



# Geen adaptiestrategie zonder een klimaatbestendige ecohydrologie

Een verkennend onderzoek naar de mogelijkheden om de biodiversiteit in Nederland onder een ander klimaat te voorspellen





# Geen adaptiestrategie zonder een klimaatbestendige ecohydrologie

Een verkennend onderzoek naar de mogelijkheden om de biodiversiteit in Nederland onder een ander klimaat te voorspellen

## Authors

P.M. van Bodegom <sup>1)</sup>

S.C. Dekker <sup>2)</sup>

M. Wassen <sup>2)</sup>

J.P.M. Witte <sup>3)</sup>



**Universiteit Utrecht**

vrije Universiteit amsterdam



**KWR**

Watercycle Research Institute

- 1) Vrije Universiteit
- 2) Universiteit Utrecht
- 3) KWR Watercycle Research Institute

KvK rapportnummer  
ISBN

KvK 005/09  
978-94-90070-05-2

Dit project (VBR 17 Klimaatverandering en ecohydrologie) is uitgevoerd in het kader van het nationaal onderzoekprogramma Kennis voor Klimaat. Dit onderzoekprogramma wordt medefinancierd door het Ministerie van VROM.

### **Disclaimer**

De voorliggende verkenning maakt deel uit van een reeks verkenningen naar de *State of Art* voor een aantal belangrijke adaptatie thema's die ter voorbereiding op de daadwerkelijke start van het nationaal onderzoeksprogramma *Kennis voor Klimaat* op verzoek van de directie van *Kennis voor Klimaat* is uitgevoerd. Het betreffen verkenningen op zowel natuurwetenschappelijke en technische als sociaal wetenschappelijke onderwerpen. Doel van de verkenningen was om na te gaan welke kennis beschikbaar is voor het betreffende adaptatie thema en welke kennisleemtes er zijn. De *State of Art* overzichten zijn niet alleen bedoeld als advies aan de directie en programmaraad van *Kennis voor Klimaat* m.b.t. de inhoudelijke afbakening van het onderzoeksprogramma, maar ook als achtergrond informatie over een aantal belangrijke adaptatie thema's voor een brede doelgroep. *Kennis voor Klimaat* stelt daarom de *State of Art* verkenningen via haar website [www.kennisvoorklimaat.nl](http://www.kennisvoorklimaat.nl) vrij beschikbaar, maar de inhoud van de verkenning valt onder verantwoordelijkheid van de auteurs die ook zelf de review van de verkenningen hebben georganiseerd door een concept aan een groep van wetenschappers, experts en betrokkenen voor te leggen.

### **Copyright @ 2009**

Nationaal Onderzoekprogramma Kennis voor Klimaat (KvK). Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd, in geautomatiseerde bestanden opgeslagen en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm, geluidsband of op welke andere wijze ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van het Nationaal Onderzoekprogramma Kennis voor Klimaat. In overeenstemming met artikel 15a van het Nederlandse auteursrecht is het toegestaan delen van deze publicatie te citeren, daarbij gebruik makend van een duidelijke referentie naar deze publicatie.

### **Aansprakelijkheid**

Hoewel uiterste zorg is besteed aan de inhoud van deze publicatie aanvaarden de Stichting Kennis voor Klimaat, de leden van deze organisatie, de auteurs van deze publicatie en hun organisaties, noch de samenstellers enige aansprakelijkheid voor onvolledigheid, onjuistheid of de gevolgen daarvan. Gebruik van de inhoud van deze publicatie is voor de verantwoordelijkheid van de gebruiker.



## Voorwoord

Ecohydrologie is het vakgebied dat zich bezighoudt met de invloed van de waterhuishouding van de omgeving op organismen vice versa. Het is ontstaan in Nederland eind jaren zeventig van de vorige eeuw, toen bleek dat natuurterreinen aan het verdrogen waren. Dat werd in de eerste plaats veroorzaakt door peilverlagingen en drainage van landbouwgronden. Toename van grondwaterwinning en andere ingrepen deden daar een schepje bovenop. Het gevolg was dat de natuur in Nederland verpieterde, zodanig zelfs dat verdroging misschien wel de belangrijkste oorzaak is van de achteruitgang van de Nederlandse flora en fauna in de twintigste eeuw. Het onderzoek was aanvankelijk vooral gericht op het begrijpen van de relatie tussen waterhuishouding en biodiversiteit, met als uiteindelijke doel de natuur te beschermen. De nadruk lag, en ligt nog steeds, op de relatie tussen waterhuishouding en plantensoorten en plantengemeenschappen. Dankzij het ecohydrologisch onderzoek worden: (1) natuurgebieden tegenwoordig beter beschermd tegen verdroging, (2) kunnen verdroogde gebieden gedeeltelijk weer op de juiste manier worden hersteld en, (3) kunnen nieuwe natuurgebieden adequaat worden ingericht, met een waterhuishouding die volop kansen biedt aan de kenmerkende flora en fauna.

Was verdroging in de vorige eeuw de belangrijkste impuls voor de ontwikkeling van de ecohydrologie, in de toekomst zal dat klimaatverandering zijn. Klimaatverandering roept de vraag op of geplande natuurdoelen nog wel kunnen worden gehaald. Die doelen zijn niet alleen ingegeven door liefde voor de natuur, maar ook wettelijk vastgelegd, onder andere in Europees verband (Kaderrichtlijn Water, Natura-2000, Vogel- en Habitatrichtlijn). Een andere vraag is waar in de toekomst de beste kansen liggen voor nieuwe natuur, bijvoorbeeld in het kader van de Ecologische Hoofdstructuur. In dit rapport zullen we laten zien dat onze huidige ecohydrologische kennis tekort schiet om deze vragen te beantwoorden: we zijn, met de huidige stand van kennis, niet in staat om de biodiversiteit van Nederland te voorspellen onder het klimaat van de toekomst. Dat betekent tevens, dat het nauwelijks zin heeft na te denken over adaptiestrategieën om negatieve gevolgen van klimaatverandering te beperken, en nieuwe potenties te benutten. In dit rapport geven we aan welk onderzoek prioriteit heeft bij de ontwikkeling van een klimaatbestendige ecohydrologie, die een voorwaarde is voor het ontwikkelen van aanpassingsstrategieën.

Het rapport is in conceptvorm voorgelegd aan een deskundigenteam bestaande uit de volgende personen:

- prof. dr. ir. M. Bierkens (Universiteit Utrecht)
- dr. ir. M. Heijmans (Wageningen Universiteit)
- dr. A.F.M. Meuleman (Waterschap Brabantse Delta)
- drs. R. van Ek (Deltares)
- prof. dr. J.T.A. Verhoeven (Universiteit Utrecht)
- prof. dr. ir. S.A.E.T.M. van der Zee (Wageningen Universiteit)

Zowel mondeling, tijdens een bijeenkomst op 15 december 2008 in Utrecht, als schriftelijk leverden zij waardevol commentaar, dat wij in dit rapport hebben verwerkt. Van prof. Van der Zee leverde een uitvoerig schriftelijk commentaar dat als Bijlage bij dit rapport is opgenomen.

Symbolisch wordt de toekomst van het onderzoek verbeeld door het vingertje van de Romein Vitruvius (zie volgende pagina), die tweeduizend jaar geleden al plantensoorten gebruikte als indicatoren voor de aanwezigheid en zelfs de kwaliteit van grondwater. Dat vingertje wijst naar het oosten, waar de zon op komt en de toekomst dus letterlijk ligt (maar tegenwoordig ook figuurlijk, met de opkomst van China en India). Vitruvius was een veelzijdige militair en architect, bekend als schrijver van boeken over Romeinse architectuur waarin werkelijk alles werd behandeld: van de ideale maten van gebouwen, tot de constructie van waterwerken als molens, aquaducten en de waterschroef. Een visionair, aan wie we ons graag spiegelen.

Peter van Bodegom,  
Stefan Dekker,  
Martin Wassen,  
Flip Witte,  
Januari 2009



Marcus Vitruvius Pollo ( $\pm$  85 - 20 BC), Romeinse militair en architect, ecohydroloog *avant la lettre*: hij gebruikte plantensoorten als indicatoren voor de aanwezigheid en zelfs de kwaliteit van grondwater.



## Inhoudsopgave

Voorwoord .....	5
Samenvatting .....	9
Summary .....	11
1. Inleiding .....	13
1.1. Aanleiding en probleemstelling .....	13
1.2. Inperking van het onderzoek .....	13
1.3. Relevantie voor de hotspots .....	14
1.4. Leeswijzer .....	14
2. Hoe klimaatverandering de vegetatie kan beïnvloeden .....	15
2.1. Inleiding .....	15
2.3. Samenvattende discussie .....	18
3. Overzicht van bestaande ecohydrologische modellen .....	21
3.1. Welke modellen zijn er al? .....	21
3.2. Modellen gebaseerd op expert-kennis .....	21
3.3. Modellen gebaseerd op empirische statistische relaties .....	21
3.4. Modellen met een procesbenadering .....	22
3.5. Samenvattende discussie .....	23
4. Kennisvragen voor een klimaatbestendige ecohydrologie .....	25
4.1. Leemtes in bestaande ecohydrologische modellen .....	25
4.2. Van ecohydrologische impactmodellen naar adaptatiestrategieën .....	28
4.3. Ontwikkeling van klimaatbestendige ecohydrologische modellen .....	29
Geciteerde literatuur .....	33
Bijlage: schriftelijke reactie Van der Zee .....	39





## Samenvatting

Klimaatverandering leidt tot veranderingen in de diversiteit aan plantensoorten en plantengemeenschappen. Het is aannemelijk dat de grootste effecten zullen optreden via wijzigingen in de waterhuishouding. Deze veranderingen beïnvloeden op hun beurt standplaatsfactoren die voor de plantengroei belangrijk zijn, zoals het zoutgehalte, de zuurgraad en de beschikbare hoeveelheid vocht, zuurstof en nutriënten.

Hierdoor is het is de vraag, of natuurdoelen die via Europese wetgeving een verplichtend karakter hebben (Vogel- en Habitatrichtlijn, Kaderrichtlijn Water), nog wel kunnen worden gehaald in het klimaat van de toekomst. Hetzelfde geldt voor de beheersdoelen die natuurbeschermingsorganisaties zich stellen. Indien tijdig, via adaptieve maatregelen in het beleid en beheer, op klimaatverandering wordt ingespeeld kunnen mogelijke bedreigingen worden opgevangen en kansen voor natuurontwikkeling worden benut. Te denken valt aan een andere planning van natuurdoelen in de EHS, het aanleggen van hydrologische bufferzones tegen verdroging, de berging van water in natte perioden, of het uitbreiden van het natuurareaal ter verhoging van de dispersiekansen van soorten.

In dit rapport worden verschillende ecohydrologische modellen besproken met het oog op hun toepasbaarheid in klimaatscenario's. Helaas blijkt geen van de modellen klimaatbestendig te zijn. Dat heeft grote consequenties: als straks meteorologische en hydrologische scenarioberekeningen zijn voltooid, kan nauwelijks iets gezegd worden over de gevolgen voor de biodiversiteit van Nederland, laat staan over de effectiviteit van adaptieve maatregelen. De onbruikbaarheid van de modellen komt doordat: (1) ze gebaseerd zijn op zeer indirecte verbanden, ontleend aan het klimaat van de twintigste eeuw, (2) CO<sub>2</sub> en belangrijke klimaatsvariabelen als temperatuur buiten beschouwing zijn gelaten, en (3) belangrijke terugkoppelingsprocessen in het systeem van bodem, water en vegetatie niet worden gemodelleerd.

Om binnen afzienbare tijd (maximaal vier jaar) bruikbare klimaatbestendige ecohydrologische modellen en adaptatiestrategieën gereed te hebben, verdienen de volgende onderzoeken prioriteit:

1. Ontwikkeling van een klimaatbestendig ecohydrologisch model, geschikt voor de evaluatie van scenario's en adaptieve maatregelen. Belangrijke bouwstenen voor een dergelijk model zijn al aanwezig (uit bestaande modellen en uit de kennis die op het ogenblik wordt ontwikkeld in BSIK), maar moeten verder uitgebouwd worden.
2. Ontwikkeling van een model voor de berekening van standplaatsfactoren in de loop der successie onder invloed van klimaat, nutriëntenbeheer en vegetatiebeheer. Dit model vormt in een later stadium een onderdeel van het onder (1) genoemde model.
3. Onderzoek 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 biodiversiteit, maar ook voor de grondwateraanvulling, de drijvende kracht achter het grondwatersysteem.
4. Onderzoek naar de gevolgen van ruimtelijke terugkoppelingsprocessen tussen vegetatie en bodem bij de ontwikkeling van ruimtelijke patronen in vegetatiestructuur. Dit is vooral van belang voor ecosystemen die sterk gelimiteerd zijn, bijvoorbeeld zeer voedselarme droge zandgronden en hoogvenen.

De totale omvang van dit onderzoek bedraagt ongeveer 2 M€. De drinkwaterbedrijven erkennen het belang van het klimaatbestendig ecohydrologisch modelleren van biodiversiteit. Ze zijn daarom onder voorwaarden bereid onderdelen te cofinancieren voor een bedrag van bijna 1 M€. Aanvullende financiering zal gezocht moeten worden. Als dit onderzoek gerealiseerd wordt, kan de ruimtelijke inrichting van Nederland ten behoeve van een klimaatbestendige natuur zeer kosteneffectief gerealiseerd worden.







## Summary

Climate change leads to changes in the diversity of plant species and plant communities. It seems probable that the biggest effect will occur due to differences in the water balance. In turn, these changes will affect habitat factors essential for plant growth, like salt levels, acidity and the availability of moisture, oxygen and nutrients.

As a consequence, it is questionable whether the nature targets, obligatory through European law (Bird Directive, Habitat Directive and the Water Framework Directive), may still be obtained in a future climate. The same applies to the nature protection aims formulated by nature management organisations. If one responds to climate change in time, through adaptive measures in policy and nature management, potential threats may be eliminated and chances for nature development may be created and fulfilled. Potential measures are a different planning of nature targets in the EHS, the creation of hydrological buffers against desiccation, water storage during wet periods, or the extension of protected areas to increase the chances of successful seed dispersal for plant species.

