

Vochtige ecosystemen kwetsbaar

Klimaatverandering
effecten op natuur
vergelijkende studie
adaptatie

Klimaat effecten in Nederland

Drie onderling onafhankelijke onderzoeken, uitgevoerd door verschillende teams met eigen methoden, komen tot dezelfde conclusie: natte, voedselarme ecosystemen als vochtige graslanden, natte heide en vennen in Nederland lijken het meeste risico te lopen als gevolg van klimaatverandering. De consistentie van de resultaten benadrukt het belang van adaptatiemaatregelen voor het behoud van natuurtypen die belangrijk zijn voor Nederland.

Wanneer door klimaatverandering de levensomstandigheden veranderen, kan dit gevolgen hebben voor de thans aanwezige planten- en diersoorten. De belangrijkste veranderingen zijn de stijging van de gemiddelde temperatuur en neerslag en de toename in variatie (het weer wordt grilliger). Samen kunnen deze leiden tot periodes van droogte, hittegolven, maar ook extreme neerslag en overstromingen. Plantensoorten kunnen droogtestress krijgen als ze minder vocht verdampen dan optimaal is, en zuurstofstress als de wortels onder water staan. Dieren kunnen direct getroffen worden door stortbuien, hitte of vochttekort.

Naast deze directe effecten, zijn er ook indirecte effecten. Zo moeten planten reageren op veranderingen in de nutriëntenhuishouding en het grondwater, op gewijzigde vuur- en overstromingsregimes en veranderde voedselketens. Dieren krijgen bijvoorbeeld te maken met indirecte effecten als hun levenscyclus uit de pas gaat lopen met die van hun prooi of voedselplant, zoals bij insectenetende vogels als de bonte vliegenvanger (Both *et al.*, 2006).

Al met al leidt dit tot zowel bedreigingen van bestaande natuur als ook kansen voor nieuwe natuur. Soorten die in Nederland aan de zuidgrens van hun verspreidingsgebied leven, zoals kraaiheide en hoogveensoorten, zie figuur 1, hebben moeite zich aan te passen aan de veranderende omstandigheden en nemen daardoor af. Kansen zijn vooral voor soorten met de noordgrens van hun versprei-

dingsgebied in de buurt van Nederland. Zij nemen toe. Voorbeelden zijn de oprukkende warmteminnende planten- en diersoorten uit het zuiden zoals de gewone esdoorn en de koninginpage (figuur 1). Jaarvogels, zoals de roerdomp, profiteren van het (gemiddeld) achterwege blijven van strenge winters (Van Turnhout *et al.*, 2010). Ongewervelden zoals vlinders, krijgen extra generaties en vergroten hun vliegactiviteit (Cormont *et al.*, 2011). Naast deze algemene trends zijn er nog veel onduidelijkheden, met name over de effecten op totale ecosystemen.

In dit artikel worden de resultaten gepresenteerd van drie complementaire studies die zich richten op het begrijpen en voorspellen van de effecten van klimaatverandering op de natuur in Nederland. Twee van deze studies analyseren de directe en indirecte effecten van klimaatverandering op de vegetatie in Nederland. Alle veel voorkomende natuurtypen in Nederland en Rode Lijstsoorten zijn hierbij geanalyseerd. Diersoorten zijn in deze analyses achterwege gelaten. Er is onvoldoende mechanistische kennis over klimaat effecten voor een breed spectrum aan diersoorten. De derde studie was breder van opzet en heeft de resultante van alle veranderingen, zoals weergegeven via areaalverschuivingen van dier- en plantensoorten, geanalyseerd.

Dankzij de complementariteit van deze studies kon de consistentie in gevonden patronen onderzocht worden en daarmee konden algemenere conclusies over de effec-

PETER VAN BODEGOM,
JANA VERBOOM,
FLIP WITTE,
CLAIRE VOS, RUUD
BARTHOLOMEUS,
ANOUK CORMONT,
WILLEMEN
GEERTSEMA & MARJA
VAN DER VEEN

Dr. Ir. P.M. van Bodegom
Faculteit der Aard- en
Levenswetenschappen,
Vrije Universiteit Amsterdam,
De Boelelaan 1105,
1081 HV Amsterdam
p.m.van.bodegom@vu.nl
Dr. J. Verboom-Vasiljev
Alterra, Wageningen UR
Prof. Dr. Ir. J.P.M. Witte
KWR Watercycle Research
Institute en Faculteit der Aard-
en Levenswetenschappen,
Vrije Universiteit Amsterdam
Dr. C.C. Vos
Alterra, Wageningen UR
Dr. Ir. R. Bartholomeus
KWR Watercycle Research
Institute en Faculteit der Aard-
en Levenswetenschappen,
Vrije Universiteit Amsterdam
Drs. A. Cormont
Alterra, Wageningen UR
Dr. Ir. W. Geertsema
Alterra, Wageningen UR
Ing. M. van der Veen
Alterra, Wageningen UR

Foto Aat Barendregt
geo.uu.nl/pictures/
barendregt.

Figuur 1 (links) nieuwe kansen voor de koninginpage (foto Ruut Wegman), (rechts) bedreigde natuur: detail hoogveenlenk (foto Flip Witte).

