



Ecohydrologische effecten van klimaatverandering op de vegetatie van Nederland

KWR 2009.032
April 2009

KWR

Watercycle Research Institute

Deltares
Enabling Delta Life 

Ecohydrologische effecten van klimaatverandering op de vegetatie van Nederland

KWR 2009.032
April 2009

© 2009 KWR

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Colofon

Titel

Ecohydrologische effecten van klimaatverandering op de vegetatie van Nederland

Projectnummer

A308046

Projectmanager

H. van Oene

Opdrachtgevers

Deltares & Planbureau voor de Leefomgeving

Kwaliteitsborger

H. van Oene

Auteurs

J.P.M. Witte, J. Runhaar & R. van Ek¹

Dit rapport is niet openbaar en slechts verstrekt aan de opdrachtgevers van het Contractonderzoekproject. Eventuele verspreiding daarbuiten vindt alleen plaats door de opdrachtgevers zelf.

Foto omslag: J. Runhaar

¹ Deltares, Unit BGS, Utrecht

Voorwoord

Het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) en Deltares hebben KWR Watercycle Research Institute opdracht gegeven via een korte en verkennende studie te onderzoeken wat de mogelijke effecten van klimaatverandering zijn op geplande natuurdoelen in Nederland. De studie richt zich op de vegetatie die via wijzigingen in de waterhuishouding door klimaatverandering kan worden beïnvloed. Doel van het onderzoek is niet alleen de mogelijke ecohydrologische effecten van klimaatverandering te schetsen, maar ook om leemten in kennis te signaleren.

Het onderzoek werd begeleid door een stuurgroep bestaande uit de volgende personen:

- Marjolijn Haasnoot (Deltares)
- Remco van Ek (Deltares, contactpersoon)
- Arjen van Hinsberg (PBL)
- Dirk-Jan van der Hoek (PBL, contactpersoon)
- Marijke Vonk (PBL)

Het onderzoek heeft uiteindelijk geresulteerd in een voorlopige schetskaart waarop de potentiële gevolgen van klimaatverandering voor natuurdoelen zijn aangegeven. Voor diegenen die alleen in deze kaart zijn geïnteresseerd, verwijzen we hier naar Hoofdstuk 3, dat separaat kan worden gelezen.

Flip Witte, Han Runhaar & Remco van Ek,
Nieuwegein, April 2009

Samenvatting

Methode

Klimaatverandering zal via de waterhuishouding doorwerken op de natuur van Nederland. In deze studie is verkend wat de gevolgen kunnen zijn voor binnendijkse natuurdoelen bij de klimaatscenario's W en W+. Qua neerslagoverschot zijn dit respectievelijk het natste en het droogste van de vier door het KNMI in 2006 gepresenteerde scenario's. Beide scenario's hebben gemeen dat de winters natter worden en dat de verschillen tussen de jaren toenemen. Onder scenario W+ wordt de zomer veel droger, terwijl de droogte onder scenario W iets gaat toenemen. De studie richt zich op de vegetatiekundige component van die natuurdoelen die via wijzigingen in de waterhuishouding door klimaatverandering kan worden beïnvloed, vandaar dat de titel van dit rapport luidt: "*Ecohydrologische effecten van klimaatverandering op de vegetatie van Nederland*".

Het onderzoek bestond uit twee delen. In het eerste deel werd een kaart van natuurdoeltypen vergeleken met de uitkomsten van hydrologische modellen (het PAWN-instrumentarium), beide beschikbaar voor heel Nederland in een ruimtelijke resolutie van 25×25 m. Zo kon ieder natuurdoeltype worden gerelateerd aan hydrologische grootheden als de grondwaterstand, het vochttekort, en het percentage systeemvreemd water. Vervolgens werd voor ieder type onderzocht welke verschuivingen er in deze grootheden optreden wanneer het klimaat verandert.

In het tweede deel werden de uitkomsten uit het eerste deel gecombineerd met literatuurgegevens en proceskennis om een beeld te schetsen van de mogelijke effecten van klimaatverandering op de natuur in Nederland. Die schets bestaat uit een voorlopige kaart (Figuur 3-1) met een begeleidende tekst, gepresenteerd in het zelfstandig leesbare Hoofdstuk 3. Het doel van deze kaart is niet alleen om de door ons voorziene verschuivingen in de natuur van Nederland grafisch weer te geven, maar ook om discussie uit te lokken waarmee onze kennis over de ecohydrologische effecten van klimaatverandering kan worden vergroot.

Effecten van klimaatverandering op de vegetatie van Nederland

Klimaatverandering zal vooral gevolgen hebben voor vegetaties die voor hun watervoorziening geheel zijn aangewezen op de atmosfeer. Grondwateronafhankelijke vegetaties op hogere zandgronden – zoals stuwwallen, duinen en hogere dekzandruggen – zullen te maken krijgen met een groter vochttekort in het groeiseizoen. Onder scenario W+ is de toename aanzienlijk, wat zal leiden tot een opener vegetatie en een toename van het aandeel vroege bloeiers en soorten die in zomerslaap gaan. Verschillende boomsoorten zullen de grotere droogte niet overleven. In beide scenario's zal het aantal wintergroene soorten in bossen toenemen en zal er sprake zijn van een verhoogd risico op bosbranden.

Er zijn ook natte ecosystemen die alleen, of vrijwel alleen, door regenwater worden gevoed. Door de toegenomen vochtdynamiek en temperatuur zullen karakteristieke vegetaties van hoogvenen, vennen en natte heiden het moeilijker krijgen. De ontwikkeling van levend hoogveen in Nederland is onder scenario W+ waarschijnlijk kritiek.

De kwel naar lage gebieden als beekdalen, duinvalleien en de randen van grote infiltratiegebieden zal toenemen onder het relatief natte scenario W. Dat gebeurt mogelijk ook onder het droge scenario W+. Dat komt doordat de bodem in hoger gelegen infiltratiegebieden in dit scenario 's zomers zo ver uitdroogt, dat de werkelijke verdamping door de vegetatie sterk wordt gereduceerd en, dientengevolge, de jaarlijkse grondwateraanvulling stijgt. De kweltoename is gunstig voor de biodiversiteit van sprengen, beken, natte duinvalleien en door kwelwater gevoede schraallanden, zoals die voorkomen in het laagveenmoeras net aan de westelijke voet van de Utrechtse heuvelrug. Daar staat bij scenario W+ een ongunstige verandering tegenover, namelijk dat als de kweltoename onvoldoende is, de grondwaterstand in de loop van de drogere zomer dieper kan wegzakken (onder scenario W verandert de laagste grondwaterstand nauwelijks). Voor een dergelijk kweltoename moet het infiltratiegebied

voldoende groot zijn. De toename van kwel onder W+ is echter hoogst onzeker omdat de toekomstige verdampingseigenschappen van de vegetatie in het voedende infiltratiegebied nu nog niet bekend zijn.

Benedenlopen van beken krijgen vaker te maken met overstromingen, wat bij de huidige kwaliteit van het beekwater waarschijnlijk niet gunstig is voor de beoogde vegetaties.

De waterkwaliteit van sloten en meren zal vermoedelijk achteruitgaan doordat in de zomer de watertemperatuur stijgt, de peilen dalen en de verzilting en de invloed van sulfaatrijk water uit de grote rivieren toenemen. Laagveenmoerassen, zoals de Nieuwkoopse plassen en de Weerribben, waaruit veel water wegzijgt naar een diep ontwaterde omgeving, zullen zonder aanvullende maatregelen (denk aan een ander peilbeheer) in de zomer meer oppervlaktewater moeten aanvoeren. Door de slechtere kwaliteit van dit oppervlaktewater, moet voor een achteruitgang van de biodiversiteit worden gevreesd. Dat geldt ook voor de biodiversiteit van het veenweidegebied, niet alleen wegens de grotere invloed van kwalitatief slecht oppervlaktewater, maar ook doordat een lagere grondwaterstand en een hogere temperatuur in de zomer zullen leiden tot een versnelde afbraak van het veen.

Onzekerheden en benodigd onderzoek

Een juiste analyse van de ecohydrologische gevolgen van klimaatverandering, valt of staat met een op maat gesneden modellering van de waterhuishouding. Dit betekent dat de resolutie en de nauwkeurigheid van het hydrologisch model moeten aansluiten bij de habitateisen van de te bestuderen natuurdoeltypen. Het in deze studie gebruikte PAWN-instrumentarium sluit onvoldoende op deze eisen aan; het in ontwikkeling zijnde Nationaal Hydrologisch Instrumentarium (NHI) zal dat ongetwijfeld beter doen. Wel dienen hydrologische modellen nog rekening te houden met enkele structurele aanpassingen van de vegetatie aan het klimaat: (1) de *water use efficiency* van planten stijgt met een toenemend CO₂-gehalte, (2) de interceptiepost verandert onder invloed van een andere temporele neerslagverdeling, en (3) het aandeel kale grond en het aandeel weinig verdampende niet wortelende planten (mossen en korstmossen) in de vegetatie van hogere zandgronden stijgt in drogere zomers. Zolang deze aanpassingen niet worden gekwantificeerd, zijn hydrologische modellen niet geschikt voor het simuleren van een extreem (maar waarschijnlijk) scenario als W+. Ten slotte is het voor een juiste voorspelling van ecologische effecten nodig dat de grondwaterkwaliteit, onder andere in kwelgebieden met neerslaglenzen, goed wordt gemodelleerd.

Naast verbetering van de hydrologische modellering, dienen ecologische relaties, zoals opgenomen in modellen, klimaatbestendig te worden gemaakt. De huidige ecohydrologische modellen zijn onbruikbaar in een nieuw klimaat omdat ze gebaseerd zijn op zeer indirecte verbanden, ontleend aan het klimaat van de twintigste eeuw. We hebben daarom op fysiologisch processen gebaseerde relaties nodig, waarin de invloed van het klimaat is verwerkt. Een voorbeeld is het vervangen van de grondwaterstand, als voorspellende variabele voor de vegetatie, door grootheden die direct op de vegetatie inwerken: de beschikbaarheid in het wortelmilieu van zuurstof om te respireren en van water om te transpireren. Bovendien weten we nog weinig over de effecten van extremen op de vegetatie, terwijl ecologen de grote betekenis van extremen benadrukken en die extremen naar verwachting zullen gaan toenemen, bijvoorbeeld in de vorm van zeer droge zomers. Omdat we voorspellingen willen doen voor de langere termijn (2050 of 2100, bijvoorbeeld), is het ten slotte noodzakelijk dat we rekening houden met de successie van het systeem van bodem, water en vegetatie in een veranderend klimaat.

Voor een gedetailleerd overzicht van aanbevelingen wordt hier verder verwezen naar Hoofdstuk 4.

Adaptieve maatregelen

In welke richting het klimaat gaat veranderen is nog zeer onzeker. Bovendien, zo blijkt uit deze studie, is het voorspellen van de hydrologische en ecologische gevolgen van klimaatverandering met minstens zo grote onzekerheden omgeven. Uit deze studie mogen dus beslist geen conclusies worden getrokken die vergaande consequenties kunnen hebben, zoals het opgeven van bepaalde natuurdoelen omdat die toch niet meer haalbaar zouden zijn. Wel kan alvast op de mogelijke negatieve gevolgen van klimaatverandering worden geanticipeerd met het nemen van een aantal maatregelen. Verdroging van natte heiden en vennen kan onder andere worden bestreden door het omzetten van veel verdampend donker naaldbos in loofbos, grasland of hei, en door het afdammen van greppels, voor zover die nog aanwezig zijn. Externe maatregelen zijn bijvoorbeeld het aanleggen van hydrologische bufferzones, het

opzetten van peilen in landbouwgebieden, een beregeningsverbod in droge tijden en het verplaatsen of sluiten van grondwaterwinningen. Vergroten van de oppervlakte van aaneengesloten natuurterrein maakt het eenvoudiger een hoog grond- en oppervlaktewaterpeil ten opzichte van de omgeving te handhaven. Bovendien biedt oppervlaktevergroting soorten de mogelijkheid te migreren naar locaties die in de toekomst gunstige groeiomstandigheden bieden. In peilbeheerste gebieden, zoals laagvenen, kan een flexibeler peilbeheer aanzienlijk helpen om de aanvoer van oppervlaktewater van een slechte kwaliteit zo lang mogelijk buiten de deur te houden. De inlaatbehoefte van laagvenen kan voorts worden verminderd door de wegzijging te reduceren via een aantal externe maatregelen: het onder water zetten van aangrenzende diepe polders, het verplaatsen van grondwaterwinningen en het bevorderen van de grondwateraanvulling in infiltratiegebieden, zoals de Utrechtse heuvelrug.

Al deze maatregelen zijn gericht op de bestrijding van de verdroging, en als zodanig niet nieuw. Ze zijn van groot belang als scenario W+ bewaarheid wordt, en mogelijk van belang onder scenario W, dat op jaarbasis weliswaar natter is dan het huidige klimaat, maar dat een iets drogere zomer kent en, net als scenario W+, meer meteorologische variatie tussen de jaren. Klimaatverandering zou al met al een stimulans moeten zijn het anti-verdrogingbeleid met grotere voortvarendheid uit te voeren.

Inhoud

1	Inleiding	9
2	Kwantificering van hydrologische effecten per natuurdoeltype	11
2.1	Methode	11
2.1.1	Inleiding	11
2.1.2	Hydrologische berekeningen	11
2.1.3	Veranderingen per natuurdoeltype	14
2.2	Resultaten	16
2.2.1	Inleiding	16
2.2.2	Gemiddelde Voorjaarsgrondwaterstand <i>GVG</i>	16
2.2.3	Vochttekort <i>TK</i>	20
2.2.4	Gemiddeld laagste grondwaterstand <i>GLG</i>	24
2.2.5	Kwelflux <i>Kwel</i>	24
2.2.6	Percentage systeemvreemd water <i>PSV_{juli}</i>	26
2.3	Discussie	29
2.3.1	Inleiding	29
2.3.2	Beperkingen van deze studie	29
2.3.3	Vergelijking met andere studies	30
3	Voorlopige schetskaart voor 2050	33
3.1	Veranderingen in de waterhuishouding van Nederland	33
3.2	De effecten voor ecosysteemtypen in een voorlopige schetskaart	33
3.2.1	Grondwateronafhankelijke systemen	34
3.2.2	Door regenwater gevoede natte systemen	37
3.2.3	Door kwel en oppervlaktewater gevoede terrestrische systemen	38
3.2.4	Oppervlaktewateren	40
4	Conclusies en aanbevelingen	45
5	Literatuur	49
I	Gevoeligheid natuurdoeltypen voor hydrologische grootheden	53
II	Statistische analyse van gelokaliseerde vegetatieopnamen	63

1 Inleiding

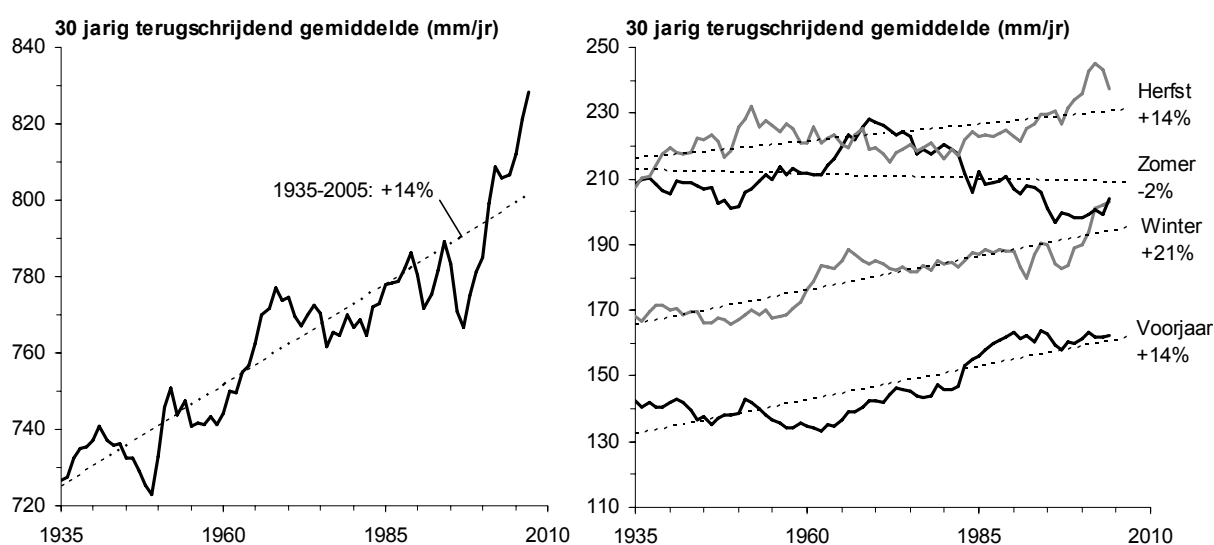
Door toename van de concentratie broeikasgassen in de atmosfeer zal, zo is de algemene opvatting onder wetenschappers, het klimaat op aarde veranderen. De verandering is nu al aantoonbaar, bijvoorbeeld aan de hand van gemeten neerslaggegevens (Figuur 1-1).

Voor Nederland publiceerde het KNMI vier klimaatscenario's die betrekking hebben op de jaren 2050 en 2100 (Van den Hurk et al., 2006; Tabel 1-1). Deze scenario's verschillen in de mate van verandering, maar hebben gemeen dat de temperatuur en de potentiële verdamping stijgen en dat de hoeveelheid neerslag in de winter toeneemt. De voorspelde veranderingen kunnen grote gevolgen hebben voor de maatschappij en nopen tot aanpassingen in het landgebruik en het waterbeheer.

Wat klimaatverandering voor de natuur betekent, is nog verre van duidelijk. Op een globaal schaalniveau zal klimaatverandering leiden tot verschuivingen in de arealen van soorten: soorten van een warmer klimaat zullen toenemen terwijl soorten van een kouder klimaat, op de langere termijn, zullen verdwijnen uit Nederland. Voor de hogere planten in Nederland zijn zulke gevolgen van klimaatverandering onderzocht door Tamis (2005), terwijl 't Lam (2007) de gevolgen van temperatuurstijging heeft beschreven voor hogere planten, dagvlinders en libellen in de Nederlandse duinen. Deze veranderingen hebben te maken met de directe invloed van temperatuur op het functioneren van organismen, bijvoorbeeld via de bestendigheid van planten tegen vorst en hitte, of via het uitlopen van bloemknoppen na het bereiken van een bepaalde temperatuursom (Noest et al., 1995; Walther et al., 2002).

Het is echter aannemelijk dat de grootste effecten van klimaatverandering op de biodiversiteit optreden via wijzigingen in de waterhuishouding (Bazzaz et al., 1996; Van Oene & Berendse, 2001). De hoeveelheid water die beschikbaar is voor transpiratie verandert en dit beïnvloedt de hoeveelheid regen die doorzijpelt naar het grondwater, en daarmee de kwel naar beekdalen en duinvalleien. Deze veranderingen beïnvloeden op hun beurt de nutriëntenkringloop en de zuurgraad in de wortelzone.

Het is de vraag of natuurdoelen die via Europese wetgeving een verplichtend karakter hebben, nog wel kunnen worden gehaald in het klimaat van de toekomst (Vogel- en Habitatrichtlijn, Kaderrichtlijn Water). Mogelijk kunnen bedreigingen worden opgevangen en kansen voor natuurontwikkeling benut, indien tijdig, via beleid en beheer, op klimaatverandering wordt ingespeeld. Te denken valt aan het aanleggen van hydrologische bufferzones tegen verdroging, het verplaatsen van waterwinningen, het



Figuur 1-1. Terugschrijdend 30-jarig gemiddelde neerslag, berekend uit gegevens van de 12 hoofdstations van het KNMI; Links per jaar, rechts per seizoen. Een gemiddelde over 30 jaar is genomen, omdat het klimaat is gedefinieerd als de weersgesteldheid over een periode van 30 jaar. Gegevens KNMI, Analyse KWR.

bergen van water in natte perioden, of het uitbreiden van het areaal natuur ter verhoging van de dispersiekansen van soorten. Om te kunnen bepalen waar welke mitigerende maatregelen zinvol zijn, is echter eerst inzicht nodig in de ecohydrologische effecten van klimaatverandering.

Het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) en Deltares hebben daarom KWR Watercycle Research Institute opdracht gegeven via een korte en verkennende studie te onderzoeken wat de mogelijke effecten van klimaatverandering zijn op geplande natuurdoelen in Nederland. De studie richt zich op de vegetatiekundige component van die natuurdoelen die via wijzigingen in de waterhuishouding door klimaatverandering kan worden beïnvloed, vandaar dat de titel van dit rapport luidt: "Ecohydrologische effecten van klimaatverandering op de vegetatie van Nederland".

In de studie hebben we ons beperkt tot het analyseren van het zichtjaar 2050 en twee van de vier KNMI-scenario's (Van den Hurk et al., 2006), namelijk scenario's W en W+. Beide scenario's zijn gebaseerd op een mondiale temperatuurstijging van 2 °C, wat thans door het KNMI waarschijnlijker wordt geacht dan de 1 °C stijging waar de G-scenario's van uitgaan (mond. med. J. Bezembinder). Qua potentieel neerslagoverschot (neerslag minus referentiegewasverdamping) zijn W en W+ respectievelijk het natste en het droogste van de vier scenario's (Tabel 1-1). Ter illustratie toont Tabel 1-2 wat klimaatverandering voor de Amsterdamse Waterleidingduinen zou betekenen: de winters worden natter, maar de zomers droger, onder W+ zelfs twee keer zo droog. In andere delen van Nederland is de trend niet veel anders (zie bijvoorbeeld Hermans et al., 2009, voor weerstation De Bilt).

In eerste instantie zullen de effecten van de twee scenario's op een kwantitatieve wijze worden afgeleid. De daarvoor te gebruiken methode en resultaten worden besproken in Hoofdstuk 2. In Hoofdstuk 3 gebruiken we de resultaten, samen met literatuur en proceskennis, om voor een aantal ecosysteemtypen te beschrijven wat waarschijnlijk de effecten van klimaatverandering zullen zijn. Voor enkele (nagenoeg) vegetatieloze ecosystemen, zoals sprengbeken, zullen we ook, zij het zeer summier, de effecten op de fauna schatten. De beschrijving is tevens weergegevens in een voorlopige landelijke schetskaart van klimaat-effecten. Voor diegenen die alleen in de schetskaart geïnteresseerd zijn verwijzen we naar Hoofdstuk 3, dat zo is geschreven dat het los van de voorgaande hoofdstukken kan worden gelezen. Het rapport eindigt met een discussie (Hoofdstuk 4) waarin de belangrijkste bevindingen worden bediscussieerd en aanbevelingen worden gedaan voor nader onderzoek.

Tabel 1-1. Gevolgen, uitgedrukt als percentage ten opzichte van de huidige waarde, van de vier klimaatscenario's (2050) voor neerslag en potentiële verdamping in Nederland, uitgesplitst naar drie zomermaanden (juni, juli en augustus) en drie wintermaanden (december, januari, februari) (Van den Hurk et al., 2006, p. 59).

		Verandering (%) bij scenario:			
		G	W	G+	W+
Zomer (JJA)					
	neerslag	+2.8	+5.5	-9.5	-19
	potentiële verdamping	+3.4	+6.8	+7.6	+15.2
Winter (DJF)					
	neerslag	+3.6	+7.3	+7.0	+14.2

Tabel 1-2. Verandering in het potentieel neerslagoverschot (in de zomer negatief) van de AWD, als percentage van het huidige overschot. Gebaseerd op tijdreeksen van 1960 t/m 2006 (Witte et al., 2008).

	Verandering (%) bij scenario			
	G	W	G+	W+
Zomer (JJA)	-5	-11	-49	-99
Winter (DJF)	4	8	8	16
Jaar	4	8	-21	-42

2 Kwantificering van hydrologische effecten per natuurdoeltype

2.1 Methode

2.1.1 Inleiding

Voor de berekening van de ecohydrologische effecten van klimaatverandering is gebruik gemaakt van de modeluitkomsten van het landelijke hydrologische modelinstrumentarium uit de PAWN-studie. Met dit instrumentarium zijn door Deltares landsdekkende kaarten geproduceerd (resolutie: 500×500 m, en door Alterra neergeschaald naar 25 ×25 m) van hydrologische grootheden – zoals van de gemiddeld laagste grondwaterstand – voor zowel het huidige als voor het toekomstige klimaat (Figuur 2-1). De volgende paragraaf beschrijft het instrumentarium en de daarmee uitgevoerde berekeningen.

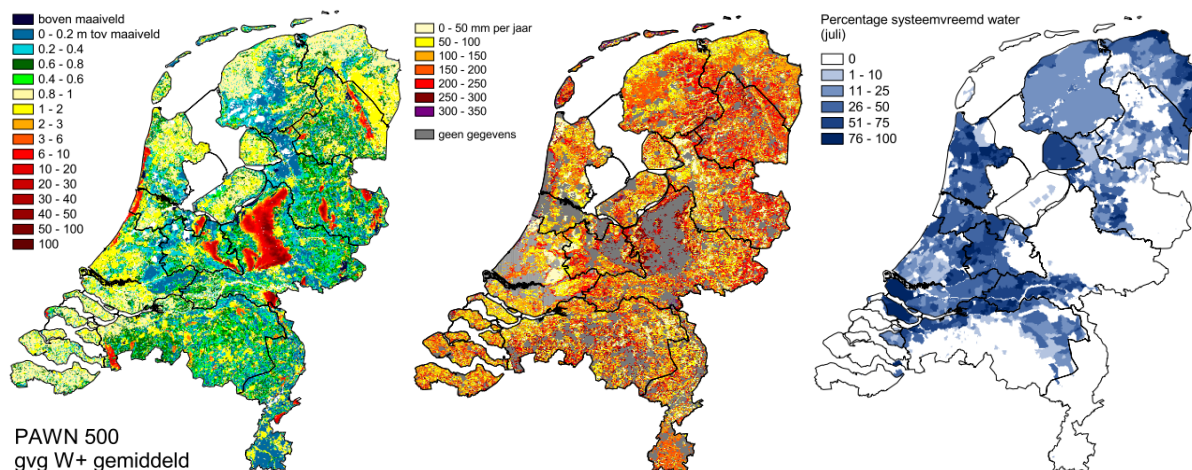
De hydrologische uitkomsten zijn vergeleken met het voorkomen van de vegetatie in Nederland. Daarvoor is door PBL een overlay gemaakt van een landelijke kaart van natuurdoelen – volgens de typologie van het Handboek Natuurdoeltypen (Bal et al., 2001; Figuur 2-2) – met de kaarten van de hydrologische uitkomsten (§ 2.1.3). Zo kon ieder natuurdoeltype worden gerelateerd aan hydrologische grootheden als de grondwaterstand, het vochttekort, en het percentage systeemvreemd water. Vervolgens werd voor ieder type onderzocht welke verschuivingen er in deze grootheden optreden wanneer het klimaat verandert.

Er is ook nog een poging gewaagd de hydrologische uitkomsten te koppelen aan goed gelokaliseerde vegetatieopnamen uit het landelijke vegetatiebestand Synbiosys. Deze analyse is gestopt wegens gebrek aan voldoende goed geclassificeerde opnamen. Geïnteresseerden worden hier verwezen naar Bijlage II.

2.1.2 Hydrologische berekeningen

Het PAWN-instrumentarium

Bij de scenarioanalyse is gerekend met een keten van hydrologische modellen (Vermulst et al., 1998): NAGROM voor het diepe grondwater, MOZART voor de onverzadigde zone en de koppeling met het oppervlaktewater, de verdeling van oppervlaktewater binnen het hoofdwatersysteem met het DM. De koppeling tussen NAGROM en MOZART vindt plaats met de module MONA, dat de consistentie in de invoer tussen de twee hydrologische modellen waarborgt. De modelberekeningen hebben een ruimtelijke resolutie van 500×500 m en een temporele resolutie van 10 dagen.



Figuur 2-1. Voorbeelden van PAWN uitvoer: gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand GVG, vochttekort en inlaat systeemvreemd water. Bron: Deltares.



Figuur 2-2. Natuurdoeltypenkaart volgens Bal et al. (2001).