In this report, various ecohydrological models are treated in relation to their applicability in a future climate. Unfortunately, it turns out that none of the models are climate-proof. This has major consequences: even when meteorological and hydrological scenario calculations are released, still hardly anything may be predicted about the effects on biodiversity within the Netherlands, let alone about the effectiveness of adaptation strategies. The unsuitability of the models is caused by their (1) base upon indirect relationships, based upon the climate of the twentieth century, (2) omission of critical climate variables like temperature and CO<sub>2</sub>, and, (3) neglect of important feedback processes within the system of soil, water and vegetation.

In order to produce suitable climate-proof models and adaptation strategies within a reasonable period of time (maximally four years), the following research topics deserve priority:

1. Development of a climate-proof ecohydrological model, suitable to evaluate climate scenarios and adaptation measures. Important components for such model have already been developed (and are available in existing models and in models presently in development within BSIK), but will need to be further improved.
2. Development of a model to calculate modifications of habitat characteristics in the course of succession as affected by climate, nutrient management and vegetation management. At a later stage, this model will become part of the model mentioned at (1).
3. Research to determine the effects of drought upon the proportion of bare soil and the cover of mosses and lichens with low evapotranspiration on high sandy soils. This is relevant not only for biodiversity issues, but also for the groundwater recharge, driving the groundwater system.
4. Research to determine the effects of spatial feedback mechanisms between soil and vegetation. This is particularly important for ecosystems affected by stress, like infertile sandy soils and bogs.

In total, this research amounts to approximately 2 M€. The water companies value the importance of climate-proof ecohydrological modeling of biodiversity. Therefore they are willing to conditionally co-finance components of this research up to an amount of almost 1 M€. Other source of co-finance will have to be found elsewhere. If this research is granted, the spatial planning of the Netherlands in relation to climate-proof nature will be realized highly cost-effectively.





## 1. Inleiding

### 1.1. Aanleiding en probleemstelling

Uit de KKF-workshops op het KNMI van 6 en 25 juni 2008 en uit de daaraan verbonden inventarisatie [72] over ecologische voorspellingsmodellen is gebleken dat er nog een grote leemte in kennis bestaat over de effecten van klimaatverandering op ecosystemen. Vooral de noodzaak van klimaatbestendige ecohydrologische modellen ter bepaling van de toekomstige biodiversiteit kwam naar voren. Die biodiversiteit wordt op een complexe wijze via klimaatvariabelen beïnvloed, niet alleen via directe variabelen als CO<sub>2</sub>, temperatuur en neerslag, maar ook indirect, via bodemvocht, biotische bodemprocessen en waterchemie.

De algemene zorg na deze workshops was dat de ecologische modellering verre van klimaatbestendig is en we het ons niet kunnen veroorloven om over een paar jaar — als de klimaatmodellen verder geperfectioneerd zijn en de koppeling van regionale met lokale klimaatmodellen en hydrologische modellen gereed is — tot de conclusie te komen dat er geen zinnige koppeling met de ecologie gemaakt kan worden, laat staan dat adaptatiestrategieën beoordeeld kunnen worden. Dit rapport is een eerste stap in het wegnemen van deze zorg. Het is een 'State of the Art' overzicht van ecohydrologische modellering, leidend tot een samenhangende behandeling van de grootste kennisleemtes.

De probleemstelling die ten grondslag ligt aan dit onderzoek is dat het onvoldoende duidelijk is welke kennis aanwezig is en welke modellen, modelconcepten of modules van modellen bruikbaar zijn voor het klimaatbestendig modelleren van biodiversiteit. In dit rapport wordt een overzicht gegeven van de aanwezige kennis, mogelijke opties voor klimaatbestendige ecohydrologische modellering en de leemtes in kennis.

### 1.2. Inperking van het onderzoek

We beperken ons in deze studie tot de vegetatie als biotische component van het ecosysteem. De reden is dat veranderingen in de waterhuishouding het meest direct van invloed zijn op de vegetatie. Een andere reden is dat de natuurwaarde van gebieden vaak grotendeels ontleend wordt aan de vegetatie [67]. Een tweede inperking is dat we alleen terrestrische vegetaties en verlandingsvegetaties behandelen. Hier is geen inhoudelijke reden voor, alleen een pragmatische: de omvang van deze studie noopte tot inperking en liet dus niet toe dat we ook aquatische ecosystemen onderzochten. Ten slotte laten we buitendijkse vegetaties die direct onder invloed staan van de zee (kwelders en schorren) buiten beschouwing, omdat de mogelijkheid om hier met adaptieve maatregelen op in te grijpen (bijvoorbeeld via het waterbeheer), beperkt zijn.

Veel hydrologen noemen zich tegenwoordig 'ecohydroloog' wanneer zij de vegetatie bestuderen als regulator in de kringloop van het water: de vegetatie beïnvloedt de verdamping, de infiltratiecapaciteit van bodems, de weerstand tegen stroming van oppervlaktewater, etc. Deze studie gaat echter vooral over de ecohydrologie in de traditionele zin: het begrijpen en voorspellen van de diversiteit aan plantensoorten en plantengemeenschappen, de biodiversiteit, in afhankelijkheid van water. Dat we daarbij, waar nodig, ook naar de regulatiefunctie van de vegetatie kijken, spreekt voor zich, maar het doel is anders: het begrijpen en voorspellen van biodiversiteit. We beperken ons tot het topsysteem van vegetatie en bodem (de bovenste 1 á 2 m van het aardoppervlak, waaruit planten met hun wortels water en voedingsstoffen onttrekken).

Een van de externe deskundigen die het onderzoek heeft begeleid (zie Voorwoord), merkte op dat een betrouwbare ecohydrologische voorspelling valt of staat met goede ruimtelijke hydrologische modellen. Deze constatering onderschrijven we volledig. Voor het beleid zijn natuurdoelen vaak geformuleerd in de vorm van soorten en vegetaties die heel nauwkeurige eisen stellen aan de waterhuishouding, bijvoorbeeld aan de grondwaterstand. Deze hydrologische condities ruimtelijk nauwkeurig en met voldoende ruimtelijk detail voorspellen, is noodzaak voor het beoordelen van ecohydrologische effecten. In deze studie laten we ons echter niet uit over de ter beschikking staande hydrologische modellen, maar beperken we ons tot de opdracht.



### **1.3. Relevantie voor de hotspots**

Deze quick-scan is relevant voor al die hotspots waar zoete en/of zoute, natte tot vochtige ecosystemen voorkomen; Ondiepe Meren en Veenweidegebieden, Haaglanden, Zuidwestelijke Delta, Grote Rivieren, Waddenzee, maar ook de Droge Rurale Zandgronden met zijn vennen, hoogvenen, beekdalen en andere lage gebieden rondom de grote zandgebieden. Echter, ook, en misschien wel juist, zijn de drogere ecosystemen in deze hotspots van belang. Hierbij kan gedacht worden aan van hangwater afhankelijke ecosystemen waarvoor klimaatverandering via de neerslag en verdamping rechtstreeks de waterbeschikbaarheid beïnvloedt, maar ook aan de hoge delen van uiterwaarden en rivierduinen.

### **1.4. Leeswijzer**

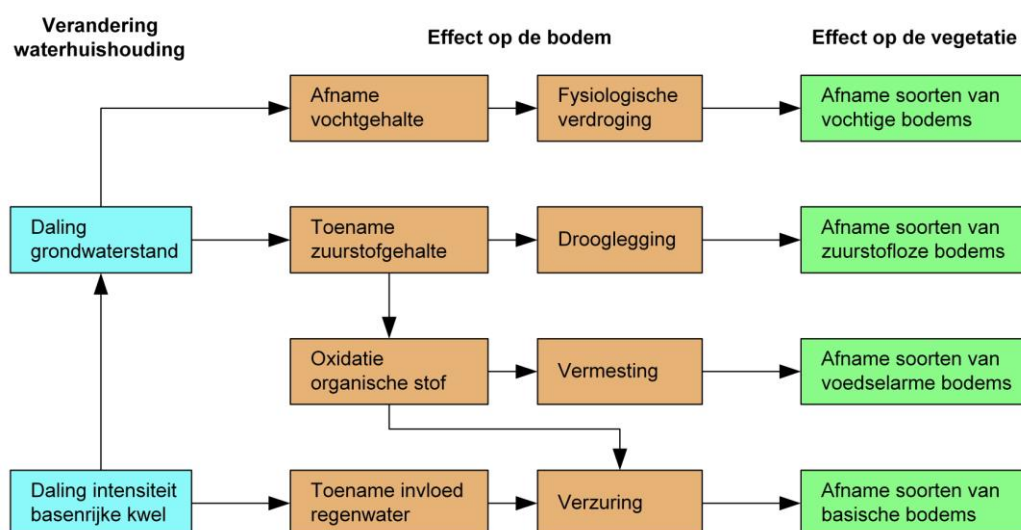
Klimaatverandering is waarschijnlijk vooral via de waterhuishouding van Nederland van invloed op de vegetatie [5, 6, 27, 59, 75]. Om dit inzichtelijk te maken hebben we een conceptueel schema gemaakt van de beïnvloedingen die uitgaan van klimaatvariabelen (Hoofdstuk 2). Daarna wordt een overzicht gegeven van de bestaande ecohydrologische modellen en wordt de vraag beantwoord in hoeverre deze geschikt zijn voor de voorspelling van de effecten van klimaatverandering (Hoofdstuk 3). Tot slot (Hoofdstuk 4) zullen we de gesignaleerde kennisleemtes prioriteren in de vorm van afgebakende brokken onderzoek waar volgens ons de grootste behoefte aan is.

## 2. Hoe klimaatverandering de vegetatie kan beïnvloeden

### 2.1. Inleiding

Het onderzoek naar de samenhang tussen water en biodiversiteit is vooral in de jaren tachtig van de vorige eeuw ontwikkeld als reactie op de verdroging van de natuur in Nederland. Natuurbeheerders zagen hun terreinen verpieteren en men dacht aanvankelijk dat het alleen een kwantiteitsprobleem was: men trachtte het euvel te verhelpen met simpele waterhuishoudkundige maatregelen, bijvoorbeeld het dichten van greppels om regenwater in het gebied te conserveren, of de aanvoer van oppervlaktewater. Deze maatregelen hadden meestal niet het beoogde effect omdat planten niet alleen eisen stellen aan de hoogte van de grondwaterstand, maar ook aan andere standplaatsfactoren, zoals de hoeveelheid beschikbare nutriënten in de bodem, het zuurstofgehalte, de zuurgraad en de beschikbaarheid van micro-elementen in de bodem. Planten hebben niet alleen dorst, ze hebben ook lekkere dorst. Nog steeds blijkt dat niet-ecologen vaak menen dat de vegetatie in natuurterreinen een kwestie is van de juiste hoeveelheid water. Dat de zaak ingewikkelder ligt wordt geïllustreerd met Figuur 2-1, dat de potentiële effecten op de vegetatie van een grondwaterstanddaling laat zien.

De huidige generatie ecohydrologische modellen probeert zo goed mogelijk de vegetatie te voorspellen als functie van de hiervoor genoemde standplaatsfactoren (Hoofdstuk 3). Nu het klimaat verandert, hebben we echter een ander type modellen nodig (Hoofdstuk 4). Om dat te kunnen begrijpen schetsen we hier eerst op welke wijze de vegetatie zou kunnen worden beïnvloed door klimaatverandering.



**Figuur 4-1. Belangrijkste schadelijke gevolgen van hydrologische veranderingen op natte ecosystemen. [74]**

### 2.2. Relevante processen

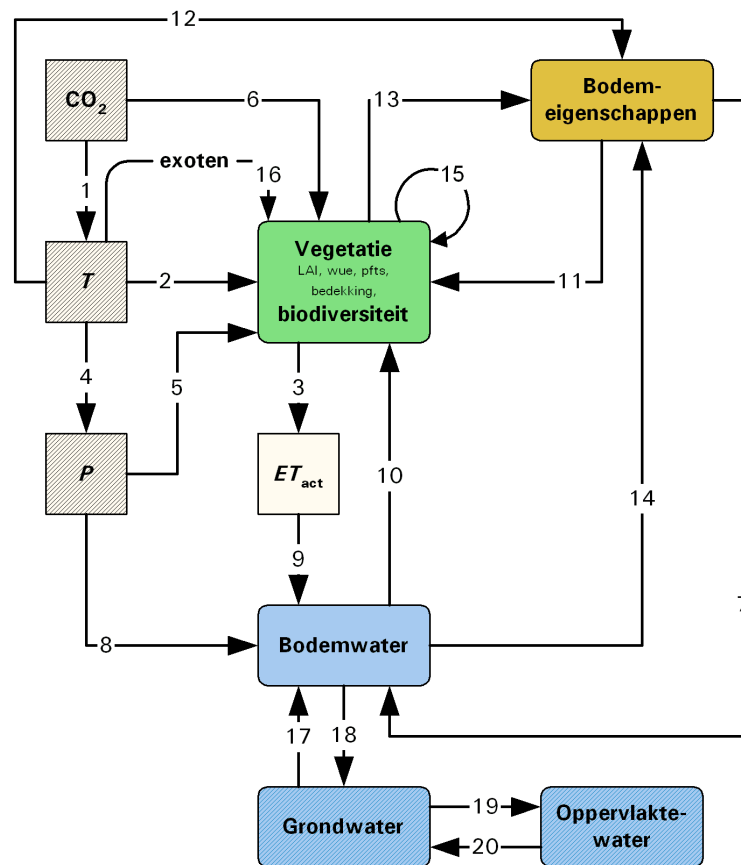
De wisselwerking tussen klimaat, bodem en vegetatie is zeer complex en iedere poging deze in een schema te vatten kan rekenen op kritiek. In die wetenschap en het besef niet volledig te kunnen zijn, willen wij hier toch een bescheiden poging wagen de belangrijkste processen schematisch weer te geven: zie Figuur 2-2. De nummers in deze figuur verwijzen naar de processen die we hieronder bespreken. In de figuur zijn de drie compartimenten van het door ons onderzochte systeem te herkennen: bodem, water, vegetatie. Gearceerde blokken zijn procesonderdelen die buiten het aandachtsveld van de ecohydrologische modellering, zoals opgevat in deze studie, vallen.