Figure 1 (left) new chances for the yellow swallowtail (photo Ruut Wegman), (right) threatened nature: a detail of bog (photo Flip Witte)



ten van klimaatverandering op de Nederlandse natuur getrokken worden, dan op basis van de individuele studies mogelijk zou zijn.

Opzet case studies en gebruikte modellen

De in dit artikel beschreven onderzoeken maken gebruik van drie typen modellen om de klimaatinvloeden op de natuur te voorspellen die van elkaar verschillen in aannamen over de wisselwerking tussen klimaat, bodem en vegetatie.

Het eerste type: ecohydrologische modellen, is vooral in een Nederlandse context ontwikkeld (bijvoorbeeld Koerselman *et al.*, 1999; Van Ek *et al.*, 2000). Ecohydrologische modellen voorspellen de effecten van veranderingen in de waterhuishouding op de vegetatie. In Nederland zullen deze als gevolg van klimaatveranderingen een groter effect op de standplaatsfactoren hebben dan bijvoorbeeld wijzigingen in de nutriëntenhuishouding (zie bijvoorbeeld Knapp *et al.*, 2008; Van Oene *et al.*, 1999). De eerste casestudie maakt gebruik van landsdekkende procesgerichte hydrologiemodellen die tot voor kort door Rijkswa-

terstaat gebruikt werden, en voor het ecosysteemgedeelte, van expertkennis. In hun huidige vorm zijn ecohydrologische modellen echter niet geschikt voor het bepalen van klimaateffecten. Dit komt vooral doordat ze gebruik maken van correlatieve verbanden tussen vegetatie en de gemeten gemiddelde grondwaterstand of overstromingsduur, zoals ontleend aan het klimaat uit de tweede helft van de twintigste eeuw (Bartholomeus *et al.*, 2008a). Door de mix van directe en indirecte effecten van klimaatverandering lijken deze correlatieve verbanden niet geldig voor de toekomst. Het effect van de grondwaterstand op bijvoorbeeld de zuigspanning die plantenwortels moeten uitoefenen om water op te nemen hangt sterk af van de bodemtextuur en -structuur en is mede afhankelijk van temperatuur en CO₂. Bovendien kunnen door klimaatverandering de bandbreedten van klimaatcondities waarvoor de beslisregels in de huidige modellen zijn opgesteld, worden overschreden. Deze nieuwe omstandigheden kunnen tot problemen leiden in de voorspellingen. Daarom maakt de tweede casestudie gebruik van een tweede type model: een mechanistisch ecosysteemmodel. We modelleren de directe klimaateffecten door verande-

ringen in de hoeveelheid water en zuurstof te voorspellen die beschikbaar is voor respectievelijk transpiratie en wortelademhaling van de vegetatie (Bartholomeus, 2010). De stress die planten ondervinden als gevolg van excessieve droge of natte omstandigheden heeft grote implicaties voor plantensoorten, omdat uiteindelijk alleen die soorten zullen overleven die aangepast zijn aan deze condities (van Bodegom *et al.*, 2006). Om onder zuurstoffarme condities te kunnen functioneren hebben plantensoorten bijvoorbeeld luchtkanalen in de wortel nodig (van Bodegom *et al.*, 2008). Op deze manier kunnen we zuurstof- en droogtestress aan vegetatiekarakteristieken koppelen en zijn de relaties tussen standplaats en vegetatie gebaseerd op processen die direct van invloed zijn op het functioneren van planten en daardoor ook geldig in een nieuw klimaat. Onze benadering heeft als bijkomend voordeel dat ze het voorkomen van nieuwe soortencombinaties kan voorspellen (Witte *et al.*, 2010; Van Bodegom *et al.*, 2011).

Het derde type model om klimaatinvloeden te voorspellen maakt gebruik van zogenaamde klimaatveloppen: statistische beschrijvingen van het voorkomen van soorten als functie van een beperkt aantal klimaatvariabelen. Beperkingen in de verspreiding van soorten worden niet meegenomen. Desondanks zijn er momenteel weinig betere methoden om areaalverschuivingen te evalueren. Onze derde casestudie gebruikt de resultaten van klimaatvelopmodellen, aanvullend op veldgegevens, om de consequenties van klimaatverandering op areaalverschuivingen te bepalen. De veldgegevens bestaan uit waarnemingen over het voorkomen van soorten vroeger en nu. Omdat sommige opnamen al decennia lang worden uitgevoerd, tonen ze op onafhankelijke wijze aan welke soorten lokaal toe- of afnemen en welke veranderingen er plaatsvinden in verspreidingsgebied (Van der Veen *et al.*, 2010). Deze database geeft direct inzicht in de gerealiseerde en voorspelde areaalverschuivingen van meer dan 3.000 planten- en diersoorten. Wat betreft plantensoorten gaat het om 82% van de Nederlandse flora. Daarmee zijn de databasegegevens representatief voor de (in)directe respons van de Nederlandse flora op klimaatveranderingen.

seerde en voorspelde areaalverschuivingen van meer dan 3.000 planten- en diersoorten. Wat betreft plantensoorten gaat het om 82% van de Nederlandse flora. Daarmee zijn de databasegegevens representatief voor de (in)directe respons van de Nederlandse flora op klimaatveranderingen.