Droogtejaren en scenario's

Omdat het PAWN-instrumentarium veel rekentijd nodig heeft (doorrekenen van een jaar vergt ongeveer 30 uur), is bij de berekeningen door Deltares (Van Beek et al., 2008) gekozen voor het doorrekenen van twee zogenaamde 'droogtejaren' conform de eerste droogtestudie (Rijkswaterstaat/Riza, 2005). Een droogtejaar is een historisch jaar dat karakteristiek is voor een bepaalde droogtegraad (Tabel 2-1). Het jaar 1967 is meteorologisch gezien een gemiddeld, en het jaar 1949 een droog jaar (Beersma et al., 2005). De meteorologische condities van deze twee jaren zijn gebruikt om hydrologische grootheden te bepalen voor een gemiddeld jaar en een voor droog jaar. Ten behoeve van een dergelijke berekening is wel gebruik gemaakt van een 'inloopjaar' (meteorologische gegevens in 1966 in geval van een gemiddeld jaar, en 1948 voor een droog jaar) teneinde een stabiele berekening te bereiken.

Naast droogtejaren is er sprake van klimaatscenario's (W, W+). De meteorologische gegevens van de droogtejaren zijn door Deltares met software van het KNMI getransformeerd naar het verwachte klimaat in 2050 en vervolgens ingevoerd in het PAWN-instrumentarium. In deze studie is gebruik gemaakt van modeluitkomsten voor het huidige klimaat (H) en voor de KNMI-scenario's W en W+ (Van den Hurk et al., 2006). Zoals vermeld in Hoofdstuk 1, vertegenwoordigen W en W+ qua neerslagoverschot (neerslag minus referentiegewasverdamping) respectievelijk het natste en het droogste van de vier door het KNMI gepubliceerde scenario's.

Tabel 2-1. Karakteristieke jaren en hun maximale neerslagtekort in het groeiseizoen (gesommeerde referentiegewasverdamming minus neerslag van 1 april t/m 30 september) (Beersma et al., 2005).

Soort jaar	Maximaal neerslagtekort (mm)	Herhalingstijd* (jaar)	Overschrijdingskans* (1/jaar)
Gemiddeld (1967)	151	2.5	0.400
Droog (1949)	226	11.7	0.083

* Een herhalingstijd van 2.5 jaar wil zeggen dat eens in de 2.5 jaar een jaar voorkomt met een even groot of groter tekort (de overschrijdingskans op zo'n jaar is de reciproque van de herhalingstijd).

Hydrologische uitvoer

De door Deltares met PAWN berekende hydrologische grootheden zijn:

<i>GHG</i>	gemiddeld hoogste grondwaterstand (cm - m.v.)
<i>GLG</i>	gemiddeld laagste grondwaterstand (cm - m.v.)
<i>GVG</i>	gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (cm - m.v.)
<i>Kwel</i>	Kwelflux (mm/d)
<i>PSV_{jaar}</i>	Percentage systeemvreemd water, gemiddeld per jaar (%)
<i>PSV_{juli}</i>	Percentage systeemvreemd water, gemiddeld in de maand juli (%)
<i>ZV</i>	Zoutvracht (kg [Cl ⁻] ha ⁻¹ jr ⁻¹)
<i>TK</i>	Vochttekort (mm/jaar)

Belangrijke indicatoren voor het grondwatersysteem zijn de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (*GVG*), de gemiddelde laagste grondwaterstand (*GLG*) en de gemiddelde hoogste grondwaterstand (*GHG*), bepaald op een langjarige reeks. De *GHG* is officieel gedefinieerd als het gemiddelde van de jaarlijks drie hoogste waterstanden over een reeks van ten minste acht jaar; voor de *GLG* worden de drie laagste standen in een jaar genomen. Om pragmatische redenen (rekentijd, geheugenopslag) kon de berekening van *GHG*, *GLG* en *GVG* echter niet op deze wijze plaatsvinden. Om een indicatie te krijgen van deze karakteristieken, zijn daarom de vijf hoogste, respectievelijk vijf laagste waarden van het doorgerkende jaar (1947 of 1967) genomen. De *GVG* is berekend als het gemiddelde van de grondwaterstanden in de maand maart (decade 7, 8 en 9).

De *GLG* geeft een indicatie voor droogte in de zomerperiode. Een andere indicatie is het bodemvochttekort zelf. Dit is het jaarlijkse verschil tussen de potentiële verdamping en de werkelijke verdamping. De potentiële verdamping is wat de vegetatie verdampt bij aanwezigheid van voldoende bodemvocht; wanneer er onvoldoende bodemvocht aanwezig is reduceert de vegetatie zijn transpiratie en zodoende wordt de werkelijke verdamping lager dan de potentiële. Het vochttekort is berekend met MOZART.

De ruimtelijke resolutie van MOZART is 500×500 m. Met behulp van het Actueel Hoogtebestand Nederland zijn de grondwaterstandskarakteristieken en de kwelflux door Alterra voor deze studie neergeschaald naar een resolutie van 25×25 m (Hoogland, 2009).

Kanttekeningen

Voor de latere interpretatie van de resultaten, in § 2.2, is het nodig twee kanttekeningen te maken bij de hydrologische berekeningen.

De eerste betreft de berekeningen voor een droog jaar. Voor de bepaling van de effecten van een droog jaar zijn de meteorologische gegevens van 1948 (inloopjaar) en 1949 (droogjaar) als referentie gekozen. Op deze wijze worden echter de effecten van een droog jaar onvolledig weergegeven. De reactie van de grondwaterspiegel op het weer, en daarmee ook op droogte kan zeer traag zijn. Dit hangt op de eerste

plaats af van de afstand tussen de drainagesystemen: de reactietijd is omgekeerd evenredig met het kwadraat van deze afstand. Dit verklaart de uiterst trage reactie van het grondwater onder de Veluwe op het weer: de afstand tussen de 'drainagesystemen' Gelderse vallei en IJsseldal bedraagt immers ongeveer 25 km. Daarnaast is het doorlaatvermogen van het doorstroomde pakket van groot belang. Voor het berekenen van de effecten van een droog jaar op het grondwatersysteem zijn dus langjarige berekeningen noodzakelijk. In de droogtestudie is altijd gerekend met twee jaren, omdat anders de rekentijd veel te lang werd. Dit betekent echter dat de effecten in traag reagerende gebieden niet goed zijn gekarakteriseerd. We zullen daarom bij de resultaten minder aandacht aan het droge jaar besteden.

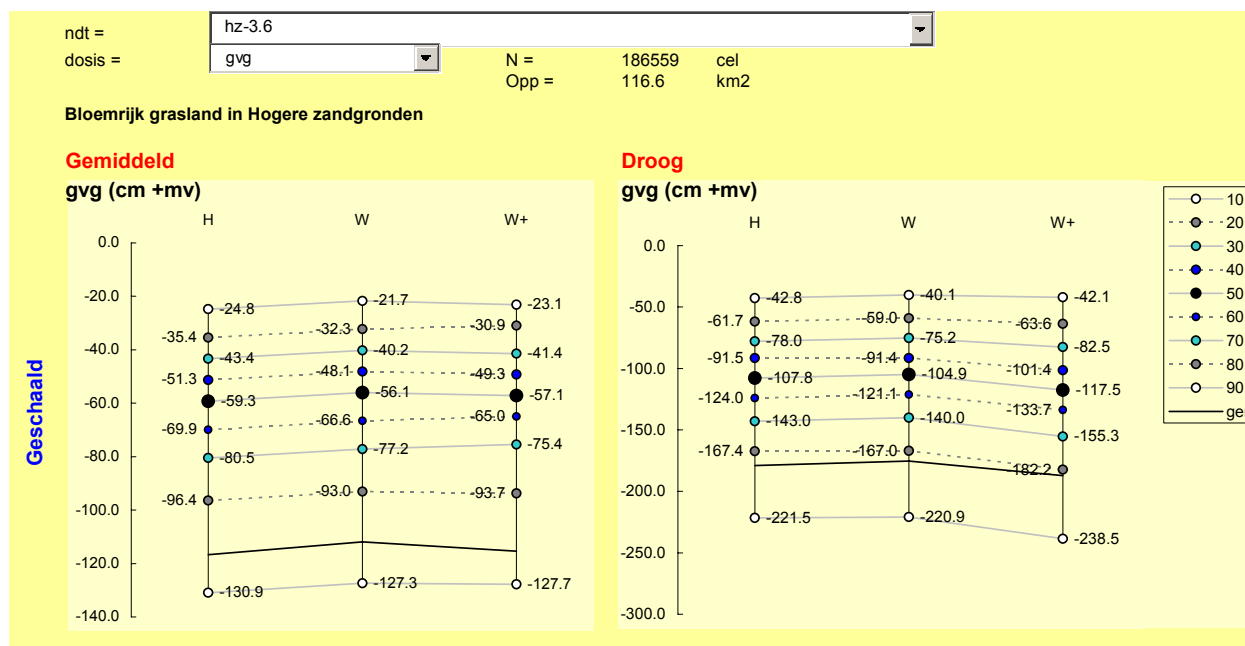
Een tweede kanttekening is dat voor een aantal gebieden met een diepe grondwaterstand, zoals delen van de Veluwe en de duinen, geen vochttekorten *TK* met MOZART zijn berekend. Dit betekent dat de effecten van een veranderd vochttekort bij grondwateronafhankelijke natuurdoeltypen zijn bepaald op slechts een gedeelte van hun areaal. Deze gebieden zijn, samen met de stedelijke gebieden, grijs gearceerd in het tweede plaatje van Figuur 2-1. De grondwateraanvulling van het droge jaar 1949 is hier bovendien rechtsreeks gebruikt als invoer voor NAGROM, zonder rekening te houden met de naijling en afvlakking van het overschot in diepe onverzadigde zones.

2.1.3 Veranderingen per natuurdoeltype

De uitkomsten van het PAWN-instrumentarium zijn vergeleken met een landsdekkende kaart van natuurdoeltypen, aangeleverd door PBL in een resolutie van 25×25 m. Alleen die rastercellen zijn geanalyseerd waar een natuurdoeltype nu al aanwezig is; cellen waar een type is gepland zijn dus buiten beschouwing gelaten. De kaart is afgeleid van de landelijke natuurdoelenkaart (LNV, 2003) en achterliggende provinciale natuurdoeltypenkaarten. De landelijke natuurdoelenkaart geeft een vrij globaal beeld van het ruimtelijk patroon van verschillende natuurdoeltypen (grotweg 27 typen) zoals die worden nagestreefd in natuurbeleid. Voor het verkrijgen van een zo nauwkeurig mogelijk ruimtelijk patroon zijn de natuurdoeltypen daarom nader gelokaliseerd op basis van huidige begroeiing, bodem en waterhuishouding (Lammers et al., 2005; Reijnen et al., 2007).

De verspreiding van ieder natuurdoeltype is vergeleken met de kaart van iedere hydrologische grootheid. Dit is gedaan voor zowel het huidige klimaat (H) als scenario W en W+, voor een gemiddeld en voor een droog jaar, en voor zowel ongeschaalde gegevens als voor gegevens die zijn geschaald naar cellen van 25×25 m. In het totaal gaat het om 7410 combinaties met evenzoveel verdelingen. Voor drie natte en ombrotrafente natuurdoeltypen van de hogere zandgronden zijn rastercellen met een GVG dieper dan drie meter beneden maaiveld buiten beschouwing gelaten (hz-3.4 *Ven*, hz-3.10 *Vochtige heide en levend hoogveen*, hz-3.16 *Bosgemeenschappen van hoogveen*). We veronderstellen dat het bij zulke diepe berekende grondwaterstanden om voorkomens op een schijngrondwaterspiegel gaat: een grondwaterlichaam op een zeer slecht doorlatende klei- of verkitten humuslaag, waaronder zich eerst een onverzadigde zone bevindt en daaronder pas de echte grondwaterspiegel, die met het hydrologisch model is berekend.

Ieder natuurdoeltype komt voor in bepaalde rastercellen waarvan tevens hydrologische grootheden bekend zijn. Dat betekent dus dat van ieder type frequentieverdelingen van die grootheden gemaakt kunnen worden. Dat is gedaan en de resultaten daarvan zijn verwerkt in een toegankelijk Excel-bestand (NDTstatistiek.xls). Via twee 'scroll-down' menu's, een voor het natuurdoeltype en een voor de dosis, zijn de frequentieverdelingen op te vragen. Ter illustratie toont Figuur 2-3 de geschaalde verdelingen van de dosis GVG voor het natuurdoeltype *Bloemrijk grasland* (hogere zandgronden). Links een gemiddeld jaar, rechts een droog jaar. Deze combinatie is berekend voor 186 559 cellen van 25×25 m, ofwel voor 116.6 km². De verdelingen zijn gegeven in de vorm van percentielen, lopend van 10% in stappen van 10% naar 90%. Tevens zijn de gemiddelde waarden (zwarte doorgetrokken lijnen) in de figuur opgenomen. Van de figuur kan bijvoorbeeld worden afgelezen dat in de huidige situatie en in een gemiddeld jaar, 90% van de cellen een GVG heeft, ondieper dan 130.9 cm -m.v., en 50% van 59.3 cm beneden maaiveld. Deze laatste waarde is de zogenaamde mediaan, weergegeven met extra grote zwarte stippen (de mediaan is de middelste waarde van een frequentieverdeling). De verdelingen voor W en W+ geven uiteraard niet de toekomstige situatie voor het natuurdoeltype weer, maar alleen de situatie voor de locaties waar het type zich thans bevindt. Of het zich kan handhaven op deze locaties hangt af van de grootte van de veranderingen en de gevoeligheid van het type daarvoor.



Figuur 2-3. Voorbeeld van twee frequentieverdelingen, opgevraagd uit het bestand 'NDTstatistiek.xls'.

Om ook een ruimtelijk beeld te kunnen geven van potentiële effecten, is de verandering van de hydrologische grootheid gedeeld door de gevoeligheid G van het betreffende natuurdoeltype voor die grootheid. Dit leidt tot een relatieve verandering R :

$$R = (S - H) / G \quad [2.1]$$

Waarin S en H staan voor de waarde van een grootheid in respectievelijk het scenario en de huidige situatie. Stijgt bijvoorbeeld de GVG met 25 cm, en is de gevoeligheid 50 cm, dan geldt $R = 0.5$. Ook in deze analyse zijn schijnspiegelsystemen eruit gefilterd. Voor GVG en vochttekort TK is de gevoeligheid uitgedrukt als de bandbreedte waarbij het natuurdoeltype volgens Waterlood kan voorkomen. Voor de factoren $Kwel$, GLG en PSV_{juli} is een tweedeling aangehouden tussen wel en niet gevoelig (Tabel 2-2). Gevoeligheden zijn alleen vastgesteld voor natuurdoeltypen waar de betreffende grootheid invloed op kan hebben. De gevoeligheid voor grondwaterstanden zijn dus niet aangegeven in grondwateronafhankelijke systemen. Gevoeligheid voor GLG is alleen aangegeven voor die natuurdoeltypen waar de laagste grondwaterstanden anders dan via de vochtleverantie van invloed is op de vegetatie. In Bijlage I staat beschreven hoe de gevoeligheden van natuurdoeltypen voor deze hydrologische grootheden zijn afgeleid van het beoordelingsinstrument Waterlood.

Tabel 2-2. Voor natuurdoeltypen relevante hydrologische grootheden en de wijze waarop deze zijn weergegeven.

Grootheid	Ecologische relevantie	Weergave gevoeligheid G	Weergave op kaarten
GVG	Bepalend voor zuurstofvoorziening aan begin groeiseizoen	Bandbreedte waarbij type optimaal kan voorkomen	Relatief (-)
TK	Bepalend voor vochtleverantie planten		Relatief (-)
$Kwel$	Bepalend voor zuurbuffering		Absoluut (mm/d)
GLG	Kritische factor in veenvormende systemen	Tweedeling wel en niet gevoelig	Absoluut (cm)
PSV_{juli}	Bepalend voor oppervlaktewaterkwaliteit		Absoluut (%)

Voor de grootheden *GHG*, het gemiddelde percentage systeemvreemd water in een jaar PSV_{jaar} en de jaarlijkse zoutvrucht *ZV* zijn geen gevoeligheden vastgesteld: de *GHG* is minder relevant voor de vegetatie en bovendien sterk gecorreleerd aan de *GVG*, PSV_{juli} is veel maatgevender voor de vegetatie dan PSV_{jaar} en ten slotte zou de voorspelling van *ZV* gebaseerd moeten zijn op een lange simulatie van oprukkend zout grondwater, wat niet is gebeurd.

2.2 Resultaten

2.2.1 Inleiding

In Tabel 2-3 t/m Tabel 2-7 zijn voor de verschillende hydrologische grootheden de veranderingen ten opzichte van de huidige situatie aangegeven voor die natuurdoeltypen die gevoelig zijn voor de betreffende grootheden. In een tabel kunnen enkele weinig oppervlak innemende typen zijn weggevallen doordat er geen hydrologische uitkomsten voor waren (bijvoorbeeld *zk-3.7 veenheide* in Tabel 2-3). In de kolommen staat achtereenvolgens:

- De oppervlakte van het natuurdoeltype waarover betreffende grootheid is berekend
- Voor *GVG* en *TK*: de mediaan volgens Waterlood (Bijlage I)
- De mediaan van de grootheid voor het huidige klimaat (H)
- Voor *GVG* en *TK*: de gevoeligheid *G* van het natuurdoeltype (afleiding *G* in Bijlage I)
- De verandering van de grootheid in scenario *W* en *W+* ten opzichte van het huidige klimaat (H)
- De verandering van de grootheid als gevolg van een droog jaar in de scenario's *H*, *W* en *W+*

Daarnaast zijn ook kaarten gemaakt waarop per klimaatscenario en per hydrologische grootheid voor heel Nederland is aangegeven wat de grootte van de veranderingen is in daarvoor gevoelige natuurdoeltypen. Voor *Kwel*, *GLG* en PSV_{juli} zijn op de kaarten de absolute veranderingen ten opzichte van het huidige klimaat aangegeven, voor *GVG* en *TK* de relatieve verandering op basis van de gevoeligheid *G* van het natuurdoeltype (volgens [2.1]). De kaarten zijn alleen gemaakt een gemiddeld jaar. Er zijn drie redenen waarom van het droge jaar geen kaarten zijn gemaakt en waarom de resultaten van dit jaar minder gewicht krijgen bij de beoordeling van effecten. De eerste is dat vraagtekens gezet kunnen worden bij hydrologische uitkomsten voor het droge jaar (zie kantttekeningen bij § 2.1.2). De tweede is dat de grondwaterstandskarakteristieken *GHG*, *GLG* en *GVG* per definitie betrekking hebben op een gemiddelde situatie, en dus niet op een droog jaar. Ten slotte zijn alle gekwantificeerde relaties tussen hydrologische grootheden en de vegetatie (zoals die in Waterlood) gebaseerd op gemiddelden.

In de volgende paragrafen wordt iedere grootheid besproken aan de hand van de tabellen en kaarten.

2.2.2 Gemiddelde Voorjaarsgrondwaterstand *GVG*

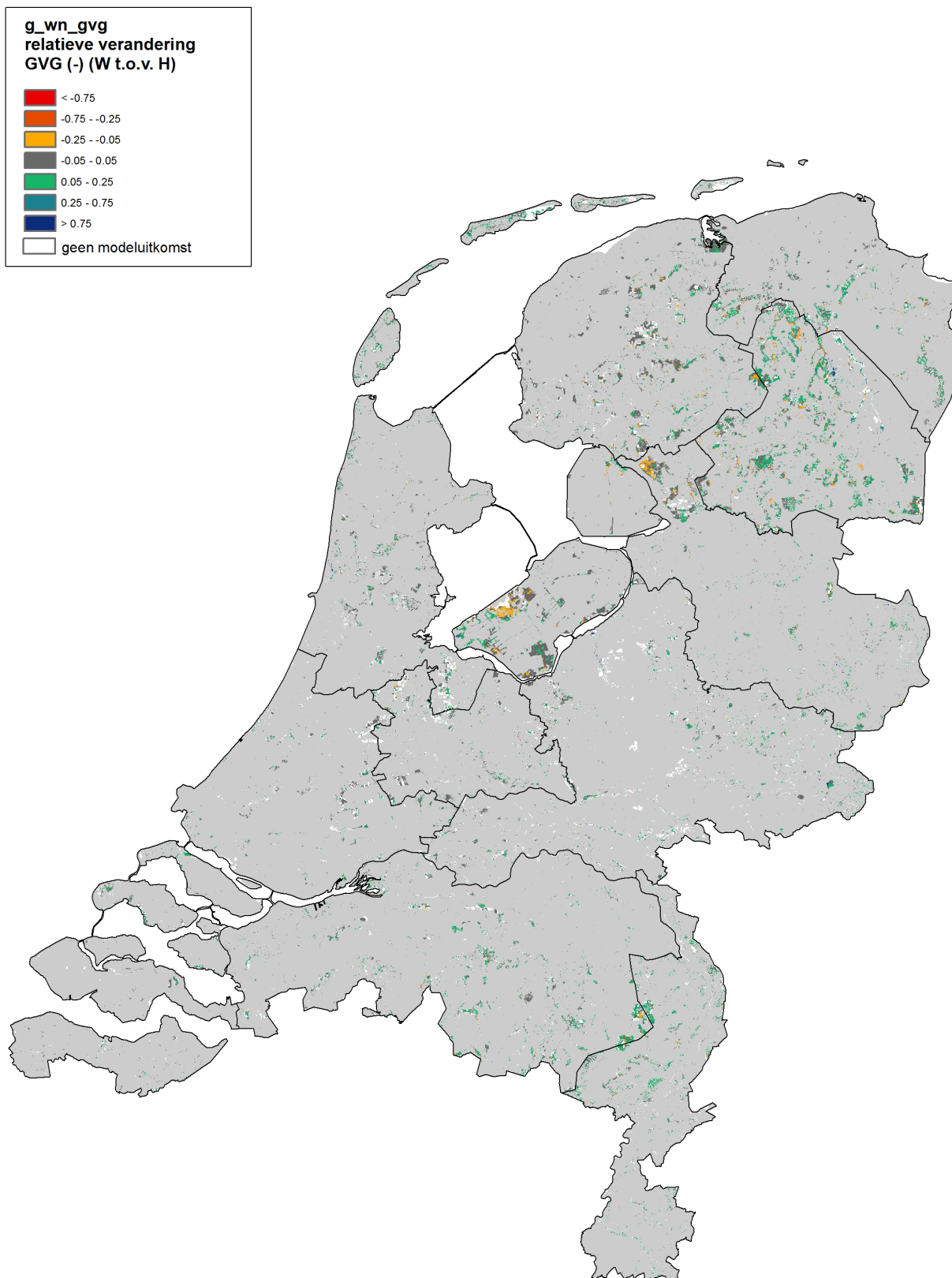
In vergelijking met de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstanden op basis van Waterlood worden binnen de grondwaterafhankelijke natuurdoeltypen de standen met het PAWN-instrumentarium gemiddeld bijna een halve meter lager geschat (Tabel 2-3). De afwijkingen zijn het kleinst in peilbeheerste gebieden (*lv-3.3*) en het grootst in infiltratiegebieden (*hz-3.10* en *du-3.9*). Figuur 2-4 en Figuur 2-5 geven in kaartbeeld de relatieve veranderingen in *GVG* (volgens [2.1]).

De veranderingen in *GVG* in de scenario's *W* en *W+* ten opzichte van *H* zijn gering; de grondwaterstand stijgt in een gemiddeld jaar met enkele centimeters, waarbij de stijging van de grondwaterstand het grootst is in scenario *W* (gemiddeld over alle natuurdoeltypen 4 centimeter). Uitzonderingen vormen *du-3.4* en *du-3.9* (duinmeer en natte duinvallei), waar in scenario *W+* de voorjaarsgrondwaterstand juist daalt. Dit is mogelijk het gevolg van de traagheid van het duingrondwatersysteem, waardoor effecten van droge zomers nauwelijks op de grondwaterstand. Door zeespiegelstijging mag echter juist een extra verhoging van de *GVG* worden verwacht en in een zeer gedetailleerde hydrologische simulatie van de Amsterdamse Waterleidingduinen werd die ook gevonden (Kamps et al., 2008; Witte et al., 2008).

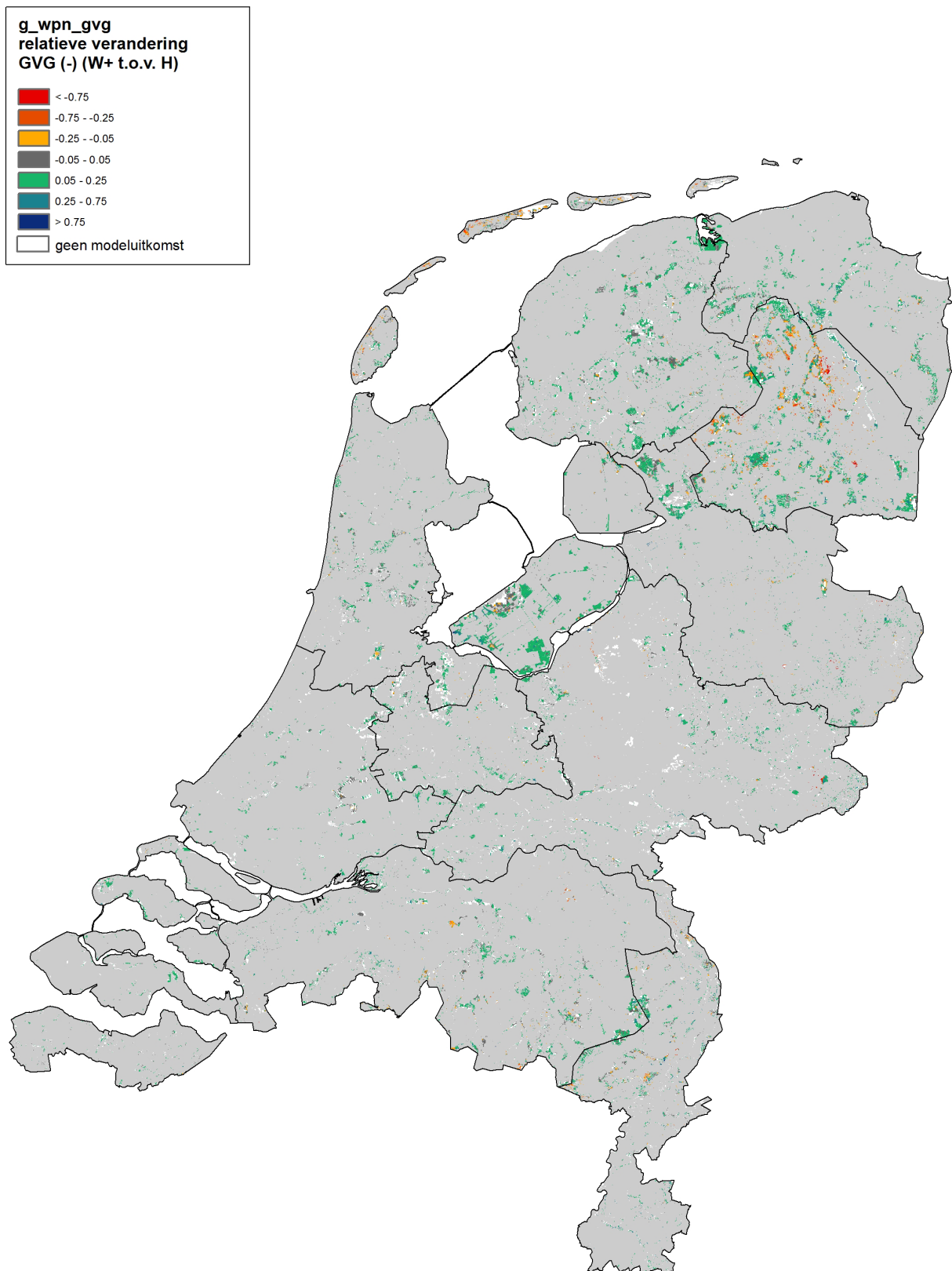
In een droog jaar is de voorjaarsgrondwaterstand in zowel het huidige klimaat als in scenario *W* 4.5 dm lager dan in een gemiddeld jaar. In scenario *W+* is de verlaging als gevolg van een droog jaar gemiddeld 6 dm; een extra daling van 1.5 dm derhalve.

