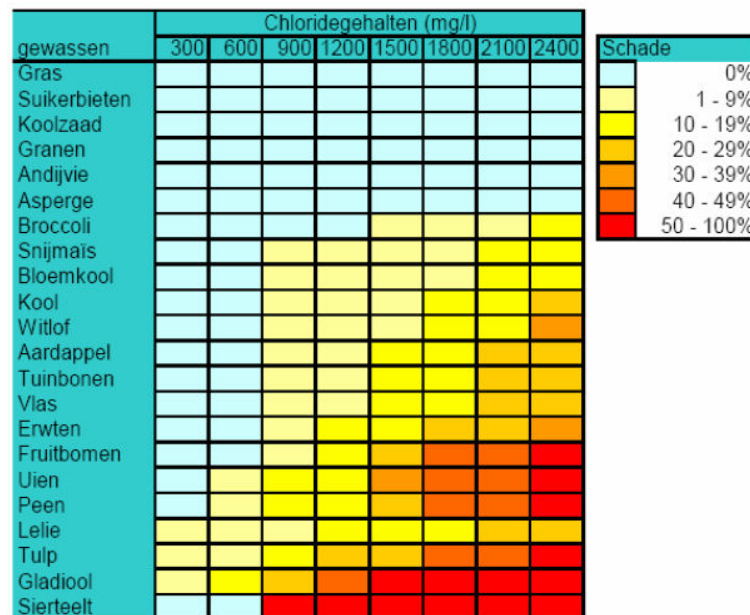
Tabel 6.1 Voor verschillende situaties de berekende dikte van de regenwaterlens (De Louw en Oude Essink, 2006)

Case	Initiële kwel-flux mm/d	Peil-verandering m	Drainage-niveau verandering en drainage afstand M	Sloot-afstand M	Drainage weerstand D	Cl-conc. van diepe kwel-water mg/l	Dikte van regenwaterlens (m)				
							gem.	winter	zomer	max	min
1	0.3	0	0 + 10m	170	5	7500	1.60	1.86	1.35	3.00	0.24
4	0.3	-0.5	0 + 10m	170	5	7500	1.21	1.45	0.98	2.57	0.08
7	0.3	+0.5	+0.5m + 10m	170	5	7500	6.53	6.81	6.24	8.21	5.09
10	0.3	0	+0.5m + 6m	170	5	7500	5.60	5.89	5.32	7.44	3.89
13	0.3	0	0 + 10m	85	5	7500	1.21	1.44	0.97	2.52	0.07
19	0.3	0	0 + 10m	170	5	5000	1.50	1.75	1.25	2.84	0.24
20	0.3	0	0 + 10m	170	5	4000	1.46	1.71	1.21	2.83	0.20
16	0.3	0	0 + 10m	170	10	7500	2.61	2.87	2.34	4.11	1.01
17	0.3	0	0 + 10m	170	1	7500	0.63	0.83	0.42	1.85	0.00
18	0.3	0	0 + 10m	170	5	7500	6.64	6.91	6.36	8.42	4.90
2	0.1	0	0 + 10m	170	5	7500	5.35	5.62	5.08	7.26	3.57
5	0.1	-0.5	0 + 10m	170	5	7500	4.07	4.35	3.80	5.86	2.48
8	0.1	+0.5	+0.5m + 10m	170	5	7500	6.25	6.53	5.98	7.87	4.80
11	0.1	0	+0.5m + 6m	170	5	7500	6.12	6.40	5.85	7.95	4.42
14	0.1	0	0 + 10m	85	5	7500	4.52	4.77	4.26	6.17	2.88
21	0.1	0	0 + 10m	170	5	5000	5.35	5.62	5.08	7.24	3.58
23	0.1	0	0 + 10m	170	5	4000	5.37	5.64	5.10	7.28	3.61
3	0.5	0	0 + 10m	170	5	7500	0.13	0.22	0.05	1.10	0.00
6	0.5	-0.5	0 + 10m	170	5	7500	0.12	0.19	0.04	1.02	0.00
9	0.5	+0.5	+0.5m + 10m	170	5	7500	6.92	7.20	6.64	8.40	5.39
12	0.5	0	+0.5m + 6m	170	5	7500	5.25	5.53	4.96	7.02	3.55
15	0.5	0	0 + 10m	85	5	7500	0.10	0.17	0.03	0.94	0.00
22	0.5	0	0 + 10m	170	5	5000	0.12	0.21	0.04	1.08	0.00
24	0.5	0	0 + 10m	170	5	4000	0.13	0.21	0.04	1.10	0.00