#### *Directe processen*

Broeikasgassen, waaronder CO<sub>2</sub>, zorgen voor een verhoging van de temperatuur op aarde (1), wat van invloed is op de fenologie [63] en, via aanpassingen tegen vorst en hitte, de overlevingsmogelijkheden van soorten (2). De relatie tussen temperatuurstijging door klimaatverandering en de overlevingskansen van soorten is in diverse studies statistisch onderzocht,



vaak met zogenaamde klimaatveloppen, maar ook op basis van historische verspreidingsgegevens van soorten o.a. [47, 50].



**Figuur 2-2. Processen die via klimaatverandering de vegetatie beïnvloeden. Gearceerd: onderdelen die buiten de ecohydrologische modellering vallen. ET<sub>act</sub> = werkelijke verdamping, P = neerslag, T = temperatuur.**

Temperatuurstijging leidt via de vegetatie (2) bovendien tot een hogere verdampingsflux (3). De hydrologische kringloop op aarde wordt versneld, wat voor Nederland waarschijnlijk zal betekenen dat de neerslag toeneemt en de verdeling van de neerslag in de tijd verandert (4) [56]. Het veranderende neerslagpatroon is via de vegetatie (5) van invloed op de interceptiepost in de verdamping (3): de interceptie daalt naarmate de neerslag meer in de vorm van extreme buien valt [9, 68]. Met de meeste hydrologische modellen (bijvoorbeeld SWAP [55]) kan deze verandering goed worden gesimuleerd. Toename van CO<sub>2</sub> zal enerzijds leiden tot verhoogde biomassaproductie, anderzijds kunnen planten bij hogere CO<sub>2</sub>-concentraties makkelijker voldoen aan hun koolstof behoefte, zodat zij hun huidmondjes minder hoeven te openen of minder huidmondjes hoeven aan te maken (6). Voor Nederland is het effect op de verdamping van beide aanpassingen (hogere leaf-area index LAI én hogere water use efficiency wue) in de vorm van eenvoudige correctiecijfers gekwantificeerd [31, 79, 80].

Bij een gegeven grondwaterstand en bodemfysische eigenschappen (7) wordt de hoeveelheid vocht in de bodem die beschikbaar is voor de vegetatie bepaald door de neerslag (8) en de werkelijke verdamping (9). Bij te weinig vocht reduceren planten hun verdamping door hun huidmondjes te sluiten (10). Wanneer de vegetatie hier niet op is aangepast, bijvoorbeeld met luchtwortels, gebeurt dat ook onder zeer natte omstandigheden doordat er dan een gebrek aan zuurstof in de bodem is om te kunnen respireren [4].

De vegetatie (soortensamenstelling, plantfunctionele eigenschappen én verdampingskenmerken) wordt direct beïnvloedt door bodemchemische en bodemfysische factoren, zoals de pH en de beschikbare hoeveelheid nutriënten, water en zuurstof (10 & 11). Zoals in Hoofdstuk 1 vermeld zijn de



meeste ecohydrologische modellen juist op deze standplaatsfactoren gericht, en dan in het bijzonder op de relatie tussen deze factoren en de soortensamenstelling van de vegetatie. De hoeveelheid beschikbare nutriënten in de bodem wordt bepaald door de afbraaksnelheid van organische stof, welke sterk afhankelijk is van de temperatuur (12) [36].

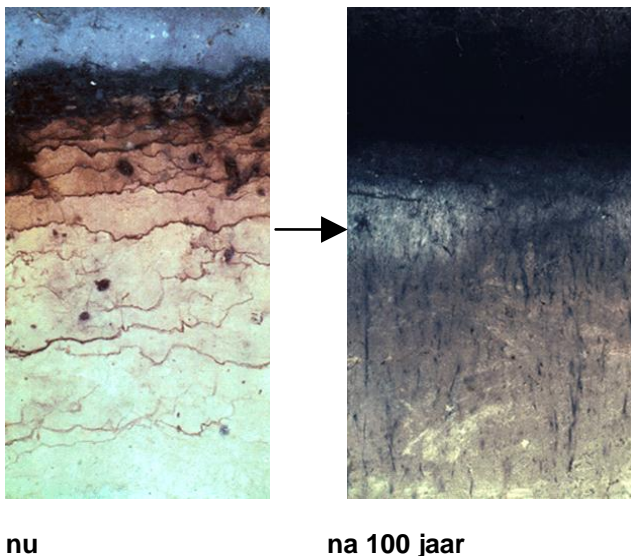
Bij ondiepe grondwaterstanden (maximaal ca. 2m –maaiveld, maar dit is afhankelijk van de bodemtextuur) wordt de hoeveelheid bodemvocht en zuurstof mede bepaald door de invloed van grondwater, namelijk via capillaire opstijging (17). De kwaliteit van dit grondwater is via de bodemchemie tevens van groot belang voor de vegetatie. In West-Nederland staan veel bodems onder invloed van brak grondwater, wat leidt tot een kenmerkende vegetatie van soorten die in zekere mate zouttolerant zijn. Andere vegetaties moeten het juist hebben van zoet en basenrijk kwelwater (denk aan blauwgraslanden en trilvenen), wat onder andere leidt tot een neutrale en zeer stabiele bodem-pH, terwijl bijvoorbeeld hoogvenen en natte heiden zeer basenarm water behoeven. Klimaatverandering kan via gewijzigde grondwaterstromingspatronen leiden tot een andere grondwaterkwaliteit en aldus achtereenvolgens de bodemchemie (14) en de vegetatie (11) beïnvloeden. Een gevolg van klimaatverandering kan bijvoorbeeld zijn dat de invloed van brak grondwater toeneemt.

De verandering van grondwaterstromingspatronen hangt af van de grondwateraanvulling (het verschil tussen percolatie van bodemwater (18) en capillaire opstijging (17)) en de drainage naar en infiltratie vanuit het stelsel van oppervlaktewateren (resp. 19 en 20).

De hiervoor genoemde processen werken vrij direct in op de vegetatie: bij een verandering kan de respons van de vegetatie op een termijn van een uur tot een groeiseizoen al worden waargenomen. Dat geldt niet voor de volgende processen, die pas na meerdere jaren manifest worden.

#### *Indirecte processen*

In ecohydrologische modellen (maar ook in bijna alle hydrologische modellen) wordt de bodem beschouwd als een entiteit met onveranderlijke bodemfysische en bodemchemische eigenschappen: de bodem als bloempot. Bij klimaatverandering hebben we het echter over voorspellingen met een lange tijdshorizon, bijvoorbeeld 50 of 100 jaar. En op de lange termijn zijn bodem en water geen constanten, maar veranderen bodemfysische en bodemchemische eigenschappen onder invloed van de vegetatie, die op zijn beurt weer mee verandert (Figuur 2-3). Bodem, water en vegetatie vormen samen een eenheid in de successie, de een kan niet beschouwd worden zonder de ander. In enkele modellen wordt met terugkoppelingsprocessen al in zekere mate rekening gehouden, maar deze modellen hebben vooral als functie de natuur wetenschappelijk te doorgronden, niet om op een betrouwbare wijze biodiversiteit te voorspellen [61].



**Figuur 2-3. Een bodem is geen vaste entiteit: hij ontwikkelt zich in de loop der tijd onder invloed van klimaat, vegetatie en grondwaterstand.**





Een van de belangrijkste terugkoppelingsprocessen is dat in de loop der tijd de ophoping van organische stof stijgt onder invloed van vegetatie (13) en bodemvocht (14). Daardoor neemt de beschikbaarheid van nutriënten en bodemvocht toe zodat de biomassa-productie van de vegetatie stijgt. In infiltratiebodems vindt uitloging plaats, wat tot verzuring leidt. Klimaatverandering beïnvloedt het successieverloop, bijvoorbeeld doordat natte omstandigheden leiden tot een opbouw van de hoeveelheid organische stof, terwijl drogere omstandigheden meestal tot een afbraak van organische stof leiden.

Veranderingen in het klimaat en in standplaatsfactoren leiden uiteindelijk, via concurrentie om water, nutriënten en licht, en via tolerantie tegen diverse stressoren (hitte, droogte, gebrek aan zuurstof en water), tot een andere soortensamenstelling van de vegetatie (15). Daarmee kunnen ook de verdampingseigenschappen van de vegetatie veranderen. Zo is onlangs aannemelijk gemaakt dat het aandeel kale grond en het aandeel weinig verdampende mossen en korstmossen op de hogere zandgronden zullen gaan toenemen wanneer de zomers droger worden (Figuur 2-4) [27, 75].

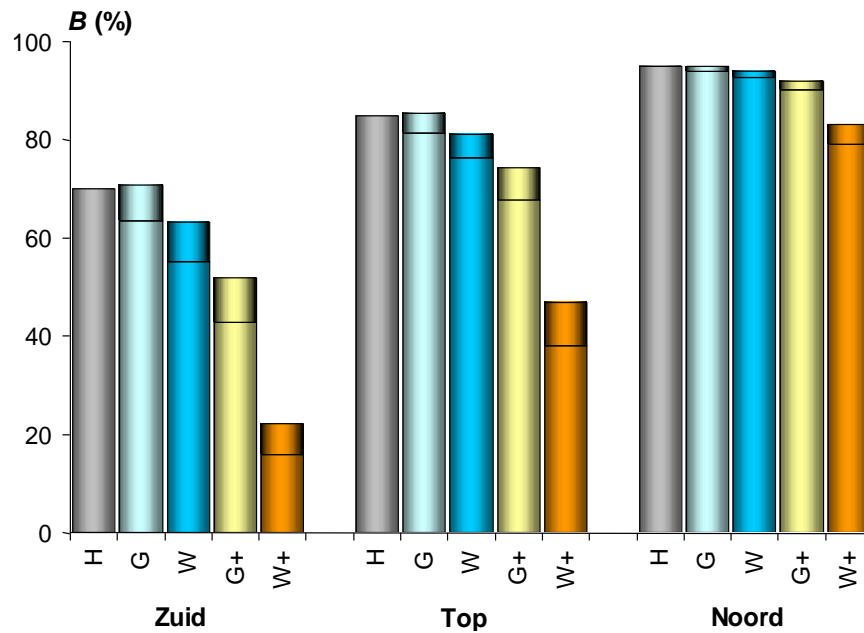
Klimaatverandering, en dan vooral de stijging van de temperatuur, kan leiden tot het oprukken van nieuwe plant- en diersoorten (16). Er zijn diverse gevallen bekend waarbij het oprukken van exoten grote gevolgen heeft gehad voor de (soortensamenstelling van de) vegetatie (Grote waternavel, Japanse duizendknoop, Waterpest, Bospest, Eikenprocessierups, Kastanjemineermot).

### **2.3. Samenvattende discussie**

De wisselwerking tussen klimaat, bodem, water en vegetatie is complex. De huidige generatie ecohydrologische modellen probeert zo goed mogelijk de vegetatie te voorspellen door die complexiteit mee te nemen. Die complexiteit heeft ook tot gevolg dat de effecten van klimaatverandering en de ontwikkeling van adaptatiestrategieën alleen in voldoende mate bestudeerd kan worden via modellen.

Klimaat kan de vegetatie direct beïnvloeden via CO<sub>2</sub>, temperatuur, neerslag en verdamping. Vegetatie reageert op deze invloeden op een termijn van uren tot een groeiseizoen. Op de lange termijn kunnen bodem en water echter niet meer als constanten beschouwd worden, maar zullen bodemchemische en –fysische eigenschappen veranderen onder invloed van de vegetatie, die op zijn beurt weer mee reageert. Ten slotte zal een verandering in de soortensamenstelling, door klimaatverandering, effecten hebben op bodem en water.

Alleen als deze processen in samenhang geanalyseerd worden, kunnen adequate adaptatiestrategieën ontworpen worden. In het volgende hoofdstuk zal bediscussieerd worden in welke mate bestaande modellen daartoe in staat zijn.



**Figuur 2-2.** Berekende bedekking B op de zuidhelling, de top en de noordhelling van een duin in de Amsterdamse Waterleidingduinen onder de vier scenario's van het KNMI (G, W, G+ en W+)<sup>75</sup>. Het 'hoedje' op ieder staafje geeft het CO<sub>2</sub>-effect weer: het verminderen van de verdamping door hogere koolzuurgasconcentraties. Ter vergelijking is de huidige bedekking (H) opgenomen. De vorming van kale grond is een aanpassing van de vegetatie aan klimaatverandering die grote gevolgen heeft voor de bodem- en grondwaterhuishouding. Deze aanpassing is echter hoogst onzeker en dient nader te worden onderzocht.





### 3. Overzicht van bestaande ecohydrologische modellen

#### 3.1. Welke modellen zijn er al?

De afgelopen twee decennia is in Nederland hard gewerkt aan de ontwikkeling van ecohydrologische effectvoorspellingsmodellen. De mogelijkheden en beperkingen hiervan, de perspectieven voor de toekomst en potentiële verbeteringen aan de modellen zijn geëvalueerd in een aantal overzichtsartikelen en rapporten [16, 20, 37, 70, 72, 78, 81, 82].