Tabel 2-3. Overzicht van veranderingen in GVG binnen grondwaterafhankelijke natuurdoeltypen ten opzichte van de huidige GVG in een gemiddeld jaar (GVG_H). Waarden zijn medianen, berekend met het PAWN-instrumentarium. Ter vergelijking zijn de van Waterlood afgeleide gevoeligheid G en mediaan toegevoegd.

Code	Omschrijving	Oppervlak (km ²)	uit Waterlood		GVG _H (cm -mv)	uit PAWN				
			G (cm)	mediaan (cm -mv)		Verandering t.o.v. GVG _H (cm)				
						gemiddeld jaar		droog jaar		
					W	W+	H	W	W+	
az-3.2	Open begroeiing van vochtige gronden	10.2	45	15	57	7	10	-33	-28	-40
az-3.3	Zoute en brakke ruigte en grasland	6.5	50	20	40	1	5	-64	-68	-85
az-3.4	Rietland en ruigte	19.7	50	20	37	1	6	-38	-36	-53
du-3.2	Duinmeer	0.1	100	-28	93	5	7	-10	-11	-15
du-3.4	Duinrietland en -ruigte	3.4	30	-17	48	7	-10	-106	-103	-109
du-3.5	Nat schraalgrasland	9.7	50	16	65	3	2	-78	-79	-90
du-3.9	Natte tot vochtige voedselarme duinvallei	19.3	50	2	68	8	-7	-111	-109	-115
hl-3.2	Zoetwatergemeenschap	0.1	100	<0	72	1	2	-82	-79	-98
hl-3.3	Rietland en ruigte	0.7	50	1	58	4	8	-102	-97	-124
hl-3.7	Vochtig schraalgrasland	2.4	50	24	51	7	12	-175	-167	-214
hl-3.11	Bosgemeenschappen van bron en beek	3.6	35	-2	50	4	9	-165	-159	-204
hz-3.2	Zoetwatergemeenschap	2.8	100	<0	43	2	4	-28	-25	-31
hz-3.3	Rietland en ruigte	32.0	50	1	50	4	6	-38	-36	-47
hz-3.4	Ven	47.1	100	-33	62	3	3	-53	-53	-65
hz-3.7	Vochtig schraalgrasland	125.8	50	14	46	4	4	-38	-36	-44
hz-3.10	Vochtige heide en levend hoogveen	172.0	50	15	74	2	2	-72	-72	-85
hz-3.15	Bosgemeenschappen van bron en beek	98.9	35	-2	56	3	5	-46	-44	-58
hz-3.16	Bosgemeenschappen van hoogveen	74.5	35	1	49	3	5	-45	-42	-57
lv-3.1	Zoetwatergemeenschap	3.5	150	<0	43	1	4	-19	-14	-25
lv-3.2	Brakwatergemeenschap	0.0	150	<0	46	1	2	-18	-15	-12
lv-3.3	Rietland en ruigte	69.7	30	15	28	1	4	-13	-12	-26
lv-3.4	Nat schraalgrasland	101.5	50	18	30	1	3	-15	-11	-17
lv-3.6	Veenheide	10.9	15	7	18	0	3	4	-1	-20
lv-3.7	Struweel	5.3	40	10	26	0	4	-6	-11	-24
lv-3.8	Hakhout en griend	5.7	35	-2	42	2	4	-23	-19	-32
lv-3.9	Bosgemeenschappen van voedselrijk (laag)veen	35.3	35	-2	24	1	4	-2	-1	-13
lv-3.10	Bosgemeenschappen van voedselarm (hoog)veen	6.1	25	9	24	0	3	-13	-15	-51
ri-3.2	Plas en geïsoleerde strang	1.0	150	<0	69	2	6	-31	-30	-37
ri-3.3	Rietland en ruigte	17.2	50	1	53	2	6	-42	-41	-53
ri-3.4	Nat schraalgrasland	37.3	50	21	45	2	5	-37	-36	-50
ri-3.8	Hakhout en griend	7.9	35	-2	35	1	5	-20	-18	-47
zk-3.1	Zoetwatergemeenschap	4.1	150	<0	62	1	3	-21	-20	-26
zk-3.2	Brakwatergemeenschap	0.1	150	<0	58	2	3	-21	-21	-23
zk-3.3	Zoute en brakke ruigte en grasland	13.8	50	11	60	2	4	-17	-15	-21
zk-3.4	Rietland en ruigte	43.4	50	1	59	-1	2	-44	-50	-61
zk-3.5	Nat schraalgrasland	42.1	50	21	46	1	4	-29	-26	-35
zk-3.9	Hakhout en griend	105.5	35	-1	61	1	5	-65	-67	-85
zk-3.11	Bosgemeenschappen van veen-op-klei	8.5	35	-5	42	2	4	-37	-33	-41
Gemiddeld			62	5	50	2	4	-46	-45	-59



Figuur 2-4. Relatieve verandering (volgens [2.1]) in GVG bij scenario W (gemiddeld jaar).



Figuur 2-5. Relatieve verandering (volgens [2.1]) in GVG bij scenario W+ (gemiddeld jaar).

2.2.3 Vochttekort TK

De klimaatscenario's leiden in alle doeltypen tot een toename van de vochttekorten die vooral in scenario W+ groot zijn ten opzichte van de opgegeven bandbreedte G waarbij het type volgens Waterlood optimaal voorkomt (toename van gemiddelde van 16 mm/jr in H naar 33 mm/jr in W+). In het klimaatscenario W+ neemt het vochttekort in een droog jaar sterk toe. Waar het vochttekort in H in een droog jaar gemiddeld met 59 mm/jr toeneemt, is dat verschil in scenario W+ maar liefst 124 mm/jr. Figuur 2-6 geeft in kaartbeeld de relatieve toename van het vochttekort weer onder scenario W.

Dat de variatie in het weer tussen de jaren toe neemt blijkt uit het verschil in het vochttekort, gemiddeld over alle natuurdoeltypen, tussen een droog en een gemiddeld jaar. Dat bedraagt voor de scenario's H, W en W+ achtereenvolgens 59, 68 en 81 mm.

In vergelijking met het vochttekort in Waterlood wordt het huidige tekort, TK_H , per natuurdoeltype volgens het model lager gesimuleerd (gemiddeld 16 mm per natuurdoeltype versus 33 mm in Waterlood) (Tabel 2-4). Opvallend is dat er nauwelijks enige relatie is tussen verwachte (Waterlood) en gesimuleerde (PAWN) waarden per natuurdoeltype; de gemeenschappelijke variantie is niet meer dan 5% ($R = 0.23$, $p = 0.05$). Mogelijk wordt dit slechte verband mede veroorzaakt door het feit dat van gebieden met diepe grondwaterstanden, zoals delen van de Veluwe, geen vochttekorten zijn aangeleverd voor deze studie (zie kanttekeningen bij § 2.1.2): de berekeningen zijn voor droogteminnende typen dus op een gedeelte van het werkelijke areaal gebaseerd.

Voor een deel kan het verschil ook worden verklaard uit een andere definitie van het vochttekort. In Waterlood wordt uitgegaan van het potentiële vochttekort onder een standaard grasland, omdat hier het doel was de standplaats te karakteriseren. Bij de hydrologische modellering is het werkelijke vochttekort berekend, uitgaande van de aanwezige vegetatie met per vegetatietype een karakteristieke worteldiepte, gewasfactor en interceptiecapaciteit.

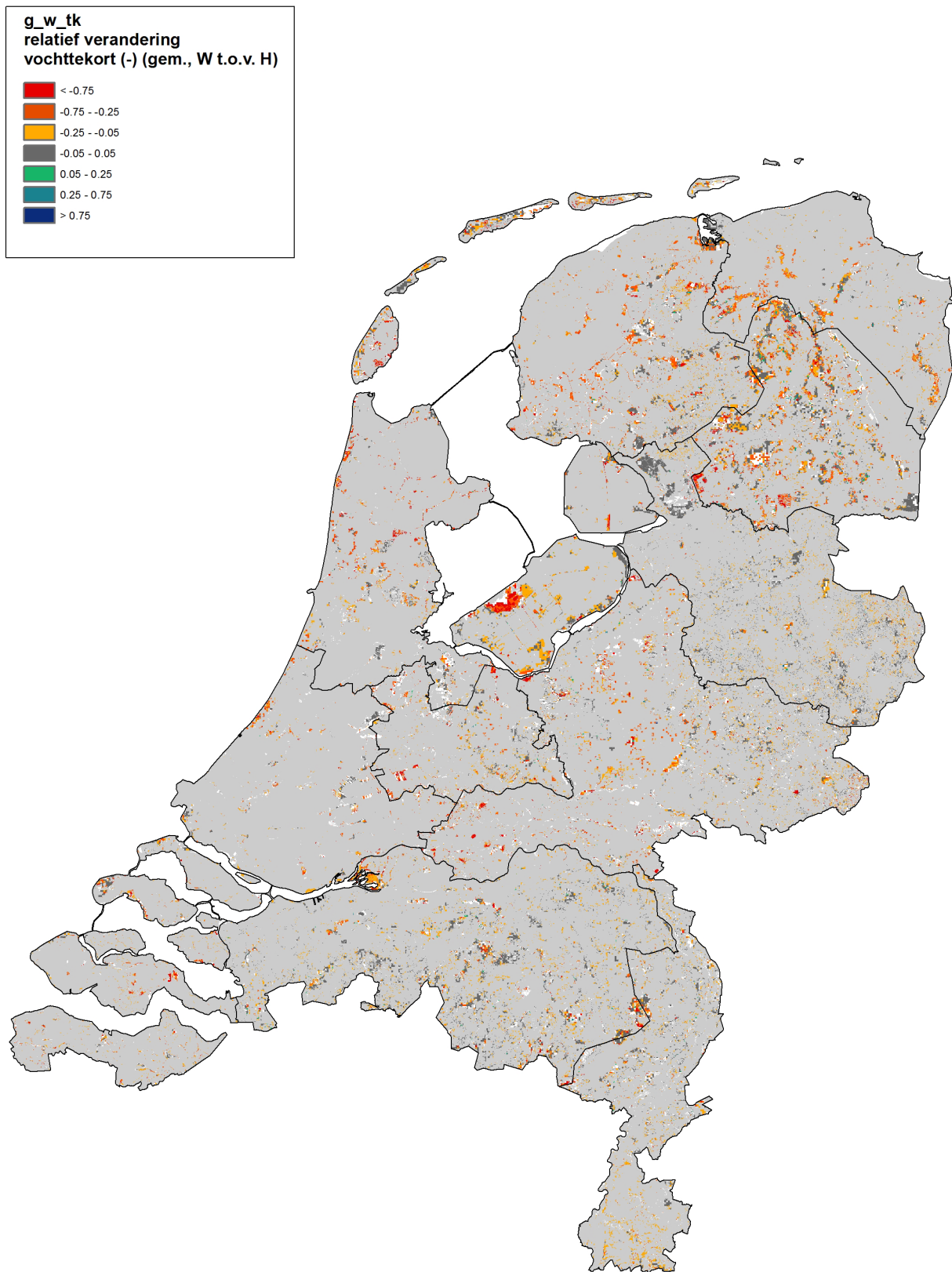
Hiermee kunnen de verschillen echter niet volledig worden verklaard:

- Bij sommige natuurdoeltypen met kleine oppervlakten, zijn de uitkomsten niet realistisch. Zo hebben ri-3.11 *middenbos* en hl-3.11 *bosgemeenschap van bron en beek* een hoger vochttekort TK_H dan de droge bossen op de hogere zandgronden en de duinen, en *open begroeiingen van droge gronden* in afgesloten zearmen (az-3.1) geen vochttekort, maar *open zand* in dekzandgebieden en stuwwallen (hz-3.8) wel een vochttekort, dat zelfs hoger is dan in de *droge heide* (hz-3.9) met zijn gesloten vegetatie die meer verdampt. De oorzaak ligt waarschijnlijk in een discrepantie tussen de schematisering van de vegetatie voor het hydrologisch model (gebeurd op basis van LGN), en die voor natuurdoeltypen. Bij grotere oppervlakten wordt deze discrepantie weggemiddeld, maar bij kleine oppervlakten kan hij in sommige gevallen zichtbaar worden in de resultaten.
- In *duinvalleien* (du-3.8) wordt bij een mediane GVG van 7 dm beneden maaiveld een TK_H van 46 mm/jr berekend, waarbij volgens Waterlood alleen zeer droogteresistente soorten nog kunnen voorkomen. Waarschijnlijk ligt de oorzaak in de grote maaiveldvariatie in de duinen waardoor bij de 'overlay' van natuurdoeltypen met de grondwaterstand veel locaties een zeer diepe stand zijn toebedeeld.
- Bij grondwaterafhankelijke natuurdoeltypen worden de vochttekorten waarschijnlijk systematisch overschat omdat daarvoor te lage grondwaterstanden zijn berekend.

Tabel 2-4. Overzicht van veranderingen in TK ten opzichte van het huidige TK in een gemiddeld jaar (TK_H). Waarden zijn medianen, berekend met het PAWN-instrumentarium. Ter vergelijking zijn de van Waterlood afgeleide gevoeligheid G en mediaan toegevoegd.

Code	Omschrijving	Oppervlak (km ²)	uit Waterlood		uit PAWN					
			G (mm/jr)	mediaan (mm/jr)	TK_H (mm/jr)	Verandering t.o.v. TK_H (mm/jr)			droog jaar	
						gemiddeld jaar	W	W+	H	W
az-3.1	Open begroeiing van droge gronden	0.3	60	82	0	0	0	36	56	152
az-3.2	Open begroeiing van vochtige gronden	9.0	15	10	0	1	23	37	48	94
az-3.3	Zoute en brakke ruigte en grasland	5.5	15	4	0	0	1	61	80	124
az-3.4	Rietland en ruigte	18.1	15	4	0	0	18	29	43	79
az-3.5	Bloemrijk grasland	6.1	45	28	18	6	33	49	60	102
az-3.6	Struweel, mantel- en zoombegroeiing	0.2	95	48	4	6	23	21	34	88
az-3.7	Bosgemeenschappen van zandgrond	0.1	60	48	0	0	0	1	4	13
az-3.8	Bosgemeenschappen van zeeklei	4.9	45	7	0	0	1	23	36	75
du-3.4	Duinrietland en -ruigte	2.4	15	8	31	14	55	127	146	231
du-3.5	Nat schraalgrasland	7.5	15	7	0	1	24	142	169	239
du-3.6	Bloemrijk grasland	4.4	45	28	34	15	47	107	127	188
du-3.7	Droog duingrasland en open duin	54.8	60	82	47	4	71	138	165	225
du-3.8	Droge duinheide	2.7	60	71	47	5	71	130	154	225
du-3.9	Natte tot vochtige voedselarme duinvallei	13.9	15	7	46	5	71	116	137	216
du-3.10	Struweel, mantel- en zoombegroeiing	5.6	95	62	66	11	72	131	153	216
du-3.11	Hakhout	0.2	95	48	60	10	54	94	114	155
du-3.12	Bosgemeenschappen van kalkarm duin	6.5	60	64	7	9	38	89	110	145
du-3.13	Bosgemeenschappen van kalkrijk duin	8.0	60	64	1	3	26	90	102	149
du-3.14	Bosgemeenschappen van de duinzoom	4.6	60	59	0	0	12	45	40	108
du-3.16	Park-stinzenbos	0.5	45	59	0	3	35	62	78	135
hl-3.3	Rietland en ruigte	0.4	15	4	35	9	48	55	65	137
hl-3.4	Kalkgrasland	5.0	45	68	35	9	52	64	78	153
hl-3.5	Droog loessgrasland	1.0	45	73	20	7	48	64	79	141
hl-3.6	Bloemrijk grasland	6.8	45	28	35	9	52	65	80	156
hl-3.7	Vochtig schraalgrasland	1.7	15	8	37	9	53	64	78	151
hl-3.8	Struweel, mantel- en zoombegroeiing	2.0	45	37	19	7	47	65	77	138
hl-3.9	Hakhout	0.9	45	48	0	0	0	23	32	93
hl-3.10	Bosgemeenschappen van helling en plateau	18.4	45	32	16	6	35	46	57	113
hl-3.11	Bosgemeenschappen van bron en beek	1.8	15	8	25	7	48	58	72	133
hl-3.12	Middenbos	2.0	45	28	6	4	24	34	44	87
hz-3.3	Rietland en ruigte	27.4	15	4	3	2	28	52	65	118
hz-3.4	Ven	33.3	15	7	1	3	30	57	73	125
hz-3.5	Droog grasland	42.9	60	68	18	7	43	96	115	178
hz-3.6	Bloemrijk grasland	95.4	45	73	4	4	32	73	85	141
hz-3.7	Vochtig schraalgrasland	106.0	15	7	1	1	24	59	67	116
hz-3.8	Open zand	2.9	60	91	42	6	78	139	161	226
hz-3.9	Droge heide	64.5	60	68	16	8	46	111	134	196
hz-3.10	Vochtige heide en levend hoogveen	117.1	15	8	2	4	32	65	80	138
hz-3.11	Struweel, mantel- en zoombegroeiing	58.7	95	37	3	4	30	56	70	121
hz-3.12	Hakhout	43.7	95	48	9	3	33	87	107	153
hz-3.13	Bosgemeenschappen van arme zandgrond	464.5	60	64	8	5	34	69	83	137
hz-3.14	Bosgemeenschappen van leemgrond	105.1	60	48	0	2	24	49	62	111
hz-3.15	Bosgemeenschappen van bron en beek	70.7	15	8	0	1	24	46	58	110
hz-3.16	Bosgemeenschappen van hoogveen	55.2	15	8	0	0	11	31	40	84
hz-3.17	Middenbos	0.3	45	15	9	9	61	58	75	132
hz-3.18	Boombos	172.1	95		9	5	33	58	75	134

Code	Omschrijving	Oppervlak (km ²)	uit Waterlood		uit PAWN					
			G (mm/jr)	mediaan (mm/jr)	TK _H (mm/jr)	Verandering t.o.v. TK _H (mm/jr)				
						gemiddeld jaar		droog jaar		
				W		W+		H	W	W+
hz-3.19	Park-stinzenbos	2.2	45	64	27	11	54	82	105	165
lv-3.3	Rietland en ruigte	66.5	15	4	0	0	5	9	20	56
lv-3.4	Nat schraalgrasland	98.2	15	7	5	5	23	30	41	80
lv-3.5	Bloemrijk grasland	38.9	45	28	13	5	29	31	48	80
lv-3.6	Veenheide	10.7	15	8	0	0	0	0	0	17
lv-3.7	Struweel	4.7	15	10	0	0	1	1	7	43
lv-3.8	Hakhout en griend	4.2	95	48	26	10	45	58	77	130
lv-3.9	Bosgemeenschappen van voedselrijk (laag)veen	31.5	15	8	0	0	0	0	0	18
lv-3.10	Bosgemeenschappen van voedselarm (hoog)veen	5.9	15	8	0	0	1	0	2	36
ri-3.2	Plas en geïsoleerde strang	0.8	15		39	10	41	68	87	131
ri-3.3	Rietland en ruigte	15.7	15	4	24	8	41	71	88	135
ri-3.4	Nat schraalgrasland	32.1	15	7	21	8	38	73	88	135
ri-3.5	Stroomdalgrasland	27.2	60	73	19	6	27	49	65	112
ri-3.6	Rivierduin en slik	0.2	95	50	43	6	59	55	76	140
ri-3.7	Struweel, mantel- en zoombegroeiing	4.3	95	35	13	6	21	27	36	77
ri-3.8	Hakhout en griend	6.0	95	48	17	6	30	42	58	96
ri-3.9	Bosgemeenschappen van zandgrond	4.2	60	48	3	4	23	29	37	79
ri-3.10	Bosgemeenschappen van rivierklei	40.2	45	31	16	5	29	41	54	96
ri-3.11	Middenbos	1.7	45	31	54	12	42	61	78	129
ri-3.12	Park-stinzenbos	8.5	45	31	8	4	22	36	49	92
zk-3.3	Zoute en brakke ruigte en grasland	12.5	15	7	26	7	43	62	82	115
zk-3.4	Rietland en ruigte	42.1	15	4	27	12	55	62	86	141
zk-3.5	Nat schraalgrasland	39.4	15	7	31	10	46	66	81	135
zk-3.6	Bloemrijk grasland	74.1	45	40	22	9	44	58	76	123
zk-3.8	Struweel, mantel- en zoombegroeiing	3.2	45	35	21	9	44	68	82	134
zk-3.9	Hakhout en griend	81.3	95	48	7	7	29	53	68	110
zk-3.10	Bosgemeenschappen van zeeklei	33.5	45	31	18	7	37	55	69	115
zk-3.11	Bosgemeenschappen van veen-op-klei	7.3	15	8	3	5	33	55	68	117
zk-3.12	Middenbos	0.1	45	31	0	0	0	0	0	0
Gemiddeld			44	33	16	5	33	59	73	124



Figuur 2-6. Relatieve verandering (volgens [2.1]) in TK bij scenario W (gemiddeld jaar).

2.2.4 Gemiddeld laagste grondwaterstand *GLG*

In Tabel 2-5 is voor de natuurdoeltypen die gevoelig zijn voor de *GLG* aangegeven welke veranderingen te verwachten zijn in de verschillende scenario's. Het gaat om typen waar de grondwaterstand normaal niet meer dan een halve meter wegzakt. *Vochtige heide en levend hoogveen* vormen in dit opzicht een wat ongelukkig natuurdoeltype, omdat het zowel vegetaties omvat die extreem gevoelig zijn voor lage grondwaterstanden (hoogveen, met *GLG* in slenken van hooguit paar dm diep) als vegetaties die voorkomen op standplaatsen waar de grondwaterstand in de zomer ver weg kan zakken (vochtige heide).

Ondanks de neerschaling worden voor de huidige situatie veel lagere *GLG*'s berekend dan op grond van Waterlood mag worden verwacht. In de natuurdoeltypen van beekdalen (hz-3.7, hz-3.15) is de *GLG* waarschijnlijk te laag berekend en de verandering in *GLG* te hoog, wat te maken heeft met resolutie van MOZART; zie opmerking in discussieparagraaf § 2.3. Zo zal in hz-3.15 *bosgemeenschappen van bron en beek* de daling in werkelijkheid minder zijn dan berekend, omdat deze bossen liggen op kwelplekken en de daling van de *GLG* in het omringende gebied hier minder doorwerkt op de grondwaterstand in het brongebied.

In scenario W is de verlaging van de *GLG* verwaarloosbaar klein, in scenario W+ bedraagt hij 1 á 2 dm. In een droog jaar is de *GLG* in de scenario's H en W ongeveer 3 dm lager dan in een normaal jaar, in scenario W+ is het verschil gemiddeld 4.5 dm.

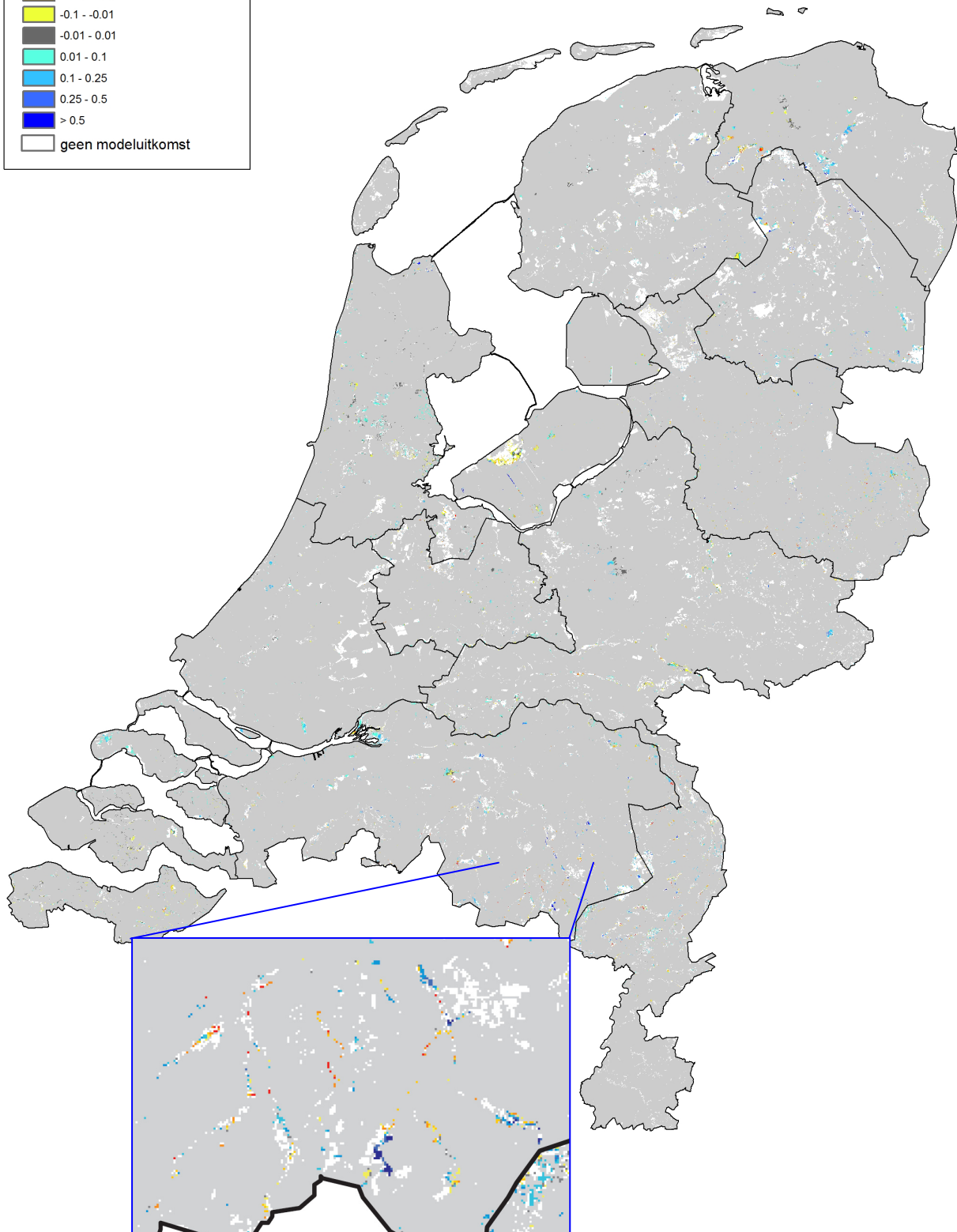
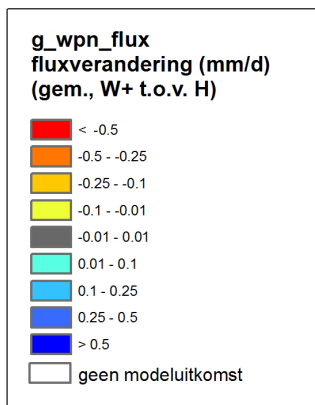
Tabel 2-5. Overzicht van veranderingen in *GLG* ten opzichte van de huidige *GLG* in een gemiddeld jaar (GLG_H). Waarden zijn medianen, berekend met het PAWN-instrumentarium.

Code	Omschrijving	Oppervlak (km ²)	GLG_H (cm -mv)	Verandering t.o.v. GLG_H (cm)					
				gemiddeld jaar		droog jaar			
				W	W+	H	W	W+	
hz-3.7	Vochtig schraalgrasland	125.8	105	1	-11	-30	-28	-37	
hz-3.10	Vochtige heide en levend hoogveen	172.0	161	-3	-12	-35	-38	-50	
hz-3.15	Bosgemeenschappen van bron en beek	98.9	123	0	-13	-32	-32	-44	
hz-3.16	Bosgemeenschappen van hoogveen	74.5	120	0	-12	-31	-31	-42	
lv-3.3	Rietland en ruigte	69.7	108	-4	-17	-16	-19	-31	
lv-3.4	Nat schraalgrasland	101.5	103	-1	-14	-15	-15	-24	
lv-3.9	Bosgemeenschappen van voedselrijk (laag)veen	35.3	105	-3	-18	-16	-18	-31	
lv-3.10	Bosgemeenschappen van voedselarm (hoog)veen	6.1	121	-5	-24	-24	-28	-47	
zk-3.4	Rietland en ruigte	43.4	191	-7	-22	-17	-25	-39	
zk-3.11	Bosgemeenschappen van veen-op-klei	8.5	132	-1	-11	-17	-17	-26	
	gemiddeld		139	-2	-16	-29	-30	-45	

2.2.5 Kwelflux *Kwel*

Tabel 2-6 toont de veranderingen in kwelflux voor natuurdoeltypen die afhankelijk zijn van grondwateraanvoer. Over het algemeen is er sprake van een kleine toename van de kwelfluxen, zelfs onder het droge scenario W+ (Figuur 2-7). Op hogere zandgronden wordt het effect van klimaatverandering blijkbaar afgezwakt doordat de vegetatie bij droogte minder gaat transpireren. Het gevolg is vermoedelijk dat de grondwateraanvulling op hogere zandgronden gelijk blijft of stijgt, ondanks het veel lagere potentiële neerslagoverschot in W+. Daardoor stijgt de kwel naar lager gelegen gebieden. Deze terugkoppeling van de vegetatie op het klimaat heeft ook tot gevolg dat de grondwaterstanden in kwelgebieden onder W+ minder ver wegzakken. Zie verder de discussie in § 2.3.