Klimaatscenario's

In de zogenaamde KNMI'06 scenario's (Bakker & Bessembinder, 2007) zijn mondiale projecties vertaald naar meer gedetailleerde veranderingen in temperatuur, neerslag, verdamping, wind, en zeespiegel voor Nederland. Twee basisscenario's worden onderscheiden. Het W-scenario gaat uit van een opwarming van de aarde met 2°C in 2050 ten opzichte van 1990 zonder dat er veranderingen in luchtstromingspatronen plaatsvinden. Het W+ scenario neemt aan dat dergelijke veranderingen wel plaatsvinden, wat naast de temperatuurstijging leidt tot natere winters en drogere zomers. Deze scenario's worden in de eerste twee casestudies gebruikt om effecten van klimaatveranderingen voor de toekomstige vegetatie te analyseren. Via transformatiereksen worden voor beide scenario's temperatuur, neerslag en verdampingsreeksen berekend die vervolgens dienen als input voor de procesgerichte hydrologiemodellen.

Resultaten

Casestudie 1: klimaatschetskaart

In de eerste benadering wordt expliciet erkend dat de huidige generatie modellen slechts beperkt toepasbaar is voor klimaatprojecties. Daarom heeft KWR Watercycle Research Institute een voorlopige schetskaart ontwikkeld die de impact van klimaatverandering op een aantal ecosysteemttypen weer geeft (figuur 2). Deze schetskaart (Witte *et al.*, 2009) is ontwikkeld door een kaart met alle



Figuur 2 schetskaart van ecohydrologische effecten van een warmer en qua neerslag grilliger klimaat (Witte *et al.*, 2009).

Figure 2 sketch map of ecohydrological impacts of a warmer and, where it concerns precipitation, more variable climate (Witte *et al.*, 2009)

in Nederland aanwezige natuurtypen te vergelijken met uitkomsten van landsdekkende hydrologische modellen. Op deze manier is ieder ecosysteemtype gekoppeld aan hydrologische grootheden als grondwaterstand en vochttekort. Vervolgens is voor ieder type met expertkennis onderzocht welke verschuivingen optreden wanneer het klimaat verandert volgens de KNMI-scenario's. Deze resultaten zijn gecombineerd met literatuurgegevens en proceskennis. Voor meer informatie over de methode zie: <http://klimaatennatuur.kwrwater.nl>

De klimaatschetskaart laat zien dat klimaatverandering vooral gevolgen zal hebben voor vegetaties die voor hun watervoorziening geheel zijn aangewezen op regenwater. Grondwateronafhankelijke vegetaties op hogere zandgronden, zoals stuwwallen, duinen en hogere dekzandruggen, zullen te maken krijgen met een groter vochttekort in het groeiseizoen. Onder het W+ scenario is de toename van dat tekort aanzienlijk, wat zal leiden tot een opener vegetatie.

Ook in natte, alleen door regenwater gevoede, ecosystemen kunnen grote veranderingen optreden. Door de toegenomen vochtdynamiek en temperatuur zullen karakteristieke vegetaties van hoogvenen, vennen en natte heiden het moeilijker krijgen. Bij een suboptimale waterhuishouding en een hoog(blijvend) stikstofdepositieniveau is de ontwikkeling van levend hoogveen in Nederland onder scenario W+ waarschijnlijk kritiek (figuur 2). De kwel naar lage gebieden als beekdalen, duinvalleien en sprengen zal toenemen onder het relatief natte scenario W. Dat is gunstig voor de biodiversiteit ter plekke en voor de biodiversiteit van door kwelwater gevoede schraallanden. Of dit ook gebeurt onder het droge scenario W+ is hoogst onzeker. Als bij scenario W+ de kweltoename onvoldoende is om toegenomen waterverliezen in het laagland tegen te gaan, kan de grondwaterstand in de loop van de drogere zomer diep wegzakken. En dat is schade-

lijk voor de ecosystemen in de lage gebieden.

Laagveenmoerassen, zoals de Nieuwkoopse plassen en de Weerribben, waaruit veel water wegzijgt naar een diep ontwaterde omgeving, zullen zonder aanvullende maatregelen (denk aan een ander peilbeheer) in de zomer meer oppervlaktewater moeten aanvoeren om inklinking te voorkomen. Door de slechtere kwaliteit van oppervlaktewater ten opzichte van grondwater, leidt dit waarschijnlijk tot een afname van de biodiversiteit.

Ook van het veenweidegebied zal de biodiversiteit afnemen door de inlaat van kwalitatief slecht oppervlaktewater en een versnelde afbraak van het veen, veroorzaakt door een lagere grondwaterstand en een hogere temperatuur in de zomer.

Casestudie 2: plantenstress

Op basis van procesgerichte hydrologiemodellen hebben we de zuurstofstress en de droogtestress berekend. Beide zijn gebaseerd op de stress die een hypothetische grasmat met vaste karakteristieken zou ondervinden. Door uit te gaan van zo'n hypothetische grasmat blijft de stressaanpassing van de werkelijke vegetatie buiten beschouwing en wordt een objectieve maat voor de potentiële stress door de natheid of droogheid van de bodem verkregen. Voor deze hypothetische grasmat wordt het effect van veranderingen in temperatuur, CO₂ en neerslag op de vocht-huishouding berekend. Vervolgens worden de effecten op de zuurstofbeschikbaarheid als functie van respiratie door plantenwortels en bodemmicro-organismen berekend. De plantenrespiratie die gerealiseerd kan worden ten opzichte van de optimale respiratie is een maat voor de zuurstofstress (Bartholomeus *et al.*, 2008b). Analogue is de vermindering van de transpiratie onder invloed van een tekort aan bodemvocht een maat voor de droogtestress (Bartholomeus *et al.*, 2010). De veranderingen in zuurstof- en droogtestress, en dus van de potentiële kos-

ten van plantensoorten om zich aan die veranderingen aan te passen, zijn berekend voor verschillende KNMI'o6 klimaatscenario's. In hoeverre plantensoorten die kosten investeren om zich daadwerkelijk aan te passen staat hier los van.