In het kader van dit rapport zijn 11 ecohydrologische modellen geselecteerd als voorbeelden van modellen waarover veel is nagedacht bij de ontwikkeling en waarover wetenschappelijk gepubliceerd is: DEMNAT, NTM, ICHORS, ITORS, HYVEG, MOVE, NUCOM, SMART-SUMO, ECOMOD, NICHE, PROBE. Het grootste gedeelte van deze 11 ecohydrologische modellen wordt nog steeds toegepast bij vraagstukken waarbij gezocht wordt naar nieuwe vormen van peilbeheer, waterkwaliteitsbeheer of landgebruikplanning. Hier analyseren we of deze modellen, of onderdelen daarvan, ook bruikbaar zijn bij een veranderend klimaat. Allereerst geven we in grote lijnen weer wat de belangrijkste eigenschappen zijn van de modellen.

Ze verschillen in veel opzichten. In het bestek van dit rapport zijn de meest essentiële verschillen het modelconcept, de ingrepen waarvoor ze effecten voorspellen, het type ecosystemen waarvoor ze voorspellingen doen, de vereiste invoer en de gegenereerde uitvoer en de extrapolatiebaarheid. In essentie vallen de modellen uiteen in categorieën op basis van een aantal concepten:

- Ecosysteembenadering versus standplaatsbenadering;
- Empirisch statistische versus expertkennis versus procesbenadering.

Veelal combineren modellen deze benaderingen; de indeling is daardoor, alhoewel illustratief, ietwat geforceerd.

#### 3.2. Modellen gebaseerd op expert-kennis

Van de 11 modellen, zijn vier modellen vooral gebaseerd op expertkennis, te weten DEMNAT, NTM, ECOMOD en MOVE. DEMNAT hanteert de ecosysteembenadering, waarin deels met empirische gegevens onderbouwde expertkennis is opgenomen en waarbij een verandering van natuurwaarde wordt voorspeld op basis van verschuivingen tussen ecotooptypen [58, 72]. NTM gaat uit van de standplaatsbenadering waarbij deels met empirische gegevens onderbouwde expertkennis is opgenomen en de natuurbehoudswaarde van de standplaats wordt voorspeld via beslisregels [69]. Deze twee modellen maken gebruik van lijsten van indicatiewaarden zoals die van Ellenberg voor vocht, zuurgraad, voedselrijkdom en zout. MOVE is een variant op deze modellen, waarbij het gemiddelde van de Ellenberg indicatiewaarden van de op een plek voorkomende soorten is berekend. Dat is gedaan voor 17000 vegetatieopnames. Deze zijn gebruikt om via regressie een inschatting te maken van het optimum en de tolerantie van de soorten uitgedrukt in Ellenberg-getallen [32, 33]. ECOMOD is een standplaatsmodel dat specifiek voor de Amsterdamse Waterleidingduinen is ontwikkeld. Dit model maakt gebruik van geformaliseerde expertkennis [20].

#### 3.3. Modellen gebaseerd op empirische statistische relaties

ICHORS [2], ITORS [18] en HYVEG [35] zijn voorbeelden van zogenaamde empirisch-statistische modellen. Dit zijn modellen waarbij de aan- en afwezigheid van soorten gerelateerd wordt aan de op een plek gemeten milieufactoren. Deze modellen maken gebruik van gegevensbestanden waarop zeer veel plekken soorten en milieuomstandigheden zijn geïnventariseerd en waarbij op basis van dit empirische materiaal statistische relaties zijn afgeleid. Zo is HYVEG een empirisch statistisch model dat met een groot aantal grondwaterstandvariabelen het voorkomen van soorten probeert te verklaren in het duingebied Meyendel. Deze empirische relaties worden gebruikt om te voorspellen hoe de respons van soorten zal zijn bij een veranderend milieu. De voorspelling is in feite een extrapolatie in de tijd. Verschillen tussen plekken zoals waargenomen in het hier en nu worden geëxtrapoléerd naar veranderingen zoals die in de toekomst zouden kunnen ontstaan na een verandering van het milieu. Omdat proceskennis ontbreekt en er bijvoorbeeld geen informatie is over hoe lang het duurt voor een stabiele nieuwe toestand wordt bereikt, voorspellen deze modellen onder de aanname dat er een nieuw evenwicht tussen milieuomstandigheden en de aanwezige soorten is ontstaan. Het nadeel is echter weer dat de geldigheid van de empirische relaties en dus van de voorspellingen strikt genomen alleen geldt voor het geografische gebied en de overige omstandigheden waar de data zijn verzameld. Extrapolatie is in principe niet toegestaan.



### 3.4. Modellen met een procesbenadering

PROBE, NICHE, NUCOM en SMART-SUMO zijn alle vooral gebaseerd op proceskennis (voor meer details zie [78]). Gezien het potentieel van dergelijke benaderingen voor de ontwikkeling van een klimaatbestendig ecohydrologisch model, zal op deze modellen uitgebreider worden ingegaan dan het geval was voor de voorgaande modellen.

NUCOM [59, 60] en een vergelijkbaar naamloos model ontwikkeld voor een Engels helling-overstromingsvlakte gebied [57], zijn procesmodellen die de stikstof-, koolstof- en waterhuishouding van een ecosysteem berekenen op basis van een procesmatige benadering van plant- en bodemprocessen in ecosystemen. NUCOM beschrijft de concurrentie tussen soorten om voedsel, vocht en licht. Omdat het ondoenlijk is de interacties tussen alle soorten te simuleren werkt het model met een beperkt aantal plantfunctionele groepen van soorten die concurreren met elkaar naar gelang die soorten overeenkomen in concurrentiekracht, en de hoeveelheid en afbreekbaarheid van organische stof. Ten gevolge van het afsterven van boven- en ondergrondse plantdelen treedt verandering op in de hoeveelheid en de aard van de organische stof in de bodem. Dit uit zich in een toename van de mineralisatiesnelheid en een verhoogde beschikbaarheid aan nutriënten, een proces dat door NUCOM wordt gesimuleerd. Door de toename van het organische-stofgehalte neemt de beschikbare hoeveelheid beschikbaar bodemvocht (d.w.z. de hoeveelheid tussen veldcapaciteit en verwelkingpunt) toe.

In eerste instantie is dit model ten behoeve van klimaatsstudies geschikt gemaakt voor de successie op een kale zandgrond met een diepe grondwaterstand [61]. Waargenomen veranderingen in de vegetatie op de Veluwe bleken met dit model goed te kunnen worden gesimuleerd. In de 'Veluwe'-versie werd hier rekening mee gehouden via een simpel bakjesmodel dat de hoeveelheid beschikbaar bodemvocht berekent als functie van de hoeveelheid organische stof. Deze versie is echter ongeschikt voor de door grondwater beïnvloede systemen, waar de vochtvoorziening in de wortelzone tevens afhangt van de capillaire nalevering van grondwater.

Voor zulke natte ecosystemen is de 'Wetland'-versie van NUCOM ontwikkeld [59]. Onderdelen van het onverzadigde-zonemodel SWAP [55] werden daartoe geïncorporeerd, maar in deze versie is de successie van bodemfysische relaties (bodemvocht- en doorlatenheidskarakteristieken) volledig buiten beschouwing gelaten. Bovendien berekent de Wetland-versie systematisch veel te hoge verdampingsfluxen (Fig. 6.4 en 6.7 in [59]): verdamping ruim 600 mm/jr, waar alleen al onder de huidige CO<sub>2</sub>-concentraties ca. 500 mm/jr mag worden verwacht; voor de percolatie van water uit de wortelzone naar het grondwater betekent dit bij een neerslag van 800 mm/jr een overschatting van 33%). Het grote aantal reactievergelijkingen en parameters in NUCOM (resp. 30 en 98) zijn een probleem bij de toepasbaarheid. Voor de Veluwe is echter aangetoond<sup>61</sup> dat de met NUCOM berekende standplaatsfactoren zouden kunnen worden gebruikt als invoer voor het statistische model MOVE. Wegens de enorme behoefte aan invoerparameters lijkt een puur mechanistische benadering hoewel wetenschappelijk interessant, nochtans ongeschikt voor toepassingen.

NICHE-duinen [29] en PROBE [76, 77] zijn specifiek voor de duinen ontwikkeld. De trofiemodule van NICHE is mechanistisch, omdat het aandeel procesbeschrijving in dit model relatief groot is. De module berekent de voedselrijkdom van de standplaats als functie van waterhuishouding, bodemtype (eigen indeling), beheer en inrichting. De module beperkt zich tot de twee belangrijkste voedingsstoffen, stikstof (N) en fosfor (P). In het model wordt de beschikbaarheid van N en P bepaald door (1) de mineralisatie vanuit humus (met reductiefactoren voor de invloed van zuurgraad en vochtgehalte), (2) de levering via grond- en oppervlaktewater, atmosferische depositie en eventuele bemesting, (3) maaibeheer en (4) in het geval van P precipitatie van fosfaat. De N-en P-beschikbaarheid is berekend als de som van de aanvoer en mineralisatie, verminderd met eventuele precipitatie en afvoer door maaien. Bepalend voor de voedselrijkdom voor de vegetatie is de beschikbaarheid van die voedingsstof die het meest schaars is. Deze zogenaamde groeibeperkende voedingsstof wordt in het model afgeleid uit de verhouding waarin N en P beschikbaar zijn [28]. De beheercomponent begrazing ontbreekt in het model. NICHE is in eerste instantie ontwikkeld voor vochtige tot natte ecosystemen. Uitbreiding van de voedselrijkdom-module van NICHE voor droge vegetaties levert naar verwachting geen problemen op. Op grond van literatuurgegevens kan namelijk de belangrijkste parameter, de mineralisatiesnelheid, beschreven worden voor droge omstandigheden. Daarnaast kan gepubliceerd onderzoek [b.v. 7, 24, 49] worden gebruikt voor het vaststellen van procesparameters.

In NICHE wordt de pH/basenverzadiging afgeleid uit een combinatie van factoren via een beslisboom. Uitgangspunt is het vaststellen van de bepalende factor voor de zuurbuffering op het niveau van een



duinvallei. De methode is ook toepasbaar voor het vaststellen van zuurgradiënten binnen duinvalleien.

De eerste stap wordt gevormd door het chloridegehalte van het ondiepe grondwater, gevolgd door het kalkpercentage in de toplaag van de bodem. Vervolgens wordt een verder onderscheid gemaakt op basis van kweldruk, calciumconcentratie van het ondiepe grondwater en de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG). Uiteindelijk wordt onderscheid gemaakt in vijf zuurklassen. De beslisboom kan relatief gemakkelijk uitgebreid worden met droge duinecosystemen (op basis van bodemkenmerken en zuurdepositie). Nadeel van deze benadering dat een volledige dynamische modellering niet mogelijk is. Wel kunnen onderdelen in een dynamisch model worden ondergebracht, zoals een functie over de mate van uitloging en de invloed van humusopbouw op de zuurgraad.

PROBE is een model dat proceskennis, onder andere uit NICHE, combineert met een statistische aanpak waarin de kans op voorkomen van vegetatietypen wordt berekend [76, 77]. Dat gebeurt als functie van meerdere standplaatsfactoren tegelijk, wat als voordeel heeft dat rekening wordt houden met correlaties tussen standplaatsfactoren. De kansfuncties zijn voor PROBE afgeleid uit een bestand met ruim 35 0000 vegetatieopnamen [83]. In 2009 wordt voor de duinen een minimodel voor bodemsuccessie gebouwd, waarin humusvorming en uitloging in de loop der tijd zijn opgenomen. Op deze manier kan PROBE geschikt worden gemaakt voor langetermijnvoorspellingen. Tevens bestaan er concrete plannen om het model uit te breiden voor de rest van Nederland.

SMART-SUMO zijn gekoppelde modellen die ieder een ecosysteemcomponent bevatten. SMART is een dynamisch procesmodel voor de onverzadigde bodem dat zich richt op het bepalen van de effecten van zuurdepositie op de zuurgraad. De concepten in SMART lijken sterk op die in de bodemmodule van NICHE. Het model houdt rekening met zuurbuffermechanismen, kation-uitwisselingsprocessen, biochemische zuurvorming (bv. door decompositie) en transport van grondwater. In SMART wordt de standplaatsfactor voedselrijkdom uitgedrukt in nutriëntenbeschikbaarheid (alleen N). Deze beschikbaarheid is het gevolg van de som van atmosferische depositie, mineralisatie en aanvoer van N via waterstroming. De N-flux ten gevolge van mineralisatie wordt beschreven als de fractie van de N-input in de vorm van strooisel en afgestorven worteldelen, die jaarlijks vrijkomt. Hierbij wordt onderscheid gemaakt in een flux uit gemakkelijk afbreekbaar materiaal en een flux uit moeilijk afbreekbaar materiaal. Eerst berekent het model een optimale N-mineralisatie, die vervolgens wordt gereduceerd onder invloed van bodemvocht, pH en C/N-verhouding.

SUMO is een dynamisch successiemodel voor vegetatie dat de kans op voorkomen van bepaalde soorten berekend. Het is alleen geschikt voor zandgronden. Het model draait om stikstof, en biomassagroei wordt dan ook gemodelleerd als functie van licht, stikstof, grondwaterstand en beheer. Doordat klimaat ingrijpt via CO<sub>2</sub> en temperatuur dient een fundamenteel andere procesbenadering gekozen te worden. Het procesgeoriënteerde model bevat vele parameters (1000) die door 'fine-tuning' procedures geoptimaliseerd zijn. Hierdoor heeft het model een empirisch karakter gekregen met grote kans van overparameterisering.

### 3.5. Samenvattende discussie

Er zijn veel ecohydrologische modellen beschikbaar in Nederland. Ook internationaal gezien, heeft Nederland een belangrijke rol op het gebied van ecohydrologische modellering. De modellen richten zich in hoofdzaak op het leggen van relaties tussen standplaatsfactoren, als grondwaterstand en bodem-pH, en de vegetatie (10 en 11 in Figuur 2-2). Of deze relaties nu via deskundigenoordeel of via statistiek tot stand zijn gekomen, ze zijn in ieder geval gebaseerd op het klimaat van de twintigste eeuw. Bovendien is in die relaties vaak het effect van het klimaat niet ingebouwd (in bijvoorbeeld de relatie grondwaterstand – vegetatie, zit niet het effect van een stijgende temperatuur). Al met al is het zeer twijfelachtig of ze kunnen worden gebruikt om er de effecten van klimaatverandering mee te berekenen.