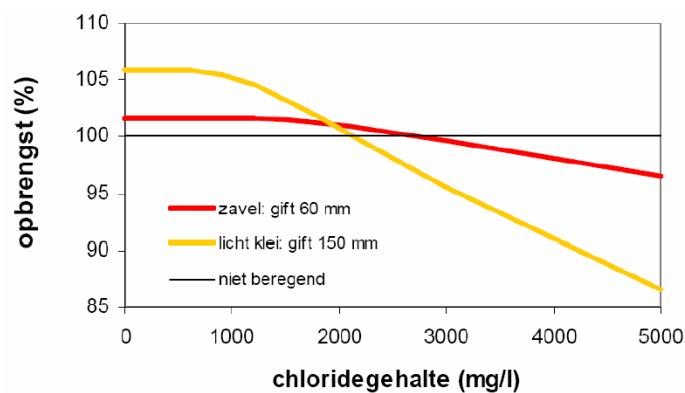
Zowel uit de veldmetingen als de bovenstaande modelberekeningen blijkt een grote invloed van de kwelintensiteit op de dikte van de regenwaterlens. De kwelintensiteit is eenvoudig te sturen met behulp van peilbeheer. Case 7 laat zien dat bij een peilverhoging van een 0.5m de kwelsituatie omslaat naar een infiltratiesituatie en de lens significant dikker wordt van 1.6 m naar 6.5 m. Een verhoging van drainagebuizen hebben een vergelijkbaar effect. Het verkleinen van de slootafstand blijkt ongunstig voor de ontwikkeling van regenwaterlensen. Door de sterkere ontwatering wordt veelal meer regenwater afgevoerd en krijgen we te maken met een gemiddeld lagere grondwaterstand waardoor de kwel meer invloed krijgt. De kwelintensiteit kan ook door externe factoren veranderen. Bijvoorbeeld een zeespiegelstijging kan een verhogend effect hebben op de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket (kweldruk). Case 3 laat zien dat door een verhoging van de kwelintensiteit de gemiddelde lensdikte

verandert van 1.6 m naar slechts 0.13 m. Een geringe kwelflux van slechts 0.1 mm/d heeft een significant dikkere lens tot gevolg.

Bovenstaan resultaten laten resultaten zien voor het ondiepe grondwater. Voor het wel of niet ontstaan van zout schade aan gewassen, is uiteindelijk het zoutgehalte in de wortelzone van belang. Deze is afhankelijk van het chloridengehalte van het bovenste grondwater maar ook van de diepte van de grondwaterstand. Als de grondwaterstand op 3 meter diepte zit, zal dit grondwater de wortelzone nooit bereiken en zullen we zoete omstandigheden in de wortelzone hebben. Een zeer ondiepe grondwaterstand bestaande uit brak grondwater zou de wortelzone al enigszins negatief kunnen beïnvloeden. Over zouttolerantie van gewassen als gevolg van capillaire opstijging van zout grondwater is weinig bekend. Handvaten die hiervoor gebruikt kunnen worden zijn de zouttolerantiewaarden die bestaan voor het beregenen met brak water (zie figuur 6.9, Stuyt, 2007). Figuur 6.10 laat duidelijk zien dat de zouttolerantie voor beregenen met brak oppervlaktewater ook sterk afhankelijk van de grondsoort.



Figuur 6.9: Schadepercentage voor enkele gewassen door beregenen met brakwater (uit Stuyt, 2007)



Figuur 6.10: Opbrengst (%) van consumptieaardappel als functie van het chloridengehalte van het beregeningswater voor twee verschillende grondsoorten

6.3 Effect van klimaatverandering op zoetwaterlenzen

Neerslagoverschot heeft een grote invloed op de zoetwaterlenzen van type 2b. Zoals eerder opgemerkt bouwt de zoetwaterlens zich in de winter op en wordt de lens dunner in de zomerperiode wanneer er een neerslagtekort heerst. Volgens alle vier de klimaatscenario's van het KNMI (2006) zal de potentiële verdamping in de zomer toenemen, variërend van +3% (scenario G) tot +15% (scenario W+) in 2050 ten opzichte van het gemiddelde klimaat rond 1990. Dit resulteert in een toename van het maximale neerslagtekort van +5% (scenario G) tot +53% (scenario W+). Het toenemen van het neerslagtekort zal leiden tot dunnere zoetwaterlenzen. Met behulp van modelberekeningen wordt dit geïllustreerd.

