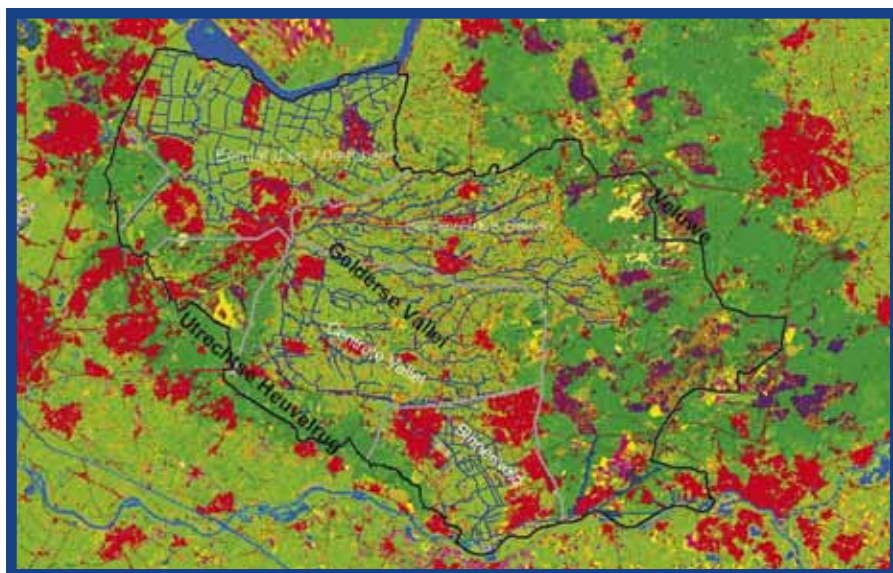




Ellen Hermans, FutureWater  
Jenny Otte, Waterschap Vallei & Eem  
Jan van Bakel, Alterra

# Regionale hydrologische modellering ter onderbouwing van klimaateffecten

Provincies en waterschappen bereiden zich voor op een warmer en grilliger klimaat. Met name voor watersystemen met een interactie tussen traag en snel reagerende deelsystemen is een regionaal hydrologisch model noodzakelijk om klimaateffecten inzichtelijk te maken. In dit artikel wordt dit geïllustreerd voor het beheergebied van Waterschap Vallei & Eem. Voor de KNMI'06-klimaat-scenario's zijn de veranderingen in grondwaterstanden en kwel berekend. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen de traag reagerende systemen van de Utrechtse Heuvelrug en de Veluwe en het snel reagerende systeem van de tussenliggende Gelderse Vallei. Vervolgens wordt ingegaan op klimaatscenario's en nat- en droogteschade voor de landbouw en de doelrealisatie voor natuur.



Afb. 1: Het beheergebied van Waterschap Vallei & Eem.

Voor een zevental provincies zijn de effecten van klimaatverandering in beeld gebracht in zogeheten klimaateffectschetsboeken<sup>1)</sup>. Hierbij zijn de hydrologische effecten veelal kwalitatief beschreven en onvoldoende kwantitatief onderbouwd. Ook Waterschap Vallei & Eem bereidt zich voor op een verandering van het klimaat. FutureWater heeft voor dit waterschap een verkennende klimaatstudie<sup>2)</sup> uitgevoerd gericht op de thema's veiligheid tegen overstromingen, wateroverlast,

watertekort en waterkwaliteit. Voor elk thema is een knelpuntenkaart opgesteld met mogelijke adaptatiemaatregelen.

In een volgend H<sub>2</sub>O-artikel worden deze resultaten gepresenteerd en geeft het waterschap aan hoe het deze verkenning wil gebruiken om te komen tot een klimaatstrategie voor haar beheergebied. Dit artikel gaat in op de regionale hydrologische modellering die is gebruikt ter onderbouwing van de klimaateffecten.

## Interactie deelsystemen

Het beheergebied van Waterschap Vallei & Eem wordt gevormd door de flanken van de Utrechtse Heuvelrug en de Veluwe en de naar het noorden aflopende Gelderse Vallei daar tussenin (zie afbeelding 1). De Gelderse Vallei bestaat uit de deelgebieden Binnenveld, Centrale Vallei, Barneveldse beken en Arkemheen. Water infiltrereert op beide stuwwallen. Op de overgang van de stuwwallen naar de vallei ontspringen beken. De Gelderse Vallei is een kwelgebied. Overtollig water wordt grotendeels onder vrij verval geloosd op de Veluwerandmeren. Alleen de laagst gelegen delen in het noorden van het beheergebied worden bemalen. Beide stuwwallen zijn begroeid met loof- en naaldbos. In de Gelderse Vallei vinden we voornamelijk grasland en mais. Ook grondwaterafhankelijke natuur komt hier voor.