Veranderingen in de waterhuishouding, leiden tot een verandering in de hoeveelheid bodemvocht, nutriënten en andere standplaatsfactoren (bijv. Figuur 2-1).

In de modellen DEMNAT, NTM, SMART, NICHE, PROBE en NUCOM worden deze standplaatsveranderingen gesimuleerd. Dat gebeurt echter op een zeer vereenvoudigde wijze, waarin de bodemeigenschappen niet veranderen en waarin geen rekening is gehouden met de effecten van veranderende weerscondities, temperatuur- en CO<sub>2</sub>-stijging. NUCOM is hierop een gunstige



uitzondering, maar dit model is, met zijn 30 reactievergelijkingen en 98 modelparameters, vooral van wetenschappelijk belang: begrijpen hoe de natuur 'werkt'. Bovendien is het toepassingsbereik beperkt: hogere grondwateronafhankelijke zandgronden.

In een klimaatveranderende wereld kan niet worden volstaan met correlatieve kennis of een deskundigenoordeel, maar is gedegen inzicht in causaal-analytische verbanden noodzakelijk [5, 22, 40, 51]. Die noodzakelijke inzichten zullen in Hoofdstuk 4 behandeld worden. Die kennis kan dan in procesmodellen worden opgenomen ofwel door de ontwikkeling van nieuwe modellen ofwel door aanpassingen in bestaande procesgebaseerde modellen, zoals SMART, NUCOM en PROBE.



## 4. Kennisvragen voor een klimaatbestendige ecohydrologie

### 4.1. Leemtes in bestaande ecohydrologische modellen

Klimaatbestendige ecohydrologische modellen zijn een voorwaarde voor de ontwikkeling van effectieve adaptatiestrategieën. In dit verband is het goed om de belangrijkste tekortkomingen van de huidige modellen op een rijtje te zetten. Hierbij volgen we de structuur van het procesdiagram van Figuur 2-2 via CO<sub>2</sub>, temperatuur naar bodemwater- en bodemchemie-effecten en eindigend in de centrale vegetatiebox.

#### *Relaties tussen vegetatie en CO<sub>2</sub>*

Zoals in Hoofdstuk 2 is aangegeven, heeft een verandering in atmosferische CO<sub>2</sub>-concentratie een belangrijke invloed op de waterhuishouding, zowel op de korte termijn (door effecten op de huidmondjes) als op de lange termijn (via aanpassingen van de plantensoorten en eventuele verschuivingen in de plantengemeenschappen) (6). Daarbij lijken de effecten op korte termijn te verschillen van die op de lange termijn [41, 59]. Geen van deze effecten zit echter expliciet in de huidige ecohydrologische modellen, terwijl het grote effecten heeft op de waterbalans. Dergelijke modellen zijn wel gemaakt om transpiratie- en assimilatiefluxen uit bossen te simuleren [bijv. 14, 30, 64] en die modellen zijn hydrologisch gekoppeld aan modellen voor de onverzadigde zone. Wellicht kunnen inzichten verkregen via dergelijke modellen worden ingebouwd in ecohydrologische modellen.

#### *Relaties tussen vegetatie en temperatuur*

In tegenstelling tot Nederlandse ecohydrologische modellen, wordt temperatuur in diverse mondiale modellen gebruikt om de verspreiding van soorten of vegetatietypen te voorspellen (2). Als de temperatuur gaat stijgen, lijkt het voor de hand te liggen om relaties uit de mondiale, zogenaamde bio-enveloppe modellen op te nemen in ecohydrologische modellen om zo verschuivingen in de vegetatie als gevolg van temperatuur te kunnen berekenen, wat momenteel niet in de huidige modellen mogelijk is.

Toch lijkt dit niet een goede oplossing, omdat het nog maar zeer de vraag of relaties uit die modellen nog geldig zijn in een veranderend klimaat. De effecten van temperatuur op planten uit zich in een aantal directe effecten, zoals het al of niet bestendig zijn tegen nachtvorst of tegen hoge temperaturen. Deze relaties kunnen klimaatbestendig zijn. Een belangrijke voorwaarde daarvoor is echter dat in de directe effecten van temperatuur op de verspreiding van soorten of vegetatietypen ook de invloed van extremen in temperatuur zit. De wetenschappelijke consensus is meer en meer dat extremen in temperatuur een grotere invloed hebben op planten dan gemiddelden (zoals uitgedrukt in isoclines). Een relatie tussen vegetatie en temperatuur zal de invloed van extremen daarom in ogenschouw moeten nemen.

Bovendien zijn temperatuurseffecten waarschijnlijk merendeels indirect, bijvoorbeeld doordat temperatuur effect heeft op de nutriëntenbeschikbaarheid en hierdoor indirect op de concurrentie tussen plantensoorten. Ook bepaalt temperatuur de mate van verdamping en respiratie van planten (3) en heeft hij zo effect op de concurrentie tussen plantensoorten om water. Temperatuur is dus een van de factoren die de concurrentie tussen plantensoorten of tussen vegetatietypen zal veranderen. Die effecten van temperatuur zijn echter heel lastig te scheiden van andere factoren die de concurrentie tussen plantensoorten bepalen. In de meeste bestaande modellen wordt ofwel de concurrentie slechts indirect meegenomen (b.v. door correlaties met temperatuur, veelal betekend dat de rol van concurrentie wordt genegeerd) of als constante veronderstelt (terwijl bovenstaande aangeeft deze relaties zullen veranderen in een veranderend klimaat). De correlaties tussen de verspreiding van soorten en temperatuur zullen in elk geval mede door deze indirecte effecten veranderen in een veranderend klimaat en zijn dus niet klimaatbestendig. Er komt dan ook steeds meer internationale kritiek [bijv. 8, 22, 51] op het gebruik van bioenveloppe modellen, ze worden "ecologisch naïef" genoemd. Die kritiek gaat overigens verder dan alleen het correlatieve karakter van de klimaatenvoloppen, ook wordt bijvoorbeeld betwijfeld of uit de werkelijke verspreiding van soorten, die deels nog na-ijlen op de laatste ijstijd, wel informatie kan worden ingewonnen over de werkelijke temperatuurtolerantie van soorten.

Aangezien in een internationaal verband temperatuurgradiënten, en daarmee de potentiële rol voor directe temperatuurseffecten, groter zijn dan binnen Nederland, lijkt de toepasbaarheid van een benadering met klimaatenvoloppen voor Nederland nog kleiner.





### *Relaties tussen water en vegetatie*

De bestaande ecohydrologische modellen relateren de respons van vegetatietypen of plantensoorten aan een karakteristieke grondwaterstand, zoals de GHG, GLG of GVG (10). Meestal echter, zijn de meetreeksen veel te kort geweest voor het betrouwbaar vaststellen van een gemiddelde. Een korte reeks betekent dat de 'toevallige' weersgesteldheid tijdens de metingen wordt weerspiegeld in de gevonden relatie tussen grondwaterstand en vegetatie. In het huidige klimaat zijn al lange tijdseries tot 30 jaar nodig om de GLG, GHG en GVG goed te schatten. Voor deze systematische fouten kan gecorrigeerd worden [3], maar dat is voor de bestaande ecohydrologische modellen nog niet gedaan. In het huidige klimaat zijn GHG, GLG en GVG zeer goed gecorreleerd, zodat het niet veel uitmaakt welk van deze drie als verklarende variabele voor de vegetatie wordt gebruikt. Met klimaatverandering echter, zal de dynamiek in grondwaterspiegel veranderen, wat van grote invloed kan zijn op de vegetatie. Het verband tussen GVG, GHG en GLG zal ook veranderen, en daarmee hun voorspellende waarde.

Vaak wordt gerekend met de GVG, de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand, berekend voor 1 april. 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. In de toekomst begint het voorjaar misschien al in februari. De GVG, ontleend aan 1 april, zal dus onder een ander klimaat zijn ecologische betekenis verliezen. [4]]

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 [4], wat aanzienlijke gevolgen kan hebben voor de natuur [5]. Met bestaande ecohydrologische modellen kunnen deze gevolgen niet worden voorspeld. Het is de verwachting dat in een toekomstig klimaat de extremen in regenval zullen toenemen en analoog aan de situatie voor temperatuur, is de wetenschappelijke consensus meer en meer dat extremen in regenval een belangrijke invloed hebben op het voorkomen van plantensoorten. Een relatie tussen vegetatie en water zal daarom de invloed van extremen in ogenschouw moeten nemen [52].

Als adaptatiestrategie tegen hoge afvoeren, worden overloopgebieden aangewezen. Over de effecten van inundaties, en dan vooral die in het groeiseizoen, is echter nauwelijks iets bekend [54].

### *Relaties tussen vegetatie en bodemchemie*

Verwacht wordt dat de nutriëntenbeschikbaarheid voor de vegetatie (11) toe zal nemen door hogere mineralisatiesnelheden onder invloed van temperatuurstijgingen (12). De empirisch-statistische en expertgebaseerde ecohydrologische modellen simuleren dit effect echter niet en relaties in die modellen zullen moeten worden aangepast. Mineralisatie is voor een belangrijke mate bepalend voor de hoeveelheid beschikbare stikstof [53] (naast stikstofdepositie, waarvoor enkele scenario's bestaan die geïncorporeerd zouden kunnen worden in bestaande modellen). Andere belangrijke macronutriënten, zoals fosfaat en kalium, worden in belangrijke mate door interacties met de waterhuishouding gestuurd. Zo wordt fosfaatbeschikbaarheid sterk beïnvloed door de mate van waterverzadiging [25] in combinatie met de aanvoer van bepaalde kationen, zoals calcium en ijzer, met kwel. De beschikbaarheid van kalium wordt sterk bepaald door uitspoeling, wat ook in een veranderend klimaat kan veranderen door een veranderende waterhuishouding. De invloed van kalium wordt echter in geen enkel model meegenomen en fosfaatbeschikbaarheid en de effecten daarvan worden alleen bepaald in NICHE en PROBE. Meestal wordt alleen gewerkt met 'nutriëntenrijkdom', zoals in SMART/SUMO. Dat is echter ongeschikt in een toekomstig klimaat omdat verschuivingen in nutriëntenlimitaties tussen bijvoorbeeld P en N grote effecten kunnen hebben voor de samenstelling van de vegetatie [51]. Naast waterbeheer als adaptatiestrategie zal vooral een verandering in de frequentie van overstromingen in een toekomstig klimaat een effect hebben op de P- en N-balans. Bestaande modellen zullen daarom in elk geval aangepast moeten worden om de effecten op van klimaat en adaptatiestrategieën op de fosfaathuishouding en daarmee op de vegetatiesamenstelling te kunnen voorspellen.

Nutriëntenrijkdom is — samen met andere factoren zoals droogte, gebrek aan zuurstof, extremen in pH en zout —bepalend voor de productiviteit van de vegetatie. Mits de veranderingen in deze factoren goed worden berekend, kunnen de meeste bestaande ecohydrologische de verandering in productiviteit berekenen. Deze leidt tot veranderingen in de mineralisatie en dus de nutriëntenbeschikbaarheid (13). Op NUCOM, SMART en in beperkte mate NICHE en PROBE na,



schieten de hier besproken modellen daarin tekort. Veranderingen in de hoeveelheid en de aard van organische stof kunnen op hun beurt weer leiden tot veranderingen in bodemfysische eigenschappen (14) en daarmee in de beschikbaarheid van water en zuurstof. De onverzadigde zone is een dynamisch en sterk niet-lineair systeem: kleine veranderingen in bodemvochtgehalte  $\theta$  hebben grote invloed op de onverzadigde doorlatendheid  $k$  en dus op het verticale transport van water van en naar de wortelzone. Deze terugkoppeling tussen bodemchemie en hydrologie zit op het moment niet in de beschikbare ecohydrologische modellen. Er zijn echter wel mogelijkheden die te inbouwen, bijvoorbeeld aan de hand van de door Wösten et al. [84] gepubliceerde 'pedo-transfer-functies' die afhankelijk zijn van het gehalte aan organische stof.

Een andere feedback, wederom via nutriëntenbeschikbaarheid, die in geen van de bestaande ecohydrologische modellen lijkt te zitten is dat de kwaliteit en daarmee de afbreekbaarheid van bodem organische stof en het strooisel [10, 26] zal veranderen in een veranderend klimaat (13). Als gevolg van verschuivingen in de beschikbaarheid van water, CO<sub>2</sub> en nutriënten, zal de kwaliteit van het plantenstrooisel (bijvoorbeeld de hoeveelheid lignines of totale hoeveelheden koolstof en stikstof) veranderen. De afbreekbaarheid van plantenstrooisel verandert daarmee ook, wat belangrijke gevolgen heeft voor de toekomstige nutriëntenbeschikbaarheid. Deze gevolgen zullen nog groter zijn als de samenstelling van de vegetatie verandert.

#### *Vegetatiekarakteristieken in een veranderend klimaat*

De huidige ecohydrologische modellen gaan uit van een set van vegetatietypen of plantensoorten zoals die momenteel in Nederland voorkomen (centrale box in Figuur 2-2). In een toekomstig klimaat kan dat echter veranderen. Plantensoorten die momenteel niet in Nederland voorkomen maar wel in b.v. Duitsland, België of Frankrijk, kunnen zich verspreiden naar Nederland (16). De mate waarin dat gebeurt, is afhankelijk van de (veranderende) milieucondities, de dispersie van die plantensoorten via water, wind of dieren en voor een groot deel afhankelijk van kans (op verspreiding, kieming en vestiging). Dit betekent dat plantensoorten of vegetatietypen van buiten de landsgrenzen in de ecohydrologische modellen betrokken moeten worden.