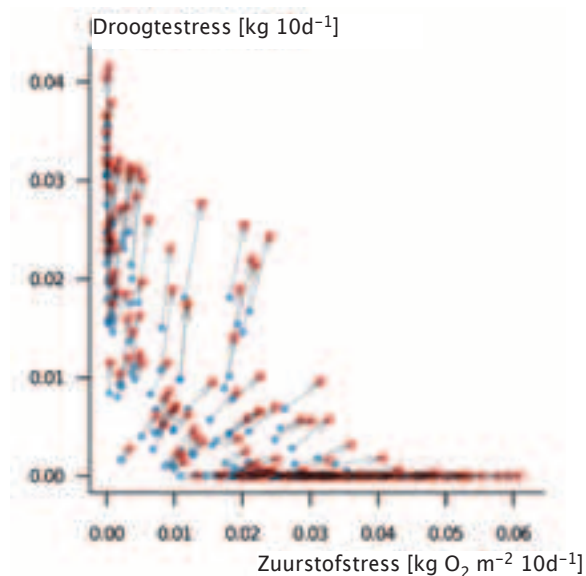
Figuur 3 laat zien dat Nederland systemen heeft die nooit droogtestress (altijd nat genoeg) of zuurstofstress (grondwateronafhankelijke systemen) kennen. Diverse ecosystemen hebben echter in de huidige situatie met beide stressen te maken. Dit zijn vooral de vochtige, maar niet continu natte ecosystemen van Nederland. Juist voor die situaties voorspellen we op basis van onze simulaties dat de beide stressen zullen gaan toenemen, vooral in het W+ scenario.

Zeldzame soorten hebben over het algemeen een smalere fysiologische range dan algemene soorten (onder meer Bartholomeus *et al.*, ingediend) en zijn daardoor naar verwachting gevoeliger voor combinaties van stress. Om dit te toetsen hebben we het aantal Rode Lijstsoorten bepaald voor alle vegetatieopnamen uit figuur 3. Vervolgens hebben we met behulp van regressievergelijkingen het verband tussen het aantal Rode Lijstsoorten en de potentiële zuurstof- en droogtestress en de combinatie van stressen bepaald. Het aantal Rode Lijstsoorten binnen een vegetatie blijkt alleen af te nemen als zowel de droogte- als zuurstofstress toeneemt (Bartholomeus *et al.*, ingediend). Algemene soorten doen dat niet. Gegeven de door ons voorspelde toename van combinaties van droogte- en zuurstofstress zullen Rode Lijstsoorten gaan afnemen in gebieden waar die combinaties voorkomen: vooral de vochtige ecosystemen. Uit onze analyses blijkt bovendien dat de effecten van voedseltekorten hier los van staan. Het gevonden effect is dus een direct gevolg van droogte- en zuurstofstress.

Ook de procesgebaseerde analyse van casestudie 2 wijst in dezelfde richting als de andere analyses. Hierbij dient

Figuur 3 Zuurstof- en droogtestress voor 185 vegetatieopnamen verspreid over Nederland in het huidige (blauwe cirkels) en toekomstige klimaat volgens het W+ scenario (rode cirkels). De pijl geeft de verwachte verschuiving aan richting het vaker simultaan voorkomen van zuurstof- en droogtestress (naar: Bartholomeus *et al.*, ingediend).

Figure 3 Oxygen and drought stress of 185 vegetation relevees across the Netherlands as calculated for the current (blue circles) and future climate according to the W+ scenario (red circles). The arrow indicates the direction of the expected change towards an increasingly co-occurrence of drought and oxygen stress (modified after: Bartholomeus *et al.*, submitted)



wel opgemerkt worden dat genoemde effecten het sterkst zijn onder een W+ scenario.

Casestudie 3: verschuivende soorten

Voor alle soorten in de Klimaat Respons Database is een indeling gemaakt in *uitbreidende*, *terugtrekkende* en *centrale* soorten. Voor het noordelijk halfrond is vastgesteld dat de meeste soorten zich naar het noorden uitbreiden (Doak & Morris, 2010) en, minder duidelijk, dat verspreidingsgebieden aan hun zuidgrens krimpen. *Uitbreidende* soorten zijn soorten waarvan de noordelijke verspreidingsgrens door of net ten zuiden van Nederland ligt. Deze zullen zich hier kunnen uitbreiden of voor het eerst verschijnen. Van *terugtrekkende* soorten ligt juist de zuidgrens van het verspreidingsgebied in Nederland. Zij zullen in aantal afnemen of helemaal verdwijnen uit Nederland. De overige soorten zijn de *centrale* soorten. Nederland ligt min of