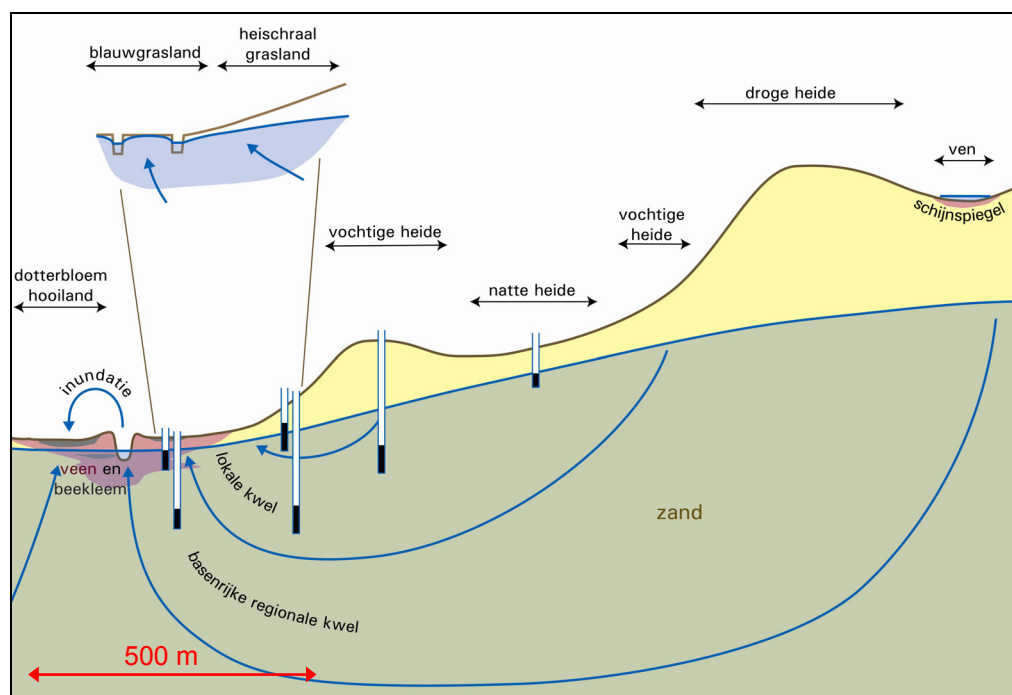
De resolutie van PAWN lijkt te grof voor het karakteriseren van beekdalen (Figuur 2-7): een Nederlands beekdal is te smal om te typeren met rekencellen van 500×500 m en de neerschaling lijkt daar weinig aan te hebben geholpen. Een gemiddelde kwelflux in een dergelijke cel zal vaak het gemiddelde zijn van een gedeelte dat echt kwelgevoed beekdal is, en een deel van het aangrenzende infiltratiegebied (Figuur 2-8). De oranje en rood gekleurde cellen in Figuur 2-7 zullen hier gedeeltelijk door kunnen worden verklaard.



Figuur 2-7. Verandering bij scenario W+ in Kwel (gemiddeld jaar). Inzet: Brabants dekzandlandschap met beekdalen.

Tabel 2-6. Overzicht veranderingen in Kwel ten opzichte van de huidige Kwel in een gemiddeld jaar (K_{welH}). Waarden zijn medianen, berekend met het PAWN-instrumentarium.

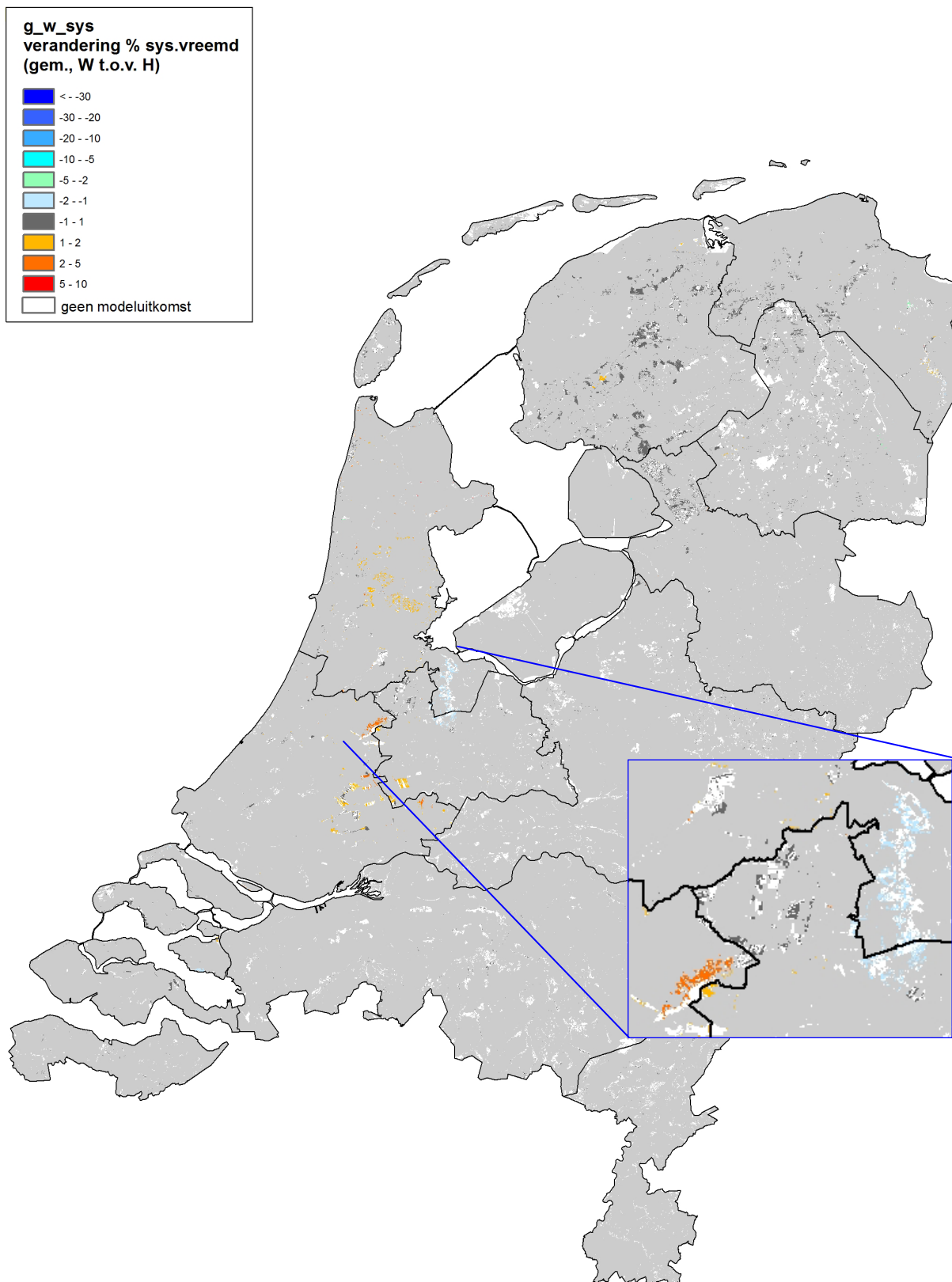
Code	Omschrijving	Oppervlak (km ²)	K_{welH} (mm/d)	Verandering t.o.v. K_{welH} (mm/d)				
				gemiddeld jaar		droog jaar		
				W	W+	H	W	W+
du-3.5	Nat schraalgrasland	6.9	-0.45	-0.02	0.08	0.02	0.04	0.11
hz-3.7	Vochtig schraalgrasland	130.8	0.20	0.12	0.03	0.25	0.31	0.23
hz-3.15	Bosgemeenschappen van bron en beek	100.8	0.11	0.01	-0.04	0.20	0.20	0.12
lv-3.4	Nat schraalgrasland	115.9	-0.16	0.03	0.04	-0.04	-0.03	-0.05
ri-3.4	Nat schraalgrasland	43.4	-0.04	0.01	0.00	0.01	0.02	-0.01
zk-3.5	Nat schraalgrasland	41.6	-0.02	0.01	0.02	-0.04	-0.05	-0.04
gemiddeld			-0.06	0.03	0.02	0.07	0.08	0.06



Figuur 2-8. Ecohydrologische dwarsdoorsnede van hogere zandgrond naar beekdal. Inzet: een blauwgrasland is afhankelijk van basenrijke kwel, en zuur atmoclien water wordt 's winters via ondiepe greppels afgevoerd; ook heischrale graslanden kennen enige aanrijking met basen. Dotterbloemhooilanden komen op voedselrijkere plekken voor, bijvoorbeeld door inundatie met beekwater. De 500 m maatstaf is indicatief. Bron: Witte et al. (2007a).

2.2.6 Percentage systeemvreemd water PSV_{juli}

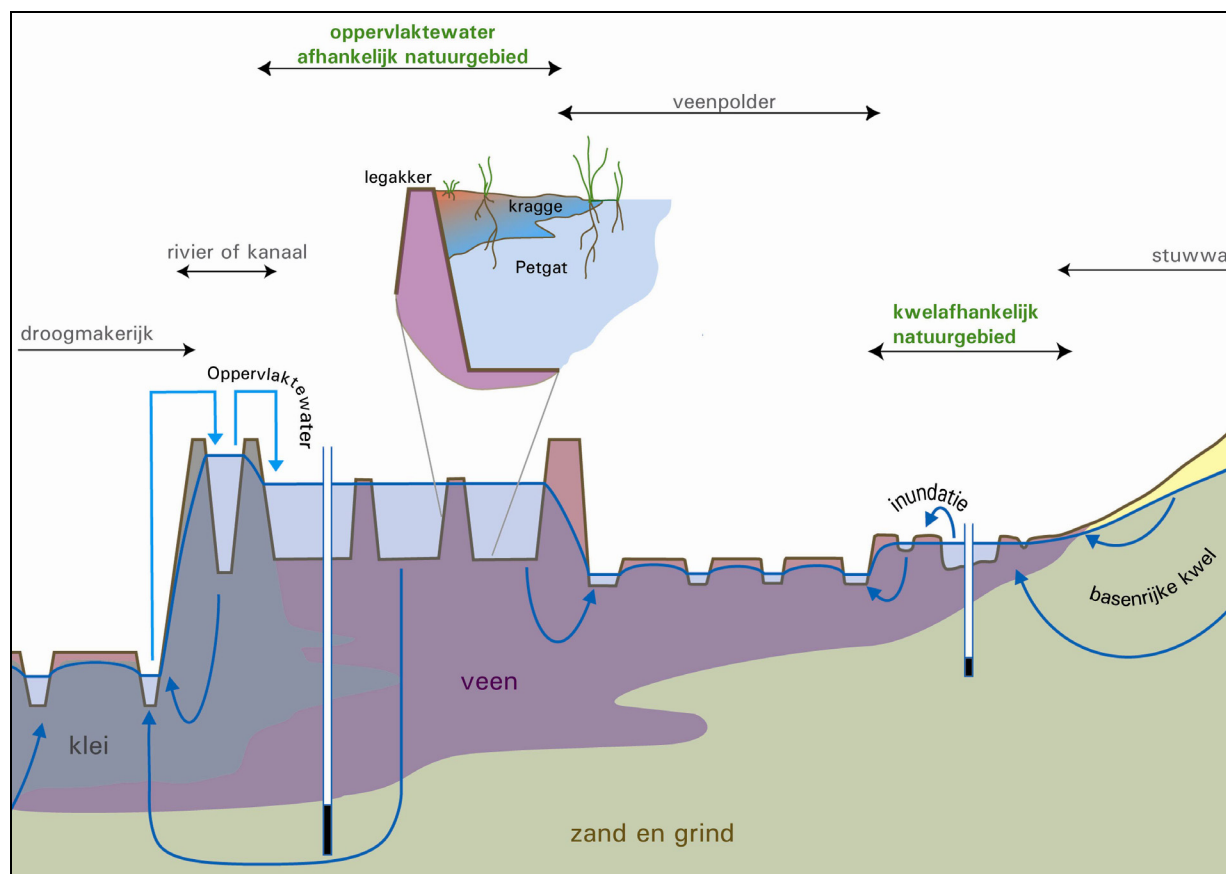
Tabel 2-7 geeft de veranderingen PSV_{juli} voor zover natuurdoeltypen hiervoor gevoelig zijn. Omdat de meeste typen in zeer kleine oppervlakten voorkomen, is in deze tabel tevens het naar oppervlakte gewogen gemiddelde opgenomen, naast het rekenkundig gemiddelde. Te zien is dat in scenario W het percentage nauwelijks toeneemt, in een gemiddeld, noch in een droog jaar. Onder W+ stijgt PSV_{juli} vooral in een droog jaar (met gemiddeld $9.4 - 5.3 = 4.1\%$). Ter illustratie toont Figuur 2-9 een kaart van de verandering onder scenario W. Opmerkelijk is dat het percentage systeemvreemd water in het ten westen van de Utrechtse heuvelrug gelegen Vechtplassegebied daalt, terwijl het in de rest van de laagveenmoerassen juist stijgt, bijvoorbeeld in de Nieuwkoopse plassen. De verklaring is dat het eerste gebied kwelwater ontvangt vanuit de heuvelrug, terwijl een gebied als de Nieuwkoopse plassen als het ware aan het infuus ligt: hier moet voortdurend water worden ingelaten om het gebied, dat uittorent boven zijn omgeving, op peil te houden (Figuur 2-10). Onder scenario W+ stijgt ook het percentage gebiedsvreemd water onder aan de Utrechtse heuvelrug, zij het bescheiden (1-2 %).



Figuur 2-9. Verandering bij scenario W in PSV_{juli} (gemiddeld jaar). Inzet: het verschil tussen een mede door kwel gevoed laagveengebied (Vechtplassen) en een gebied dat sterk afhankelijk is van aangevoerd oppervlaktewater (Nieuwkoopse plassen).

Tabel 2-7. Overzicht veranderingen in percentage systeemvreemd water PSV_{juli} (op basis van gesimuleerde mediaan) ten opzichte van de mediaan in een gemiddeld jaar ($PSV_{juli,H}$).

Code	Omschrijving	Oppervlak (km ²)	$PSV_{juli,H}$ (%)	Verandering t.o.v. $PSV_{juli,H}$ (%)				
				gemiddeld jaar		droog jaar		
				W	W+	H	W	W+
du-3.6	Bloemrijk grasland	6.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
hz-3.1	Laaglandbeek	29.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
hz-3.2	Zoetwatergemeenschap	3.0	0.0	0.0	1.3	6.3	7.0	11.3
lv-3.1	Zoetwatergemeenschap	4.1	0.7	0.3	4.7	10.3	11.0	13.0
lv-3.2	Brakwatergemeenschap	0.0	20.0	1.3	8.0	14.7	14.3	15.0
lv-3.3	Rietland en ruigte	97.0	0.0	0.0	1.3	6.3	7.0	11.3
lv-3.9	Bosgemeenschappen van voedselrijk (laag)veen	40.2	0.0	0.0	1.3	6.3	7.0	11.3
zk-3.1	Zoetwatergemeenschap	4.4	0.7	0.3	4.7	12.7	13.7	22.7
zk-3.2	Brakwatergemeenschap	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
gemiddeld			2.7	0.2	2.7	7.1	7.5	6.7
Naar oppervlakte gewogen gemiddelde			0.0	0.0	1.2	5.3	5.9	9.4



Figuur 2-10. Hydrologische positie van laagveennatuurgebieden. Inzet: kraggeverlanding vanuit een legakker, met binnen de kragge een gradiënt in waterkwaliteit variërend van regenwaterachtig (rood) tot oppervlaktewaterachtig (blauw). Bron: Witte et al. (2007a).

2.3 Discussie

2.3.1 Inleiding

In deze afsluitende discussieparagraaf bespreken we eerst de belangrijkste tekortkomingen van de in dit hoofdstuk uitgevoerde analyse (§ 2.3.2), waarna we de resultaten vergelijken met die uit andere studies (§ 2.3.3). Rekening houdend met alle beperkingen zullen we vervolgens naar beste vermogen een oordeel geven over de effecten van klimaatverandering op zowel de waterhuishouding als de natuur van Nederland. Dit oordeel is echter niet in deze discussie opgenomen, maar doorgeschoven naar achtereenvolgens § 3.1 en § 3.2 van het volgende hoofdstuk.

2.3.2 Beperkingen van deze studie

We hebben moeten constateren dat de met het PAWN-instrumentarium berekende grondwaterstanden in absolute zin vaak sterk afwijken van de grondwaterstanden zoals die op basis van ecologische kennis verwacht mogen worden, zelfs in verdroogde situaties. Over het algemeen lijken de grondwaterstanden in natuurdoeltypen te laag te zijn berekend. Oorzaak ligt onder andere in een beperkte betrouwbaarheid van het PAWN-instrumentarium voor natuurgebieden en in het feit dat de schaal waarop de waterhuishouding is gemodelleerd niet aansluit bij de schaal waarop grondwaterafhankelijke natuur voorkomt. Door de gebruikte neerschaling van de modelresultaten is dit probleem onvoldoende opgelost (Van Ek, 2008). De afwijkingen zijn het grootst bij het natuurdoeltype hl-3.11, *bosgemeenschappen van bron en beek*, omdat het hier gaat om kleine snippertjes natte natuur ingebed in een omgeving met zeer diepe grondwaterstanden (kalkplateaus).

In de effectanalyse is geprobeerd met de modelonvolkomenheden rekening te houden door niet uit te gaan van de absolute hydrologische grootheden, maar van de voorspelde veranderingen. Zo is dus niet gekeken naar de grondwaterstand ten opzichte van maaiveld, maar naar de veranderingen in grondwaterstand. Veronderstelling is daarbij dat de veranderingen in waterhuishouding betrouwbaarder zijn dan absolute waarden, omdat ze minder gevoelig zijn voor schaalproblemen, maaiveldvariatie en modelschematiseringen. Sluitend is deze redenering echter niet, vooral omdat processen in de onverzadigde zone niet-lineair verlopen. Als bijvoorbeeld de grondwaterstand te laag wordt berekend, leidt dat tot een te hoog vochttekort bij grondwaterafhankelijke natuurdoeltypen (die via capillaire nalevering vanuit het grondwater van water worden voorzien).

Bovendien sluit de oorspronkelijke resolutie van het PAWN-instrumentarium onvoldoende aan bij natuurdoeltypen die in kleine of smalle gebieden voorkomen. Zo is een Nederlands beekdal te smal om te typeren met rekencellen van 500×500 m; een gemiddelde grondwaterstand en kwelflux in een dergelijke cel zal vaak het gemiddelde zijn van een gedeelte dat nat en kwelgevoed beekdal is, en een deel van het aangrenzende drogere infiltratiegebied (Figuur 2-8). De neerschaling met behulp van het AHN heeft daar weinig aan kunnen verhelpen. Rekening houdend met dit euvel verwachten dan ook dat de kwel in de meeste natuurdoeltypen van beekdalen in werkelijkheid meer zal toenemen dan Tabel 2-6 en Figuur 2-7 laten zien. Om dezelfde reden verwachten we in de beekdalen een *GLG* die minder ver uitzakt dan berekend, en een minder groot vochttekort.

Een van de gevolgen van klimaatverandering kan zijn dat de meteorologische verschillen tussen de jaren zullen gaan toenemen. Om dit effect goed te kunnen beoordelen zou een lange reeks jaren met het hydrologisch instrumentarium moeten worden doorgerekend. Het grondwater ijlt immers na op de weersgesteldheid. Bij grotere systemen, zoals onder de Veluwe, kan dat nauwelijks tientallen jaren duren. Om de variatie in een grootheid, zoals het vochttekort, goed te typeren zou een meteorologische reeks van bijvoorbeeld 30 jaar (1970-2000) moeten worden getransformeerd naar de toekomst (2050), waarna hier de hydrologische berekeningen op worden gebaseerd. Uit praktische overwegingen was een dergelijke aanpak in deze studie niet mogelijk. Dat betekent dat we minder waarde hebben moeten hechten aan de uitkomsten van het droge jaar.

Een laatste kanttekening is dat de gebruikte natuurdoeltypen niet de beste eenheden zijn om ecologische effecten uit te drukken, omdat ze soms zeer breed zijn gedefinieerd en de gevoeligheid mede afhangt van de breedte van de definitie. Zo omvat het doeltype *hakhout* vaak alle hakhoutbossen in een bepaald landschapstype, ongeacht of ze op natte of droge standplaatsen voorkomen. Voor het al of niet bereiken van de doelstelling zijn dan veranderingen in waterhuishouding niet relevant, wat in deze studie

betekent dat geen of slechts een geringe gevoeligheid is aangegeven. Dat wil echter niet zeggen dat er binnen de hakhoutbossen geen veranderingen zullen optreden als gevolg van klimaatgestuurde waterhuishoudkundige veranderingen. Een ander voorbeeld vormt het doeltypische *vochtige heide en levend hoogveen* dat zowel laagdynamische en zeer gevoelig ecosystemen (hoogveen) als hoogdynamische minder gevoelige ecosystemen (vochtige heiden) omvat. Ook laat de kwaliteit van de natuurdoelenkaart te wensen over en zitten er zelfs opzichte fouten in.

2.3.3 Vergelijking met andere studies

Ondanks alle beperkingen stemmen de resultaten van de PAWN-simulaties in grote lijnen overeen met die van een meer gedetailleerde simulatie van het W+ scenario. Sinds het voorjaar van 2007 is er namelijk een regionaal grondwatermodel in een hoge resolutie beschikbaar voor Noord-Nederland, het MIPWA-model (Snepvangers en Berendrecht, 2007). Met dit model zijn in het kader van het toekomstverkenningen van de grondwatervoorraad (Stuurman et al., 2008) de effecten van W+ op de GHG en GLG over 30 jaar doorgerekend:

- 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 op de meeste plaatsen ook, zij het in minder mate dan de GHG;
- In de overige gebieden daalt de GLG enkele centimeters tot lokaal 1-2 decimeter.

Opvallend is dus dat ondanks de grote afname van het jaarlijkse potentiële neerslagoverschot (Hoofdstuk 1), de verwachte daling van de grondwaterstand onder W+ uitblijft. Dat komt door de toename van de neerslag in de winterperiode, in combinatie met een afname van de *werkelijke* verdamping in de drogere zomers. Deze afname wordt door hydrologische modellen gesimuleerd en is ten eerste het gevolg van de transpiratiereductie door het sluiten van de huidmondjes van planten bij het uitdrogen van de bodem. Een tweede oorzaak ligt in de verandering van het temporele neerslagpatroon, welke leidt tot een afname van de interceptiepost in de verdamping: naarmate de neerslag minder gelijkmatig verdeeld over het jaar valt, daalt de interceptie.

Recent is scenario W+ ook doorgerekend met een gedetailleerd SIMGRO-model voor de Gelderse Vallei en de aangrenzende stuwwallen Utrechtse heuvelrug en Veluwe (Hermans et al., 2009). Deze studie geeft voor het W-scenario vergelijkbare trends (hogere grondwaterstanden, meer kwel) te zien als berekend met het MIPWA en PAWN (Hoofdstuk 2), maar het scenario W+ pakt droger uit. Volgens Hermans et al. (2009) zal de grondwateraanvulling op beide stuwwallen dalen met ongeveer 20 mm/jr. Dit zou leiden tot lagere grondwaterstanden op de Veluwe en de Utrechtse heuvelrug (maximaal 60 en 35 cm daling van de GLG) en tot minder kwel naar de Gelderse Vallei.

Of onder W+ de *berekende* grondwateraanvulling onder stuwwallen stijgt of daalt, en de kwel naar de Gelderse vallei stijgt of daalt, hangt af van de manier waarop de vegetatie in de hydrologische modellen wordt geschematiseerd en geparаметriseerd. Voor natuurgebieden en bossen zijn belangrijke modelparameters (worteldiepte, gewasfactor, interceptiecapaciteit) meestal slecht bekend. Bovendien worden verdampingsprocessen meestal op een wat 'fuzzy'-achtige wijze gemodelleerd. Voor het gebruik van hydrologische modellen onder het huidige klimaat hoeft dat geen bezwaar te zijn, maar bij het doorrekenen van een extreem scenario als W+ is het noodzakelijk dat alle afzonderlijke verdampingsposten (transpiratie, interceptie en bodemevaporatie), goed worden nagebootst. Anders kan bijvoorbeeld nooit het effect van een gewijzigde neerslagverdeling op de interceptieverdamping goed worden bepaald. Clarke & Sanitwong Na Ayuttaya (2008) hebben voor een duingebied nabij Liverpool aangetoond dat dit effect aanzienlijk kan zijn.

Om er achter te komen waarom het ene model onder W+ een stijging van de GLG berekent en het andere een daling, zouden de modellen inhoudelijk vergeleken moeten worden. Dat valt buiten het bestek van deze studie. Als we echter de fout in de gesimuleerde verdamping conservatief schatten op 10 %, dan betekent dit in het Nederlandse klimaat (verdamping ca. 500 mm/jr) voor de grondwateraanvulling al ongeveer 50 mm/jr. Met een dergelijke fout moeten we dus constateren dat er moeilijk een uitspraak kan

worden gedaan over de richting van de verandering onder W+: stijgen of dalen de grondwaterstanden onder de Veluwe, neemt de kwel toe of juist af in de Gelderse vallei?

Er zijn echter redenen om aan te nemen dat de grondwateraanvulling meer stijgt, of minder daalt, dan berekend met PAWN, MIPWA of SIMGRO. Allereerst is in deze modellen de interceptiepost niet voor alle vegetatietypen expliciet gemodelleerd, wat betekent dat de verdamping bij een intensiever neerslagpatroon wordt overschat. Ten tweede zal, volgens de laatste inzichten, de intensiteit van de neerslagbuien nog veel meer toenemen dan waar in deze studie rekening mee is gehouden (Lenderink, 2008), en de grondwateraanvulling dus nog meer stijgen. Ten slotte zijn er meerdere regulerende mechanismen waarmee de vegetatie zijn verdamping aanpast aan veranderingen in weer en klimaat. Het eerste is dat planten in droge tijden hun huidmondjes sluiten om zo hun verdamping te reduceren. Dit mechanisme is zoals vermeld goed bekend en wordt gesimuleerd in alle hydrologische modellen. Waar deze modellen echter geen rekening mee houden, is dat het klimaat ook invloed heeft op verdampingskarakteristieken van de vegetatie.

In samenwerking met Alterra heeft KWR onlangs aangetoond dat een hogere CO₂-concentratie ervoor zorgt dat planten zuiniger omgaan met water, hun *water use efficiency* stijgt (Kruit et al., 2008; Witte et al., 2006a,b). De voor 2050 verwachte CO₂-toename van 150 ppm compenseert op die manier voor een temperatuurstijging van 1 °C. Voor hogere zandgronden met bos, hei en zandverstuivingen moet worden gerekend op een verdampingsreductie van 2 tot 4%, ofwel ca. 10-20 mm/jr.

Een derde terugkoppelingsmechanisme is dat op hogere zandgronden het aandeel kale grond en het aandeel niet-wortelende planten (mossen en korstmossen) in een natuurlijke vegetatie toeneemt naarmate de zomer droger wordt. Omdat kale grond en (korst)mossen veel minder verdampen dan wortelende vaatplanten, zorgt dit voor een daling van de werkelijke verdamping.