Het jaarlijkse neerslagoverschot voedt het grondwater onder beide stuwwallen. Door het langzame transport van water door de dikke onverzadigde zone reageert het grondwater vertraagd en worden seizoenseffecten genivelleerd. Het ondiepe grondwater in de Gelderse Vallei reageert veel sneller op veranderingen in neerslag en verdamping. Het kent een duidelijke seizoensfluctuatie en staat onder directe invloed van het oppervlaktewater. De interactie tussen beide deelsystemen wordt bepaald door stijghoogteverschillen en de eigenschappen van de ondergrond (KD-waarden van

watervoerende pakketten en c-waarden van scheidende lagen). Met klimaatverandering zullen neerslaghoeveelheden en neerslagpatronen gaan veranderen. De verdamping zal in meer of mindere mate toenemen. Dit beïnvloedt niet alleen het grondwaterregime per deelsysteem maar tevens de interactie tussen de deelsystemen. Het gebruik van een regionaal hydrologisch model is dan noodzakelijk om wijzigingen in grondwaterregimes te kwantificeren.

### Modellen en KNMI-scenario's

In de verkennende klimaatstudie voor Waterschap Vallei & Eem is gebruik gemaakt van vier bestaande SIMGRO-modellen<sup>4)</sup>. SIMGRO<sup>3)</sup> is een geïntegreerd regionaal hydrologisch model. Het omvat de interacties tussen bodem, plant, atmosfeer, bodemwater, grondwater en oppervlaktewater. In elk model is een ander deelgebied van de Gelderse Vallei in detail geschematiseerd. De begrenzing van de vier modellen is gelijk en ligt op ruime afstand van het beheergebied. De modellen zijn eerder gebruikt voor het bepalen van de wateropgave en het gewenste grond- en oppervlaktewaterregime (GGOR)<sup>5)</sup>. Een 30-jarige reeks (1975-2005) van neerslag en referentieverdamping voor station De Bilt is getransformeerd naar de situatie rond 2050 volgens de vier KNMI'06-scenario's (zie kader). Hierbij is voor de neerslag gebruik gemaakt van het transformatieprogramma van het KNMI. Tabel 1 geeft aan dat de verandering in gemiddelde neerslag vaak anders is dan de verandering in extreme neerslag. Het aantal droge dagen in de zomer neemt toe. Het transformatieprogramma houdt hier rekening mee. De referentieverdamping volgens Makkink is op maandbasis getransformeerd<sup>6)</sup>. Deze getransformeerde neerslag- en verdampingsreeksen zijn als randvoorwaarden opgelegd aan de SIMGRO-modellen. Vervolgens is de periode 1986-2000 doorgerekend voor het huidige klimaat en voor de KNMI'06-scenario's.

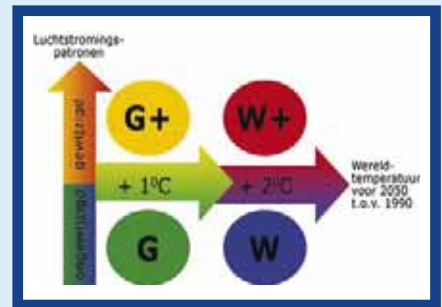
Tabel 2 geeft het gemiddelde jaarlijkse neerslagoverschot en -tekort in de zomermaanden over de 14 doorgerekende hydrologische jaren. Het neerslagtekort in de zomer neemt volgens het G- en W-scenario nauwelijks toe, terwijl dit voor het G+- en het W+-scenario verdubbelt respectievelijk verdrievoudigt. Het jaarlijks neerslagoverschot varieert aanzienlijk, waarbij de +-scenario's droger en de andere twee scenario's natter worden.

