



Knowledge
for Climate

Klimaatverandering en modellering van natuureffecten

Verkenning van mogelijkheden om natuur effecten te voorspellen met hydrologische modellen als uitgangspunt





Copyright © 2010

National Research Programme Knowledge for Climate/Nationaal Onderzoekprogramma Kennis voor Klimaat (KvK) All rights reserved. Nothing in this publication may be copied, stored in automated databases or published without prior written consent of the National Research Programme Knowledge for Climate / Nationaal Onderzoekprogramma Kennis voor Klimaat. Pursuant to Article 15a of the Dutch Law on authorship, sections of this publication may be quoted on the understanding that a clear reference is made to this publication.

Liability

The National Research Programme Knowledge for Climate and the authors of this publication have exercised due caution in preparing this publication. However, it can not be excluded that this publication may contain errors or is incomplete. Any use of the content of this publication is for the own responsibility of the user. The Foundation Knowledge for Climate (Stichting Kennis voor Klimaat), its organisation members, the authors of this publication and their organisations may not be held liable for any damages resulting from the use of this publication.

Klimaatverandering en modellering van natuureffecten

A. Barendregt¹, P.P. Schot¹, M.J. Wassen¹



⁽¹⁾ Universiteit Utrecht

KfC/038D/2011
ISBN 978-94-90070-00-7

KKF01b

Thanks to...

This research project (KKF01b; Klimaatverandering en modellering van natuureffecten) was (is) carried out in the framework of the Dutch National Research Programme Knowledge for Climate (www.knowledgeforclimate.org) This research programme is co-financed by the Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment (VROM).



Content

1	Summary.....	6
2	Inleiding	7
3	Effecten van klimaatverandering op natuur.....	9
4	Effecten van klimaatverandering in verschillende delen van Nederland 12	
5	Modellering van effecten van klimaatverandering op de natuur.....	15
6	Overzicht van bestaande ecologische modellen	17
6.1	Modellen op basis van expertkennis	17
6.2	Modellen op basis van gemeten waarden.....	18
6.3	Gekoppelde modellen.....	19
6.4	Mechanistische modellen.....	19
6.5	Vergelijking van de verschillende modellen	20
7	Toepasbaarheid van bestaande ecologische modellen.....	24
8	Conclusies	27
9	Literatuur	28

1 Summary

“Climate change and modelling of effects in nature”

The impact of climate change on the conditions in the Netherlands is uncertain. The project “KKF – Model platform Coupling” aims to connect climate scenarios with the existing models for hydrology, atmosphere and agriculture / nature, to predict the future conditions from climate scenarios. One question is to select the best model to predict the effects of these new conditions on nature; this paper evaluates the available models that can be applied in the Netherlands. Most models are based on the present conditions and cannot incorporate the higher CO₂ concentrations or the increased/decreased precipitation. Models that are “climate-proof” are in construction, but not available within a few years. Prediction of the fauna in future climate conditions cannot be performed yet. We can indicate four types of models that are available to predict the effects of a change in conditions on the vegetation / plant species. Some models use expert knowledge as starting point in the modeling; some others use data from the field to model with regression analysis. One of the problems is that these ecological models cannot be applied in a flow of models: the hydrological and chemical changes have to be incorporated. The third type of models uses different sub-models (soil & water, succession, ecology) and gives the results of one sub-model as input to another model. The fourth type of models is the mechanical modeling of all known relations in an ecosystem; this is possible for defined ecosystems but not yet for all Dutch examples; however, the model PROBE2 is in its last phase of development. As a final conclusion we suggest to apply the sub-models that are connected in calculations. The most probable example is the series SMART2-SUMO2-MOVE4, with the suggestion to add the impact of salinity and phosphorus to these models.



2 Inleiding

Klimaatverandering wordt als een serieuze bedreiging van de duurzaamheid van de aarde gezien. De stijgende CO₂ concentratie en de stijgende temperatuur alsmede vele hierdoor mogelijk ingang gezette of te verwachten veranderingen worden als problemen beschouwd waarvan we de gevolgen willen kennen. In feite willen we voorspellen hoe de situatie zich gedurende de komende halve eeuw (of langer) zou kunnen ontwikkelen.

7

Het nationaal onderzoeksprogramma Kennis voor Klimaat tracht deze antwoorden te geven. Binnen dit programma verricht het project *KKF- Model platform Coupling* onderzoek naar de koppeling van bestaande modellen en databases voor het simuleren van de effecten van klimaatverandering op het natuurlijke systeem van Nederland. Doel hiervan is het valoriseren en beter toegankelijk maken van bestaande onderzoeken op het gebied van modellering van de effecten van klimaatverandering.

Door koppeling van diverse bestaande modellen wordt getracht de effecten van klimaatveranderingen door te rekenen met o.a. luchtkwaliteits- en hydrologische modellen. De gesimuleerde abiotische veranderingen zouden vervolgens moeten worden doorvertaald naar biotische veranderingen, ofwel naar de natuur (flora en fauna), en wel op de schaal van heel Nederland.