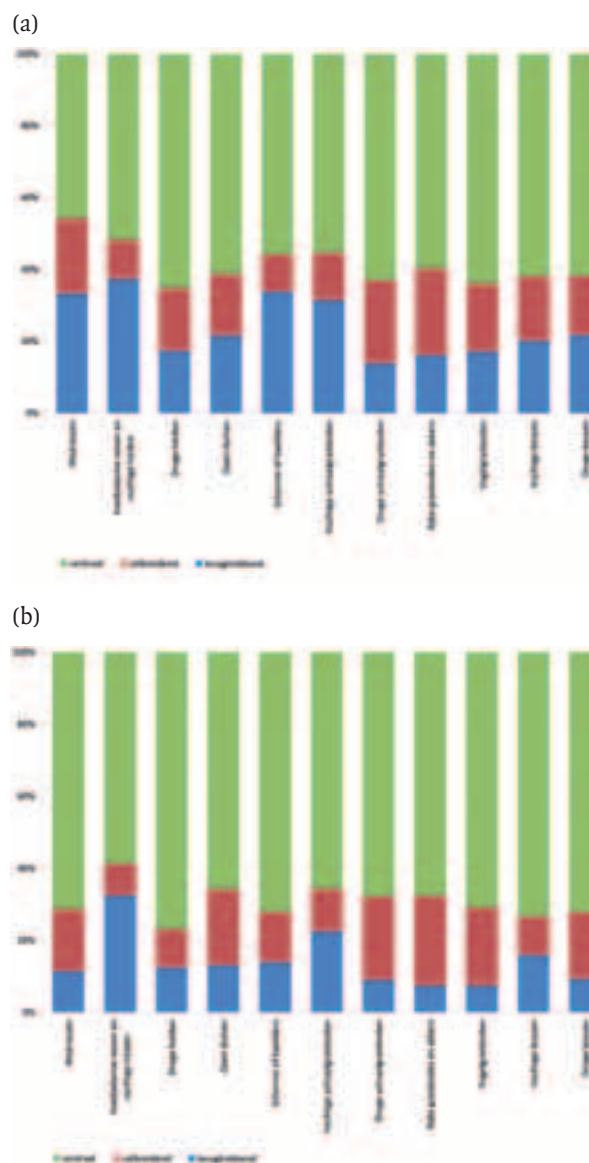
meer centraal in hun verspreidingsgebied en deze soorten krijgen niet direct te maken met systematisch geschikter of ongeschikter wordende omstandigheden. Voor alle soorten geldt dat ze bovendien nog kunnen worden beïnvloed door de toenemende grilligheid van het weer en het vaker voorkomen van extreme omstandigheden: hittegolven, droogte, zware buien (Verboom *et al.*, 2010).

De gegevens over terugtrekkende, uitbreidende en centrale soorten planten en dieren uit de Klimaat Respons Database zijn gebruikt om inzicht te krijgen in de te verwachte veranderingen in verschillende natuurtypen, zie figuur 4 (Veen *et al.*, 2010; Vos *et al.*, 2010). Vooral vochtige schraalgraslanden, vochtige heiden en voedselarme venen bieden plaats aan veel terugtrekkende planten- en diersoorten. Droge schaalgraslanden, rijke graslanden en akkers tellen juist veel uitbreidende soorten. Het beeld dat de biodiversiteit van vooral vochtige tot natte ecosystemen lijdt onder de huidige klimaatverandering wordt nog duidelijker wanneer we kijken naar de balans tussen uitbreidende en terugtrekkende soorten. Die balans is het meest negatief voor de vochtige schraalgraslanden, voedselarme venen en vochtige heiden (voor zowel dier- als plantensoorten). De balans is (in mindere mate) ook negatief voor (voedselrijke) moerassen, schorren en kwelders wanneer dier- en plantensoorten gecombineerd worden. Voor droge schraalgraslanden en rijke graslanden is de balans daarentegen positief. Zij laten een uitbreiding van het totaal aantal planten- en diersoorten zien.

Overeenkomsten casestudies

De belangrijkste conclusie van onze analyses tot nu toe is dat alle drie de benaderingen in dezelfde richting wijzen: vooral vochtige ecosystemen zijn kwetsbaar voor de voorspelde klimaatverandering. Droge en permanent natte ecosystemen lijken minder kwetsbaar te zijn. Bovendien lijken de effecten van eventuele verschuivingen in de nu-