### Verandering grondwaterstand en kwel

De modelberekeningen laten zien dat op de flanken van de Utrechtse Heuvelrug en de Veluwe de grondwaterstanden volgens het G- en W-scenario toenemen en volgens het G+- en het W+-scenario afnemen. In de Gelderse Vallei worden in de zomer lagere grondwaterstanden berekend volgens het G+- en het W+-scenario. In de Gelderse Vallei is nauwelijks sprake van significant hogere grondwaterstanden. Effecten op grondwaterstanden volgens het G-scenario zijn vergelijkbaar met het W-scenario maar minder extreem. Hetzelfde geldt voor G+-scenario en het W+-scenario.

## KNMI'06-scenario's

Afbeelding 2 geeft een schematisch overzicht van de KNMI'06-scenario's. Klimaatmodellen voorspellen dat de wereldgemiddelde temperatuur rond 2050 één of twee graden hoger zal liggen. Deze temperatuurstijging vormt het uitgangspunt voor de gematigde (G) en de warme (W) klimaatscenario's. Voor het klimaat in Nederland speelt tevens de gemiddelde windrichting een belangrijke rol. Voorspellingen voor 2050 zijn hierin niet eenduidig. In het W+- en G+-scenario is uitgegaan van een sterkere westelijke stroming in de winter en meer oostenwind in de zomer. Dit zal resulteren in zachtere en nattere winters en warmere en droger zomers. De KNMI'06-scenario's zijn op grond van de huidige kennis alle vier even aannemelijk.



Afb. 2: Schematisch overzicht van de vier KNMI'06-scenario's.

Tabel 1 geeft de veranderingen in neerslag en verdamping per seizoen per KNMI'06-scenario. In de winter stijgt de gemiddelde neerslaghoeveelheid voor alle klimaatscenario's; het meest voor het W+-scenario. In de zomer stijgt de gemiddelde neerslaghoeveelheid voor het W- en het G-scenario, terwijl dit volgens het W+- en het G+-scenario aanzienlijk daalt. Volgens alle scenario's neemt het aantal droge dagen in de zomer toe evenals de extreme neerslaghoeveelheid. Volgens het W-scenario is de toename van de dagsom van de neerslag die eens in de tien jaar wordt overschreden, rond 2050 zelfs 27 procent ten opzichte van 1990.

Tabel 1: Klimaatverandering in Nederland rond 2050 ten opzichte van het basisjaar 1990 volgens de vier KNMI'06-scenario's.

		2050			
		G	G+	W	W+
winter	gemiddelde neerslaghoeveelheid	+4%	+7%	+7%	+14%
	aantal natte dagen (≥0,1 mm)	0%	+1%	0%	+2%
	10-daagse neerslagsom die eens in de tien jaar wordt overschreden	+4%	+6%	+8%	+12%
zomer	gemiddelde neerslaghoeveelheid	+3%	-10%	+6%	-19%
	aantal natte dagen (≥0,1 mm)	-2%	-10%	-3%	-19%
	dagsom van de neerslag die eens in de tien jaar wordt overschreden	+13%	+5%	+27%	+10%
	potentiële verdamping	+3%	+8%	+7%	+15%

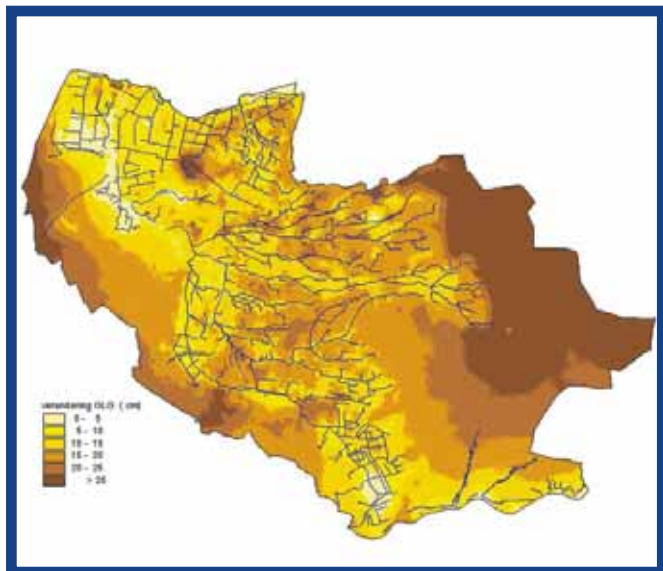
Tabel 2: Jaarlijkse neerslagoverschot en -tekort in de zomer (juni, juli en augustus) voor station De Bilt voor het huidige klimaat en de KNMI'06-scenario's. Gemiddelden voor de 14 hydrologische jaren in de periode 1986-2000.