In de ecohydrologische modellen die werken met vegetatietypen, in plaats van individuele plantensoorten, is er nog een andere leemte: bestaande vegetatietypen zouden in een veranderend klimaat wellicht kunnen verdwijnen en nieuwe vegetatietypen, niet-analoog aan bestaande vegetatietypen, kunnen ontstaan [51]. Dit komt deels doordat de soortensamenstelling binnen vegetatietypen zal veranderen. De snelheid van verspreiding is verschillend namelijk per plantensoort. Bovengenoemde problemen geven aan dat het gebruik van vegetatietypen met constante eigenschappen, zoals toegepast in SMART/SUMO, ongeschikt lijkt voor een veranderend klimaat. Een theoretische oplossing is dat ecohydrologische modellen gaan werken met variabele parameters voor de individuele soorten. Het direct modelleren van de concurrentie tussen individuele soorten is echter gans onmogelijk, zeker op nationale schaal. Dit betekent namelijk dat voor de ongeveer 1400 plantensoorten die momenteel in Nederland voorkomen plus de eventuele nieuwe soorten, ruim een miljoen relaties moeten worden beschreven, die bovendien nog eens variabel in tijd en ruimte kunnen zijn. Door deze problemen ontstaat het gevaar van overparameterisatie van de modellen, terwijl validatie vaak al moeilijk is door gebrek aan meetgegevens [13, 60, 62]. Het is dan ook van belang dat veel aandacht wordt geschonken aan gekoppelde nationale databestanden van zowel water, bodem als vegetatie.

Wellicht vallen de gevolgen voor de floristische samenstelling van vegetatietypen ook wel mee. Effecten van klimaatverandering (2070-2100, met een dagtemperatuur die 2.8 °C hoger ligt) op de vegetatie van beekdalen schatten Van Walsum et al. [65] door Nederlandse beekdalen te vergelijken met een referentiegebied in Frankrijk. Volgens hen zijn de floristische verschillen klein, vooral in de natte gebieden. Wel komen in de Franse beekdalen meer Schermbloemen voor, en in Nederlandse beekdalen meer Zeggen.

Gerelateerd aan het probleem van constante vegetatie-eigenschappen is dat de bestaande ecohydrologische modellen uitgaan van een evenwichtsbenadering. In een veranderend klimaat, heb je echter niet alleen te maken met evenwichten tussen vegetatie en standplaats, maar ook met verschuivingen in de vegetatie die tijd kosten. Deze responstijd van de vegetatie wordt niet verdisconteerd in de huidige modellen. Bijvoorbeeld, in een GVG weegt de grondwaterstand van 8 jaar geleden net zo zwaar mee in de vegetatie als die van vorig jaar. Dat lijkt niet logisch: het is aannemelijk dat recente gebeurtenissen zich meer weerspiegelen in de vegetatie dan gebeurtenissen uit een lang verleden. Het is daarbij zinvol zijn enkele groepen van soorten te onderscheiden naar



gelang de verwachte responstijd: boomsoorten en soorten met wortelstokken en wortelknollen zullen bijvoorbeeld lang stand houden op een bepaalde plek, terwijl eenjarige een korte responstijd zullen hebben. Er is weinig bekend over de responstijd van een vegetatie, terwijl het grote invloed kan hebben op de toekomstige vegetatiesamenstelling.

#### 4.2. Van ecohydrologische impactmodellen naar adaptatiestrategieën

Met elke adaptatiestrategie wordt ingegrepen in het schema van Figuur 2-2. Om die reden is het ook van groot belang de relaties uit Figuur 2-2 klimaatbestendig te kunnen beschrijven. Dat begrip heeft echter alleen zin als het in samenhang met diezelfde adaptatiestrategieën wordt gezien. Zonder adaptatie zijn namelijk grote moeilijkheden te verwachten (Figuur 4-1). De twee meest voor de hand liggende plekken waarmee via adaptatie kan worden ingegrepen, zijn via waterbeheer, en dan vooral peilbeheer, en via natuurbeheer. In Figuur 4-2 is dit aangegeven. In deze figuur zijn bovendien de processen die volgens ons met prioriteit dienen te worden onderzocht, via extra dikke pijlen gemarkeerd.

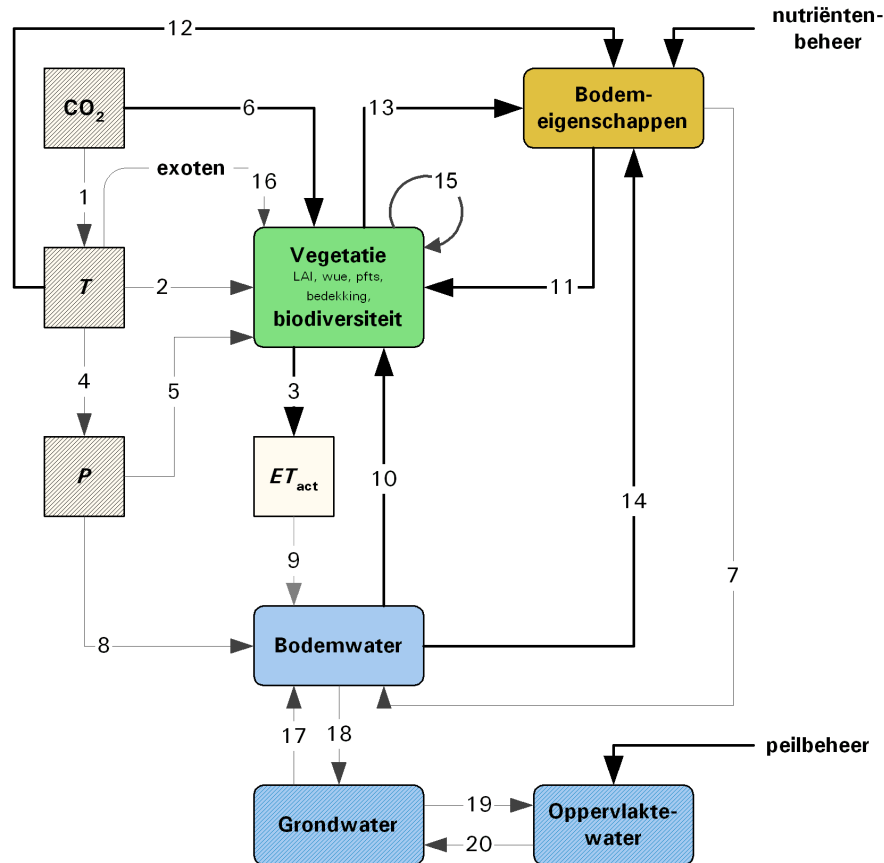


**Figuur 4.1.**  
Een gebrek aan visie kan op den duur leiden tot grote problemen in het waterbeheer.

Bijvoorbeeld, met peilbeheer, kunnen waterbeschikbaarheid en kwelstromen (van belang voor de nutriënten- en waterdynamiek) beïnvloed worden en met behulp van maaien, begrazen of plaggen wordt de nutriëntendynamiek beïnvloed. In de meeste bestaande ecohydrologische modellen wordt natuurbeheer niet verdisconteerd en wordt peilbeheer alleen goed voorspeld als de effecten op de grondwaterstanden helder zijn (met alle onzekerheden van dien, zie § 4.1). Alleen NICHE, PROBE en SMART berekenen de effecten van natuurbeheer op de bodemchemie, hoewel begrazing ofwel niet in het model verwerkt is (PROBE) ofwel alleen via effecten op de bodemchemie en niet direct op de selectie van vegetatie (SMART). Begrazing beïnvloedt namelijk niet alleen de hoeveelheid nutriënten, maar selecteert ook direct bepaalde plantensoorten, omdat sommige plantensoorten 'aantrekkelijker' zijn voor grazers dan andere. Dat laatste effect zit in geen van de modellen. Ten slotte, doordat andere relaties tussen milieufactoren en vegetatie zullen veranderen in een veranderend klimaat, kunnen ook de effecten van adaptatiestrategieën in het algemeen en van water- en natuurbeheer in het bijzonder op de vegetatie anders zijn. Ook om die reden zijn empirisch-statistische en expertgebaseerde modellen ongeschikt om adaptatiestrategieën te bepalen. Enkel procesgebaseerde modellen die bovendien de veranderingen in de relaties genoemd in § 4.1 correct beschrijven zijn daarom geschikt. Dergelijke modellen zullen wel de interacties tussen adaptatiestrategieën en klimaat op de vegetatie moeten meenemen. Zo kan begrazing het effect van klimaatsverandering op de



kwaliteit van strooisel veranderen. Natuurbeheer kan de ontwikkeling van bodemfysische parameters in de loop van de successie veranderen en daarmee de feedbacks van planten op de waterhuishouding. Peilbeheer heeft grote invloed op de mate waarin extremen in regenval kunnen doorwerken op de vegetatie. Zonder het verdisconteren van dergelijke interacties bovenop de al genoemde effecten in § 4.1 in een nieuwe generatie ecohydrologische modellen zal het onmogelijk zijn om goede adaptatiestrategieën te ontwikkelen en te toetsen.



**Figuur 4.2.** Als Figuur 2-2, maar nu inclusief peilbeheer en nutriëntenbeheer en met de processen die met prioriteit dienen te worden onderzocht extra dik aangegeven.

### 4.3. Ontwikkeling van klimaatbestendige ecohydrologische modellen

Gezien de problemen en leemtes die hierboven genoemd zijn, zijn alleen procesgebaseerde ecohydrologische modellen geschikt. Een aantal modellen genoemd in Hoofdstuk 2 zouden eventueel klimaatbestendig gemaakt kunnen worden door relaties aan te passen en feedbacks mee te nemen om zo adaptatiestrategieën mee te kunnen ontwikkelen en toetsen. Er is echter een groot probleem, behandeld in § 4.1, dat vegetatietypen en vaststaande vegetatie-eigenschappen niet klimaatbestendig zijn. Daarom stellen wij een benadering voor waarbij de centrale vegetatiebox met vegetatietypen en vaststaande vegetatie-eigenschappen wordt omgezet naar een met planteneigenschappen. Op deze manier worden de variabele planteneigenschappen, in plaats van niet-klimaatbestendige vaststaande eigenschappen, centraal in de ecohydrologische modellen. Aangezien een aanzienlijk deel van de effecten van klimaatverandering op de vegetatie via deze veranderende planteneigenschappen verloopt, is dit cruciaal om rechtstreeks de effecten van klimaatverandering te evalueren. Bovendien representeren planteneigenschappen de functionele karakteristieken van de vegetatie. Recent onderzoek [19, 23] heeft uitgewezen dat veranderingen in functionele karakteristieken eenduidiger te voorspellen zijn dan veranderingen in de soortensamenstelling (zoals weergegeven in vegetatietypen). Ten slotte is het maar de vraag of vegetatietypen in een toekomstig klimaat nog bruikbaar zijn, omdat nieuwe vegetatietypen zullen ontstaan door het verdwijnen van individuele soorten, het verschil in verspreiding tussen soorten en het migreren van soorten en wellicht complete vegetatietypen vanuit het buitenland. Het gebruik van een alternatief dat consistente voorspellingen over vegetatie-eigenschappen maakt, ligt dan voor de hand.



Een benadering gebaseerd op planteneigenschappen wordt in internationale publicaties als zeer kansrijk beoordeeld [12, 17, 22, 34, 38, 51, 52]. Ecohydrologische modellen zouden de selectie van die planteneigenschappen expliciet moeten berekenen. In dat geval worden de planteneigenschappen automatisch variabel onder invloed van adaptatie en klimaat en is het niet meer noodzakelijk vegetatietypen als centrale rekeneenheid in de ecohydrologische modellen op te nemen. Wel kan op basis van die eigenschappen het voorkomen van bepaalde natuurdoeltypen of Rode-lijstsoorten bepaald worden. Ook is het mogelijk de voorwaarden voor het voorkomen van bepaalde habitats (en bijbehorende plantensoorten), zoals veranderd door een bepaalde adaptatiestrategie, te bepalen.

Om dergelijke klimaatbestendige ecohydrologische modellen en adaptatiestrategieën te ontwikkelen is een investering nodig voor de ontwikkeling van de volgende onderdelen:

- 1) Integratie van de effecten van klimaat, waterhuishouding en adaptatiestrategieën in een klimaatbestendig ecohydrologisch model gebaseerd op planteneigenschappen, geschikt voor de evaluatie van scenario's en adaptieve maatregelen. Onzekerheden in de invoer (bijvoorbeeld berekende grondwaterstanden) en in de modelrelaties dienen in de uitkomsten tot uitdrukking te komen. Belangrijke bouwstenen voor het model komen van de kennis die op het ogenblik wordt ontwikkeld in BSIK-project-A1 (drie promovendi begeleid door VU en KWR) [3, 4, 5, 17, 38, 39], van de grote expertise op het gebied van planteigenschappen bij de groep systeemecologie van de VU [10, 11], en van de ervaringen met ecohydrologische modellen bij medewerkers van KWR [43, 44, 45, 46, 59, 60, 61, 72, 81, 82, 83].
- 2) Zoals aangegeven in § 4.2, is naast peilbeheer een andere adaptieve mogelijkheid in te grijpen via nutriëntenbeheer. Bestaande ecohydrologische modellen zijn al in beperkte mate geschikt om deze adaptatiestrategieën door te rekenen. Echter, het schatten en voorspellen van de nutriëntenbeschikbaarheid over een heel groeiseizoen blijkt zeer lastig [38] en bovendien is kennis over de effecten van begrazing en inundaties op de nutriëntenhuishouding en de vegetatie slechts mondjesmaat in ecohydrologische modellen beschikbaar. Dit zijn cruciale onderdelen voor de ontwikkeling van geschikte adaptatiestrategieën.