Doel van deze verkenning is een inventarisatie van ecologische modellen welke de effecten van klimaatverandering op de natuur in Nederland kunnen simuleren. Nadruk ligt hierbij op modellen welke zouden kunnen aansluiten op hydrologische modelleringen die in *KKF – Model platform Coupling* nagestreefd worden.



3 Effecten van klimaatverandering op natuur

Natuur wordt internationaal bedreigd (Butchard et al. 2010), maar staat ook nationaal onder zware druk (Planbureau voor de Leefomgeving 2009). De oorzaken voor deze achteruitgang kunnen samengevat worden in ten eerste het ontbreken van de ruimtelijke samenhang tussen gebieden en ten tweede aan het veranderen van de milieucondities. Daar is de laatste jaren nog een derde probleemveld aan toegevoegd met de invloeden van klimaatsverandering. Door de voorspelde stijging van temperatuur en verandering in neerslagpatroon (Van der Hurk et al. 2006) worden de eerste twee genoemde oorzaken beïnvloed en verandert de biodiversiteit. Voorspelling van de reactie van de avifauna op deze klimaatsveranderingen (Huntley et al. 2008) geeft een grote verschuiving in areaal van de aanwezige vogelsoorten. Verbonden hiermee is de aantasting van de ruimtelijke patronen in populaties van soorten (Hole et al. 2009). De achteruitgang aan biodiversiteit heeft dus verschillende oorzaken die aan elkaar gekoppeld zijn en mogelijk door klimaatsverandering versterkt worden.

De verwachte klimaatverandering wordt door het KNMI (Van den Hurk et al. 2006) voorspeld in verschillende scenario's. Voor de duidelijkheid wordt in de volgende tekst uitgegaan van de meest extreme veranderingen die in de scenario's W en W+ tot uiting komen. Volgens deze voorspellingen zal het Nederlandse klimaat in 2050 veranderen met:

- in de winter een temperatuurstijging van +1,8 tot +2,3 °C
- in de winter een toename in neerslaghoeveelheid van +7 tot +14%
- in de zomer een temperatuurstijging van +1,7 tot +2,8 °C
- in de zomer een gemiddelde verandering in neerslaghoeveelheid van +6 tot -19%
- in de zomer een stijging in potentiële verdamping van +7 tot +15 %

Waarschijnlijk zal een grotere hoeveelheid neerslag in korte perioden vallen, met in de zomerperioden meer verdamping, langere droge perioden en een groter watertekort.

De verandering in temperatuur, verdamping en neerslaghoeveelheden zal een breed spectrum aan aanpassingen in de ecosystemen veroorzaken. In essentie kunnen de volgende veranderingen plaats vinden (Van Bodegom et al., 2009):

- De CO₂ concentratie zal stijgen, waardoor de groei en concurrentie tussen soorten zal veranderen (C₃ versus C₄ koolstofassimilatie).
- De temperatuurstijging zal in de zomer effect hebben op de groei van de vegetatie. Droge vegetatietypen zullen te lijden hebben onder droogte stress terwijl natte ecosystemen daar geen last van hoeven te

hebben door de grondwater aanvoer en mogelijk een grotere productie kunnen bereiken door de verhoogde [CO₂].

- De temperatuurstijging zal ook effect hebben op het verschijnen van soorten (exoten). Mogelijk zullen ook soorten uit Nederland verdwijnen. Hierdoor zal de samenstelling van de vegetatie en de fauna en het evenwicht tussen soorten kunnen veranderen.
- De lengte van de zomerperiode c.q. het vegetatieseizoen zal veranderen.
- De fenologie van de soorten wordt verstoord (eerder bloeien van planten; eerder present zijn van voedsel voor vogels die in het voorjaar nog in Afrika verblijven).
- De frequentie en kwantiteit van de neerslag zal veranderen.

Lange droge perioden zullen droogte stress veroorzaken in vele ecosystemen, terwijl de korte hevigere neerslag perioden voor veel dynamiek in waterafvoer en/of -stand zal zorgen. Typerende ecosystemen van het Atlantisch klimaat met stabiele grondwaterpeilen zullen hierdoor aangetast worden. Als voorbeeld kunnen genoemd worden de grondwater gevoede vegetatietypen met een kalkrijke bodem die door uitdroging gevolgd door hevige regen een verzuring in de bodem kunnen ondervinden.