	1990 huidig	2050 G	G+	W	W+
jaarlijks neerslagoverschot (mm)	283	295	241	309	201
neerslagtekort in de zomer (mm)	-32	-35	-70	-33	-111

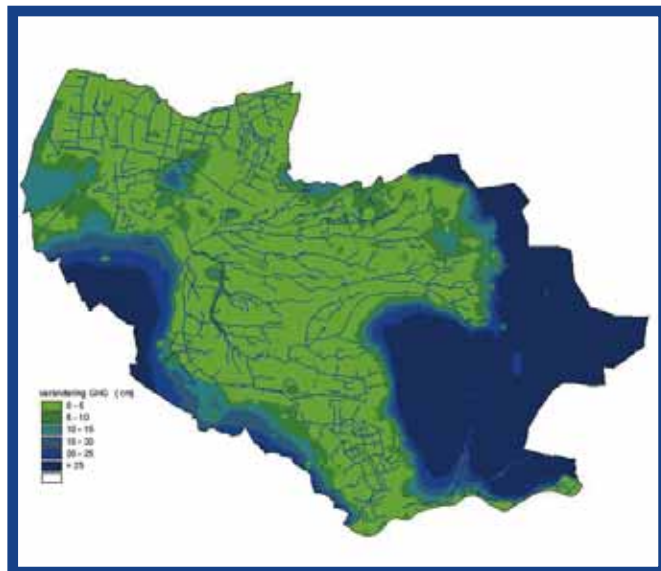
Het W+-scenario laat de grootste daling van grondwaterstanden zien. Afbeelding 3 geeft het verschil in gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) weer voor dit scenario, en het huidige klimaat. In het lagere deel van het beheergebied is het verschil maximaal 20 cm. Op de flanken van de Veluwe en de Utrechtse Heuvelrug kan het verschil oplopen tot meer dan 25 cm. Midden op de Veluwe en de Utrechtse Heuvelrug bedraagt het verschil respectievelijk 60 en 35 cm.

Afbeelding 4 geeft de afname van de

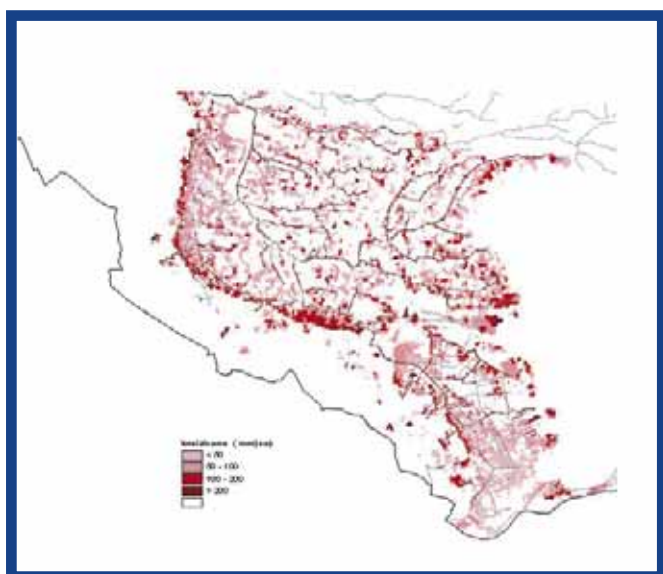
jaarlijkse kwel naar het freatisch pakket weer volgens het W+-scenario ten opzichte van de huidige situatie. De kwelafname op de overgang van de Utrechtse Heuvelrug naar de Centrale Vallei en naar het oppervlaktewater is het grootst (tot 200 mm per jaar). Op de Utrechtse Heuvelrug en de Veluwe neemt voor dit scenario de wegzijging met ongeveer 20 mm per jaar af ten opzichte van de huidige situatie. Dit is duidelijk minder dan de afname van het jaarlijkse neerslagoverschot (zie tabel 2). Meer neerslag in de winter, meer pieken en een actuele