Modelopbouw

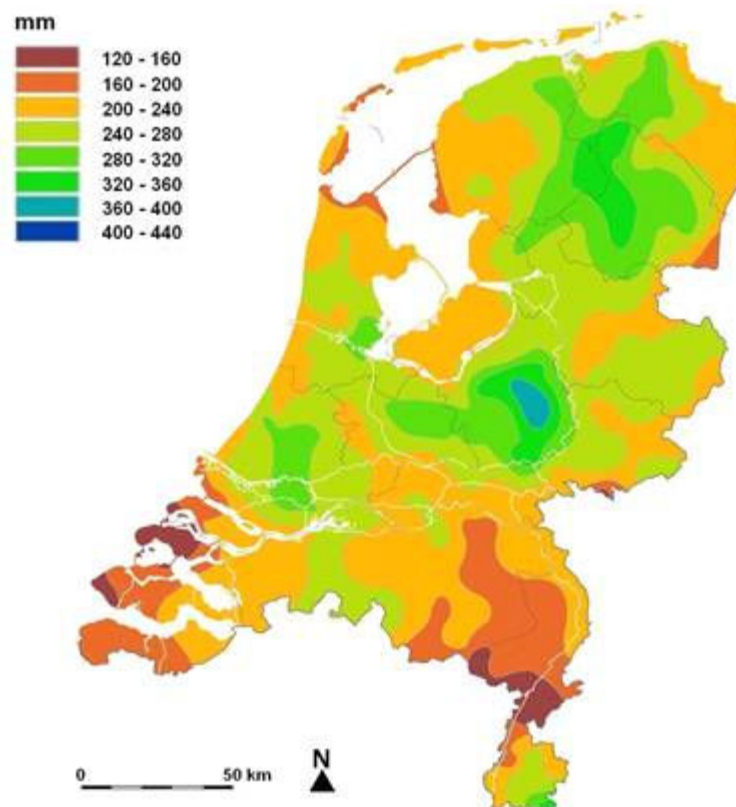
Het perceel dat wordt gemodelleerd is een veel voorkomende situatie van regenwaterlenzen op zout kwelwater van het type 2b, een relatief dunne regenwaterlens die sterk wordt beïnvloed door het neerslagoverschot. In tabel 6.2 staan enkele kenmerken van de geohydrologische situatie weergegeven. Hiermee hebben we uiteraard niet alle voorkomende situaties te pakken maar het voorbeeld dient dan ook alleen ter illustratie van klimaatverandering op zoetwaterlenzen. In andere situaties dan gemodelleerd zullen de effecten wellicht groter of juist kleiner zijn. De berekeningen zijn uitgevoerd MOCDENS3D, een grondwatermodel voor dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming (Oude Essink, 1998, 2000; Vugt et al., 2003).

Tabel 6.2 Modelparameters

<p><i>Modeldiscretisatie</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Profielmodel tussen 2 sloten: celgrootte 1 bij 1 m • Aantal lagen = 70: laagdikte 0.1m bovenste 4.6m, 0.25m 4.6m tot 10.0m. <p><i>Opbouw ondergrond</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • 0-.180 cm: Deklaag: zandige klei, hor. doorlatendheid = 0.4 m/d • 180-240 cm: Deklaag: zavel, hor., doorlatendheid = 0.5 m/d • 240-460 cm: Deklaag: klei, hor. doorlatendheid = 0.046 m/d • 460 -1000 cm: Eerste watervoerend pakket: zand hor. doorlatendheid = 2.5 m/d • Vert. doorlatendheid in deklaag 10x zo klein als hor. doorlatendheid • Freatische bergingscoëfficiënt: 0.16 <p><i>Kweldruk</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Stijghoogte eerste watervoerend pakket: -0.75 m onder maaiveld <p><i>Ontwatering</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Slootafstand: 200 m, slootpeil: -1.20 m onder maaiveld • Drainageafstand: 10 m, drainageniveau: -0.90 m onder maaiveld <p><i>Stoftransport</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Chloridenconcentratie: kwelwater = 8000 mg/l, regenwater = 10 mg/l, slootwater = 400 mg/l • effectieve porositeit=30% • longitudinale dispersiviteit: $a_L=1m$; $a_{TH}=a_{TV}$=transversale disp.=$1/10*a_L$ • moleculaire diffusie: $D_{mol}=8.64*10^{-5} m^2/dag$