Veranderingen in waterhuishouding, temperatuur en CO<sub>2</sub>-concentratie leiden tot een andere beschikbaarheid van macro-nutriënten N, P en K en in een verschuiving, in de loop der tijd, in het nutriënt dat limiterend is voor de vegetatie. Verschuivingen in waterbalans en biomassa-productie kunnen een verdere versterking of juist verzwakking krijgen door het samenspel van positieve of negatieve terugkoppelingen tussen biomassa, bodem en waterhuishouding. Hierdoor zullen bodemfysische en vegetatie-eigenschappen (bv LAI) versneld kunnen veranderen met als gevolg verdere effecten op de waterbalans en biomassa-productie. Een goede simulatie van de biomassa en waterhuishouding met deze terugkoppelingen is dus noodzakelijk. Met het daarvoor te ontwikkelen model moet kunnen worden bepaald (a) in welke ecosystemen verschuivingen in nutriëntenbeschikbaarheid, inclusief het type limitatie, zullen optreden; (b) hoe nutriëntenbeheer via maaien, plaggen en begrazing de effecten van dergelijke verschuivingen op de vegetatie zodanig kunnen beïnvloeden dat natuurdoeltypen (of rode lijstsoorten) beschermd worden.

- 3) Effecten van klimaatverandering zullen zich vermoedelijk vooral manifesteren op grondwateronafhankelijke bodems, en dan vooral die bodems die zomers weinig vocht kunnen naleveren (zandgronden). Tot nu toe is er in het ecohydrologisch onderzoek nauwelijks aandacht besteed aan grondwateronafhankelijke vegetaties, en dat is zeer onterecht. De toename in de droogte op deze gronden kan grote consequenties hebben voor de vegetatiestructuur, voor de diversiteit aan soorten en, ten slotte, voor de grondwateraanvulling [27, 75] (Figuur 4-3). Een goede berekening van de grondwateraanvulling is noodzakelijk om grondwaterstanden en kwelfluxen in lager gelegen gebieden betrouwbaar te kunnen simuleren. Op het ogenblik ontbreekt de terugkoppeling tussen verdampingseigenschappen van de vegetatie en het klimaat in bestaande hydrologische modellen.
- 4) Ten slotte kunnen ruimtelijke terugkoppelingsprocessen tussen vegetatie en bodem een belangrijke rol spelen bij de ontwikkeling van ruimtelijke patronen in vegetatiestructuur [o.a. 42], zoals te zien is in Figuur 4-3. Denk aan de positieve invloed van de vegetatie op de infiltratiecapaciteit van de bodem en dus op de toestroming, over het maaiveld, van water en nutriënten. Dit onderzoek is waarschijnlijk vooral van belang voor ecosystemen die sterk gelimiteerd zijn, bijvoorbeeld zeer voedselarme droge zandgronden en hoogvenen.



De totale omvang van dit onderzoek bedraagt ongeveer 2 M€. De drinkwaterbedrijven erkennen het belang van het klimaatbestendig ecohydrologisch modelleren van biodiversiteit. Ze zijn daarom onder voorwaarden bereid onderdelen te cofinancieren voor een bedrag van ongeveer 1 M€. Er zullen dus aanvullende bronnen van cofinanciering gevonden moeten worden, bijvoorbeeld bij voor het natuurbeheer en natuurbeleid verantwoordelijke organisaties.



**Figuur 4-3. Referentiebeeld voor de grondwateronafhankelijke duinen onder een droger klimaat? Foto: B. Sparrius.**







## Geciteerde literatuur

1. Van Amstel, A.R., L.C. Braat, A.C. Garritsen, C.R. van Gool, N. Gremmen, C.L.G. Groen, H.L.M. Rolf, J. Runhaar & J. Wiertz, 1989. *Verdroging van natuur en landschap in Nederland*. Ministerie van V&W, Lelystad.
2. Barendregt, A., M.J. Wassen & J.T. De Smidt. 1993. Eco-hydrological modelling in a polder landscape: a tool for wetland management. In: C.C. Vos & P. Opdam (eds.) *IALE Studies in Landscape Ecology 1*. pp. 79-99. Landscape ecology of a stressed environment. Chapman & Hall, London.
3. Bartholomeus, R.P., J.P.M. Witte, P.M. van Bodegom & R. Aerts, 2008. The need of data harmonization to derive robust empirical soil-vegetation relationships. *Journal of Vegetation science* 19: 799-808
4. 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: improvement of the Feddes-function. *Journal of Hydrology* 360: 147-165.
5. 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*.
6. Bazzaz, F.A., S.L. Bassow, G.M. Berntson & S.C. Thomas, 1996. *Elevated CO<sub>2</sub> 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.
7. Bobbink, R. & L.P.M. Lamers, 1999. *Effecten van stikstofhoudende luchtverontreiniging op vegetaties - een overzicht*. Rapport R13 Technische Commissie Bodembescherming, Den Haag.
8. Botkin D.B., H. Saxe, M.B. Araújo, R. Betts, R.H.W. Bradshaw, T. Cedhagen, P. Chesson, T.P. Dawson, J.R. Etterson, D.P. Faith, S. Ferrier, A. Guisan, A. Hansen, D.W. Hilbert, C. Loehle, C. Margules, M. New & M.J. Sobel. Forecasting the effects of global warming on biodiversity. *Bioscience* 57: 227-236.
9. Clarke, D. & S.N. Sanitwong, 2008. *Predicted effects of climate change and sea level rise on water table levels and dune slack habitat*. Proceedings Changing Perspectives in Coast Dune Mangement, Liverpool 31/3-3/4.
10. Cornelissen J.H.C., P.M. van Bodegom, R. Aerts, T.V. Callaghan, R.S.P. van Logtestijn, J. Alatalo, F.S. Chapin, R. Gerdo, J. Gudmundsson, D. Gwynn-Jones, A.E. Hartley, D.S. Hik, A. Hofgaard, I.S. Jónsdóttir, S. Karlsson, J.A. Klein, J. Laundre, B. Magnusson, A. Michelsen, U. Molau, V.G. Onipchenko, H.M. Quested, S.M. Sandvik, I.K. Schmidt, G.R. Shaver, B. Solheim, N.A. Soudzilovskaia, A. Stenström, A. Tolvanen, Ø. Totland, N. Wada, J.M. Welker, X. Zhao & M.O.L. Team, 2007. Global negative vegetation feedback to climate warming responses of leaf litter decomposition rates in cold biomes. *Ecology Letters* 10: 619-627
11. Cornelissen, J.H.C., S. Lavorel, E. Garnier, S. Diaz, N. Buchmann, D.E. Gurevich, P.B. Reich, H. ter Steege, H.D. Morgan, M.G.A. van der Heijden, H.G. Pausas & H. Poorter, 2003. A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany* 51: 335- 380.
12. Cornwell, W.K., J.H.C. Cornelissen, K. Amatangelo, E. Dorrepaal, V.T. Eviner, O. Godoy, S.E. Hobbie, B. Hoorens, H. Kurokawa, N. Perez Harguindeguy, H.M. Quested, L.S. Santiago, D.A. Wardle, I.J. Wright, R. Aerts, S. Allison, P.M. van Bodegom, V. Brovkin, A. Chatain, T. Callaghan, S. Díaz, E. Garnier, D.E. Gurevich, E. Kazakou, J.A. Klein, J. Read, P.B. Reich, N.A. Soudzilovskaia, M.V. Vaieretti, & M. Westoby, 2008. Plant species traits are the predominant control on litter decomposition rates within biomes worldwide. *Ecology Letters* 11: 1065-1071
13. Dekker S.C., Lee G.E.M. van der. 2001. Strategie om ecologische modellen te toetsen. *Landschap* 18: 285-290.
14. Dekker, S.C., Bouten, W. and Verstraten, J.M., 2000. Modelling forest transpiration from different perspectives. *Hydrological processes* 14: 251-260.





15. Dekker, S.C., Rietkerk, M. and Bierkens, M.F.P., 2007. Coupling microscale vegetation-soil water and macroscale vegetation-precipitation feedbacks in semiarid ecosystems. *Global Change Biology* 13: 671-678.
16. De Smidt, J.T., M.J. Wassen & P.P. Schot, 1992. De aansluiting van aanbod op vraag naar hydro-ecologische kennis. *Landschap* 9: 159-161.
17. Douma, J.C., P.M. van Bodegom, J.P.M. Witte, R.M. Bekker, K. Metselaar & R. Aerts, submitted. Functional traits within plant species assemblages are non-randomly selected across large spatial scales and reflect plant strategies. *American Naturalist*.
18. Ertsen, A.C.D., J.W. Frens, J.W. Nieuwenhuis & M.J. Wassen, 1995. An approach to modelling the relationship between plant species and site conditions in terrestrial ecosystems. *Landscape and Urban Planning* 31: 143-151.
19. Fukami, T., T.M. Bezemer, S.R. Mortimer & W.H. van der Putten, 2005. Species divergence and trait convergence in experimental plant community assembly. *Ecology Letters* 8: 1283-1290.
20. Geelen, L., de Haan, M., Koerselman, W. & W. Droessen, 2001. Twee ecologische modellen voor duinvalleien. Toepassing, vergelijking en toekomstperspectief. *Landschap* 18: 211-226.
21. Grootjans, A.P., G. van Wirdum, R. Kemmers & R. and van Diggelen, 1996. Ecohydrology in The Netherlands: principles of an application-driven interdisciplinary. *Acta Botanica Neerlandica* 45: 491-516.
22. Guisan, A. & W. Thuiller, 2005. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters* 8: 993-1009.
23. Heemsbergen, D.A., M.P. Berg, M. Loreau, J.R. van Hal, J.H. Faber & H.A. Verhoef, 2004. Biodiversity effects on soil processes explained by interspecific functional dissimilarity. *Science* 306: 1019-1020.
24. Heil, G.W., A.M.J.V. van Boxtel & W.P.A. van Deursen, 1994. *Definitiestudie ten behoeve van de ontwikkeling van een dynamisch GIS-model over droge duingraslanden*. Resource Analysis, in opdracht van DZH, Delft.
25. Hinsinger, P., 2001. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant and Soil* 237: 173-195
26. Holtkamp, R., Kardol, P., van der Wal, A., Dekker, S.C., van der Putten, W.H. and de Ruiter, P.C., 2008. Soil food web structure during ecosystem development after land abandonment. *Applied Soil Ecology* 39: 23-34.
27. 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.
28. Koerselman, W. & A.F.M. Meuleman, 1994. *Groei beperkende voedingsstoffen in verschillende duinvalleitypen*. SWE 94.020, Kiwa Onderzoek en Advies, Nieuwegein.
29. Koerselman, W., Meuleman, A.F.M., & De Haan, M.W.A., 1999. *Ecohydrologische effectvoorspelling duinen*. *Standplaatsmodellering in NICHE Duinen*. Nieuwegein: Kiwa Water Research.
30. Kramer, K. and Mohren, G.M.J., 1996. Sensitivity of FORGRO to climatic change scenarios: a case study on *Betula pubescens*, *Fagus sylvatica*, *Quercus robur* in the Netherlands. *Climate Change*, 34: 231-237.
31. Kruijt, B., J.P.M. Witte, C. Jacobs & T. Kroon, 2008. Effects of rising atmospheric CO<sub>2</sub> on evapotranspiration and soil moisture: a practical approach for the Netherlands. *Journal of Hydrology* 349: 257-267.
32. Latour J.B. & R. Reiling. 1993. A multiple stress model for vegetation (MOVE): a tool for scenario studies and standard setting. *Science of the Total Environment* (Suppl): 1513-1526.
33. Latour, J.B., Reiling, R. & W. Slooff. 1994. Ecological standards for eutrophication and dessication: perspectives for a risk assessment. *Water, Air, Soil Pollution* 78: 265-277.
34. McGill, B.J., B.J. Enquist, E. Weiher & M. Westoby, 2006. Rebuilding community ecology from functional traits. *Trends in Ecology and Evolution* 21: 178-185.



35. Noest, V., 1991. HYVEG, een interactiemodel hydrologie-vegetatie voor jonge vochtige duinvalleien. DZH, Den-Haag.
36. Norby, R.J., et al., 2007. Ecosystem responses to warming and interacting global change factors. In: Canadell, J., et al. (eds.), *Global change and terrestrial ecosystems*. pp. 23-36
37. Olde Venterink, H.G.M. & M.J. Wassen, 1997. A comparison of six models predicting vegetation response to hydrological habitat change. *Ecological Modelling* 101: 347-361.
38. Ordoñez, J.C., P.M. van Bodegom, J.P.M. Witte, I.J. Wright, P.B. Reich, R. Aerts, 2008. A cross continental study of relationships between leaf traits, climate and soil proxies of nutrient availability. *Global ecology and Biogeography* in press.
39. Ordoñez, J.C., P.M. van Bodegom, J.P.M. Witte, R.P. Bartholomeus, J.R. van Hal & R. Aerts, submitted. Plant strategies in relation to resource supply in mesic to wet environments: does theory mirror nature? *American Naturalist*.
40. Peeters, E.T.H.M et al., 2008. Assessing ecological quality of shallow lakes: Does knowledge of transparency suffice? *Basic and Applied Ecology* (in press).
41. Poorter, H. and M-L Navas, 2003. Plant growth and competition at elevated CO<sub>2</sub>: on winners, losers and functional groups. *New Phytologist* 157: 175-198
42. Rietkerk, M., Dekker, S.C., de Ruiter, P.C. and van de Koppel, J., 2004. Self-organized patchiness and catastrophic shifts in ecosystems. *Science* 305: 1926-1929.
43. Runhaar, J., H.L. Boogaard, S.P.J. van Delft & S. Weghorst, 1999. *Natuurgericht Landevaluatie-systeem (NATLES)*. Rapport 704. Staring Centrum, Wageningen.
44. Runhaar, J. & J.P.M. Witte, 2006. *Watermood natuur-terrestrisch versie 3. Voorstudie naar uitbreiding module natuur-terrestrisch*. Rapport 2006-22. Stowa, Utrecht.
45. Runhaar, J., J.P.M. Witte & M. van der Linden, 1996. Waterbeheer en natuur; effectvoorspelling met het landelijke model DEMNAT. *Landschap* 13: 65-77.
46. Runhaar, J., J.P.M. Witte & P.H. Verburg, 1997. Groundwater level, moisture supply and vegetation. *Wetlands* 17: 528-538.
47. Scheffer, M. & J. Beets, 1995. Voorspellen in de ecologie; de beperkingen van modellen. *Landschap* 12(4): 55-67.
48. Tamis, W., 2005. *Changes in the flora of the Netherlands in the 20th century*. PhD-thesis, Leiden University.
49. Ten Harkel, M., 1998. *Nutrient pools and fluxes in dry coastal dune grasslands*. PhD-thesis, Amsterdam.
50. Thomas C.D., A. Cameron, R.E. Green, et al., 2004. Extinction risk from climate change. *Nature* 427: 145-148.
51. Thuiller, W., S. Lavorel, M.B. Araujo, M.T. Sykes and I.C. Prentice, 2005. Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proceedings of the National Academy of Science* 102: 8245-8250.
52. Van Bodegom, P.M., Grootjans, A.P., Sorrell, B.K., Bekker, R.M., Bakker, C. & Ozinga, W.A., 2006. Plant traits in response to raising groundwater levels in wetland restoration: evidence from three case studies. *Applied Vegetation Science* 9: 251-260
53. Van Bodegom, P.M., A. Oosthoek, R. Broekman, C. Bakker & R. Aerts, 2006. Raising groundwater differentially affects mineralization and plant species abundance in dune slacks. *Ecological Applications* 16: 1785-1795
54. Van Bodegom, P.M., B.K. Sorrell, A. Oosthoek, C. Bakker & R. Aerts, 2008. Separating the effects of partial submergence and soil oxygen demand on plant physiology and growth upon flooding. *Ecology* 89: 193-204
55. Van Dam, J.C., 2000. *Field-scale water flow and solute transport – SWAP model concepts, parameter estimation and case studies*. PhD- thesis, WAU, Wageningen.
56. Van den Hurk, B., A.K. Tank, G. Lenderink, A. van Ulden, G.J. van Oldenborgh, C. Katsman, H. van den Brink, F. Keller, J. Bessembinder, G. Burgers, G. Komen, W. Hazeleger & S. Drijfhout,