Indicatieve berekeningen voor de Amsterdamse Waterleidingduinen tonen aan dat al deze drie terugkoppelingsmechanismen samen, ervoor zorgen dat zowel onder scenario W als onder W+ de grondwateraanvulling licht stijgt (op duintoppen met respectievelijk 2 en 9%; Witte et al., 2008). Het samenspel van klimaat, bodem, water en vegetatie is echter nauwelijks begrepen, laat staan goed gekwantificeerd. Dit betekent dat effecten van klimaatverandering op waterhuishouding en ecosystemen, niet goed kunnen worden voorspeld.

3 Voorlopige schetskaart voor 2050

3.1 Veranderingen in de waterhuishouding van Nederland

In het vorige hoofdstuk is besproken hoe de waterhuishouding van Nederland – en daarbinnen van verschillende natuurdoelen – verandert volgens simulaties met het hydrologische modelinstrumentarium PAWN. In een afsluitende discussieparagraaf van dat hoofdstuk hebben we de resultaten bovendien vergeleken met die van andere studies. Ten slotte hebben we bediscussieerd welke tekortkomingen de huidige generatie hydrologische modellen heeft, en wat daarvan de consequenties kunnen zijn voor de gesimuleerde hydrologische grootheden, zoals de grondwaterstand.

In deze paragraaf beschrijven we de hydrologische uitgangspunten voor de schetskaart van § 3.2. Deze geven weer wat waarschijnlijk de gevolgen van scenario's W en W+ zullen zijn voor de waterhuishouding van Nederland. De uitgangspunten zijn naar beste vermogen *beoordeeld* op basis van de in het vorige hoofdstuk opgedane kennis, literatuurgegevens, algemene proceskennis en discussies met collega-hydrologen:

1. In gebieden waar de grondwaterstand zomers een eind beneden maaiveld ligt (dieper dan, zeg, een meter, maar dit hangt van de bodemtextuur af), zal het vochttekort in de zomer onder beide scenario's toenemen. De toename is aanzienlijk onder scenario W+ (Tabel 2-4).
2. De gemiddelde grondwateraanvulling neemt onder scenario W zeker toe (Tabel 1-2). Door een aantal (niet in de modelstudie meegenomen) terugkoppelingen van de vegetatie op het klimaat (§ 2.3.3), is een toename van de grondwateraanvulling op hogere zandgronden onder scenario W+ waarschijnlijk.
3. Dit heeft gevolgen voor de kwel naar lager gelegen gebieden: die zal gemiddeld gelijk blijven of iets stijgen.
4. In beide scenario's zal de grondwaterstand van grondwaterafhankelijke ecosystemen in winter en voorjaar waarschijnlijk licht stijgen, gemiddeld over Nederland met enkele cm's in beide scenario's.
5. De zomerse grondwaterstand zal onder W min of meer gelijk blijven en onder W+ dieper wegzakken; volgens de berekeningen gemiddeld met een á twee decimeter (Tabel 2-5). Mogelijk pakt de daling onder W+ lager uit doordat, zie punt 2, in de berekeningen geen rekening is gehouden met enkele terugkoppelingsmechanismen.
6. Door de drogere zomers zal onder W+ iets meer systeemvreemd water moeten worden aangevoerd naar de peilbeheerste gebieden (laag Nederland) (Tabel 2-7). Bij gebieden die onder invloed staan van kwelwater wordt de aanvoer juist iets minder (W; Figuur 2-9) of blijft hij nagenoeg onveranderd.
7. De dynamiek in de waterhuishouding van Nederland zal toenemen: door een intensivering van de neerslagbuien, door nattere winters en drogere zomers, maar ook door grotere meteorologische verschillen tussen jaren.

3.2 De effecten voor ecosysteemttypen in een voorlopige schetskaart

De ecohydrologische gevolgen van klimaatverandering voor het jaar 2050 zijn weergegeven in een voorlopige schetskaart: zie Figuur 3-1. Het is slechts één kaart geworden, omdat de door ons onderzochte scenario's W en W+ allebei in dezelfde richting wijzen: een nattere winter en een drogere zomer en meer variatie tussen de jaren. Er zijn natuurlijk ook grote verschillen tussen de scenario's, zoals dat de zomer onder W+ veel droger wordt dan onder W. Deze verschillen zullen we waar verantwoord aangeven. Het doel van deze kaart is niet alleen om de door ons voorziene verschuivingen in de natuur van Nederland grafisch weer te geven, maar ook om discussie uit te lokken waarmee onze kennis over de ecohydrologische effecten van klimaatverandering kan worden vergroot. Vandaar dat we van een *voorlopige* schetskaart spreken.

De totstandkoming van de kaart is gebaseerd op de in de vorige paragraaf genoemde hydrologische uitgangspunten, de resultaten van Hoofdstuk 2, literatuurgegevens, discussies in het door Alterra getrokken 'Klimaatatlasproject' en proceskennis. Tevens is gelet op de aanwezigheid van mogelijke omslagpunten in ecosystemen (Kwadijk et al., 2008; RWS-WD/Deltares, 2008). De kaart zal in de volgende paragrafen per ecosysteemtype worden gemotiveerd, waarbij we de indeling van Tabel 3-1 aanhouden. We zijn dus van de indeling in natuurdoeltypen afgestapt, ten eerste omdat dit niveau te gedetailleerd is, gegeven alle onzekerheden, en ten tweede omdat natuurdoeltypen statistisch zijn geformuleerd, terwijl de natuur nu juist van aanzien verandert onder een veranderend klimaat. We hebben in de volgende paragrafen niet naar volledigheid gestreefd, waardoor verschillende systemen in Tabel 3-1 ontbreken. Buitendijkse kwelders en schorren zijn bovendien buiten beschouwing gelaten.

Tabel 3-1. Voor de voorlopige schetskaart gebruikte indeling in ecosystemtypen.

Volledig van regenwater afhankelijk	Gevoed door kwel of oppervlaktewater
<p>§ 3.2.1 Grondwateronafhankelijke systemen</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Droge duingraslanden en droge heiden</i> • <i>Bossen</i> 	<p>§ 3.2.3 Door kwel en oppervlaktewater gevoede terrestrische systemen</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Beekdalen</i> • <i>Duinvalleien</i> • <i>Laagvenen</i>
<p>§ 3.2.2 Door regenwater gevoede natte systemen</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Hoogvenen</i> • <i>Natte heiden</i> • <i>Vennen</i> 	<p>§ 3.2.4 Oppervlaktewateren</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Beken en sprengen</i> • <i>Sloten</i> • <i>Meren en plassen</i>

3.2.1 Grondwateronafhankelijke systemen

Hoewel in veel klimaatstudies de aandacht is uitgegaan naar wetlands, zijn de effecten waarschijnlijk vooral groot in gebieden die voor hun watervoorziening geheel zijn aangewezen op de atmosfeer. We maken hier een onderscheid in *Door regenwater gevoede natte systemen*, die in § 3.2.2 worden behandeld, en in *Grondwateronafhankelijke systemen*, die hier ter sprake komen.

In *Grondwateronafhankelijke systemen* zoals op stuwwallen, dekzandruggen en duinen zal het vochttekort toenemen, onder W maar vooral onder scenario W+ (gemiddeld met tientallen mm/jr). Hierdoor zal het aantal droogteresistente soorten toenemen en zal het zwaartepunt van het groeiseizoen verschuiven naar het vroege voorjaar.

Droge duingraslanden en droge heiden

De verwachting is dat vooral in *droge duingraslanden* en *droge heides* grote veranderingen zullen optreden als het klimaat verandert zoals voorspeld in de scenario's W en W+.

De door ons verwachte grote effecten op neerslagwatergevoede systemen stemmen overeen met de resultaten uit de NOP-studie Klimaat en Beken (Van Walsum et al., 2002). Daarin werd geconcludeerd dat de grootste veranderingen niet zullen optreden in de beekdalen zelf, maar in de aangrenzende infiltratiegebieden met natte en droge heides. Deze conclusies werden getrokken op basis van modelberekeningen voor een studiegebied in Nederland (Beerze-Reusel), en konden worden bevestigd aan de hand van vegetatiepatronen in een referentiegebied in Frankrijk (La Brenne).

Voorlopige schetskaart van ecohydrologische effecten

(scenario's W en W*, zichtjaar 2050)



© 2009 - KWR Watercycle Research Institute

grafisch ontwerp: Erik Zeegers | vormgeving.com

KWR

Figuur 3-1. Voorlopige schetskaart van ecologische effecten van klimaatverandering (zichtjaar 2050, scenario's W en W+).

Voor de te verwachten effecten is niet alleen van belang hoeveel droger het wordt, maar ook wanneer de droogte optreedt. De afgelopen jaren is door ons, maar ook door de heer H. Piek van Natuurmonumenten (mond. med.), geconstateerd dat een zeer droog voorjaar leidt tot massale sterfte onder Struikhei. Mogelijk heeft dit te maken met de gewoonlijk hoge dichtheid aan fijne wortels in het voorjaar, die dan in de loop van de zomer daalt. Dit is in ieder geval aangetoond in een gedetailleerd onderzoek aan de wortels van twee Douglasopstanden (Olsthoorn, 1998). De gevolgtrekking van deze bevinding is dat een soort die in het huidige klimaat relatief droogtebestendig is, zoals Struikhei, dat in het toekomstige klimaat niet hoeft te zijn.

Klimaatverandering zal in deze droge systemen vermoedelijk leiden tot relatief grote verschuivingen in soortensamenstelling. Dat hoeft niet tot een afname van de soortenrijkdom te leiden. In de heidegebieden in Zuidwest Europa komen veel heide- en bremsoorten voor die aan de droge zomers goed zijn aangepast. Klimaatveranderingen kunnen in deze systemen dus ook leiden tot een toename van de biodiversiteit, mits 'nieuwe' soorten Nederland kunnen bereiken. Dat is overigens onzeker, omdat de meeste heidesoorten zich niet via water of lucht verspreiden en Midden- en Zuidwest-Europese heidegebieden nogal geïsoleerd liggen ten opzichte van heidegebieden in Noord-Europa.

Door de voorspelde vaker optredende droogte in de zomer kan op leemarme zandgronden, zoals de kustduinen, het aandeel kale grond in de vegetatie gaan toenemen, met meer verstuing tot gevolg (Witte et al., 2008). Mogelijk neemt tevens het aandeel mossen en korstmossen toe. Deze gevolgen van meer droge zomers zouden in eerste instantie door terreinbeheerders kunnen worden toegejuicht, omdat ze nu immers klagen dat de duinen te weinig dynamiek kennen en volledig dichtgroeien. Grazige en soortenrijke duingraslanden zullen zich echter nog sterker terugtrekken op beschutte noordhellingen.

Waar in het huidige klimaat droogtestress vooral voorkomt op zandgronden met lage grondwaterstanden, zal in de voorspelde klimaatscenario's, en dan vooral in scenario W+, droogtestress ook gaan optreden op zavel- en kleigronden. In bloemrijke graslanden op kalkrijke zavel en klei zal dat naar verwachting leiden tot een verschuiving van het groeiseizoen naar het voorjaar en een toename van droogte- en warmteminnende Midden-Europese stroomdalplanten, die zich relatief eenvoudig verspreiden. In de zomer zullen de bloemrijke graslanden onder scenario W+ er vaak dor en droog uitzien.

Bossen

Tijdens een extreem droge zomer reageren bomen vaak met versnelde bladval. Vooral jonge aanplant is kwetsbaar, mede door een nog onderontwikkeld wortelstelsel (zie opmerking bovenaan deze pagina). Vaak is herstel mogelijk in het daaropvolgend jaar, maar wanneer extreem droge zomers in een hoge frequentie gaan optreden is verhoogde sterfte denkbaar. Verschillende boomsoorten zullen het dan moeilijk krijgen. In het westen van de Verenigde Staten stierven naaldbomen in de afgelopen 30 jaar twee keer zo veel als voorheen, wat te wijten zou zijn aan klimaatverandering (meer warmte en droogte) (Van Mantgem et al., 2009). Eik is behoorlijk droogteresistent.

Op arme kalkloze zandgronden, zoals op de Veluwe, kunnen droogte en verzuring een fatale combinatie worden (Olsthoorn, 1989). Klimaatverandering zal waarschijnlijk leiden tot een verhoogd brandrisico in de toekomst. Of dit ook daadwerkelijk leidt tot meer en grotere branden is niet te zeggen (Schelhaas & Moriondo, 2007). Dat hangt onder meer af van toekomstige terreinomstandigheden en de effectiviteit van voorkomen, opsporen en bestrijden van branden.

Nabuurs & Hommel (2007) verwachten verschuivingen in de soortensamenstelling van bossen, maar gaan niet uit van een doemscenario. Versterkte stormen (is nog geen trend) kunnen nadelig zijn voor stormgevoelige bomen als Grove den en Beuk. Pioniers als Berk en Lijsterbes kunnen hier van profiteren.

Muller (2005) voorspelt op basis van een modelstudie dat als gevolg van de zachtere winters, wintergroene soorten zoals Hulst en Taxus gaan toenemen. Bij Hulst is deze toename al waargenomen. De soort heeft in Denemarken zijn areaalgrens al met 100 km in oostelijke richting uitgebreid, wat volgens Bañuelos et al. (2004) een gevolg is van de zachtere winters. In de Nederlandse bossen neemt Hulst de laatste jaren sterk toe, wat echter ook samenhangt met het ouder worden van bossen. In internationale studies is een toename van het warmteminnende soorten in bossen geconstateerd (Walther et al., 2002).

3.2.2 Door regenwater gevoede natte systemen

Hoogvenen

In natte regenwatergevoede infiltratiegebieden is een sterke toename van de dynamiek te verwachten, waarbij het in de winter natter en in de zomer droger zal worden. Dit zal vooral voor hoogvenen (Figuur 3-2) nadelige consequenties kunnen hebben. Levend hoogveen is zeer verdrogingsgevoelig en komt alleen voor op standplaatsen waar het grondwater niet meer dan enkele decimeters beneden maaiveld wegzakt. Door toename van de verdamping en vermindering van de neerslag in de zomer is het de vraag of dit type zich in Nederland kan handhaven, vooral onder scenario W+. Volgens Casparie & Streefkerk (1992) is de huidige verspreiding van levend hoogveen als landschap beperkt tot gebieden met een neerslag van minimaal 700 mm/jr, een gemiddelde jaartemperatuur van minder dan 9.5 °C, en een gemiddelde julitemperatuur van 16-17 °C. Pons (1992) gaat uit van een gemiddelde jaartemperatuur van 11 °C en een neerslagoverschot van meer dan 150 mm/jr.

De gemiddelde jaarlijkse neerslag en referentieverdamping in Nederland is nu respectievelijk 771 en 563 mm, zodat het neerslagoverschot 208 mm/jr bedraagt (gegevens ontleend aan website KNMI, periode 1971-2000). Onder scenario W+ krijgen we een neerslagoverschot dat tientallen procenten lager ligt, afhankelijk van de locatie. Voor De Bilt komen Hermans et al. (2009) uit op een reductie van 30 %, wat toegepast om het cijfer van 208 mm/jr een neerslagoverschot van 146 mm/jr zou betekenen, minder dan de drempelwaarde van Pons (1992). Onder scenario W wordt het gemiddeld 8 % natter, wat een neerslagoverschot van 225 mm/jr betekent: juist gunstig voor hoogveengroei. De temperatuur in Nederland bedraagt nu 9.7 °C gemiddeld per jaar en 17.1 °C in de maand juli. Dat wordt straks 2 á 3 °C warmer, waarmee zowel de door zowel Pons (1992) als de door Casparie & Streefkerk (1992) gegeven drempelwaarden worden overschreden.

Als klimaatverandering zal verlopen zoals in scenario W+, is het dus aannemelijk dat hoogveenvorming volledig zal stoppen. Als eerste zal de Peel het moeilijk krijgen, omdat het met een overschot van ca. 140 mm/jr (gegevens KNMI) nu al onder de drempelwaarde van Pons (1992) ligt. De toename van het neerslagoverschot onder scenario W is gunstig voor hoogveengroei, maar de drogere zomer en temperatuurstijging zijn dat beslist niet.

Een hoge CO₂-concentratie in het oppervlaktewater zou gunstig zijn voor de groei van veemossen, maar het meeste CO₂ in hoogvenen is afkomstig uit de oxidatie van methaan, dat vrijkomt bij de afbraak van veen (Smolders et al., 2001). Van de stijging van de atmosferische concentratie zal daarom, verwachten we, geen of nauwelijks een positieve werking uitgaan.



Figuur 3-2. Is er nog toekomst voor hoogvenen in Nederland?

Natte heiden

Natte heideterreinen zijn beter bestand tegen het wegzakken van de grondwaterstand gedurende de zomer, maar ook deze ecosystemen zullen het moeilijk krijgen door de drogere zomers, vooral onder scenario W+. In combinatie met een hogere bodemtemperatuur, is een verhoogde mineralisatie van de opgebouwde organische stof te verwachten. De drogere zomers zullen vooral nadelige gevolgen hebben voor de veenmosrijke natte heiden, die een overgang vormen naar hoogveen.

Vennen

Op basis van langjarige monitoring (Van Dam & Mertens, 2008) is geconcludeerd dat de chemische toestand van vennen in Nederlandse natuurgebieden sterk is verbeterd door de afname in verzuring. Ook de toegenomen hoeveelheid neerslag in de laatste decennia hebben een positief effect (verhoogde denitrificatie en sulfaatreductie). De verbetering heeft nog niet geleid tot een zichtbaar positief effect op de vegetatie.

Helaas is de verwachting dat een toename van de frequentie van droge en hete zomers zal zorgen voor een snelle mineralisatie van in de bodem opgeslagen (zwavel)verbindingen, wat onder andere tot verzuring zal leiden. Puur door regenwater gevoede vennen zijn kwetsbaar voor extreme droogte. Regelmatige opdroging zal op termijn schade betekenen voor de aquatische organismen. Vennen die tevens gevoed worden door kwelwater zullen minder kwetsbaar zijn, vooral als het kwelwater afkomstig is uit een groot intrekgebied zodat de aanvoer het hele jaar gewaarborgd is. Vooral onder het W+ scenario zullen de meeste vennen echter, verwachten we, zware klappen oplopen door de toegenomen waterstanddynamiek en meer droogval. Het verhoogde CO₂-gehalte in de atmosfeer zal vooral in niet gebufferde vennen mogelijk leiden tot verzuring en in vennen waar koolstof een limiterende voedingstof is, tot een hogere biomassa-productie. Een soort als Knolrus zou daarvan kunnen profiteren.

3.2.3 Door kwel en oppervlaktewater gevoede terrestrische systemen

De lagere delen van ons land worden gevoed door kwelwater en/of door oppervlaktewater. Er is een directe relatie met de hiervoor besproken gebieden. Door terugkoppeling van de vegetatie op het klimaat (§ 2.3) zal de werkelijke verdamping op de hogere zandgronden minder stijgen dan de door het KNMI berekende potentiële verdamping en in sommige gevallen mogelijk zelfs dalen, ondanks de hogere temperaturen. Het gevolg is vermoedelijk dat de grondwateraanvulling zelfs onder scenario W+ stijgt en dus ook de kwel naar de lager gelegen gebieden. Naarmate deze gebieden meer kwelwater ontvangen hoeven ze minder systeemvreemd water aan te voeren, mocht dat mogelijk zijn.

Beekdalen

In natte grondwatergevoede schraalgraslanden (Figuur 3-3) verwachten we in de meeste gevallen geen effecten of positieve effecten, omdat de grondwateraanvulling in het voedende infiltratiegebied in beide scenario's gelijk blijft en mogelijk zelfs toeneemt. De nattere winters leiden bovendien tot hogere grondwaterstanden in het winterseizoen, wat de afvoer van regenwater over het oppervlak bevordert zodat de gewenste invloed van kwelwater in de wortelzone toeneemt (o.a. Schot et al., 2004). Een nadelig effect van vooral het W+ scenario kan zijn dat de grondwaterstand in de zomer te diep wegzakt. In combinatie met een verhoogde temperatuur zal dat leiden tot een verhoogde afbraak van organisch materiaal, waardoor schraallanden uiteindelijk verruigen. Zoals in § 2.3 aangegeven, hebben we echter twijfels bij de hydrologische uitkomsten voor beekdalen: er is alle reden om aan te nemen dat de GLG hier te laag is berekend (en het vochttekort te hoog). We verwachten daarom dat, op kleine grondwatersystemen na, de grondwaterstanden hoog blijven en geen vochttekorten zullen optreden. Dit is conform de modelstudie van Van Walsum et al. (2002). Ook qua soortensamenstelling zullen de veranderingen waarschijnlijk beperkt zijn. Van Walsum et al. (2002) laten zien dat de beekdalgraslanden in het referentiegebied in Frankrijk qua soortensamenstelling goed vergelijkbaar met de huidige beekdalgraslanden in Nederland. Voornaamste verschillen zijn het voorkomen van een aantal warmteminnende zuidelijke schermbloemen (*Oenanthe*, *Silaum*, *Carum*) en het ontbreken van een aantal zeggenssoorten. Anders dan in de heidegebieden zal de verspreiding van soorten hier vermoedelijk geen probleem vormen omdat ze zich via water kunnen verspreiden. Bij een aantal



Figuur 3-3. Natte kwelgevoede schraallanden zouden kunnen profiteren van klimaatverandering, mits inundatie met verontreinigd beekwater achterwege blijft.

zuidelijke soorten is nu al sprake van (her)vestiging in Nederland, zoals de Weidkervel (*Silaum silaus*) die zich op diverse plekken langs de grote rivieren heeft gevestigd.

Tegenover deze positieve ontwikkeling staan mogelijk negatieve effecten van frequentere overstromingen in midden- en benedenlopen. Aangezien het oppervlaktewater en het meegevoerde slib nog verrijkt c.q. vervuild zijn met nutriënten en zware metalen, kan dit leiden tot een uitbreiding van natte, tamelijk voedselrijke, hoog productieve beekdalecosystemen (grote zeggen, ruigtes en broekbos) ten koste van de waardevolle schraalgraslanden.

Duinvalleien

Het effect van klimaatverandering op de duinen is onlangs zo goed mogelijk geschat (Kamps et al., 2008; Witte et al., 2008), waarbij rekening is gehouden met de terugkoppeling van de vegetatie op het klimaat en met stijging van de zeespiegel. De kwel naar de duinvalleien zal, met de toename van de grondwateraanvulling, gemiddeld iets gaan stijgen. Ook zal de voorjaargrondwaterstand stijgen, in 2050 met hooguit enkele decimeters. Of klimaatverandering gunstig uitpakt voor natte duinvalleivegetaties, hangt vooral af van de grootte van het gebied dat de vallei voedt en dus van de grootte en de dynamiek van de kwelflux. Voor grotere systemen, is de verwachting, zal klimaatverandering gunstig uitpakken, mits overtollig oppervlaktewater kan worden afgevoerd, bijvoorbeeld via duinrellen of een systeem van greppeltjes en sloten. Een hogere kwelflux in combinatie met een hogere potentiële verdamping zal zorgen voor meer invloed van baserijk grondwater in het wortelmilieu. Is het systeem te klein, en de intensiteit van de kwel in de zomer te laag, dan zal de grondwaterstand in de zomer diep weg kunnen zakken, wat fataal zal zijn voor karakteristieke en beschermde plantensoorten als Moeraswespenorchis en Teer guichelheil. Kleine systemen komen onder andere voor als schijngrondwater op door duinzand overstoven slechtdoorlatende veenlagen.

Een kleine toename van de grondwateraanvulling zal er eerst voor zorgen dat lokale grondwaterstromingstelsels, zoals van een lokaal duin naar een aangrenzend vallei, veranderen. Deze lokale stelsels zijn gesuperponeerd op de grote zoetwaterbel onder het gehele duinmassief. Dit grote systeem reageert zeer traag op veranderingen. Op de lange termijn (denk aan meer dan een eeuw; Vernooij, 2005) zal er een nieuw evenwicht ontstaan tussen de opbolling van de grondwaterspiegel en de diepte van de zoetwaterbel, het grensvlak tussen zoet en zout grondwater. Hoe lang het duurt voordat dit is bereikt hangt af van de grootte van de zoetwaterbel onder het duin, de grondwateraanvulling en de aanwezigheid van weerstandbiedende lagen. Op termijn kan een kleine toename in de aanvulling echter zorgen voor een aanzienlijke stijging van de gemiddelde grondwaterstand in de duinen. Duinvalleien zonder afvoerstelsel voor oppervlaktewater zouden dan kunnen veranderen in permanente plassen.

Laagvenen

In *laagveenmoerassen* (Figuur 2-10), zoals de Weerribben, de Ankeveense plassen en de Nieuwkoopse plassen, is nauwelijks een toename in de dynamiek van de waterspiegel te verwachten doordat deze systemen worden gevoed door oppervlaktewater en/of kwelwater, en grotendeels bestaan uit drijvende kraggen en drijftillen en uit smalle legakkers. Voor gebieden die gevoed worden door kwelwater pakt klimaatverandering misschien gunstig uit, wanneer althans, zoals we verwachten, de kwelstroom toe gaat nemen. Die toename moet dan wel het toegenomen verdampingsoverschot in het laagveenmoeras overtreffen, en het is de vraag waar dat onder scenario W+ gaat gebeuren; een gedetailleerde hydrologische modellering kan hier mogelijk meer inzicht in geven. Voor gebieden die sterk afhankelijk zijn van de aanvoer van oppervlaktewater, verwachten we een verslechtering van de waterkwaliteit omdat de hoeveelheid water die wordt ingelaten zal toenemen, vooral in uitzonderlijk droge jaren. De hogere temperaturen hebben gevolgen voor het zuurstofgehalte in het oppervlaktewater. In combinatie met versterkte microbiële afbraakprocessen kan dit leiden tot zuurstofloosheid en vissterfte. De primaire productie zal als gevolg van de hogere temperatuur, en het hogere sulfaat- en nutriëntgehalten toenemen. Sommige laagvenen, zoals Bothol en de Nieuwkoopse plassen, zullen waarschijnlijk meer onder invloed komen te staan van brak water. Dat is niet alleen een gevolg van klimaatverandering (lagere rivierafvoeren, meer brakke kwel door hoger zeepeil), maar ook van een ontwikkeling die al eeuwen gaande is: de toestroming van brak en zout grondwater, deels fossiel, naar de afvoerputten van Laag Nederland, de diepe polders en droogmakerijen (Kooiman et al., 2005).

In het *veenweidegebied* verwachten we vooral negatieve effecten van klimaatverandering. De percelen zijn ten behoeve van de landbouw enigszins ontwaterd, wat heeft geleid tot mineralisatie en zetting van het veen. Daardoor is de drainageweerstand toegenomen en kan de grondwaterspiegel 's in het midden van het perceel zomers ver uitzakken, wat vooral in wegzijgebieden leidt tot holle percelen ('pannige percelen'; Figuur 3-4). 's Winters is de grondwaterspiegel juist in het midden van het perceel het hoogst, zodat dit gedeelte onder water kan komen te staan. Vaak heeft men daar weer een greppeltje gegraven om het water in de winter kwijt te raken. De drogere zomers zullen, in combinatie met de hogere temperatuur, leiden tot een versterking van de veenafbraak. Meer systeemvreemd water is nodig om deze veengebieden op peil te houden.

3.2.4 Oppervlaktewateren

Hoewel het niet tot zone opdracht behoort, willen we hier in het kort ook onze gedachten laten gaan over mogelijke effecten van klimaatverandering op enkele oppervlaktewateren. Vennen zijn eerder aan de orde gekomen (§ 3.2.2); hier laten we ons uit over beken, sloten en meren. Omdat de waarde van deze systemen in sterke mate ook bepaald wordt door van in het water levende diersoorten, betrekken we ook de fauna in de bespreking.



Figuur 3-4. Luchtfoto van enkele 'pannige' percelen, met tussen de sloten greppels. Bron: GoogleEarth.

Beken en sprengen

Sprengbeken langs de Veluwe (Figuur 3-5) kunnen mogelijk profiteren van het veranderend klimaat, wegens de hogere grondwateraanvulling op de Veluwe. Daardoor zullen minder beektrajecten droogvallen, en de afvoeren gaan toenemen. Of deze gunstige werking van klimaatverandering ook geldt voor andere beken die ontspringen onderaan een heuvel (duinrellen, beken langs de Utrechtse heuvelrug) durven we niet te zeggen. De achterliggende grondwatersystemen zijn kleiner en dus reageren ze sneller op seizoensfluctuaties en fluctuaties tussen de jaren in weersgesteldheid.