triëntenbeschikbaarheid op de biodiversiteit of het aantal zeldzame plantensoorten in Nederland minder sterk te zijn. In casestudie 1 zijn deze effecten meegenomen bij de waterhuishouding en zijn ze negatief zowel voor voedselarme, door regenwater gevoede ecosystemen als voor voedselrijke door kwel gevoede ecosystemen. Casestudie 2 laat bovendien zien dat de gevonden effecten van de combinatie van droogte- en zuurstofstress op het aantal zeldzame soorten onafhankelijk zijn van en sterker dan de effecten van nutriëntenbeschikbaarheid. Casestudie 3 laat een afnemende biodiversiteit door areaalverschuivingen zien in zowel voedselarme als voedselrijke vochtige ecosystemen, waarbij de effecten op voedselarme ecosystemen over het algemeen sterker lijken te zijn. Wel moet worden opgemerkt dat onderzoek naar de effecten van nutriëntenbeschikbaarheid in de eerste twee casestudies ondergeschikt was, maar zeker in combinatie met de derde casestudie is het aannemelijk dat die effecten van minder belang zijn dan die van de waterhuishouding. De waterhuishouding heeft met name effecten op vochtige ecosystemen met fluctuaties in vochtbeschikbaarheid en minder op droge ecosystemen die droger worden – hoewel casestudies 1 en 3 ook voor droge bossen op hogere zandgronden effecten vonden – en evenmin op permanent natte ecosystemen die minder nat worden. De consistentie van de resultaten is opmerkelijk, omdat de drie benaderingen volledig onafhankelijk van elkaar zijn en (deels) andere sturende factoren centraal stellen. De eerste twee benaderingen nemen de standplaats als uitgangspunt, terwijl de derde juist de waargenomen ruimtelijke verspreiding en de effecten op populaties centraal stelt. Desondanks lijken vochtige ecosystemen consequent als meest kwetsbaar te worden aangewezen. Bij deze bevindingen dient wel opgemerkt te worden dat niet alle vochtige ecosystemen per definitie bedreigd worden en niet onder alle scenario's even ernstig.



Figuur 4 Verdeling van uitbreidende, terugtrekkende en centrale doelsoorten over representatieve natuurtypen in Nederland. (a): voor alle planten- en diersoorten in de database, (b): alleen plantensoorten (bron: Veen *et al.* 2010).

Figure 4 Distribution of expanding and withdrawing target species for representative habitat types in the Netherlands. (a): all plant and animal species within the database, (b): plant species only (source: Veen *et al.*, 2010).

Onzekerheden in de benaderingen

Vanwege verschillende onzekerheden moet de grote consistentie tussen de drie studies niet al te absoluut genomen worden. Zo is het onzeker hoe de gebruikte klimaat-scenario's van het KNMI, die gebaseerd zijn op internationale consensus over verwachte veranderingen, zich laten doorvertalen naar lokale veranderingen in neerslag-dynamiek. Bovendien zijn de terugkoppelingen van vegetatie en andere elementen in het landschap op de neerslag in Nederland (en andere lokale hydrologische factoren) niet in deze scenario's meegenomen. Hierdoor kan lokaal het klimaat anders doorwerken op het landschap dan hier voorspeld. Dit zou bijvoorbeeld gevolgen kunnen hebben voor de klimaatschetskaart uit casestudie 1.

Een onzekerheid specifiek voor de modelstudies uit de klimaatresponsdatabase is dat er een verband wordt gelegd tussen statistieken van het weer (zoals gemiddelde temperatuur, gemiddelde neerslag) en het voorkomen van soorten planten en dieren. Voorspellingen over toekomstig weer worden vervolgens gebruikt voor voorspellingen van toekomstig voorkomen van soorten. In de wetenschappelijke wereld is toenemende kritiek op deze methode, omdat er bijvoorbeeld geen rekening wordt gehouden met aanpassing van soorten, interacties tussen soorten of gevolgen van fragmentatie van het landschap. Bovendien wordt variatie in microklimatologische omstandigheden niet meegenomen. Ondanks de kritiek worden deze modelstudies over het algemeen ondersteund door de veldstudies: soorten verleggen inderdaad hun areaal in noordelijke richting (noordelijk halfmond) of bergopwaarts, zij het vaak in een trager tempo dan voorspeld door de modellen. Dit heeft waarschijnlijk te maken met een vertragingseffect door habitatfragmentatie en verspreidingslimitaties.

Voor de klimaatschetskaart geldt dat de vertaling naar een ruimtelijke expliciete hydrologische voorspelling mo-

menteel slecht mogelijk is. Zo zal de verandering in kwel in lager gelegen gebieden afhangen van aanpassingen van de vegetatie in de bovenstroomse gebieden (Brolsma et al., 2010). Deze laten zich momenteel slecht voorspellen omdat ze sterk afhangen van de mate van adaptatie en transpiratie van de betreffende vegetatie. De Vrije Universiteit Amsterdam en KWR Watercycle Research Institute doen, samen met andere partners, momenteel onderzoek naar deze factoren in de hoop ze in de nabije toekomst beter te kunnen voorspellen. Ook worden veranderingen in substraat, zoals in de dikte en kwaliteit van veenlagen, en veranderingen in het voorkomen van natuurtypen, niet in de modellen meegenomen. Deze veranderingen hebben echter grote invloed op bijvoorbeeld waterdoorlatendheid en watervasthoudend vermogen. Ten slotte worden de effecten van extremen slecht doorvertaald naar effecten op de vegetatie, omdat deze in het algemeen slecht bekend zijn en omdat modellen vaak werken met gemiddelden. Casestudie 2 houdt overigens wel rekening met extremen, want dit model rekent expliciet met stressmaten die gebaseerd zijn op berekende extremen. De simulaties met dit model laten zien dat vooral gebieden waar sterke fluctuaties in droge en natte extremen optreden, het meest kwetsbaar lijken te zijn. Ook internationaal is er de laatste jaren steeds meer aandacht voor de invloed van extremen in milieucondities op de vegetatie. De weinige onderzoeken die tot op heden zijn uitgevoerd wijzen in dezelfde richting als de resultaten die hier zijn gepresenteerd. Echter, er is grote behoefte aan meer onderzoek om deze effecten beter te begrijpen en om te bepalen welke plantensoorten hier het meest gevoelig voor zijn. Voor het onderzoek dat de Vrije Universiteit Amsterdam onlangs gestart is zie: klimaatennatuur.kwrwater.nl.