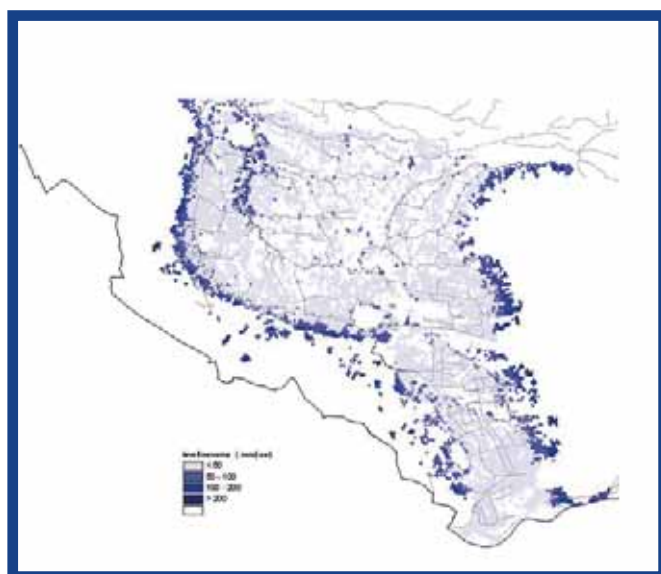
Afb. 3: Verandering van de GLG (cm) volgens het W+-scenario ten opzichte van het huidige klimaat (grondwaterstand volgens het W+-scenario is overal lager dan de huidige situatie).



Afb. 5: Verandering van de GHG (cm) volgens het W-scenario ten opzichte van het huidige klimaat (grondwaterstand volgens het W-scenario is overal hoger dan de huidige situatie).



Afb. 4: Kwelafname in kwelgebieden (mm/jaar) volgens het W+-scenario ten opzichte van het huidige klimaat.



Afb. 6: Kweltoename (mm/jaar) volgens het W-scenario ten opzichte van het huidige klimaat.

verdamping die verder achter blijft op de potentiële verdamping, veroorzaken dit.

Door een afname van het jaarlijkse neerslagoverschot in het W+-scenario dalen de grondwaterstanden onder de Utrechtse Heuvelrug en de Veluwe. Hierdoor neemt de grondwaterstroming naar de Vallei af en vermindert hier de kwel. In de zomer daalt de grondwaterstand in de Gelderse Vallei door een toename van het neerslagtekort en een vermindering van de kwelintensiteit. Beken zullen eerder droogvallen. De bodem gaat droger de winter in. Maar uiteindelijk wordt het grondwater aangevuld. De toegenomen neerslag en de verminderde kwel wordt afgevoerd door het oppervlaktewaterstelsel. De gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG) blijft nagenoeg gelijk aan de huidige situatie.

Volgens het W-scenario stijgen de grondwaterstanden het meest. Afbeelding 5

toont het verschil in GHG voor dit klimaatscenario en het huidige klimaat. Op de Veluwe kan dit verschil oplopen tot één meter. Op de overgang van de Veluwe en de Utrechtse Heuvelrug naar de Vallei is het verschil maximaal 10 tot 25 cm. In de Vallei blijft het verschil beperkt tot 5 tot 10 cm. Afbeelding 6 laat zien dat de gemiddelde jaarlijkse kwel in het Binnenveld en de Centrale Vallei toeneemt ten opzichte van de huidige situatie. Deze toename is met ongeveer 200 mm per jaar het grootst op de overgang van de stuwwallen naar de Vallei.

Door de toename van het neerslagoverschot in dit klimaatscenario stijgen de grondwaterstanden onder de Utrechtse Heuvelrug en de Veluwe. De kwelintensiteit in de Vallei neemt toe, met name op de overgang naar beide stuwwallen. Hier stijgen de grondwaterstanden het meest. De lichte toename van de kwel en een nagenoeg gelijkblijvend neerslagtekort in het centrale deel van de

Gelderse Vallei verandert nagenoeg niets aan de grondwaterstanden in de zomer. In de winter nemen de grondwaterstanden toe onder invloed van een stijging van het neerslagoverschot en kwel. Het effect op de GHG blijft beperkt door een goede ont- en afwatering.

### Van grondwaterregime naar functies

Het effect van een gewijzigd grondwaterregime op de landbouw en natuur zijn in de klimaatverkenning van Waterschap Vallei & Eem bepaald met behulp van het Water noodinstrumentarium. Bij nader inzien is dit echter niet geheel correct.