Neerslagoverschot

Het neerslagoverschot, zowel de hoeveelheid als de verdeling in het jaar, hebben grote invloed op regenwaterlenzen. Zoals in figuur 6.11 is te zien, bestaan er binnen Nederland grote verschillen in het jaarlijks neerslagoverschot. Zo zijn er gebieden in Zeeland die een ongeveer 2x zo laag neerslagoverschot hebben dan in Friesland. In het model wordt het neerslagoverschot van Zeeland ingevoerd. Voor neerslag zijn de gegevens van het KNMI-station Kerkwerpe gebruikt en de Makkink-verdamping is berekend met behulp van de gegevens van meteorostation Vlissingen.

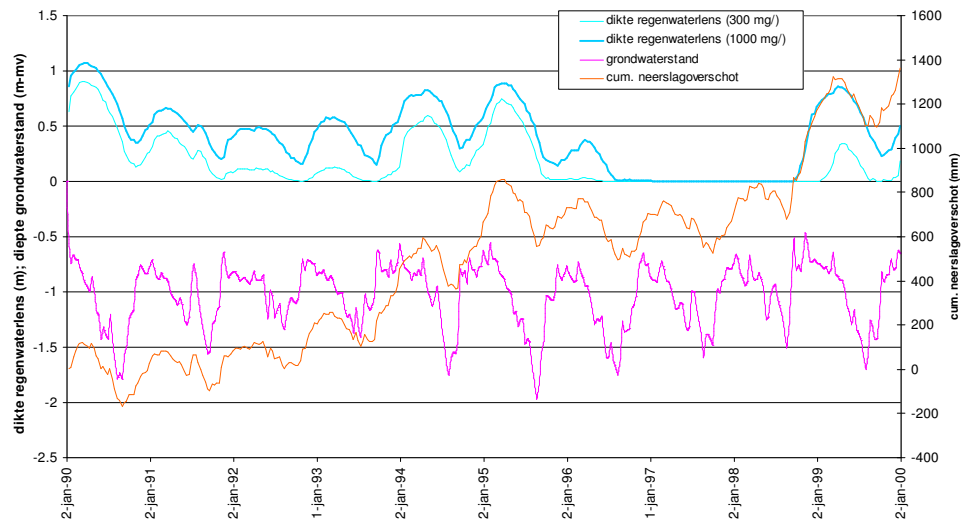


Figuur 6. 11: Gemiddeld jaarlijks neerslagoverschot in de periode 1971-2000 (KNMI, 2007)

Een periode van 10 jaar, namelijk de situatie 1990-1999 is met het model op decadebasis doorgerekend. Naast deze zogenoemde huidige situatie zijn twee KNMI-klimaatscenario's doorgerekend, namelijk het W+2050 en het W+2100 scenario. Met behulp van een programma van het KNMI (zie www.knmi.nl) is de neerslag en de temperatuur van 1990-1999 getransformeerd naar de situatie W+2050 en w+2100. Met behulp van de getransformeerde temperatuurgegevens is de Makkink-verdamping opnieuw berekend.