Vanwege deze onzekerheden gebruiken we geaggregeerde resultaten en doen we geen uitspraken over individuele soorten op specifieke locaties. Ook mogen, ondanks de

aangetoonde kwetsbaarheid van vochtige ecosystemen, op basis van deze studie, bepaalde soorten of natuurdoelen niet opgegeven worden omdat die toch niet meer levensvatbaar of haalbaar zouden zijn.

Conclusies

De vochtige ecosystemen die in de casestudies naar voren komen als het meest kwetsbaar, zoals schraallanden, duinvalleien en natte heiden, zijn karakteristiek voor Noordwest-Europa. Nederland heeft voor deze ecosystemen een zekere verantwoordelijkheid, ook in de Europese context van Natura 2000. Daarom is het, naast het verder onderzoeken van de hierboven beschreven effecten, belangrijk om na te denken over adaptieve maatregelen om de mogelijke negatieve gevolgen van klimaatverandering tegen te gaan. Dit is vooral van belang omdat bovenstaande studies laten zien dat de Rode Lijstsoorten extra kwetsbaar lijken te zijn en wellicht (lokaal) uit zullen sterven. Te denken valt aan hydrologische maatregelen om extremen in de waterhuishouding op te vangen, zoals het aanleggen van hydrologische bufferzones, retentiebekkens voor overstromingen, beregeningsverboden in droge tijden, flexibeler peilbeheer, het opzetten van peilen in landbouwgebieden en het bevorderen van de grondwateraanvulling in infiltratiegebieden, zoals de Utrechtse Heuvelrug. Ook zal het nodig blijven om het oppervlak van aaneengesloten natuurterreinen te vergroten en de ruimtelijke samenhang te bevorderen, lokaal maar ook op internationaal niveau (figuur 5). Dergelijke maatregelen faciliteren niet alleen areaalverschuivingen, maar zorgen ook voor risicospreiding (Verboom et al., 2010) en vergemakkelijken het nemen van lokale hydrologische maatregelen (Woestenburg & Vos, 2010).

Adaptatiemaatregelen zijn zeker van groot belang als scenario W+ bewaarheid wordt, maar mogelijk ook voor scenario W, dat op jaarbasis weliswaar natter is dan het



Figuur 5 (boven) Schetskaart adaptatiestrategie voor een klimaatbestendige natuur, uitgewerkt voor moerasesystemen (bron: Vos et al., 2010). Dergelijke kaarten kunnen ook voor andere natuurtypen gemaakt worden. (onder) Artistimpression van moerasesysteem

Figure 5 (top) Sketch map adaptation strategy for climate-proof nature, in this case for wetland ecosystems (source: Vos et al., 2010). Similar maps can be made for other types of nature as well. (bottom) Artist impression wetland ecosystem—

huidige klimaat, maar dat een iets drogere zomer kent en meer meteorologische variatie tussen de jaren. Onderzoek naar gecombineerde effecten van de nutriëntenbeschikbaarheid, waterhuishouding en ruimtelijke connectiviteit, voortbouwend op de onderzoeken hier geïntroduceerd, zouden de doelmatigheid van adaptatiemaatregelen op de diverse schaalniveaus kunnen vergroten.

Dank

Deze publicatie is mogelijk gemaakt door het BSIK-programma Klimaat voor Ruimte, projecten Hotspots Biodiversiteit (A1) en Adaptatie EHS (A2) en het programma Kennis voor Klimaat, project KKF Tailoring. Zie voor meer resultaten en details: www.klimaatvoorruimte.nl, www.klimaatennatuur.wur.nl en <http://klimaatennatuur.kwrwater.nl>

Foto **Aat Barendregt**
geo.uu.nl/pictures/barendregt.



Summary

Climate impacts on nature in the Netherlands

Peter van Bodegom, Jana Verboom, Flip Witte, Claire Vos, Ruud Bartholomeus, Anouk Cormont, Willemien Geertsema & Marja van der Veen
climate change; ecohydrology, extreme events, habitat distribution, plant traits

Three mutually independent studies, executed by different teams each with their own methods, have come to the same conclusion, being that wet nutrient-poor ecosystems – like hay meadows, wet heathlands and peatlands – seem to be most at risk upon climate change in the Netherlands. The three studies range in their methods from an analysis of ecohydrology effects as estimated by applying expert knowledge on the occurrence of habitat types across the Netherlands via detailed ecohydrological modelling coupled to the number of red list species to an analysis of distribution shifts of individual species decoupled from specific environmental conditions. Although the application of different methodologies overcomes particular shortcomings of individual methods, there still are various uncertainties. These particularly involve the omission of vegetation-hydrology feedbacks and, due to a lack of spatially explicit national information, the effects of soil fertility on natural dynamics. Nevertheless, the consistency of these results prove the importance of adaptation measures to combat increasing drought and flooding frequencies to protect habitat types that are critical to the Netherlands.