Vooral beektrajecten met een beperkte afvoer die verzorgd wordt door een goed doorlatend watervoerend pakket, zijn kwetsbaarder voor droogte. Te denken valt aan de Renkumse beek. Afname van de afvoer in de zomer (met vaker optreden van droogval in de bovenlopen) en een stijging van de watertemperatuur, mogen worden verwacht.

Wat lager gelegen beektrajecten (voorbeeld: Dommel), krijgen hoogst waarschijnlijk in de toekomst in toenemende mate te maken met een hogere afvoer en extreme piekafvoeren in de winter.

Volgens Alterra (Besse-Lototskaya et al., 2007) zijn veranderingen te verwachten in de faunistische soortensamenstelling van beken, met een toename van zuidelijke soorten. Sommige huidige soorten zijn kwetsbaar en kunnen mogelijk verdwijnen (Steenvliegen, Vedermpjes). Minder kwetsbare soorten zijn Kevers, Eendagsvliegen, Libellen en Kokerjuffers. Deze zullen zich zelf mogelijk gaan uitbreiden. Menselijke ingrepen op bekecosystemen zijn overigens van grote invloed. Verwacht wordt dat de vele beekherstelprojecten een positief effect zullen hebben op het leven in de beek.

Sloten

Door Wetterskip Fryslan is een overzicht gemaakt van de effecten van klimaatverandering op de waterkwaliteit van sloten (Loeve et al., 2006). Hieronder staat een aantal mogelijke effecten:

- Een versterkte kwelflux naar de waterlopen in kwelgebieden. Het ecologisch effect is afhankelijk van grondwatertype (brak of zoet).
- Bij extreem natte condities: een verslechtering van de waterkwaliteit door riooloverstorten (nutriënten) en een toename van oppervlakkige afvoer (nutriënten, zware metalen).
- Bij extreem droge condities: een verslechtering van de waterkwaliteit door indamping (hogere concentraties in regionaal watersysteem).
- Bij hogere temperaturen (vooral 's zomers): algenbloei, zuurstoftekort met als gevolg een afname



Figuur 3-5. Ansichtkaart van rond 1900, weergevend een Romantisch grothuisje in een sprengbeek. De afvoer op deze locatie bedraagt tegenwoordig ongeveer 5 l/s, terwijl deze prent een veelvoud daarvan laat zien. Zullen door klimaatverandering oude tijden gaan herleven?



Figuur 3-6. Klimaatverandering is waarschijnlijk bedreigend voor deze sloot met Krabbescheer en Drijvend fonteinkruid, beide echte zoetwatersoorten.

van waterplanten, vissterfte en een verandering in de samenstelling van de vispopulatie.

- In stilstaande wateren: een verhoogde kans op botulisme (vis- en vogelsterfte, gezondheidsrisico's).
- In niet geïsoleerde wateren: een toename van de inlaat van systeemvreemd water, vooral in de zomer. Het ecologisch effect is afhankelijk van de chemische samenstelling van het inlaatwater.
- In geïsoleerde wateren: een verhoogd risico op droogval.
- In veel watergangen: door een versnelde groei van waterplanten is een intensiever beheer en onderhoud vereist.
- Een verschuivingen in soortensamenstelling (binnen het voedselweb).
- Opkomst van exoten en plaagsoorten.

Zeespiegelstijging zal nabij de kust een vernattend en mogelijk ook verziltend effect hebben. De verzilting zal in eerste instantie doorwerken via de regionale wateren (sloten, inlagen). Door interne eutrofiëring, bijvoorbeeld via wellen in droogmakerijen, maar ook door diffuse kwel, zal de zoutlast op het oppervlaktewater toenemen.

In de droogtestudie is al gemeld dat vooral de kleine, geïsoleerde watersystemen kwetsbaar zullen zijn voor droogte. Ondiepe sloten met kleine watervolumes warmen snel op. Daarnaast zullen concentraties van diverse stoffen toenemen door indamping. Verlanding en uitdroging zullen naar verwachting vaker optreden.

Meren en plassen

De hogere temperatuur zorgt er voor dat het oppervlaktewater gevoeliger wordt voor voedingstoffen en daarmee samenhangende algengroei. Het water zal bij eenzelfde gehalte aan voedingstoffen sneller troebel worden doordat algen sneller groeien. Een vervroegde bloei van diatomeeën ten gevolge van een hogere watertemperatuur en relatief hoge nutriëntenconcentraties in het vroege voorjaar is al waargenomen in de Friese meren. Daarnaast was er ook sprake van verlenging van het groeiseizoen voor blauwalgen, die het fytoplankton domineren bij een hogere temperatuur. Dergelijke aanwijzingen komen ook uit het EU SWALE-project (SWALE = Shallow Wetland lake function and restoration in a changing European environment).

De ecologie van ondiepe meren wordt hoofdzakelijk bepaald door het voedselweb. Daarbij zijn twee alternatieve stabiele toestanden te onderscheiden, afhankelijk van de P-belasting en systeemkenmerken zoals diepte, verblijftijd en strijklengte die de kritische P-belastingen bepalen. De kritische P-belastingen

zijn de P-belastingen waarbij een helder en plantenrijk watersysteem omslaat naar een troebel en algenrijk watersysteem (kPeu) of andersom (kPoligo). Wanneer klimaatverandering gepaard gaat met extreme buien kan dit leiden tot verhoogde fosfaatuit- en afspoeling. Dit kan het herstel – waarbij getracht wordt om meren naar hun heldere toestand te brengen – frustreren (Rip, 2007).

De verhoging van het CO₂-gehalte in de atmosfeer (van 280 ppm ca. 150 jaar geleden, naar meer dan 360 ppm nu, en in 2100 mogelijk 700 ppm) leidt ook tot een verhoogde opname van CO₂ vanuit de atmosfeer door het water van meren. Volgens de website van het NIOO kan de stijging van het CO₂-gehalte in de atmosfeer van invloed zijn op de giftigheid van blauwalgen. Daarnaast is op basis van de literatuur nog een aantal effecten te noemen:

- Een versterkte verticale stratificatie van aquatische ecosystemen als gevolg van de temperatuurstijging waardoor de toevoer van nutriënten naar de bovenste (meng-)laag van het water stagneert.
- Problemen in de fenologische afstemming (timing) van de relaties binnen een voedselweb.
- Meer en ernstiger epidemieën van botulisme onder watervogels.
- Een verdere instroom van invasieve soorten uit het Ponto-Kaspische gebied.
- Een stabilisering van troebele watersystemen gedomineerd door zwevende algen (fytoplankton), waardoor pogingen om meer natuurlijke systemen te herstellen, minder effect hebben.
- Een destabilisering van meer natuurlijke meren met helder water en veel hogere planten (macrofyten), vermindering van daaraan gekoppelde biodiversiteit.

4 Conclusies en aanbevelingen

Klimaatverandering zal vooral gevolgen hebben voor vegetaties die voor hun watervoorziening geheel zijn aangewezen op de atmosfeer. Grondwateronafhankelijke vegetaties op hogere zandgronden – zoals stuwwallen, duinen en hogere dekzandruggen – zullen vooral onder scenario W+ te maken krijgen met grote vochttekorten, wat leidt tot een opener vegetatie en een toename van het aandeel vroege bloeiers en soorten die in zomerslaap gaan. Verschillende boomsoorten zullen de grotere droogte niet overleven. In beide scenario's zal het aantal wintergroene soorten in bossen toenemen en zal er sprake zijn van een verhoogd risico op bosbranden. Er zijn ook natte ecosystemen die alleen, of vrijwel alleen, door regenwater worden gevoed. Door de toegenomen dynamiek zullen karakteristieke vegetaties van hoogvenen, vennen en natte heiden het steeds moeilijker krijgen. De ontwikkeling van levend hoogveen in Nederland is onder scenario W+ waarschijnlijk kritiek.

De kwel naar lage gebieden als beekdalen, duinvalleien en de randen van grote infiltratiegebieden zal toenemen onder het relatief natte scenario W. Dat gebeurt mogelijk ook onder het droge scenario W+. Dat komt doordat de bodem in hoger gelegen infiltratiegebieden in dit scenario 's zomers zo ver uitdroogt, dat de werkelijke verdamping door de vegetatie sterk wordt gereduceerd en, dientengevolge, de jaarlijkse grondwateraanvulling stijgt. De kweltoename is gunstig voor de biodiversiteit van sprengen, beken, natte duinvalleien en door kwelwater gevoede schraallanden, zoals die voorkomen in het laagveenmoeras net aan de westelijke voet van de Utrechtse heuvelrug. Daar staat bij scenario W+ een ongunstige verandering tegenover, namelijk dat als de kweltoename onvoldoende is, de grondwaterstand in de loop van de drogere zomer dieper kan wegzakken (onder scenario W verandert de laagste grondwaterstand nauwelijks). Voor een dergelijk kweltoename moet het infiltratiegebied voldoende groot zijn. De toename van kwel onder W+ is echter hoogst onzeker omdat de toekomstige verdampingseigenschappen van de vegetatie in het voedende infiltratiegebied nu nog niet bekend zijn. Benedenlopen van beken krijgen vaker te maken met overstromingen, wat bij de huidige kwaliteit van het beekwater waarschijnlijk niet gunstig is voor de beoogde vegetaties.

De waterkwaliteit van sloten en meren zal vermoedelijk achteruitgaan doordat in de zomer de watertemperatuur stijgt, de peilen dalen en de verzilting en de invloed van sulfaatrijk water uit de grote rivieren toenemen. Laagveenmoerassen, zoals de Nieuwkoopse plassen en de Weerribben, waaruit veel water wegzijgt naar een diep ontwaterde omgeving, zullen zonder aanvullende maatregelen (denk aan een ander peilbeheer) in de zomer meer oppervlaktewater moeten aanvoeren. Door de slechtere kwaliteit van dit oppervlaktewater, moet voor een achteruitgang van de biodiversiteit worden gevreesd. Dat geldt ook voor de biodiversiteit van het veenweidegebied, niet alleen wegens de grotere invloed van kwalitatief slecht oppervlaktewater, maar ook doordat een lagere grondwaterstand en een hogere temperatuur in de zomer zullen leiden tot een versnelde afbraak van het veen.

Bovenstaande conclusies zijn gebaseerd op; (1) een kwantitatieve analyse, waarin de uitkomsten van een landelijk hydrologisch model werden vergeleken met het voorkomen van natuurdoelen, (2) op literatuuronderzoek en (3) op proceskennis. Vooral de conclusies over de effecten van klimaatverandering op de vegetatie en over de verandering in de grondwateraanvulling en kwel onder scenario W+, zijn met zeer grote onzekerheden omgeven (zie ook Van Bodegom et al., 2009). Op basis van deze studie doen we daarom de volgende aanbevelingen voor onderzoek:

1. Als iets in deze studie duidelijk is gemaakt, dan is dat de noodzaak van een ruimtelijk gedetailleerd en nauwkeurig hydrologisch model. Het PAWN-instrumentarium, hoe goed het ook moge zijn voor tal van toepassingen, is onvoldoende toegesneden op natuurdoelen: de ruimtelijke resolutie is te grof en grondwaterstanden worden in natuurgebieden systematisch te laag berekend. Wij ondersteunen daarom van harte de bouw van meer gedetailleerde hydrologische modellen, zoals het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium (NHI), en de ontwikkeling van slimme technieken om hydrologische uitkomsten ruimtelijk neer te schalen (zie o.a. Hoogewoud & Van Ek, 2002).

2. Het NHI, maar dit geldt eigenlijk voor alle hydrologische modellen, is in de huidige opzet niet klimaatbestendig. In hydrologische modellen wordt de verdamping, en dus de grondwateraanvulling, bepaald aan de hand van gewasfactoren en interceptiecoëfficiënten waarvan men zich mag afvragen of ze wel gelden onder een ander klimaat. Vaak zijn deze factoren op basis van zachte cijfers en expertkennis geschat, in ieder geval voor natuur- en bosgebieden. Gezien de grote invloed van een andere neerslagverdeling op de interceptieverdamping, wordt het zaak de interceptieterm goed te modelleren. Bovendien dient men er mee rekening te houden dat verdampingskarakteristieken zullen veranderen onder een veranderend klimaat. De transpiratie dient bijvoorbeeld afhankelijk te worden gemaakt van de atmosferische CO₂-concentratie. Voorts dient er onderzoek te worden gedaan naar de gevolgen van droogte op het aandeel kale grond en weinig verdampende mossen en korstmossen op hogere zandgronden. Dit is niet alleen relevant voor de bouw van een klimaatbestendig hydrologisch model, maar ook voor de bepaling van de biodiversiteit op hogere zandgronden.
3. De invloed van baserijk kwelwater in de wortelzone kan cruciaal zijn voor sommige natuurdoelen. Daar houden modellen nu te weinig rekening mee. Veelal is de kwelflux een verticaal, naar boven gerichte flux door een slecht doorlatende laag. Of dit kwelwater ook daadwerkelijk de wortelzone beïnvloedt kunnen de huidige hydrologische modellen niet aangeven. Voor ecohydrologische toepassingen is het wenselijk dat hydrologische modellen ook het voorkomen van regenwaterlenzen kunnen simuleren (kortom, wat gebeurt er in de wortelzone in relatie tot waterkwaliteit?). Daarnaast is ook de herkomst van kwelwater relevant. Gaat het om ondiepe snel reagerende systemen of diepe trage geohydrologische systemen? Door welke pakketten stroomt het grondwater, welke hydrochemische processen zijn relevant, en wat voor effect heeft dit op de (grond)waterkwaliteit? Voor de ecologie is dit allemaal van belang, maar kan dit nog onvoldoende in beeld worden gebracht met de huidige hydrologische modellen, zeker op landelijke schaal.
4. Het toekomstige klimaat kent waarschijnlijk meer variatie in weersgesteldheid tussen de jaren. Langzaam reagerende grondwatersystemen, zoals onder een stuwwal, kunnen niet aan de hand van één jaar worden getypeerd. Om dus de verschillen tussen de jaren en de langzaam reagerende systemen goed te typeren, dient een reeks van vele jaren (liefst 30 jaar; Bartholomeus et al., 2008a) te worden doorgerekend.
5. Ecologische modellen voor de effecten van de waterhuishouding op de natuur (DEMNET, ICHORS, MOVE, NICHE, etc.) zijn onbruikbaar in een nieuw klimaat doordat ze gebaseerd zijn op zeer indirecte verbanden, ontleend aan het klimaat van de twintigste eeuw, waarin niet het klimaat is verwerkt. Een voorbeeld is de relatie tussen gemiddelde grondwaterstanden en de vegetatie in de vorm van indicatiewaarden of responscurven. Deze zullen hun betekenis verliezen:
 - Vaak wordt gerekend met de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG), berekend voor 1 april, als maat voor zuurstofstress. Planten hebben echter niets met een door de mensen geconstrueerde kalender te maken; bij planten gaat het er bijvoorbeeld om of er voldoende warme dagen zijn verstreken om te gaan kiemen.
 - Een minstens zo belangrijke tekortkoming ligt in de indirecte wisselwerking tussen grondwaterstand en vegetatie, waardoor deze verbanden verre van klimaatbestendig zijn. De grondwaterstand is een zeer indirecte maat voor datgene waar het de planten om gaat: de beschikbaarheid in het wortelmilieu van voldoende zuurstof om te respireren en van voldoende vocht om te assimileren. Bij een ander klimaat verandert deze beschikbaarheid, zelfs als de grondwaterstand hetzelfde zou blijven. Zo zullen warmere zomers met meer onweersbuien vaker leiden tot het optreden van zuurstofstress (Bartholomeus et al. 2008b), wat aanzienlijke gevolgen kan hebben voor de natuur (Bartholomeus et al., submitted). Met bestaande ecohydrologische modellen kunnen deze gevolgen niet worden voorspeld.
 - Het is de verwachting dat in een toekomstig klimaat extremen in droogte en natheid zullen toenemen. Een relatie tussen water en vegetatie zou de invloed van extremen in ogenschouw moeten nemen. Relevant is ook de sequentie waarin extremen optreden. Zo mag verwacht worden dat binnen een 30 jarige periode, 3 á 5 keer een extreem droge zomer op rij een

grotere invloed heeft op de vegetatie dan wanneer die extremen meer verspreid optreden gedurende die 30 jaar. Er is dan namelijk minder kans op tussentijds herstel van ecosystemen en een grotere kans op mortaliteit. Relevante vraag hierbij is of we wel de ecologische kennis om deze effecten goed in beeld te kunnen brengen. Vooralsnog veronderstellen we dat de combinatie van hogere temperaturen met droogtestress een versterkende factor betekent (verslechtering) voor niet aan droogte aangepaste vegetatie.

Al met al dienen we onze modellen te baseren op grootheden die direct inwerken op de vegetatie en die door het klimaat kunnen worden beïnvloed. Goede voorbeelden zijn het vochttekort en zuurstofstress, ter vervanging van achtereenvolgens de *GLG* en *GVG*. Vochttekort en zuurstofstress hangen af van de grondwaterstand, maar ook van neerslag, verdamping, bodemfysische eigenschappen, planteigenschappen en bodemtemperatuur. Beide grootheden lijken daarom redelijk klimaatbestendig. Het zal nog veel meetwerk en nader onderzoek vergen deze grootheden op een verantwoorde manier te wegen in de tijd, zodat de effecten van extreme jaren zwaarder meetellen dan nu het geval is bij de bepaling van de rekenkundig gemiddeld bepaalde grootheden *GLG* en *GVG*.

In het BSIK-project *A1 Biodiversity in a changing environment: predicting spatio-temporal dynamics of vegetation*, waarin KWR, VU, PBL en WUR participeren, is een goede aanzet gemaakt voor een klimaatbestendig ecohydrologisch model.

6. Vochttekort is dus een belangrijke hydrologische en vermoedelijk ook klimaatbestendige grootheid waaraan de effecten van klimaatverandering kunnen worden beoordeeld. Deze grootheid is in deze studie berekend op een manier die moeilijk ecologisch te interpreteren is. We bevelen daarom aan het vochttekort te baseren op een standaardgrasland, zoals beschreven in Van Dam (2000). Uit onze studie bleek dat grote vochttekorten en daardoor veroorzaakte effecten op de vegetatie zijn te verwachten in ecosystemen die buiten de invloedssfeer van het grondwater voorkomen. Voor deze systemen kan eenvoudig alsnog het vochttekort op de juiste manier worden berekend met een model als SWAP (Van Dam, 2000). Dit is een actie die weinig inspanning hoeft te kosten.
7. Een zware dobber wordt het rekening houden met de successie van het systeem van bodem, water en vegetatie in een veranderend klimaat. Veranderingen in waterhuishouding, temperatuur en CO₂-concentratie kunnen leiden tot een andere beschikbaarheid van macronutriënten N, P en K en in een verschuiving in het nutriënt dat limiterend is voor de vegetatie. Verschuivingen in waterbalans en biomassaproductie kunnen een verdere versterking of juist verzwakking krijgen door het samenspel van positieve of negatieve terugkoppelingen tussen biomassa, bodem en waterhuishouding. Hierdoor zullen bodemfysische (bijvoorbeeld doorlatendheidskarakteristiek en pF-curve) en vegetatie-eigenschappen (zoals LAI) versneld kunnen veranderen met als gevolg verdere effecten op de waterbalans en biomassaproductie. Een goede (semi-)dynamische simulatie van vegetatie, waterhuishouding en nutriëntenhuishouding met deze terugkoppelingen is dus nodig.

In welke richting het klimaat gaat veranderen is nog zeer onzeker. Bovendien, zo blijkt uit deze studie, is het voorspellen van de hydrologische en ecologische gevolgen van klimaatverandering met minstens zo grote onzekerheden omgeven. Uit deze studie mogen dus beslist geen conclusies worden getrokken die vergaande consequenties kunnen hebben, zoals het opgeven van bepaalde natuurdoelen omdat die toch niet meer haalbaar zouden zijn. Wel kan alvast op de mogelijke negatieve gevolgen van klimaatverandering worden geanticipeerd met het nemen van een aantal maatregelen. Verdroging van natte heiden en vennen kan onder andere worden bestreden door het omzetten van veel verdampend donker naaldhout in loofbos, grasland of hei, en door het afdammen van greppels, voor zover die nog aanwezig zijn. Externe maatregelen zijn bijvoorbeeld het aanleggen van hydrologische bufferzones, het opzetten van peilen in landbouwgebieden, een beregeningsverbod in droge tijden en het verplaatsen of sluiten van grondwaterwinningen. Vergroten van de oppervlakte van aaneengesloten natuurterrein maakt het eenvoudiger een hoog grond- en oppervlaktewaterpeil ten opzichte van de omgeving te handhaven. Bovendien biedt oppervlaktevergroting soorten de mogelijkheid te migreren naar locaties die in de toekomst gunstige groeiomstandigheden bieden. In peilbeheerste gebieden, zoals laagvenen, kan een flexibeler peilbeheer aanzienlijk helpen om de aanvoer van oppervlaktewater van een slechte

kwaliteit zo lang mogelijk buiten de deur te houden. De inlaatbehoefte van laagvenen kan voorts worden verminderd door de wegzijging te reduceren via een aantal externe maatregelen: het onder water zetten van aangrenzende diepe polders, het verplaatsen van grondwaterwinningen en het bevorderen van de grondwateraanvulling in infiltratiegebieden, zoals de Utrechtse heuvelrug.

Al deze maatregelen zijn gericht op de bestrijding van de verdroging, en als zodanig niet nieuw. Ze zijn van groot belang als scenario W+ bewaarheid wordt, en mogelijk van belang onder scenario W, dat op jaarbasis weliswaar natter is dan het huidige klimaat, maar dat een iets drogere zomer kent en, net als scenario W+, meer meteorologische variatie tussen de jaren. Klimaatverandering zou al met al een stimulans moeten zijn het anti-verdrogingbeleid met grotere voortvarendheid uit te voeren.

5 Literatuur

- Bal, D., H.M. Beije, M. Felliger, R. Haveman, A.J.F.M. van Opstal & F.J. van Zadelhoff, 2001. *Handboek natuurdoeltypen*. Rapport Expertisecentrum LNV 2001/020, Wageningen.
- Bañuelos, M.J., J. Kollman, P. Hartvig & M. Quevedo, 2004. Modelling the distribution of *Ilex aquifolium* at the north-eastern edge of its geographical range. *Nordic Journal of Botany* 23: 1-14.
- Bartholomeus, R.P., J.P.M. Witte, P.M. van Bodegom & R. Aerts, 2008. The need of data harmonization to derive robust empirical relationships between soil conditions and vegetation. *Journal of Vegetation Science* 19: 799-808.
- Bartholomeus, R.P., J.P.M. Witte, P.M. van Bodegom, J.C. van Dam & R. Aerts, 2008. Critical soil conditions for oxygen stress to plant roots: substituting the Feddes-function by a process-based model. *Journal of Hydrology* 360: 147-165.
- Bartholomeus, R.P., J.P.M. Witte, P.M. van Bodegom, J.C. van Dam & R. Aerts, submitted. Towards a climate-proof relationship between soil moisture conditions and vegetation composition. *Global Change Biology*.
- Bazzaz, F.A., S.L. Bassow, G.M. Berntson & S.C. Thomas, 1996. Elevated CO₂ and terrestrial vegetation: Implications for and beyond the global carbon budget. In: B. Walker & W. Steffen (eds.), *Global Change and Terrestrial Ecosystems*, p. 43-76. Cambridge University Press.
- Besse-Lototskaya, A., R.C.M. Verdonschot, P.F.M. Verdonschot & J. Klostermann, 2007. *Doorwerking klimaatverandering in KRW-keuzen: casus beken en beekdalen*. Alterra rapport 1536, Wageningen.
- Beersma, J.J., T. A. Buishand & Hendrik Buiteveld, 2005. *Droog, droger, droogst. KNMI/RIZA-bijdrage aan de tweede fase van de Droogtestudie Nederland*. KNMI 199-I I, ISBN 90-369-2260-7, Bilthoven.
- Casparie W.A. & J.G. Streefkerk, 1992. Climatological, stratigraphic and palaeo-ecological aspects of mire development. In: J.T.A. Verhoeven (ed.), *Fens and bogs in the Netherlands; vegetation, history, nutrient dynamics and conservation*, Kluwer, Dordrecht/Boston/London, pp. 81-129.
- Clarke D., & Sanitwong Na Ayuttaya, S., 2008. Predicted effects of climate change and sea level rise on water table levels and dune slack habitats. *Proceedings Changing Perspectives in Coast Dune Mangement*, Liverpool 31/3-3/4, 2008.
- Hermans, F., J. Otte & J. van Bakel, 2009. Regionale hydrologische modellering ter onderbouwing van klimaat-effecten. *H₂O* 4: 28-32.
- Hoogewoud, J.C. & R. van Ek, R., 2002. *Regionale standplaatsmodellering voor terrestrische vegetatie: naar een generieke methode voor het neerschalen van hydrologische modeluitkomsten ten behoeve van ecohydrologische toepassingen*. Riza rapport 2002.035, Lelystad.
- Hoogland, T., 2009. *Neerschaling van enkele PAWN modelresultaten*. Notitie Alterra, Wageningen.
- Jansen, P.C., J. Runhaar, J.P.M. Witte & J.C. van Dam, 2000. *Vochtindicatie van grasvegetaties in relatie tot de vochttoestand van de bodem*. Alterra-rapport 57. Alterra, Wageningen.
- Kamps, P.W.J.T, G. Nienhuis & J.P.M. Witte, 2008. *Effects of climate change on the water table in the coastal dunes of the Amsterdam Water Supply*. Proceedings MODFLOW 2008.
- Kooiman, J.W., B. van der Wateren, K. Maas, J.P.M. Witte, G. Cirkel, J. Grijpstra, F. Schaars, G. Oude Essink & J. Stroom, 2005. *Het zout der aarde: eindrapport. Kwantificering van de huidige en toekomstige (2050) knelpunten verzilting voor Rijnland*. Kiwa-rapport KWR 04.048, Nieuwegein.
- Kruijt, B., J.P.M. Witte, C. Jacobs & T. Kroon, 2008. Effects of rising atmospheric CO₂ on evapotranspiration and soil moisture: a practical approach for the Netherlands. *Journal of Hydrology* 349: 257-267.