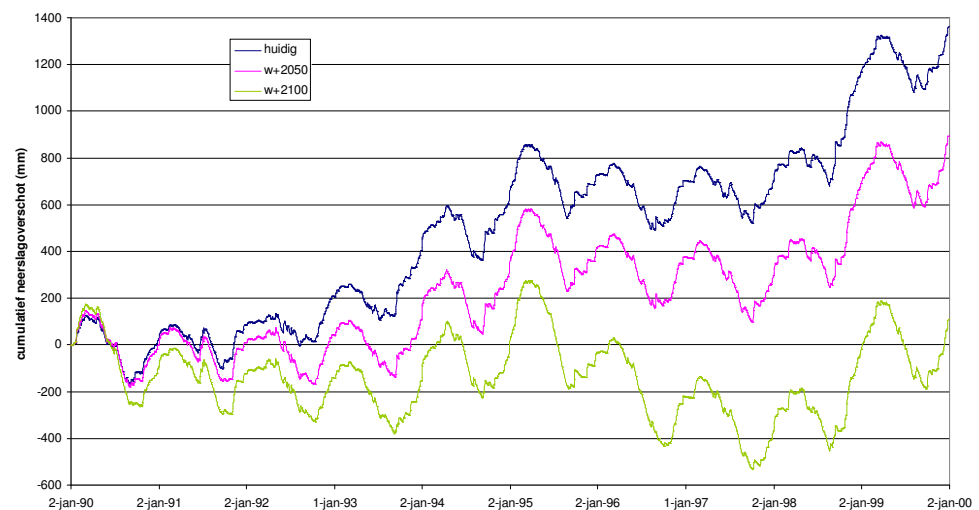
Modelresultaten

In figuur 6.12 staat de berekende grondwaterstand en dikte van de regenwaterlens in een grafiek met het cumulatieve neerslagoverschot weergegeven voor het huidige klimaat. De dikte van de regenwaterlens is op twee manieren in beeld gebracht namelijk de dikte van de regenwaterlens met een chloridenconcentratie kleiner dan 300 mg/l en kleiner dan 1000 mg/l.



Figuur 6.12: Het cumulatieve neerslagoverschot en de berekende grondwaterstand en de gemiddelde dikte van de regenwaterlens (300 en 1000 mg/l) voor het huidige klimaat

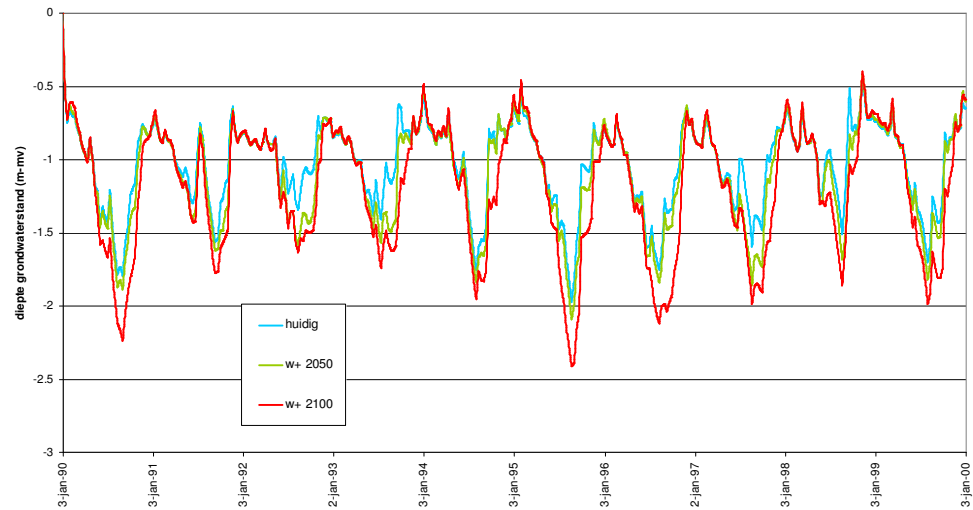
In de jaren 1990 t/m 1995 groeit het cumulatieve neerslagoverschot, dat wil zeggen dat er op jaarbasis ruim meer neerslag valt dan dat er verdampt. Voor de jaren 1996 tot 1999 valt er minder neerslag en is dit niet meer het geval. De grondwaterstand zakt in deze periode in de zomer iets verder uit dan in nattere jaren. De hoogste grondwaterstand blijft echter grotendeels gelijk, sterk beïnvloed door drainage. Echter, veel grotere verschillen zijn zichtbaar voor de dikte van de regenwaterlens. Deze verdwijnt zelfs geheel in de periode 1996-1999. In deze periode is de verdamping ongeveer gelijk aan die van de periode ervoor maar is het juist de geringe hoeveelheid neerslag die het verdwijnen van de regenwaterlens veroorzaakt. De lens kan in de winter niet voldoende worden opgebouwd waardoor in de zomer de lens in zijn geheel verdampt.