Droogteschade in de landbouw ontstaat wanneer de waterbeschikbaarheid in de wortelzone onvoldoende is en de gewasverdamping wordt gereduceerd. In Waterlood wordt de droogteschade bepaald met behulp van de HELP-2006-tabellen<sup>7)</sup>. De relatie tussen droogteschadeschade en combinaties van GLG en GHG



die in de HELP-tabellen gebruikt worden, is indirect en berekend met behulp van het onverzadigde zonemodel LAMOS (variant van MUST). Deze berekeningen zijn alleen uitgevoerd voor het huidige klimaat. Met een

toename van de potentiële verdamping en een veranderend neerslagpatroon volgens de klimaatscenario's zal de relatie tussen grondwaterregimes en landbouwschade wijzigen. Droogteschade kan ook met een

hydrologisch model bepaald worden als de 'procentuele verdampingsreductie' ten opzichte van de potentiële verdamping van het tweede en derde kwartaal. Een eerste analyse voor de Centrale Vallei laat zien dat de droogteschade voor het W+-scenario tot 20 procent toeneemt ten opzichte van de huidige situatie (zie afbeelding 7).

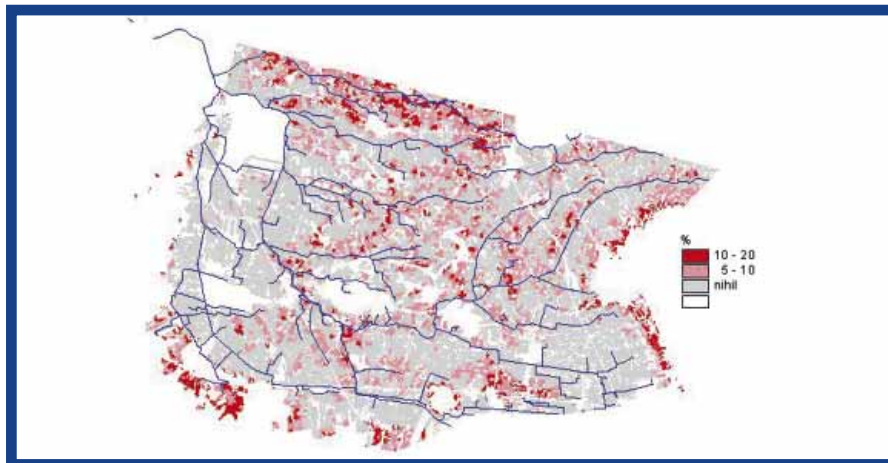
Structurele natschade in de landbouw is vooral gerelateerd aan de GHG. Deze vorm van landbouwschade vormt geen groot probleem volgens de KNMI'06-scenario's. De GHG neemt immers alleen substantieel toe op de stuwwallen die begroeid zijn met bos. Alleen landbouwgronden op de overgang van stuwwal naar de Gelderse Vallei zullen volgens twee van de vier klimaatscenario's extra natschade ondervinden. De incidentele natschade als gevolg van meer extreme neerslag kan wel substantieel toe gaan nemen, doordat bij hevige buien tijdens het groeiseizoen de grondwaterstand frequenter tot in het maaiveld stijgt of de bovengrond eerder kan verslempen waardoor zuurstofgebrek in de wortelzone kan optreden. Een kwantitatieve onderbouwing van dit proces is met de huidige hydrologische modellen echter niet mogelijk.

Met Waterlood kan ook de doelrealisatie voor natuur bepaald worden. Deze is afhankelijk van de GLG, de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG) en de kwel. Ook hier geldt echter dat de relatie tussen doelrealisatie en grondwaterstanden wijzigt met een ander klimaat. Bepaalde natuurdoelen zijn afhankelijk van de aanvoer van calcium(bi)carbonaat door kwelwater. Hierdoor wordt de verzuring in de wortelzone tegengegaan. Kwel is in de GGOR-studie van Waterschap Vallei & Eem voorsnog buiten beschouwing gelaten. De vermindering van de kwel naar het freatisch pakket volgens de +-scenario's is een extra reden om hiernaar nader onderzoek te verrichten. Hierbij moet wel aangetekend worden dat de kwel naar het freatisch pakket iets anders is dan de ecologisch relevante kwel die tot in de wortelzone moet reiken. Deze laatste zou in het W+-scenario zelfs nog kunnen toenemen. Door meer verdampingsvraag in de zomer kan mogelijk juist meer kwelwater via capillaire opstijging de wortelzone bereiken. Door Van Walsum is hier reeds op gewezen tijdens de NHV-lezingendag in 2007.