- Kwadijk, J., A. Jeuken & H. van Waveren, 2008. *De klimaatbestendigheid van Nederland Waterland. Verkenning van knikpunten in beheer en beleid voor het hoofdwatersysteem*. Tussenrapportage technisch achtergrondrapport Klimaatbestendig NL Waterland, 2008, Deltares rapport T2447, Delft.
- Lammers, G.W., A. van Hinsberg, W. Loonen, W. M.J.S.M. Reijnen & M.E. Sanders, 2005. *Optimalisatie Ecologische Hoofdstructuur; ruimte, milieu en watercondities voor duurzaam behoud van biodiversiteit*. MNP rapport 408768003, Bilthoven.
- Lenderink, G., 2008. *Grotere toename lokale neerslag extremen in warmer klimaat*. http://www.knmi.nl/kenniscentrum/neerslag_extremen/index.html.
- Loeve, R., P. Droogers & J. Veraart, 2006. *Klimaatverandering en waterkwaliteit*. FutureWater rapport in opdracht van Wetterskip Fryslân, Wageningen.
- Muller, O., 2005. *Seasonal acclimation to light and temperature in an evergreen understory shrub*. Proefschrift RU, Utrecht.
- Nabuurs G.J. & P. Hommel, 2007. Klimaatverandering en het Nederlandse bos. *Vakblad Natuur, Bos, Landschap* 4(8): 8-12.
- Noest, V., E. van der Maarel & F. van der Meulen, 1995. Impact of climate change on the ecology of temperate coastal wetlands, beaches and dunes. In: D. Eisma (ed.), *Climate Change, Impact on coastal habitation*. Lewis Publishers, Boca Raton.
- Olsthoorn, A.F.M., 1998. *Soil acidification effects on fine root growth of Douglas-fir on sandy soils*. Proefschrift Wageningen Universiteit, Wageningen.
- Pons, L.J., 1992. Holocene peat formation in the lower parts of the Netherlands. In: J.T.A. Verhoeven (ed.), *Fens and bogs in the Netherlands; vegetation, history, nutrient dynamics and conservation*, Kluwer, Dordrecht/Boston/London, pp. 7-79.
- Reijnen, M.J.S.M., H. Kuipers, H. & R. Pouwels, 2007. *Optimalisatie samenhang ecologische hoofdstructuur : ruimtecondities voor duurzaam behoud biodiversiteit diersoorten*. Alterra-rapport 1296, Wageningen. Bilthoven : MNP, (Milieu- en Natuurplanbureau Rapport 408768003) - p. 94.
- Rijkswaterstaat/Riza, 2005. *Watertekortopgave. Eindrapport Droogtestudie Nederland*. RIZA rapport 2005.015, Lelystad.
- Rijkswaterstaat-Waterdienst/Deltares, 2008. *De klimaatbestendigheid van Nederland Waterland; Beleidssamenvatting fase 1. Verkenning van omslagpunten in beheer en beleid voor het hoofdwatersysteem*.
- Rip, W., 2007. *Cyclic state shifts in a restored shallow lake*. PhD thesis, Wageningen University, Wageningen.
- Runhaar, J. & S.M. Hennekens, 2005. *Hydrologische randvoorwaarden natuur versie 2. Gebruikershandleiding bij applicatie Hydrologische Randvoorwaarden Natuur versie 2 die wordt verspreid via de website www.synbiosys.alterra.nl/waternood/*. Alterra, Wageningen.
- Runhaar, J., van Landuyt, W., Groen, C.L.G., Weeda, E.J. & Verloove, F. 2004. Herziening van de indeling in ecologische soortengroepen voor Nederland en Vlaanderen. *Gorteria* 30: 12-26
- Runhaar, J., P.E.V. van Walsum & A.H. Prins, 2002. Effects of climate and land use change on hydrological conditions and species composition in Dutch riverine grasslands (*Calthion*, *Junco-Molinion*). *Ecohydrology & Hydrobiology* 2: 219-226.
- Schelhaas, M.J. & M. Moriondo, 2007. Bosbranden en klimaatverandering. *Vakblad Natuur, Bos, Landschap* 8: 13.
- Schot, P.P., S.C. Dekker & A. Poot, 2004. The dynamic form of rainwater lenses in drained fen. *Journal of Hydrology* 293: 74-84.
- Smolders, A.J.P., H.B.M. Tomassen, H.W. Pijnappel, L.P.M. Lamers, & J.G.M. Roelofs, 2001. Substrate-derived CO₂ is important in the development of *Spagnum* spp. *New Phytologist* 152: 325-332.
- Snepvangers, J. & W. Berendrecht, 2007. *MIPWA – Methodiekontwikkeling voor Interactieve Planvorming ten behoeve van Waterbeheer*. TNO rapport 2007-U-R0972/A, Utrecht.

- Stuurman, R., P. Baggelaar, W. Berendrecht, J. Buma, P. de Louw & G. Oude Essink, 2008. *Toekomst van de Nederlandse grondwateroverraad in relatie tot klimaatverandering*. TNO rapport 2008-U-R0074/B, Utrecht.
- Tamis, W., 2005. *Changes in the flora of the Netherlands in the 20th century*. Proefschrift, Leiden. (tevens *Gorteria* supplement 6).
- 't Lam, N., 2007. De temperatuur stijgt, planten en dieren willen verhuizen. *Duin* 30(1): 4-5.
- Van Beek, E., M. Haasnoot, K.M. Meijer, J.R. Delsman, J.J.J.C. Snepvangers, G. Baarse, R. van Ek, G.F. Prinsen, J.C.J. Kwadijk & J.W. van Zetten, 2008. *Verkenning kosteneffectiviteit van grootschalige maatregelen tegen droogteschade als gevolg van de G+ en W+ klimaatscenario's*. Deltares rapport T2498, Utrecht.
- Van Dam, J.C., 2000. *Field-scale water flow and solute transport – SWAP model concepts, parameter estimation and case studies*. PhD-thesis, Wageningen University, Wageningen.
- Van Dam, H. & A. Mertens, 2008. *Monitoring van vennen 1976-2006: effecten van klimaatverandering en vermindering van verzuring*. Rapport Grontmij/Aquasense, Amsterdam.
- Van Bodegom, P.M., S.C. Dekker, M. Wassen & J.P.M. Witte, 2009. *Geen adaptiestrategie zonder een klimaatbestendige ecohydrologie. Een verkennend onderzoek naar de mogelijkheden om de biodiversiteit in Nederland onder een ander klimaat te voorspellen*. Stichting Kennis voor Klimaat, Utrecht.
- Van den Hurk, B.J.J.M., A.M.G.K. Tank, G. Lenderink, A.P. van Ulden, G.J. van Oldenborgh, C.A. Katsman, H.W. van den Brink, F. Keller, J.J.F. Bessembinder, G. Burgers, G.J. Komen, W. Hazeleger & S.S. Drijfhout, 2006. *KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands*. KNMI publication WR-2006-01. KNMI, De Bilt, Netherlands.
- Van Ek, R., 2008. *PAWN scenario's en neerschaling door Alterra*. Deltares memo dd. 23-12-2008, Utrecht.
- Van Hinsberg, A., B. de Knecht, M. van Esbroek, S. van Tol & J. Wiertz, 2007. *Natuurbeheer, toestand en trends in natuurkwaliteit. Achtergronddocument nr. 4 bij de ecologische evaluatie regelingen voor natuurbeheer: Programma Beheer en Staatsbosbeheer 2000-2006*. MNP Rapport 500410005/2007 Milieu- en Natuurplanbureau, Bilthoven.
- Van Mantgem, P.J., N.L. Stephenson, J.C. Byrne, L.D. Daniels, J.F. Franklin, P.Z. Fulé, M.E. Harmon, A.J. Larson, J.M. Smith, A.H. Taylor & T.T. Veblen, 2009. Widespread Increase of Tree Mortality Rates in the Western United States. *Science* 323: 521.
- Van Oene, H. & F. Berendse, 2001. Predicting responses of ecosystem processes to climate change and nitrogen deposition. In: H. van Oene, W.N. Ellis, M.M.P.D. Heijmans, D. Mauquoy, W.L.M. Tamis, A.J.H. van Vliet, F. Berendse, B. van Geel, R. van der Meijden & S.A. Ulenberg (eds), *Long-term effects of climate change on biodiversity and ecosystem processes*. Dutch National Research Programme on Global Air Pollution and Climate Change, Bilthoven.
- Van Walsum, P.E.V., P.F.M. Verdonschot & J. Runhaar, 2002. *Effects of climate and land-use change on lowland stream ecosystems*. Report 523, Alterra, Wageningen.
- Vermulst, J.A.P.H., T. Kroon & W.J. de Lange, 1998. Modelling the hydrology of the Netherlands on a nation wide scale. In: Wheeler, H. & C. Kirby (eds.), *Hydrology in a Changing Environment*, vol. 1. John Wiley and Sons Ltd, UK, p. 1710.
- Vernooij, M., 2005. *De ontwikkeling van het zoet/zout grensolak en de grondwaterstanden in de AWD in de komende eeuw*. Afstudeerstage Hogeschool Zeeland. Waterleidingbedrijf Amsterdam, Vogelenzang.
- Walther, G.R., E. Post, P. Convey, A. Menzel, C. Parmesan, T.J.C. Beebee, J.M. Fromentin, O. Hoegh-Guldberg & F. Bairlein, 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416: 389-395
- Witte, J.P.M., R.P. Bartholomeus, D.G. Cirkel & P.W.T.J Kamps, 2008. *Ecohydrologische gevolgen van klimaatverandering voor de kustduinen van Nederland*. Kiwa WR rapport KWR 08.006, Nieuwegein.
- Witte, J.P.M., B. Kruijt, T. Kroon & C. Maas, 2006. Verdamping planten daalt door toename atmosferische kooldioxyde. *H₂O* 5: 29-31.
- Witte, J.P.M., B. Kruijt & C. Maas, 2006. *The effects of rising CO₂ levels on evapotranspiration*. Kiwa rapport KWR 06.004, Nieuwegein.

Witte, J.P.M., C.J.S. Aggenbach & J. Runhaar, 2007. Grondwater voor Natuur. In: R. Lieste, J.P.M. Witte, A.C.M. de Nijs, C.J.S. Aggenbach, B.J. Pieters, J. Runhaar & W. Verweij, *Beoordeling van de grondwatertoestand op basis van de Kaderrichtlijn Water*, p. 43-102. RIVM, Bilthoven.

Witte, J.P.M., R. Wójcik, P.J.J.F. Torfs, M.W.H. de Haan & S. Hennekens, 2007. Bayesian classification of vegetation types with Gaussian mixture density fitting to indicator values. *Journal of Vegetation Science* 18: 605-612.

I Gevoeligheid natuurdoeltypen voor hydrologische grootheden

GVG en vochttekorten

De bandbreedten (ranges) waarbij natuurdoeltypen kunnen voorkomen, zijn gebruikt als maat voor de gevoeligheid G van die typen. Om de gevoeligheid voor GVG en vochttekort TK te bepalen, is gebruik gemaakt van de Waternoodapplicatie 'Hydrologische Randvoorwaarden Natuur' (Runhaar & Hennekens, 2005). Daarin worden de bestaansvoorwaarden per natuurdoeltype afgeleid uit de voorwaarden van de vegetatietypen die deel uitmaken van het natuurdoeltype. Omdat natuurdoeltypen soms erg ruim zijn omschreven qua vegetatietypen, zijn sommige bandbreedten waarin typen zouden kunnen voorkomen navenant breed. Een voorbeeld is het doeltype lv-3.3, rietland en ruigte, dat zowel watervegetaties met riet als veenmosrietlanden omvat en waarvan de GVG -range loopt van -120 tot +10 cm (Figuur I-1). Bovendien hebben vergelijkbare natuurdoeltypen per landschapstype soms heel andere bandbreedten door een iets andere toedeling van vegetatietypen. Om dit soort artefacten te verhelpen, die niets zeggen over de relatieve gevoeligheid van de natuurdoeltypen maar eerder het gevolg zijn van definitieproblemen, zijn de volgende correcties doorgevoerd:

1. De natuurdoeltypen zijn versmald tot vegetatietypen die het meest kenmerkend zijn voor het type (in het geval van lv-3.3 rietland en ruigte zijn dat de veenmosrietlanden) (Tabel I-3)
2. Als er geen redenen zijn om aan te nemen dat een doeltype in het ene landschap gevoeliger zal zijn dan in het andere, zijn dezelfde bandbreedten aangehouden voor doeltypen met een zelfde omschrijving ('rietland en ruigte' of 'nat schraalgrasland').

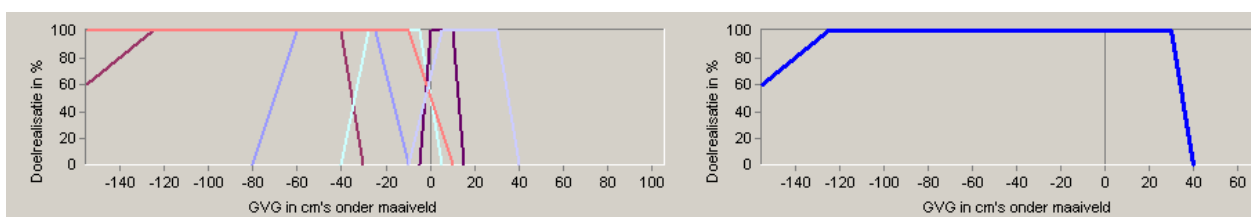
Bij typen die niet grondwaterafhankelijk zijn is met de code 999 aangegeven dat de GVG hier niet relevant is.

De voorjaarsgrondwaterstanden (medianen en bandbreedten G) zijn direct afgeleid uit de doelrealisaties in Waternood. G is afgeleid uit de zogenaamde a1- en a2-waarden (waarden waaronder dan wel waarboven het type niet meer kan voorkomen), en de mediaan is bepaald als het midden van deze bandbreedte.

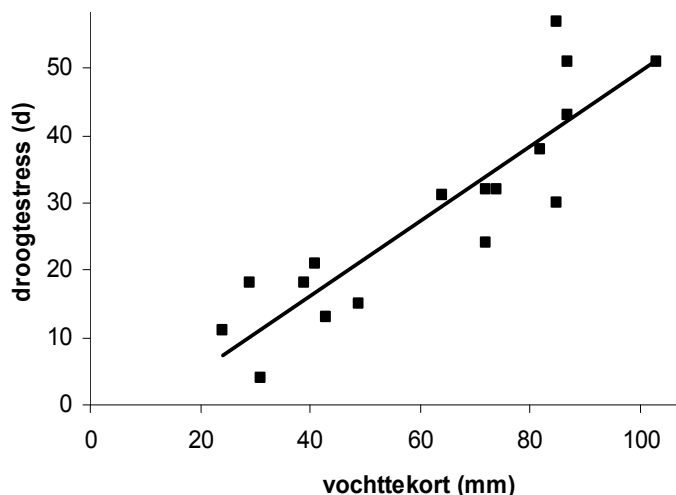
Bij droogtestress is een soortgelijke procedure gevolgd. Het aantal dagen met droogtestress uit Waternood is vertaald naar vochttekorten TK door gebruik te maken van een relatie die is afgeleid uit gegevens van Jansen et al. (2000) (Figuur I-2):

$$TK = 1.79D + 6$$

Waarin TK het vochttekort (mm/jr) en D de droogtestress (aantal dagen dat drukhoogte in wortelzone lager is dan -12000 cm) (d). De resulterende indeling naar vochttekorten is uiteindelijk sterk vereenvoudigd tot een viertal klassen (Tabel I-1). Dit is gebeurd om de zaak inzichtelijk te houden en schijnnaauwkeurigheden en artefacten die samenhangen met de heterogeniteit van natuurdoeltypen te voorkomen. Een artefact dat zonder deze vereenvoudiging bijvoorbeeld zou optreden, is dat natuurdoeltypen die zowel vochtige als droge vegetatietypen omvatten, minder gevoelig worden ingedeeld (omdat ze bij een grotere range aan vochttekorten voorkomen) dan typen die alleen bestaan uit droge vegetatietypen (terwijl vochtige ecosystemen juist gevoeliger zijn voor vochttekorten).



Figuur I-1. Ranges GVG voor lv-3.3 Rietland en ruigte op basis van Waternood.



Figuur I-2. Relatie tussen droogtestress en vochtttekort op basis van gegevens van Jansen et al. (2000).

Tabel I-1. Vereenvoudigde indeling doeltypen naar gevoeligheid voor vochtttekorten.

Omschrijving	G (mm/jr)
Natte systemen	15
Grondwateronafhankelijke (natte tot) vochtige systemen	45
Grondwateronafhankelijke (vochtige tot) droge systemen	60
Indifferent (doeltypen die zowel droog als nat kunnen voorkomen)	95

Gevoeligheid kwel, inlaat systeemvreemd water en GLG

In Tabel I-2 is ook aangegeven welke natuurdoeltypen afhankelijk zijn van buffering door aanvoer van grondwater (*Kwel*), inlaat van systeemvreemd water (PSV_{juli}) en verlaging van de gemiddeld laagste grondwaterstanden (*GLG*). Daarbij is uitgegaan van de volgende criteria:

- Kwel* Natuurdoeltypen met (veel) vegetaties die voor zuurbuffering afhankelijk zijn van aanvoer van basenrijk grondwater
- PSV_{juli} Natuurdoeltypen met watervegetaties van voedselarm tot matig voedselrijk zoet water waarin inlaat van water kan leiden tot eutrofiering en/of verzilting
- GLG* Permanent natte potentieel veenvormende systemen waarin daling van de *GLG* anders dan via vochtttekorten kan leiden tot verschuivingen in de vegetatie (afbraak organisch materiaal, toegenomen concurrentie met niet aan permanent natte omstandigheden aangepaste soorten, e.d.)

Tabel I-2. Gevoeligheid natuurdoeltypen voor veranderingen in de waterhuishouding, zoals afgeleid van Waternood.

GVG, TK, *Kwel*, *PSV_{juli}*, *GLG*: zie § 2.1.2.

med mediaan (alleen voor *GVG* en *TK*)

G gevoeligheid = bandbreedte waarbij type kan voorkomen (alleen voor *GVG* en *TK*)

J/N type is wel/niet (1/0) gevoelig voor betreffende grootheid (alleen voor *Kwel*, *PSV_{juli}* en *GLG*)

Type	Omschrijving	GVG		TK		<i>Kwel</i> (J/N)	<i>PSV_{juli}</i> (J/N)	<i>GLG</i> (J/N)
		med (cm – mv)	<i>G</i> (cm)	med (mm/jr)	<i>G</i> (mm)			
az-3.1	Open begroeiing van droge gronden			82	60	0	0	0
az-3.2	Open begroeiing van vochtige gronden	15	45	10	15	0	0	0
az-3.3	Zoute en brakke ruigte en grasland	20	50	4	15	0	0	0
az-3.4	Rietland en ruigte	20	50	4	15	0	0	0
az-3.5	Bloemrijk grasland			28	45	0	0	0
az-3.6	Struweel, mantel- en zoombegroeiing			48	95	0	0	0
az-3.7	Bosgemeenschappen van zandgrond			48	60	0	0	0
az-3.8	Bosgemeenschappen van zeeklei			7	45	0	0	0
du-3.1	Duinbeek					0	1	0
du-3.2	Duinmeer	-28	100	7	15	0	0	0
du-3.3	Slufter en groen strand					0	0	0
du-3.4	Duinrietland en -ruigte	-17	30	8	15	0	0	0
du-3.5	Nat schraalgrasland	16	50	7	15	1	0	0
du-3.6	Bloemrijk grasland			28	45	0	1	0
du-3.7	Droog duingrasland en open duin			82	60	0	0	0
du-3.8	Droge duinheide			71	60	0	0	0
du-3.9	Natte tot vochtige voedselarme duinvallei	2	50	7	15	0	0	0
du-3.10	Struweel, mantel- en zoombegroeiing			62	95	0	0	0
du-3.11	Hakhout			48	95	0	0	0
du-3.12	Bosgemeenschappen van kalkarm duin			64	60	0	0	0
du-3.13	Bosgemeenschappen van kalkrijk duin			64	60	0	0	0
du-3.14	Bosgemeenschappen van de duinzoom			59	60	0	0	0
du-3.15	Middenbos			31	45	0	0	0
du-3.16	Park-stinzenbos			59	45	0	0	0
hl-3.1	Heuvellandbeek					0	0	0
hl-3.2	Zoetwatergemeenschap		100			0	0	0
hl-3.3	Rietland en ruigte	1	50	4	15	0	0	0
hl-3.4	Kalkgrasland			68	45	0	0	0
hl-3.5	Droog loessgrasland			73	45	0	0	0
hl-3.6	Bloemrijk grasland			28	45	0	0	0
hl-3.7	Vochtig schraalgrasland	24	50	8	15	1	0	0
hl-3.8	Struweel, mantel- en zoombegroeiing			37	45	0	0	0
hl-3.9	Hakhout			48	45	0	0	0
hl-3.10	Bosgemeenschappen van helling en plateau			32	45	0	0	0
hl-3.11	Bosgemeenschappen van bron en beek	-2	35	8	15	1	0	1
hl-3.12	Middenbos			28	45	0	0	0
hz-3.1	Laaglandbeek					0	1	0
hz-3.2	Zoetwatergemeenschap		100			0	1	0
hz-3.3	Rietland en ruigte	1	50	4	15	0	0	0
hz-3.4	Ven	-33	100	7	15	0	0	0
hz-3.5	Droog grasland			68	60	0	0	0
hz-3.6	Bloemrijk grasland			73	45	0	0	0
hz-3.7	Vochtig schraalgrasland	14	50	7	15	1	0	1

Type	Omschrijving	GVG		TK		Kwel (J/N)	PSV _{juli} (J/N)	GLG (J/N)
		med (cm – mv)	G (cm)	med (mm/jr)	G (mm)			
hz-3.8	Open zand			91	60	0	0	0
hz-3.9	Droge heide			68	60	0	0	0
hz-3.10	Vochtige heide en levend hoogveen	15	50	8	15	0	0	1
hz-3.11	Struweel, mantel- en zoombegroeiing			37	95	0	0	0
hz-3.12	Hakhout			48	95	0	0	0
hz-3.13	Bosgemeenschappen van arme zandgrond			64	60	0	0	0
hz-3.14	Bosgemeenschappen van leemgrond			48	60	0	0	0
hz-3.15	Bosgemeenschappen van bron en beek	-2	35	8	15	1	0	1
hz-3.16	Bosgemeenschappen van hoogveen	1	35	8	15	0	0	1
hz-3.17	Middenbos			15	45	0	0	0
hz-3.18	Boombos				95	0	0	0
hz-3.19	Park-stinzenbos			64	45	0	0	0
gg-3.1	Onbeheerde kwelder					0	0	0
gg-3.2	Beheerde kwelder					0	0	0
lv-3.1	Zoetwatergemeenschap		150			0	1	0
lv-3.2	Brakwatergemeenschap		150			0	1	0
lv-3.3	Rietland en ruigte	15	30	4	15	0	1	1
lv-3.4	Nat schraalgrasland	18	50	7	15	1	0	1
lv-3.5	Bloemrijk grasland			28	45	0	0	0
lv-3.6	Veenheide	7	15	8	15	0	0	0
lv-3.7	Struweel	10	40	10	15	0	0	0
lv-3.8	Hakhout en griend	-2	35	48	95	0	0	0
lv-3.9	Bosgemeenschappen van voedselrijk (laag)veen	-2	35	8	15	0	1	1
lv-3.10	Bosgemeenschappen van voedselarm (hoog)veen	9	25	8	15	0	0	1
ri-3.1	Rivier en nevengeul					0	0	0
ri-3.2	Plas en geïsoleerde strang		150		15	0	0	0
ri-3.3	Rietland en ruigte	1	50	4	15	0	0	0
ri-3.4	Nat schraalgrasland	21	50	7	15	1	0	0
ri-3.5	Stroomdalgrasland			73	60	0	0	0
ri-3.6	Rivierduin en slik			51	95	0	0	0
ri-3.7	Struweel, mantel- en zoombegroeiing			35	95	0	0	0
ri-3.8	Hakhout en griend	-2	35	48	95	0	0	0
ri-3.9	Bosgemeenschappen van zandgrond			48	60	0	0	0
ri-3.10	Bosgemeenschappen van rivierklei			31	45	0	0	0
ri-3.11	Middenbos			31	45	0	0	0
ri-3.12	Park-stinzenbos			31	45	0	0	0
zk-3.1	Zoetwatergemeenschap		150			0	1	0
zk-3.2	Brakwatergemeenschap		150			0	1	0
zk-3.3	Zoute en brakke ruigte en grasland	11	50	7	15	0	0	0
zk-3.4	Rietland en ruigte	1	50	4	15	0	0	1
zk-3.5	Nat schraalgrasland	21	50	7	15	1	0	0
zk-3.6	Bloemrijk grasland			40	45	0	0	0
zk-3.7	Veenheide	7	15	8	15	0	0	1
zk-3.8	Struweel, mantel- en zoombegroeiing			35	45	0	0	0
zk-3.9	Hakhout en griend	-1	35	48	95	0	0	0
zk-3.10	Bosgemeenschappen van zeeklei			31	45	0	0	0
zk-3.11	Bosgemeenschappen van veen-op-klei	-5	35	8	15	0	0	1
zk-3.12	Middenbos			31	45	0	0	0
zk3.13	Park-stinzenbos				45	0	0	0

Tabel I-3. Samenstelling natuurdoeltypen zoals gebruikt bij afleiding hydrologische randvoorwaarden. Ten opzichte van het Handboek Natuurdoeltypen zijn de typen smaller omgrensd en zijn minder kenmerkende vegetatietypen achterwege gelaten.

NDT	Ass Nr	Associatie Naam
az-3.1 - Open begroeiing van droge gronden	14Ba1	Vogelpootjes-associatie
	14Bb2	Duin-Struisgras-associatie
	14Ca1	Duinsterretjes-associatie
	14Cb1	Duin-Paardebloem-associatie
	9Ba4	Knopbies-associatie
	9Ba5	Associatie van Bonte paardestaart en Moeraswespenorchis
	12Ba1	Associatie van Geknikte vossestaart
	27Aa2	Associatie van Strandduizendguldenkruid en Krielparnassia
az-3.3 - Zoute en brakke ruigte en grasland	12Ba3	Associatie van Aardbeiklaver en Fioringras
	32Ba2a	Moerasmelkdistel-ass.; typische subass.
	32Ba3	Associatie van Strandkweek en Echte heemst
az-3.4 - Rietland en ruigte	32Ba2a	Moerasmelkdistel-ass.; typische subass.
	32Ba3	Associatie van Strandkweek en Echte heemst
az-3.5 - Bloemrijk grasland	16Bb1a	Glanshaver-ass.; typische subass.
	16Bc1	Kamgrasweide
az-3.6 - Struweel, mantel- en zoombegroeiing	36Aa2	Associatie van Grauwe wilg
	37Ac1	Associatie van Duindoorn en Vlier
az-3.7 - Bosgemeenschappen van zandgrond	42Aa2	Beuken-Zomereikenbos
	43Aa3	Meidoorn-Berkenbos
az-3.8 - Bosgemeenschappen van zeeklei	38Aa2	Lissen-oibos
	43Aa2	Essen- Iepenbos
du-3.10 - Struweel, mantel- en zoombegroeiing	17Aa2	Associatie van Parelzaad en Salomonszegel
	31Ab3	Associatie van Ballote en andere Netels
	31Ba1	Slangekruid-associatie
	37Ac1	Associatie van Duindoorn en Vlier
	37Ac2	Associatie van Duindoorn en Liguster
	37Ac3	Associatie van Wegedoorn en Eenstijlige meidoorn
du-3.11 - Hakhout	42Aa1	Berken-Eikenbos
	42Aa2	Beuken-Zomereikenbos
	43Aa2	Essen- Iepenbos
	43Aa3	Meidoorn-Berkenbos
du-3.12 - Bosgemeenschappen van kalkarm duin	41Aa2	Korstmossen-Dennenbos
	42Aa1	Berken-Eikenbos
	42Aa2	Beuken-Zomereikenbos
du-3.13 - Bosgemeenschappen van kalkrijk duin	42Aa2	Beuken-Zomereikenbos
	42Aa2	Beuken-Zomereikenbos
	43Aa1	Abelen-Iepenbos
du-3.15 - Middenbos	43Aa1	Abelen-Iepenbos
	43Aa2	Essen- Iepenbos
du-3.16 - Park-stinzenbos	42Aa2	Beuken-Zomereikenbos
	43Aa1	Abelen-Iepenbos
du-3.2 - Duinmeer	6Ab1	Associatie van Ongelijkbladig fonteinkruid
	6Ac3	Associatie van Veelstengelige waterbies
	6Ac4	Associatie van Waterpunge en Oeverkruid
	11Aa1	Associatie van Moeraswolfsklauw en Snavelbies
	28Aa1	Draadgentiaan-associatie
du-3.4 - Duinrietland en -ruigte	8Bc2	Associatie van Scherpe zegge
du-3.5 - Nat schraalgrasland	9Aa3	Associatie van Moerasstruisgras en Zompzegge
	16Aa1b	Blauwgrasland; typische subass.
	16Ab2	Associatie van Harlekijn en Ratelaar
du-3.6 - Bloemrijk grasland	16Bb1	Glanshaver-associatie
	16Bc1	Kamgrasweide