Figuur 6.13: Het cumulatieve neerslagoverschot voor het huidige klimaat, scenario w+2050 en w+2100

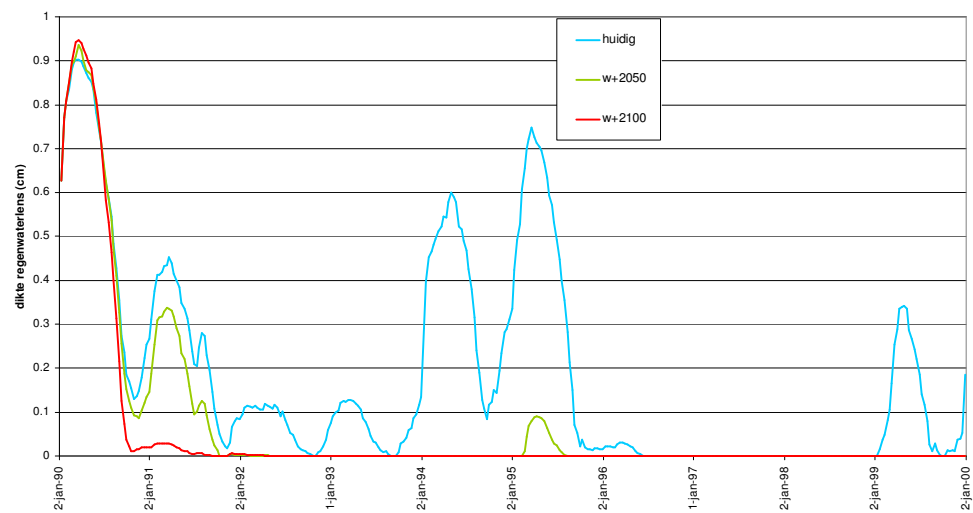
Volgens het w+-scenario neemt het neerslagoverschot drastisch af (zie figuur 13). Voor beide klimaatscenario's neemt de winterneerslag toe en de zomerneerslag af. Op jaarbasis neemt voor het w+2050 en het w+2100 klimaatscenario de neerslag af met

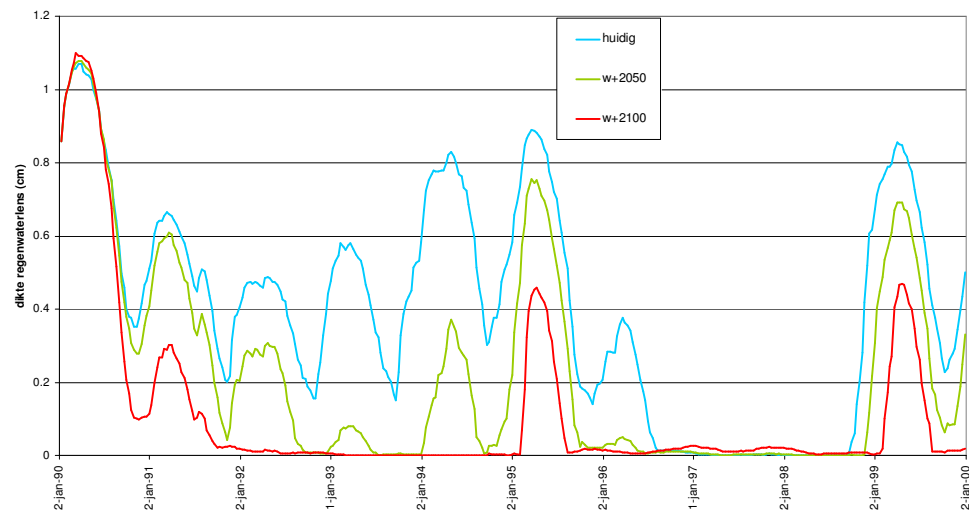
respectievelijk 8 en 50 mm/jaar. Voor zowel de zomer als de winter neemt de verdamping significant toe. Voor het w+2050 en w+2100 scenario neemt de zomerverdamping respectievelijk toe met 5% en 10%.



Figuur 6. 14: De berekende grondwaterstand voor de drie klimaatscenario's

Voor deze sterk ontwaterde situatie neemt de wintergrondwaterstand nauwelijks toe als gevolg van de klimaatscenario's (zie figuur 14). De zomergrondwaterstand zakt voor beide klimaatscenario's verder uit. Vooral scenario w+2100 laat sterke dalingen van de grondwaterstand zien.