## Conclusies

In dit artikel hebben we laten zien dat het gebruik van een regionaal hydrologisch model een bijzonder nuttig en volgens ons noodzakelijk hulpmiddel is om inzicht te krijgen in de hydrologische gevolgen van klimaatverandering.

- Met name in gebieden met een interactie tussen traag en snel reagerende deelsystemen is het gebruik van een regionaal hydrologisch model noodzakelijk om de effecten van klimaatscenario's op de hydrologie inzichtelijk te maken;
- Het Waterloodinstrumentarium voor het bepalen van nat- en droogteschade in de landbouw en de doelrealisatie van



Afb. 7: Toename van de droogteschade (%) volgens het W+-scenario ten opzichte van het huidige klimaat (droogteschade is bepaald als de procentuele verdampingsreductie ten opzichte van de potentiële verdamping).

## Vergelijking met andere studies

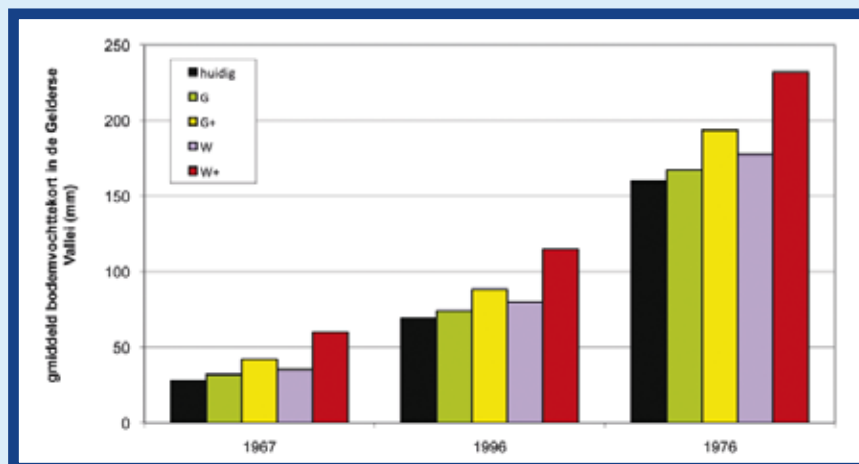
### Grondwaterstudie provincie Utrecht

Ten behoeve van het klimaatschetsboek van de provincie Utrecht is eveneens een hydrologische modellering uitgevoerd<sup>9</sup>. De grens van dit modelgebied ligt in de Gelderse Vallei. Daarom kunnen alleen resultaten met betrekking tot de Utrechtse Heuvelrug vergeleken worden. De grondwatereffecten komen kwalitatief gezien overeen, maar zijn duidelijk minder extreem dan de resultaten die wij hier presenteren. In de provinciale studie is geen rekening gehouden met een gewijzigde tijdsverdeling van de neerslag. Voor de toename van de referentieverdamping is een gemiddelde per seizoen genomen. Bovendien is slechts een periode van zes jaar doorgerekend. Omdat geen rekening is gehouden met een instelperiode, kan dit in een traag reagerend systeem als de Utrechtse Heuvelrug leiden tot een onderschatting van de hydrologische effecten.

### Droogtestudie

In 2005 is de Droogtestudie Nederland afgerond. Conclusie was dat de watertekorten de komende eeuw gaan toenemen, maar dat grootschalige maatregelen als gevolg van toekomstige droogtes voorsnog niet nodig zijn. Deze conclusies zijn gebaseerd op modelberekeningen voor karakteristieke droogtejaren en de WB'21-klimaatscenario's. Naar aanleiding van de KNMI'06-scenario's is de Droogtestudie Nederland weer opgestart. Uit een verkenning<sup>10</sup> met het oude Nationaal Hydrologisch Instrumentarium blijkt dat de watertekorten de komende eeuw volgens het G+- en het W+-scenario aanzienlijk forsere zullen uitvallen dan volgens de WB21-klimaatscenario's. Recente modelberekeningen uit de Droogtestudie Nederland kunnen dienen ter ondersteuning van regionale analyses. Afbeelding 8 geeft het gemiddelde bodemvochttekort voor karakteristieke droogtejaren volgens de KNMI'06-scenario's voor de Gelderse Vallei.