NDT	Ass Nr	Associatie Naam
	19Aa3	Associatie van Maanvaren en Vleugeltjesbloem
du-3.7 - Droog duingrasland en open duin	14Aa1	Associatie van Buntgras en Heidespurrie
	14Aa2	Duin-Buntgras-associatie
	14Ba1	Vogelpootjes-associatie
	14Bb2	Duin-Struisgras-associatie
	14Ca1	Duinsterretjes-associatie
	14Ca2	Kegelsilene-associatie
	14Cb1	Duin-Paardebloem-associatie
	14Cb2	Associatie van Wondklaver en Nachtsilene
	17Aa2	Associatie van Parelzaad en Salomonszegel
	31Ba1	Slangekruid-associatie
du-3.8 - Droge duinheide	20Ab1	Associatie van Zandzegge en Kraaihei
	20Ab2	Associatie van Eikvaren en Kraaihei
du-3.9 - Natte tot vochtige voedselarme duinvallei	6Ac3	Associatie van Veelstengelige waterbies
	6Ac4	Associatie van Waterpunge en Oeverkruid
	9Aa1	Associatie van Drienervige en Zwarte zegge
	9Ba3	Associatie van Duinrus en Parnassia
	9Ba4	Knopbies-associatie
	11Aa1	Associatie van Moeraswolfsklauw en Snavelbies
	12Ba3	Associatie van Aardbeiklaver en Fioringras
	27Aa2	Associatie van Strandduizendguldenkruid en Krielparnassia
	28Aa1	Draadgentiaan-associatie
hl-3.10 - Bosgemeenschappen van helling en plateau	42Ab1	Veldbies-Beukenbos
	43Aa1	Abelen-lepenbos
	43Ab1	Eiken-Haagbeukenbos
hl-3.11 - Bosgemeenschappen van bron en beek	39Aa2	Elzenzegge-Elzenbroek
hl-3.12 - Middenbos	37Ac5	Associatie van Hazelaar en Purperorchis
	43Ab1	Eiken-Haagbeukenbos
hl-3.3 - Rietland en ruigte	8Bc2	Associatie van Scherpe zegge
	32Aa1	Associatie van Moerasspirea en Echte Valeriaan
hl-3.4 - Kalkgrasland	13Aa1	Associatie van Tengere veldmuur
	15Aa1	Kalkgrasland
hl-3.5 - Droog loessgrasland	14Ba1	Vogelpootjes-associatie
	14Bb1	Associatie van Schapegras en Tijn
hl-3.6 - Bloemrijk grasland	16Bb1	Glanshaver-associatie
	16Bc1	Kamgrasweide
hl-3.7 - Vochtig schraalgrasland	16Ab6	Associatie van Gewone engelwortel en Moeraszegge
hl-3.8 - Struweel, mantel- en zoombegroeiing	18Aa1	Associatie van Hengel en Gladde witbol
	31Ab3	Associatie van Ballote en andere Netels
	31Ba1	Slangekruid-associatie
	35Aa2	Associatie van Witte bosbraam
	37Aa1	Associatie van Fluweelbraam en Sleedoorn
	37Ab1	Associatie van Sleedoorn en Eenstijlige meidoorn
	37Ac4	Associatie van rozen en Liguster
hl-3.9 - Hakhout	18Aa1	Associatie van Hengel en Gladde witbol
	37Ac5	Associatie van Hazelaar en Purperorchis
	42Aa2	Beuken-Zomereikenbos
	42Ab1	Veldbies-Beukenbos
	43Ab1	Eiken-Haagbeukenbos
hz-3.10 - Vochtige heide en levend hoogveen	9Aa3	Associatie van Moerasstruisgras en Zompzegge
	10Aa2	Associatie van Veenmos en Snavelbies
	10Aa3	Veenbloembies-associatie
	11Aa1	Associatie van Moeraswolfsklauw en Snavelbies
	11Aa2	Associatie van Gewone dophei
	11Ba1	Associatie van Gewone dophei en Veenmos
	28Aa1	Draadgentiaan-associatie

NDT	Ass Nr	Associatie Naam
hz-3.11 - Struweel, mantel- en zoombegroeiing	18Aa1	Associatie van Hengel en Gladde witbol
	18Aa2	Associatie van Boshavikskruid en Gladde witbol
	35Aa1	Associatie van Bronskleurige bosbraam
	35Aa2	Associatie van Witte bosbraam
	36Aa1	Associatie van Geoorde wilg
	36Aa2	Associatie van Grauwe wilg
	37Aa1	Associatie van Fluweelbraam en Sleedoorn
	37Ab1	Associatie van Sleedoorn en Eenstijlige meidoorn
	41Aa1	Gaffeltandmos-Jeneverbestruweel
hz-3.12 - Hakhout	18Aa1	Associatie van Hengel en Gladde witbol
	18Aa2	Associatie van Boshavikskruid en Gladde witbol
	39Aa2	Elzenzegge-Elzenbroek
	42Aa1	Berken-Eikenbos
	42Aa2	Beuken-Zomereikenbos
	43Ab1	Eiken-Haagbeukenbos
hz-3.13 - Bosgemeenschappen van arme zandgrond	41Aa2	Korstmossen-Dennenbos
	41Aa3	Kussentjesmos-Dennenbos
	42Aa1	Berken-Eikenbos
hz-3.14 - Bosgemeenschappen van leemgrond	42Aa2	Beuken-Zomereikenbos
	42Aa3	Bochtige smele-Beukenbos
	43Aa2	Essen- Iepenbos
	43Ab1	Eiken-Haagbeukenbos
hz-3.15 - Bosgemeenschappen van bron en beek	39Aa2	Elzenzegge-Elzenbroek
	39Aa2	Elzenzegge-Elzenbroek
	40Aa1	Dophei-Berkenbroek
	40Aa2	Zompzegge-Berkenbroek
hz-3.17 - Middenbos	43Ab1	Eiken-Haagbeukenbos
hz-3.19 - Park-stinzenbos	42Aa2	Beuken-Zomereikenbos
hz-3.3 - Rietland en ruigte	8Bc2	Associatie van Scherpe zegge
	9Aa2	Veenmosrietland
	32Aa1	Associatie van Moerasspirea en Echte Valeriaan
hz-3.4 - Ven	6Aa1	Associatie van Biesvaren en Waterlobelia
	6Ac3	Associatie van Veelstengelige waterbies
	6Ac4	Associatie van Waterpunge en Oeverkruid
	10Ab1	Associatie van Draadzegge en Veenpluis
	28Aa1	Draadgentiaan-associatie
	14Ba1	Vogelpootjes-associatie
hz-3.5 - Droog grasland	14Bb1	Associatie van Schapegras en Tijn
	14Bb2	Duin-Struisgras-associatie
	19Aa1	Associatie van Liggend walstro en Schapegras
hz-3.6 - Bloemrijk grasland	14Bb1	Associatie van Schapegras en Tijn
	14Bc1	Associatie van Vetkruid en Tijn
hz-3.7 - Vochtig schraalgrasland	9Aa3	Associatie van Moerasstruisgras en Zompzegge
	12Ba1	Associatie van Geknikte vossestaart
	16Aa1	Blauwgrasland
	16Ab1	Veldrus-associatie
	16Ab4	Associatie van Boterbloemen en Waterkruid
	28Aa1	Draadgentiaan-associatie
	28Aa2	Associatie van Borstelbies en Moerasmuur
	14Aa1	Associatie van Buntgras en Heidespurrie
hz-3.8 - Open zand	14Aa1	Associatie van Buntgras en Heidespurrie
	19Aa1	Associatie van Liggend walstro en Schapegras
hz-3.9 - Droge heide	20Aa1	Associatie van Struikhei en Stekelbrem
	41Aa1	Gaffeltandmos-Jeneverbestruweel
	40Aa1	Dophei-Berkenbroek
	40Aa2	Zompzegge-Berkenbroek
lv-3.10 - Bosgemeenschappen van voedselarm (hoog)vee	40Aa1	Dophei-Berkenbroek
	40Aa2	Zompzegge-Berkenbroek

NDT	Ass Nr	Associatie Naam
lv-3.3 - Rietland en ruigte	9Aa2	Veenmosrietland
	32Aa1	Associatie van Moerasspirea en Echte Valeriaan
lv-3.4 - Nat schraalgrasland	9Aa3	Associatie van Moerasstruisgras en Zompzegge
	9Ba1	Associatie van Schorpioenmos en Ronde zegge
	12Ba1	Associatie van Geknikte vossestaart
	16Aa1b	Blauwgrasland; typische subass.
	16Ab1	Veldrus-associatie
	16Ab4	Associatie van Boterbloemen en Waterkruid
	16Ba1	Kievitsbloem-associatie
lv-3.5 - Bloemrijk grasland	16Bb1a	Glanshaver-ass.; typische subass.
	16Bc1	Kamgrasweide
lv-3.6 - Veenheide	11Ba2	Moerasheide
lv-3.7 - Struweel	36Aa1	Associatie van Geoorde wilg
	36Aa2	Associatie van Grauwe wilg
lv-3.8 - Hakhout en griend	39Aa1	Moerasvaren-Elzenbroek
	39Aa2	Elzenzegge-Elzenbroek
lv-3.9 - Bosgemeenschappen van voedselrijk (laag)vee	39Aa1	Moerasvaren-Elzenbroek
	39Aa2	Elzenzegge-Elzenbroek
ri-3.10 - Bosgemeenschappen van rivierklei	38Aa2	Lissen-ooibos
	39Aa2	Elzenzegge-Elzenbroek
	43Aa1	Abelen-lepenbos
	43Aa2	Essen- lepenbos
	43Aa5	Vogelkers-Essenbos
ri-3.11 - Middenbos	43Aa1	Abelen-lepenbos
	43Aa2	Essen- lepenbos
	43Aa5	Vogelkers-Essenbos
	43Ab1	Eiken-Haagbeukenbos
ri-3.12 - Park-stinzenbos	43Aa1	Abelen-lepenbos
	43Aa2	Essen- lepenbos
ri-3.3 - Rietland en ruigte	8Bc2	Associatie van Scherpe zegge
	32Aa1	Associatie van Moerasspirea en Echte Valeriaan
	32Ba2	Moerasmelkdistel-associatie
ri-3.4 - Nat schraalgrasland	9Ba5	Associatie van Bonte paardestaart en Moeraswespenorchis
	12Ba1	Associatie van Geknikte vossestaart
	16Ab4	Associatie van Boterbloemen en Waterkruid
	16Ba1	Kievitsbloem-associatie
ri-3.5 - Stroomdalgrasland	14Bc1	Associatie van Vetkruid en Tijn
	14Bc2	Associatie van Sikkellaver en Zachte haver
ri-3.6 - Rivierduin en slik	14Ba1	Vogelpootjes-associatie
	14Bb1	Associatie van Schapegras en Tijn
	14Bc1	Associatie van Vetkruid en Tijn
	14Bc2	Associatie van Sikkellaver en Zachte haver
	29Aa2	Associatie van Goudzuring en Moerasandijvie
	29Aa4	Slijkgroen-associatie
	31Aa1	Vlieszaad-associatie
	31Aa2	Associatie van Raketten en Kompassla
	31Ba1	Slangekruid-associatie
ri-3.7 - Struweel, mantel- en zoombegroeiing	31Ab3	Associatie van Ballote en andere Netels
	36Aa1	Associatie van Geoorde wilg
	36Aa2	Associatie van Grauwe wilg
	37Aa1	Associatie van Fluweelbraam en Sleedoorn
	37Ab1	Associatie van Sleedoorn en Eenstijlige meidoorn
	37Ab2	Associatie van Hondсроos en Jeneverbes
ri-3.8 - Hakhout en griend	38Aa2	Lissen-ooibos
	39Aa2	Elzenzegge-Elzenbroek
ri-3.9 - Bosgemeenschappen van zandgrond	42Aa2	Beuken-Zomereikenbos

NDT	Ass Nr	Associatie Naam
	43Ab1	Eiken-Haagbeukenbos
zk-3.10 - Bosgemeenschappen van zeeklei	38Aa2	Lissen-ooibos
	43Aa1	Abelen-lepenbos
	43Aa2	Essen- lepenbos
zk-3.11 - Bosgemeenschappen van veen-op-klei	39Aa1	Moerasvaren-Elzenbroek
zk-3.12 - Middenbos	43Aa1	Abelen-lepenbos
	43Aa2	Essen- lepenbos
zk-3.3 - Zoute en brakke ruigte en grasland	12Ba3	Associatie van Aardbeiklaver en Fioringras
	25Aa2	Associatie van Kortarige zeekraal
	26Ab1	Associatie van Stomp kweldergras
	26Ac1	Associatie van Zilte rus
	32Ba2	Moerasmelkdistel-associatie
zk-3.4 - Rietland en ruigte	8Bc2	Associatie van Scherpe zegge
	9Aa2	Veenmosrietland
	32Aa1	Associatie van Moerasspirea en Echte Valeriaan
	32Ba2	Moerasmelkdistel-associatie
zk-3.5 - Nat schraalgrasland	12Ba1	Associatie van Geknikte vossestaart
	16Ab2	Associatie van Harlekijn en Ratelaar
	16Ab4	Associatie van Boterbloemen en Waterkruid
	16Ba1	Kievitsbloem-associatie
zk-3.6 - Bloemrijk grasland	14Bc2	Associatie van Sikkellklaver en Zachte haver
	16Bb1	Glanshaver-associatie
	16Bc1	Kamgrasweide
zk-3.7 - Veenheide	11Ba2	Moerasheide
zk-3.8 - Struweel, mantel- en zoombegroeiing	31Ab3	Associatie van Ballote en andere Netels
	37Ab1	Associatie van Sleedoorn en Eenstijlige meidoorn
zk-3.9 - Hakhout en griend	38Aa2	Lissen-ooibos
	39Aa1	Moerasvaren-Elzenbroek

II Statistische analyse van gelocaliseerde vegetatieopnamen

Het idee achter deze methode is om vegetatietypen van gelocaliseerde opnamen wiskundig te beschrijven als functie van standplaatsfactoren. Die standplaatsfactoren zijn zowel gekenmerkt door indicatiewaarden als door berekende hydrologische grootheden voor de huidige situatie. Die grootheden zijn bijvoorbeeld *GVG* en *TK*, als maten voor achtereenvolgens zuurstofstress en droogtestress. Is deze wiskundige beschrijving sterk genoeg, dan kunnen we de functies vervolgens gebruiken om de toekomstige kans op vegetatietypen te voorspellen, namelijk door de hydrologische grootheden onder de klimaatscenario's in te voeren: leidt klimaatverandering tot een verschuiving in vegetatietypen?, verandert een natte heide in een vochtige heide? Eerst zijn vegetatietypen beschreven als functie van indicatiewaarden. Daarna zijn de indicatiewaarde voor vocht vervangen door een hydrologische grootheid. De wiskundige beschrijving van vegetatietypen als functie van indicatiewaarden is beschreven in Witte et al. (2007).

Voor de analyse is gebruik gemaakt van zowel vegetatieopnamen uit het Landelijk Meetnet Flora - Milieu- en Natuurkwaliteit als de vegetatieopnamen uit de Landelijke Vegetatie Databank (LVDB). Dit om de aanwezigheid van actuele natuurtypen aan te geven. Alleen die locaties (opnames) zijn geselecteerd die nauwkeurig gelocaliseerd zijn, goed te koppelen zijn aan natuurdoeltypen, en die liggen in een locatie op de natuurdoeltypenkaart. De methode staat beschreven in Hinsberg et al. (2007). Van Alterra ontvingen we het resultaat van de selectie: een bestand met 4322 vegetatieopnamen, die met behulp van het programma ASSOCIA waren geassocieerd tot associaties (570), subassociaties (2414) of romp- en derivaatgemeenschappen (1338). ASSOCIA geeft als uitkomst meerdere vegetatietypen waartoe een opname kan worden geassocieerd; voor onze analyse gebruikten we telkens het door het programma aangegeven meeste waarschijnlijke type.

Subassociaties 'kaptten we af' tot associaties, zodat we 2984 associaties overhielden. Van deze opnamen berekenden we de gemiddelde indicatiewaarden voor vocht, voedselrijkdom en zuurgraad volgens het ecotopensysteem (Runhaar et al., 2004). De indicatiewaarde voor zout werd buiten beschouwing gelaten, omdat alle aangeleverde vegetatietypen kenmerkend zijn voor zoete systemen. Tweehonderdenacht opnamen met minder dan drie soorten werden verwijderd, omdat daar geen betrouwbare indicatiewaarden voor konden worden berekend. Voorts werden alle opnamen die tot romp- of derivaatgemeenschap waren geassocieerd verwijderd, omdat deze niet goed kunnen worden beschreven met behulp van indicatiewaarden (Witte et al., 2007b). De reden is dat deze gemeenschappen vaak overheerst worden door één soort, zoals Kruipbrem of Duinriet, die weinig zegt over het milieu ter plaatse maar die, eenmaal gevestigd, de vegetatiesamenstelling volledig domineert.

Uiteindelijk bleef een bestand met 2881 tot associaties geassocieerde opnamen over voor verdere analyse.

Voor onze wiskundige beschrijving van de associaties zijn minimaal 10 opnamen per verklarende as nodig. Omdat we met drie assen werken (vocht, voedselrijkdom en zuurgraad) zou deze eis neerkomen op een minimum van 30 opnamen per associatie. Om niet te veel associaties te laten afvallen, is dit minimum verlaagd naar 25. Na deze eis bleven er nog 2394 opnamen over, verdeeld over 29 associaties. Op basis van deze opnamen bouwden we wiskundige modellen die associaties beschrijven als functie van indicatiewaarden. Hoe goed dat lukt kan beoordeeld worden aan de hand van een kruistabel, waarin het aantal opnamen geassocieerd volgens ASSOCIA (rijen; de 'waarnemingen') is uitgezet tegen het aantal opnamen geassocieerd via indicatiewaarden (kolommen; de 'voorspellingen').

Tabel II-1 toont het resultaat voor alle 2394 opnamen. Associaties van hetzelfde verbond (die vaak qua standplaats verwant zijn) zijn in deze tabel omkaderd. Volgens deze tabel is 68% van de opnamen goed geassocieerd. Middelen we het percentage goed geassocieerde opnamen per associatie (derde kolom in de tabel), dan komen we uit op 69%. Opvallend is dat associatie 41AA03, *Kussentjesmos-Dennenbos*, voor heel wat misclassificaties zorgt. Deze bossen zijn vaak aangeplant, wat de samenhang tussen vegetatie en standplaats niet ten goede komt.

Hoe goed de wiskundige modellen zijn kan echter niet worden beoordeeld aan de hand van Tabel II-1; voor een goede beoordeling dienen we het opnamenbestand 'at random' in tweeën te splitsen: een helft voor de bouw van de wiskundige modellen, en de andere helft voor de validatie van die modellen. Het nadeel van deze operatie is echter dat hiermee veel associaties afvallen, omdat we immers nog steeds moeten voldoen aan de eis van minimaal 25 opnamen per associatie. Tabel II-2 toont het validatieresultaat op basis van 14 associaties, verdeeld over 935 opnamen. Een percentage van 48 opnamen is nu goed geclassificeerd (53% gemiddeld in kolom 3); de associatie van *Kussentjesmos-Dennenbos*, met 258 zeer ruim vertegenwoordigd, gooit weer roet in het eten. Verder valt op dat associaties van bossen en van korte vegetaties soms verward worden (bijvoorbeeld 20AA01 *Associatie van stuikhei en stekelbrem* met 41AA03 *Kussentjesmos-Dennenbos*). Dat is logisch, omdat met de drie indicatiewaarden geen rekening gehouden is met vegetatiestructuur.

Een opsplitsing van het bestand in twee delen, een voor bossen en struwelen, en een voor korte vegetaties, ligt dus voor de hand. Het resultaat is te zien in Tabel II-3. Van de korte opnamen wordt nu 76% goed geclassificeerd; van de bossen en struwelen 40% (76 en 45% over kolom 3).

Wanneer we werkelijk willen voorspellen, gebruiken we natuurlijk alle opnamen voor de bouw van de modellen. We hebben dan meer associaties tot onze beschikking en het percentage goed geclassificeerd zal waarschijnlijk hoger zijn dan uit het validatieresultaat blijkt (omdat we immers meer opnamen tot onze beschikking hebben). Om te onderzoeken hoe goed de modellen zijn wanneer uitgegaan wordt van een hydrologische grootheid, is de eerste berekening van Tabel II-1 overgedaan, maar nu met GVG als verklarende variabele. Het resultaat is opgenomen in Tabel II-4. Omdat voor 227 opnamen geen GVG berekend was, vielen twee associaties af in de berekening. Het percentage goed geclassificeerde opnamen bedraagt nu 50% (over kolom 3: 41%) in plaats van 68%. Dit percentage wordt echter geheel verklaard door de twee overgebleven indicatiewaarden. Vervangen we namelijk de vochtas door een random variabele, dan bedraagt het percentage goed geclassificeerd 52% (46%). De GVG als verklarende variabele verslechtert dus zelfs het resultaat enigszins.

Opmerkingen:

- In eerdere studie voor Pleistoceen Nederland en de Duinen werd een validatieresultaat van meer dan 80% gevonden (Witte et al., 2007b). Dat was echter gebaseerd op een bestand van 35000 met veel aandacht geclassificeerde opnamen. Bovendien werden alleen korte vegetaties beschouwd.
- Het resultaat hier is echter niet eens zo slecht, gegeven het kleine aantal opnamen.
- Deze methode wordt niet verder uitgewerkt omdat eerst meer gelokaliseerde opnamen nodig zijn.

Tabel II-1. Kruistabel gebaseerd op alle tot associaties geassocieerde vegetatieopnamen.

	#	%_goed	08BB04	08BD02	08BD03	09AA02	09AA03	09BA01	11AA01	11AA02	12BA01	14AA01	16AA01	16AB01	16AB04	19AA01	19AA02	20AA01	28AA01	32AA01	34AA01	39AA02	40AA02	41AA03	42AA01	42AA02	42AA03	43AA01	43AA02	43AA05	43AB01	
08BB04	36	89	25																													Riet-associatie
08BD02	28	68		19																												Pluimzegge-associatie
08BD03	25	80		1	20																											Associatie van Stijve zegge
09AA02	81	88				71	4																									Veenmosrietland
09AA03	31	65				6	20																									Associatie van Moerasstruisgras en Zompzegge
09BA01	26	96					25																									Associatie van Schorpioenmos en Ronde zegge
11AA01	104	73																														Associatie van Moeraswolfsklauw en Snavelbies
11AA02	82	65																														Associatie van Gewone dophei
12BA01	46	96																														Associatie van Geknikte vossestaart
14AA01	45	96																														Associatie van Buntgras en Heidespurrie
16AA01	39	87																														Blauwgrasland
16AB01	30	67																														Veldrus-associatie
16AB04	89	89																														Associatie van Boterbloemen en Waterkruiskruid
19AA01	58	40																														Associatie van Liggend walstro en Schapegras
19AA02	37	73																														Associatie van Klokgesgentiaan en Borstelgras
20AA01	220	73																														Associatie van Struikhei en Stekelbrem
28AA01	46	48																														Draadgentiaan-associatie
32AA01	47	53																														Associatie van Moerasspirea en Echte Valeriaan
34AA01	69	43																														Wilgeroosjes-associatie
39AA02	28	54																														Elzenzegge-Elzenbroek
40AA02	30	67																														Zompzegge-Berkenbroek
41AA03	515	90																														Kussentjesmos-Dennenbos
42AA01	211	18																														Berken-Eikenbos
42AA02	149	34																														Beuken-Zomereikenbos
42AA03	116	40																														Bochtige smele-Beukenbos
43AA01	51	92																														Abelen-lepenbos
43AA02	52	73																														Essen-lepenbos
43AA05	38	76																														Vogelkers-Essenbos
43AB01	65	97																														Eiken-Haagbeukenbos

Tabel II-2. Validatietabel gebaseerd op de helft van tot associaties geassocieerde vegetatieopnamen.

	#	%_goed	09AA02	11AA01	11AA02	16AB04	19AA01	20AA01	34AA01	41AA03	42AA01	42AA02	42AA03	43AA01	43AA02	43AB01	
09AA02	41	80	33	2		6											Veenmosrietland
11AA01	52	54	3	28	20						1						Associatie van Moeraswolfsklauw en Snavelbies
11AA02	41	61		10	25			5			1						Associatie van Gewone dophei
16AB04	45	96				43											Associatie van Boterbloemen en Waterkruiskruid
19AA01	29	38					11		5	2	4	4	1			2	Associatie van Liggend walstro en Schapegras
20AA01	110	64			8		5	70	5	11	7	1	3				Associatie van Struikhei en Stekelbrem
34AA01	35	31			1		2	1	11	5	5	2	1	4	1	2	Wilgeroosjes-associatie
41AA03	258	34					21	14	11	89	44	49	30				Kussentjesmos-Dennenbos
42AA01	106	25		2			6	5	9	32	27	15	10				Berken-Eikenbos
42AA02	75	25					3	1	7	12	14	19	17				Beuken-Zomereikenbos
42AA03	58	41					4	1	1	6	12	9	24				Bochtige smele-Beukenbos
43AA01	26	58							2					15	7		Abelen-lepenbos
43AA02	26	42										1		11	11		Essen-lepenbos
43AB01	33	88									1	1	2		29		Eiken-Haagbeukenbos

Tabel II-3. Validatietabellen voor korte vegetaties (boven) en bossen- en struwelen (onder) gebaseerd op de helft van tot associaties geclassificeerde vegetatieopnamen.

	#	#_goed	%_goed	09AA02	11AA01	11AA02	16AB04	19AA01	20AA01	
09AA02	41	33	80	33	2		6			Veenmosrietland
11AA01	52	28	54	3	28	20		1		Associatie van Moeraswolfsklauw en Snavelbies
11AA02	41	25	61		11	25			5	Associatie van Gewone dophei
16AB04	45	43	96	2			43			Associatie van Boterbloemen en Waterkruid
19AA01	29	25	86					25	4	Associatie van Liggend walstro en Schapegras
20AA01	110	89	81			10		11	89	Associatie van Struikhei en Stekelbrem

	#	#_goed	%_goed	34AA01	41AA03	42AA01	42AA02	42AA03	43AA01	43AA02	43AB01	
34AA01	35	12	34	12	6	6	2	2	4	1	2	Wilgeroosjes-associatie
41AA03	258	105	41	18	105	51	53	31				Kussentjesmos-Dennenbos
42AA01	106	30	28	10	40	30	15	11				Berken-Eikenbos
42AA02	75	19	25	8	13	15	19	18		2		Beuken-Zomereikenbos
42AA03	58	26	45	2	6	12	11	26			1	Bochtige smele-Beukenbos
43AA01	26	14	54	2					14	8	2	Abelen-lepenbos
43AA02	26	11	42				1		11	11	3	Essen-lepenbos
43AB01	33	29	88			1		1	2		29	Eiken-Haagbeukenbos

Tabel II-4. Als Tabel II-1, maar nu met vochtindicatie vervangen door berekende GVG.

	#	%_goed	08BB04	08BD02	08BD03	08BA01	11AA01	11AA02	12BA01	14AA01	16AA01	16AB01	16AB04	19AA01	19AA02	20AA01	28AA01	32AA01	34AA01	40AA02	41AA03	42AA01	42AA02	42AA03	43AA01	43AA02	43AA05	43AB01						
08BB04	33	33	11																											Riet-associatie				
08BD02	25	40		10																										Pluimzegge-associatie				
09AA02	78	50			39	2	1																							Veenmosrietland				
09AA03	30	13			5	4	3																							Associatie van Moerasstruisgras en Zompzegge				
09BA01	25	52					13																							Associatie van Schorpioenmos en Ronde zegge				
11AA01	95	13																												6	Associatie van Moeraswolfsklauw en Snavelbies			
11AA02	74	20																												Associatie van Gewone dophei				
12BA01	42	90		3																										Associatie van Geknikte vossstaart				
14AA01	41	0																												Associatie van Buntgras en Heidespurrie				
16AA01	38	74																												3	Blauwgrasland			
16AB01	28	21																													Veldrus-associatie			
16AB04	79	73		1	2		3		2																					1	Associatie van Boterbloemen en Waterkruid			
19AA01	52	17																													Associatie van Liggend walstro en Schapegras			
19AA02	35	26																													1	Associatie van Klokjesgentiaan en Borstelgras		
20AA01	204	58																													Associatie van Struikhei en Stekelbrem			
28AA01	43	23																													1	Draadgentiaan-associatie		
32AA01	44	50		1	2																										Associatie van Moerasspirea en Echte Valeriaan			
34AA01	61	36																													1	Wilgeroosjes-associatie		
40AA02	30	37																													2	Zompzegge-Berkenbroek		
41AA03	470	94																														Kussentjesmos-Dennenbos		
42AA01	207	15																														1	Berken-Eikenbos	
42AA02	140	24																														156	Beuken-Zomereikenbos	
42AA03	104	34																														3	Bochtige smele-Beukenbos	
43AA01	48	60																														2	Abelen-lepenbos	
43AA02	44	34		1	1	1																										1	Essen-lepenbos	
43AA05	33	21																															12	Vogelkers-Essenbos
43AB01	64	84																															2	Eiken-Haagbeukenbos