Figuur 6.15: De berekende dikte van de regenwaterlens voor de drie klimaatscenario's (boven grenswaarde 300 mg/l, onder 1000 mg/l)

Door de significante daling van het neerslagoverschot, nog eens versterkt in de zomer door een geringere neerslag en een toegenomen verdamping, neemt de dikte van de zoetwaterlens sterk af (zie figuur 6.14). Voor beide klimaatscenario's is er (bijna) geen sprake meer van een zoete regenwaterlens, grondwater met gloriëdeconcentraties kleiner dan 300 mg/l komen dan niet meer voor. Grondwater met concentraties lager dan 1000 mg/l komen met het extreme w+2100 scenario zeer sporadisch voor.

Discussie en conclusie modelresultaten

De modelresultaten laten zien dat regenwaterlensen zeer sterk in dikte afnemen door klimaatverandering. Een afnemend neerslagoverschot, met name in de toekomstige zomers met minder neerslag en meer verdamping, is hiervan de oorzaak.

Er dient te worden opgemerkt dat de berekeningen slechts voor 1 specifieke situatie zijn uitgevoerd. Echter, de trend zal voor alle andere situaties dezelfde zijn maar afhankelijk van de lokale geohydrologie en ontwateringsituatie zich sterker of juist minder sterk manifesteren.

6.4 Conclusies

De zoetgrondwatervoorraad van percelen in laaggelegen poldergebieden die een recente holocene transgressie hebben gekend zoals de Zeeuwse en Zuid-Hollandse eilanden, het noorden van Groningen en Friesland, Texel en het noorden van Noord-Holland worden bedreigd door klimaatverandering. De zoete regenwaterlensen zullen door een afname van het neerslagoverschot, met name in de zomer, significant in dikte afnemen. Door het zouter worden van het bovenste grondwater zal, met name in het groeiseizoen, het zoutgehalte in de wortelzone toenemen waardoor de kans op zoutschade toeneemt. Metingen en modelberekeningen laten tevens zien dat factoren als kwelintensiteit en de ontwateringsituatie een grote invloed hebben op regenwaterlensen. Dit betekent tevens dat met lokale perceelsmaatregelen kan worden geanticipeerd op de negatieve effecten op zoetwaterlensen als gevolg van klimaatverandering.

Een ander aspect van klimaatverandering met betrekking tot de verziltingsproblematiek, is de toename van het zoutgehalte van het oppervlaktewater. Door een afname van het neerslagoverschot zal het polderwater dat zowel uit zout kwelwater en zoet regenwater bestaat minder worden verdund.

6.5 Literatuur

Meinardi, 1983. Fresh and brackish groundwater under coastal areas and islands. *Geojournal* 7.5. Pag 413-425.

Louw, P.G.B. de, G. Oude Essink, P. Maljaars (2007). Achtergrondstudie kwelreductietechnieken. TNO-rapport 2007-U-R0357/B. Speciale aandacht naar de werking en dichten van wellen.

De Louw, R. Bakkum, H.A. van Hardeveld en H. Folkerts (2005). Wellen verzilten het oppervlaktewater in polders in West-Nederland. *H20*, nummer 14/15, jaargang 38-2005.

De Louw, P.G.B. de, R. Bakkum, H. Folkerts, H. van Hardeveld (2004). Het effect van waterbeheer op de chloride- en nutriëntenbelasting van het oppervlaktewater in Polder de Noordplas. Syntheserapport: Definitieve water- en stoffenbalans en effecten van verschillende waterbeheersscenario's. TNO-rapport NITG 04-241-B1213.

Louw, P.G.B. de, G. Oude Essink, P. Maljaars, Monitoring Verzilting Dongeradeel, TNO-rapport 2006-U-R0177/B.

De Louw en Oude Essink (2006). Salinisation of the northern coastal area of the Netherlands due to land subsidence and sea level rise. *Water Resources Publications, LLC. Coastal Environment and Water Quality*.

Oude Essink e.a., 2007 Zeeland. Meetcampagne naar het voorkomen van regenwaterlenzen in de provincie Zeeland. TNO-rapport.

Oude Essink, G.H.P. (2000), Zoutwaterintrusie in het grondwatersysteem van de Kop van Noord-Holland, Een toepassing van de drie-dimensionale computer code MOCDENS3D, *Stromingen*, 6(3), 9-21.