2006. *KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands*. KNMI Scientific Report WR 2006-01, De Bilt.
57. Van der Peijl, M.J. & J.T.A. Verhoeven, 1999. A model for carbon, nitrogen and phosphorus dynamics and their interactions in river marginal wetlands. *Ecological Modelling* 118: 95-130.
  58. Van Ek, R., J.P.M. Witte, J. Runhaar & F. Klijn, 2000. Ecological effects of water management in the Netherlands: the model DEMNAT. *Ecological Engineering* 16: 127-141.
  59. Van Oene, H. & F. Berendse, 2001. *Predicting responses of ecosystem processes to climate change and nitrogen deposition*. In: Van Oene, H., Ellis, W.N., Heijmans, M.M.P.D., Mauquoy, D., Tamis, W.L.M, Van Vliet, A.J.H., Berendse, F., Van Geel, B., Van der Meijden, R. and Ulenberg, S.A. (eds), Long-term effects of climate change on biodiversity and ecosystem processes. Bilthoven: Dutch National Research Programme on Global Air Pollution and Climate Change.
  60. Van Oene, H., Berendse, F., Arp, W. & R. Alkemade, 2000b. Toetsing van ecologische modellen; een reactie. *Landschap* 17: 197-200.
  61. Van Oene, H., F. Berendse & C.G.F. de Kovel, 1999. Model analysis of the effects of historic CO<sub>2</sub> levels and Nitrogen inputs on vegetation succession. *Ecological applications* 9: 920-935.
  62. Van Staalduinen, M., 2000. Toetsing van ecologische modellen. Wat draagt NUCOM bij aan de prognose van klimaateffecten op de vegetatie? *Landschap* 17: 193-195
  63. Van Vliet, 2008. *Monitoring, analysing, forecasting and communicating phenological changes*. Wageningen Universiteit, Wageningen.
  64. Van Wijk, M.T., Dekker, S.C., Bouten, W., Kohsiek, W. & G.M.J Mohren,., 2001. Simulation of carbon and water budgets of a Douglas-fir forest. *Forest Ecology and Management* 145: 229-241.
  65. Van Walsum, P.E.V, P.F.M. Verdonschot and J. Runhaar, 2001. *Effects of climate and land-use change on lowland stream ecosystems*. Dutch National Research Programme on Global Air Pollution and Climate Change, Bilthoven.
  66. Van Wirdum, G., 1982. *The ecohydrological approach to nature protection*. In: Anonymus, Annual report 1981 Research institute for nature management, p. 60-74. Arnhem, Leersum and Texel.
  67. Van Wirdum, G., 1986. *Water related impacts on nature protection sites*. In *Water management in relation to nature, forestry and landscape management*, ed. J. C. Hooghart, p. 25-57. The Hague: TNO Committee on Hydrological Research.
  68. Vrugt, J.A., Dekker, S.C. & W. Bouten, 2003. Identification of rainfall interception model parameters from measurements of throughfall and forest canopy storage. *Water Resources Research* 39: 1251.
  69. Wamelink, W., ter Braak C. & H. van Dobben, 1998. De potentiële natuurwaarde van de EHS. Natuurwaardering op basis van abiotische omstandigheden; het Natuurtechnisch Model. *Landschap* 15: 145-156.
  70. Wassen, M.J. & P.P. Schot, 1992. Hydro-ecologische modellen; mogelijkheden, beperkingen en perspectieven. *Landschap* 9: 83-105.
  71. Wassen, M.J., H. Olde Venterink, E.D. Lapshina & F. Tanneberger, 2005. Endangered plants persist under phosphorus limitation. *Nature* 437: 547-550
  72. Wever, N., 2008. *Rapport Modelinstrumentarium , Kennis voor Klimaat – Klimaatkennis Faciliteit (KKF)*. KNMI, Bilthoven.
  73. Witte, J.P.M., 1998. National Water Management and the Value of Nature. PhD-thesis, Agricultural University Wageningen, Wageningen.
  74. Witte, J.P.M., 2008. *Grondwater als bron voor biodiversiteit*. Inaugurele rede VU, Amsterdam.
  75. 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.



76. Witte, J.P.M., M. de Haan, B. Raterman & C. Aggenbach, 2006. *PROBE — Versie 1: effecten van grondwaterbeheer, atmosferische depositie, maaien en plagen*. Kiwa rapport, Nieuwegein.
77. Witte, J.P.M., M. de Haan & M.J.M. Hootsmans, 2007. PROBE: een ruimtelijk model voor vegetatiedoelen. *Landschap* 24: 77-87.
78. Witte, F., M. de Haan, A. Meuleman, & A. Tack, 2003. MODAK: naar een geïntegreerd ecosysteemmodel voor duinen; een haalbaarheidsstudie. KIWA rapport BTO-2003-024.
79. Witte, J.P.M., B. Kruijt & C. Maas, 2006. *The effects of rising CO<sub>2</sub> levels on evapotranspiration*. Kiwa report KWR 06.004, Nieuwegein.
80. Witte, J.P.M., B. Kruijt, T. Kroon & C. Maas, 2006. Verdamping planten daalt door toename atmosferische kooldioxyde. *H<sub>2</sub>O* 5: 29-31.
81. Witte, J.P.M., J.A.M. Meuleman, S. van der Schaaf & B. Raterman, 2004. *Eco-hydrology and Biodiversity*. In: Feddes, R.A., G.H. de Rooij & J.C. van Dam (eds.), *Unsaturated Zone Modelling: Progress, Challenges and Applications*, p. 301-329. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht/Boston/London.
82. Witte, J.P.M., J. Runhaar & R. van Ek, 2008. *Ecohydrological modelling for managing scarce water resources in a groundwater-dominated temperate system*. In: Harper, D., M. Zalewski, E. Jorgensen & N. Pacini (eds.), *Ecohydrology: Processes, Models and Case Studies*. CABI Publishing, Oxfordshire, UK.
83. 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.
84. Wösten, J.H.M., Ya.A. Pachepsky & W.J. Rawls, 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology*, 251, 123-150.





## **Bijlage: schriftelijke reactie Van der Zee**

Commentaar op het rapport (conceptversie 11 december 2008)

**Geen adaptiestrategie zonder klimaatbestendige ecohydrologie**

Van: KWR Watercycle Research Institute

Door: **Prof. Dr.Ir. S.E.A.T.M. van der Zee, Ecohydrologie, Wageningen Universiteit**

13 december, 2008, Utrecht

### *Algemeen*

De studie komt voort uit de zorg dat de link tussen hydrologie en ecologie op dit moment onvoldoende is uitgewerkt om de toekomstige koppeling in het kader van klimaatmodellen en klimaatveranderinganalyse goed te kunnen uitvoeren. Ik onderschrijf dit volledig en vind dit mede met het oog op een scala aan EU kaderrichtlijnen en dergelijke, waaraan wij ons moeten conformeren, een zorgelijke situatie. Terecht wordt er een onderscheid gemaakt tussen de zg inductieve en deductieve stromingen binnen de ecohydrologie. Wat mij bijzonder aanspreekt in het rapport, is dat er een duidelijke beweging is in de richting van een mechanistische koppeling waarbij beide stromingen elkaar kunnen voeden.

### *Overzicht*

Gegeven de aangenaam beperkte lengte van het rapport, vind ik de verschillende hoofdstukken gebalanceerd en to-the-point. De relatief lange paragraaf 3.4 geeft een goed overzicht over de procesbenadering. In deze context wordt de afgelopen jaren een grote inhaalslag gemaakt, die ook voor het onderhavige onderwerp zeer wezenlijk kan zijn. Vooralnog, denk ik dat de meer procesmatige benadering vooral inspirerend moet zijn voor de identificatie van zinvolle c.q. zinloze empirisch-correlatieve benaderingen. Een aantal voorbeelden van deze aanpak zijn overigens in de literatuur voorhanden.

### *Leemtes die geconstateerd zijn*

De waarde van het rapport is natuurlijk vooral gelegen in de geconstateerde leemtes, hoofdstuk 4. Ik ben er zonder meer heel tevreden over dat (duidelijk) aandacht gevraagd wordt voor het belang van temperatuur in relatie tot vegetatie en met name de identificatie van extremen als regulator, liever dan gemiddelden (alleen). Overigens meen ik dat de extremen in plaats van het gemiddelde ook kan worden doorgetrokken naar de relatie tussen water en vegetatie. Er zijn denk ik voldoende voorbeelden voorhanden, waarbij men zich vragen kan stellen of een bruikbaar gemiddelde wel kan worden gekwantificeerd. Daarnaast ontstaat er consensus, dat klimaatverandering vooral in de variabiliteit, en minder in de gemiddelden, op zal treden.

Een wezenlijk probleem wordt aangekaart ten aanzien van de vegetatiekarakteristieken: kan de huidige, overwegend statische kennis dienstbaar zijn voor de beoordeling van de effecten van klimaatgerelateerde veranderingen. In principe kunnen we hier positief op antwoorden, met de kanttekening dat vertaalfuncties nodig zijn, maar de essentie is dat beschikbare informatie en kwantificatie veelal ontbreekt: belangrijke feedback relaties zijn veelal buiten beschouwing gebleven. Ik ben dan ook heel tevreden, dat hieraan aandacht wordt gegeven in hoofdstuk 4. De context van specifieke situaties zal daarbij dan bepalend zijn van de type feedbacks die van belang zijn, bijvoorbeeld de snelheid van redoxveranderingen in natte situaties of de impact van bodembedekkingsveranderingen op de water- en warmtebalans.

### *Visie*

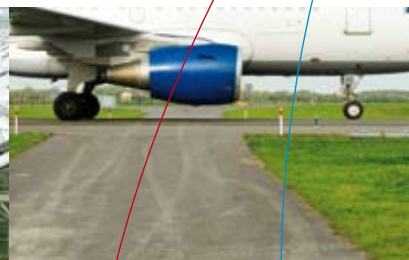
Ik ben het ermee eens dat de huidige lacunes een procesgerichte benadering vereisen, met die kanttekening dat implementatie in de huidige empirisch-correlatieve benaderingen voor een snelle toepassing van procesinzichten wel eens heel bruikbaar kan zijn.

De genoemde ontwikkelingen t.b.v. een klimaatbestendig ecohydrologisch model kan ik onderschrijven. Van belang hierbij zal moeten zijn dat vertaling t.a.v. bijvoorbeeld de nutriënten route (4.3 onderdeel 2) vanuit de landbouw richting natuur niet zonder meer wordt geaccepteerd in verband met wezenlijke verschillen.

Er wordt een lans gebroken richting grondwateronafhankelijke bodems, waar ik in principe mee instem. Ik wijs er wel op dat de demarcatie grondwater(on)afhankelijk nog weer volop in de belangstelling staat (bijv. Vervoort en Van der Zee, 2008, Water Resources Research. In dit verband is ook de momenteel bewerkte relatie water- en stoffenbalans voor de ecohydrologie wezenlijk).



Zo zijn er mogelijk nog verschillende andere niches te formuleren, die de toekomstige behoefte aan integratie van klimaatmodellering en effecten op hydrologie, ecologie en ecohydrologie in de weg staan, omdat de nodige kennis en inzichten ontbreken. De huidige analyse geeft aan waar deze complexiteit aangepakt kan worden.



Ontwikkelen van wetenschappelijke en toegepaste kennis voor een  
klimaatbestendige inrichting van Nederland en het creëren van een  
duurzame kennisinfrastructuur voor het omgaan met klimaatverandering

## Contactinformatie

Programmabureau Kennis voor Klimaat

Secretariaat:

p/a Universiteit Utrecht

Postbus 80115

3508 TC Utrecht

T +31 88 335 7881

E [office@kennisvoorklimaat.nl](mailto:office@kennisvoorklimaat.nl)

Communicatie:

p/a Alterra, Wageningen UR

Postbus 47

6700 AA Wageningen

T +31 317 48 6540

E [info@kennisvoorklimaat.nl](mailto:info@kennisvoorklimaat.nl)

[www.kennisvoorklimaat.nl](http://www.kennisvoorklimaat.nl)