Afb. 8: Gemiddeld bodemvochttekort (mm) voor karakteristieke droogtejaren volgens de KNMI'06-scenario's voor de Gelderse Vallei.



grondwaterafhankelijke natuur is niet toepasbaar als het klimaat verandert, omdat de onderliggende metamodellen zijn afgeleid voor het huidige klimaat;

- Met betrekking tot kwel is het relevant onderscheid te maken tussen kwel naar het freatisch pakket en ecologisch relevante kwel;
- Met name voor traag reagerende grondwatersystemen is het van belang een lange periode door te rekenen en/of beginvoorwaarden aan te passen.

## Aanbevelingen

- In het NBW Actueel wordt per opgave aangegeven welke klimaatscenario's beschouwd moet worden. Daar voorsnog elk scenario even waarschijnlijk is, is het wenselijk per opgave meer klimaatscenario's te evalueren om zo een beter inzicht te krijgen in mogelijkheden en risico's;
- Deze modelstudie gaat uit van het huidige landgebruik en de huidige natuurdoeltypen. Mogelijkheden voor andere gewassen en andere natuurdoelen kunnen ook bekeken worden;
- In deze studie is alleen uitgegaan van het temperatuur-effect van een warmer klimaat. In een vervolgonderzoek kan ook het kooldioxide-effect meegenomen worden;

- In deze verkennende klimaatstudie is met name gekeken naar effecten op grondwater en kwel. De modeluitkomsten kunnen nader geanalyseerd worden op oppervlaktewaterafvoer;
- In deze verkenning is gekeken naar langjarige effecten. Een nadere analyse van droge zomers en natte perioden is gewenst. Daar de intensiteit van buien toeneemt, is meer informatie nodig over neerslag gedurende korte tijdsintervallen. Gebruik van de regenradar kan hierbij nuttig zijn;
- Het is van belang dat waterschappen bij hun gebiedsplannen rekening houden met een veranderend klimaat. Vaak wordt een model gebruikt om maatregelen te evalueren. Standaard zouden ook de klimaatscenario's geevalueerd moeten worden. Daarbij dient zowel aandacht te zijn voor wateroverlast als voor watertekort.

## NOTEN

- 1) Alterra, DHV, KNMI en Vrije Universiteit Amsterdam (2008). Klimateffectschetsboek Gelderland, Drenthe en Groningen, Noord-Brabant, Utrecht, Zuid-Holland en Noord-Holland.
- 2) Hermans E., P. Droogers en W. Immerzeel (2008). Verkennende klimaatstudie Waterschap Vallei & Eem. FutureWater. Rapport 77

- 3) Van Walsum P., A. Veldhuizen, P. van Bakel, F. van der Bolt, P. Dik, P. Groenendijk, E. Querner en M. Smit (2005). SIMGRO 5.0.1; theory and model implementation. Alterra. Rapport 913.1.
- 4) De Graaff B., A. Veldhuizen, T. Botterhuis en D. Klopstra (2005, 2006 en 2007). Watersysteemanalyse Barneveldse Beek, Centrale Vallei, Binnenveld en Eemland en Arkeheem. HKV / Alterra.
- 5) Witteveen+Bos (2008). GGOR-analyse Waterschap Vallei & Eem. Concept.
- 6) Lenderink G. (2006). KNMI'06-scenario's, interpolation to monthly changes. KNMI.
- 7) Van Bakel P., B. van der Waal, M. de Haan, J. Spruyt en A. Evers (2007). HELP-2006. Uitbreiding en actualisering van de HELP-2005-tabellen ten behoeve van het Waternood-instrumentarium. STOWA. Rapport 2007-13.
- 8) Hurk B. et al (2006). Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands. KNMI Scientific Report WR 2006-01.
- 9) Tauw (2007). Effecten klimaatverandering op het grondwatersysteem provincie Utrecht.
- 10) Rijkswaterstaat/RIZA (2007). Investeringsruimte voor toekomstige droogte, verkenning van de hydrologische effecten en economische schade in de KNMI'06-klimaatscenario's.