Literatuur

- Bakker, A. & J. Bessembinder, 2007.** Neerslagreeksen voor de KNMI'06 scenario's. *H₂O* 22: 45-47.
- Bartholomeus, R.P., 2010.** Moisture matters, climate-proof and process-based relationships between water, oxygen and vegetation. Proefschrift Vrije Universiteit Amsterdam.
- Bartholomeus, R.P., J.P.M. Witte, P.M. van Bodegom & R. Aerts, 2008a.** The need of data harmonization to derive robust empirical relationships between soil conditions and vegetation. *Journal of Vegetation Science* 19: 799-808.
- Bartholomeus, R.P., J.P.M. Witte, P.M. van Bodegom, J.C. van Dam & R. Aerts, 2008b.** Critical soil conditions for oxygen stress to plant roots: Substituting the Feddes-function by a process-based model. *Journal of Hydrology* 360: 147-165.
- Bartholomeus, R.P., J.P.M. Witte, P.M. van Bodegom & J.C. van Dam, 2010.** Nieuwe maat voor bodemvochtregime ook geschikt onder toekomstig klimaat. *H₂O* 3: 37-39.
- Bartholomeus, R.P., J.P.M. Witte, P.M. van Bodegom, J.C. van Dam & R. Aerts, ingediend.** Climate change especially hampers endangered species through intensified water-related stresses. ingediend bij Geophysical Research Letters.
- Bodegom, P.M. van, 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.
- Bodegom, P.M. van, B.K. Sorrell, A. Oosthoek, C. Bakker and R. Aerts, 2008.** Separating the effects of partial submergence and soil oxygen demand on plant physiology and growth upon flooding. *Ecology* 89: 93-104.
- Bodegom, P.M. van, J.C. Douma, J.P.M. Witte, J.C. Ordoñez, R.P. Bartholomeus & R. Aerts, 2011.** Exploring the merits of trait-based concepts to improve predictions of ecosystem-atmosphere fluxes in dynamic global vegetation models. *Global Ecology and Biogeography*, in press.
- Both, C., S. Bouwhuis, C.M. Lessells & M.E. Visser, 2006.** Climate change and population declines in a long-distance migratory bird. *Nature* 441:81-83.
- Brolsma, R.J., T.H. van Vliet & M.F.P. Bierkens, 2010.** Climate change impact on a groundwater-influenced hillslope ecosystem. *Water Resources Research*, 46, doi:10.1029/2009WR008782.
- Cormont, A., A.H. Malinowska, O. Kostenko, V. Radchuk, L. Hemerik, M.F. WallisDeVries & J. Verboom, 2011.** Effect of local weather on butterfly flight behaviour, movement, and colonization: significance for dispersal under climate change. *Biodiversity and Conservation* 20: 483-503.
- Doak, D.F. & W.F. Morris, 2010.** Demographic compensation and tipping points in climate-induced range shifts. *Nature* 467: 959-962.
- Ek, R. van, 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.
- Koerselman, W., A.F.M. Meuleman & M.W.A. de Haan, 1999.** Ecohydrologische effectvoorspelling duinen. Standplaatsmodellering in NICHE Duinen. Nieuwegein. Kiwa Water Research.
- Knapp, A.K., C. Beier, D.D. Briske, A.T. Classen, Y. Luo, M. Reichstein, M.D. Smith, S.D. Smith, J.E. Bell, P.A. Fay, J.L. Heisler, S.W. Leavitt, R. Sherry, B. Smith & E. Weng, 2008.** Consequences of more extreme precipitation regimes for terrestrial ecosystems. *BioScience* 58: 811- 821.
- Oene, H. van, F. Berendse & C.G.F. de Kovel, 1999.** Model analysis of the effects of historic CO₂ levels and nitrogen inputs on vegetation succession. *Ecological applications* 9: 920-935.
- Turnhout, C.A.M. van, E.J.M. Hagemeyer & R.P.B. Foppen, 2010.** Long-term population developments in typical marshland birds in The Netherlands. *Ardea* 98: 283-299.
- Veen, M. van der, E. Wiesenekker, B.S.J. Nijhof & C.C. Vos, 2010.** Klimaat Respons Database, versie 2.0. Wageningen. Alterra WUR.
- Verboom, J., P. Schippers, A. Cormont, M. Sterk, C.C. Vos & P.F.M. Opdam, 2010.** Population dynamics under increasing environmental variability: implications of climate change for ecological network design criteria. *Landscape Ecology* 25:1289-1298.
- Vos, C.C., D.C.J. van der Hoek & M. Vonk, 2010.** Spatial planning of a climate adaptation zone for wetland ecosystems. *Landscape Ecology* 25:1465-1477.
- Witte, J.P.M., J. Runhaar, R. van Ek & D.J. van der Hoek, 2009.** Eerste landelijke schets van de ecohydrologische effecten van een warmer en grilliger klimaat. *H₂O* 16/17: 37-40.
- Witte, J.P.M., R.P. Bartholomeus, J.C. Douma, J. Runhaar & P.M. van Bodegom, 2010.** De vegetatiemodule van Probe-2. KWR-rapport BTO-2010.024(s), Nieuwegein.
- Woestenburg, M. & C.C. Vos, 2010.** Natuur aanpassen aan klimaatverandering. Op zoek naar strategieën voor een klimaatbestendige ecologische hoofdstructuur. Wageningen. Alterra WUR.