Oude Essink, G. H. P., 2001. Salt Water Intrusion in a Three-dimensional Groundwater System in The Netherlands: a Numerical Study. *Transport in Porous Media* 43(1): 137-158.

Post, 2004. Groudwater salinization processes in the coastal area of the Netherlands due to transgressions during the Holocene. Proefschrift. Vrije Universiteit, Amsterdam.

Stuyt, 2007. Presentatie op LMzW-symposium 24 september 2007. www.LevenmetZoutWater.nl.

7 Synthese en eindconclusies

1. De totale Nederlandse voorraad zoet grondwater bevat momenteel ca 1100 miljard m³. Deze grondwatervoorraad zal de komende 100 jaar, met of zonder klimaatsverandering en zeespiegelrijzing, nauwelijks veranderen.
2. De grondwatervoorraad is het resultaat van een dynamische evenwicht. Ondanks de enorme voorraad kunnen wij hiervan slechts een relatief klein deel gebruiken zonder schade aan drinkwatervoorziening, landbouw en natuur te veroorzaken. Naar schatting (Dufour, 1998) bedraagt voor Nederland het neerslagoverschot (neerslag min verdamping/transpiratie) ca 9 miljard m³/jaar en de grondwateraanvulling (neerslagoverschot min de drainage naar sloten en rivieren) ca 2,6 miljard m³/jaar. Nu wordt hiervan jaarlijks ongeveer 1,5 miljard m³ grondwater voor drinkwatervoorziening, industrie en beregening onttrokken.
3. Als gevolg van de klimaatsverandering (toename winterneerslag) valt te verwachten dat de grondwaterstanden in infiltratiegebieden (duinen, stuwwallen, dekzandruggen etc.), in de orde van decimeters tot meer dan 1 meter, gaan toenemen. Infiltratiegebieden worden gekarakteriseerd door de afwezigheid van ontwateringsmiddelen (sloten, greppels etc.). Deze grondwaterstijging zal rond deze infiltratiegebieden leiden tot hogere grondwaterstanden en daardoor mogelijk tot wateroverlast. Kwelafhankelijke natuur en oppervlaktewater zijn waarschijnlijk gebaat bij deze vernatting.
4. Binnen ontwaterde gebieden valt vooral een watertekort voor zomerse gewasverdamping te verwachten. De verwachte toename in winterse neerslag zal naar verwachting snel door de ontwateringsmiddelen worden afgevoerd. De verwachte toename in zomerse droogte zal leiden tot lagere grondwaterstanden en bodemvochtgehalten.
5. Om de zomerse watertekorten te bestrijden is bij het huidige landgebruik en bij het W+ scenario een sterke toename in beregening noodzakelijk. Op de zandgronden kan dit nauwelijks uit het oppervlaktewater plaatsvinden;
6. Uit onze analyse volgt dat in een jaar met een gemiddeld neerslagoverschot nationaal ca 100 miljoen m³ grondwater voor beregening wordt onttrokken. In een droog jaar kan dit het 1½-dubbele worden. Als gevolg van klimaatsverandering kan bij een gemiddeld neerslagoverschot de onttrekking toenemen van 105 miljoen m³/jaar (G scenario) tot 168 miljoen/jaar (W+) scenario. Tijdens droge jaren zal de behoefte nog eens aanzienlijk groter zijn.
7. Beregening kan nadelig zijn voor grondwaterafhankelijke, en vooral kwelafhankelijke natuurwaarde en mogelijk droogstand van beken veroorzaken. Een goede kwantitatieve onderbouwing over de effecten van beregening op het watersysteem en natuur ontbreekt. Hierbij moet in beschouwing worden genomen dat jaarcijfers voor beregening de relevantie van beregening sterk kunnen onderschatten, aangezien de onttrekking plaatsvindt in slechts enkele weken. In die periode is deze onttrekking 2-3 maal meer dan alle overige onttrekkingen in Nederland.
8. Zomerse droogte als gevolg van klimaatsverandering vormt een bedreiging voor zogenaamde zoetwaterlenzen in laaggelegen poldergebieden met brakke tot zoute kwel. Deze zoetwaterlenzen zijn van belang voor o.a. de aardappelteelt. In deze gebieden zal naar verwachten het polderwater in de zomer zouter worden.