Het gehele complex van abiotische waarden / condities en de vegetatie / natuur zal zich aanpassen aan de klimaatveranderingen, doch de optredende terugkoppelingen vormen een grote onzekerheid. Dit heeft tevens te maken met de mogelijkheid van soorten om zich te verspreiden met de opschuivende klimaatgrenzen want door de toename van de temperatuur zullen klimaatzones naar het noorden verschuiven. Planten en dieren die verbonden zijn aan deze klimaatzones zullen moeten migreren in noordelijke richting; zuidelijke soorten nemen de plaats in van de noordelijke soorten die in Nederland tegen hun zuidgrens aan zitten. Dit stelt hoge eisen aan de ruimtelijke structuur van de natuurgebieden; een onderbreking door fragmentatie wordt mogelijk een onoverkomelijk probleem (Opdam & Wascher 2004). Deze ruimtelijke problemen worden in deze verkenning niet verder uitgewerkt.

Tevens is er het probleem van invasieve soorten. Deze nieuwe soorten die ons land bereiken kunnen mogelijk sterk concurreren met bestaande soorten en de biodiversiteit verder uit evenwicht brengen. Dit heeft tot gevolg dat de ecosystemen anders gestructureerd gaan worden waardoor vele soorten zullen verdwijnen (Blois et al. 2010). Ook de invloed van invasieve soorten wordt in deze verkenning niet verder uitgewerkt.

De eerste studies waarin de mogelijke effecten op de diverse natuurtypen bevestigd worden (Vos et al. 2007, Vereniging Natuurmonumenten 2010) geven aan dat er vooral negatieve effecten zullen zijn op:

- natte heide
- droge heide
- hoogveen



- natte schraallanden
- moerassen
- kwelders
- beken en beekdalen
- kustduinen
- duinvaleien

Deze indeling is gericht op de natuurtypen; de natuurkwaliteit in het agrarisch gebied (graslanden, sloten, akkers) is buiten beschouwing gelaten. Het geeft wel duidelijk aan dat de mogelijke problemen verspreid over heel Nederland gevonden kunnen worden in zowel echte natte als in droge gebieden.

4 Effecten van klimaatverandering in verschillende delen van Nederland

De modellering van de effecten van eventuele klimaatverandering op de natuur dient een algemeen beeld te ontwikkelen van de toekomstige vochthuishouding en de bodemprocessen in Nederland. Dit wordt alleen bepaald door de luchtvochtigheid en de neerslaghoeveelheid (droogte stress) voor de ecosystemen die daar volledig van afhankelijk zijn, bijvoorbeeld de droge heide systemen. Voor een ander deel van de ecosystemen zullen de (grond) waterstanden van groter belang zijn. De aansturing van de verschillende ecosystemen in Nederland via klimaat en hydrologie zal dus niet overal op gelijke wijze tot uiting komen. Omdat deze studie zich richt op de natuurvoorspelling van geheel Nederland, wordt een analyse gegeven van de verschillen op basis van de bodem en hydrologie.

De volgende hoofddeling in vier regio's is gebaseerd op de mogelijkheid om de gebieden te modelleren en om hydrologische maatregelen te kunnen uitvoeren. De voorspelde klimaatsverandering zal enerzijds voor droogte in de zomer zorgen, maar tevens voor meer dynamiek in de neerslag en afvoer.

1. De getijdengebieden

De verwachting is dat de gebieden die beïnvloed worden door de getijden in/van de Noordzee relatief weinig invloed zullen ondervinden van de veranderingen in neerslaghoeveelheden echter des te meer door zeespiegelstijging. Het belangrijkste gevolg van zeespiegelstijging zal een stijging van de overspoelings-hoogte en -frequentie op de lange termijn zijn en een verzilting van nu nog zoete ecosystemen. Het onderzoek naar het effect van klimaatsverandering op de natuur in de getijdengebieden kan zich dus grotendeels beperken tot de temperatuurstijging en zeespiegelstijging.

2. De rivieren

Het stroomgebied van de rivieren in Nederland vormt de afvoerweg waarlangs het neerslagoverschot afgevoerd wordt naar de zee. Fluctuaties in debiet in de rivieren zorgen voor grote peilveranderingen, die modelmatig goed berekend kunnen worden. Bij hoog peil worden de uiterwaarden overstroomd. Extra overstroomgebieden kunnen natuur faciliteren en beperken peilstijgingen en de noodzaak tot dijkverhoging. Bij extreem laag peil ontstaan er problemen voor de scheepvaart en voor de waterkwaliteit.

De natuur in het rivierengebied heeft juist te lijden van de geringere peildynamiek die de laatste decennia aanwezig is. Door het stuwen van de meeste rivieren is veel variatie verdwenen en is bovendien de sedimentatie in de uiter-

Error! Reference source not found.

waarden en rivierduinen veranderd. De gevolgen van klimaatsverandering met een toename van dynamiek in de afvoer zal voor deze ecosystemen grotendeels positief uitwerken; de soorten planten en dieren kenmerkend voor dit systeem zijn gewend aan overstroming en veranderingen. Waarschijnlijk zal frequentere overstroming met morfologische veranderingen in de periode buiten het zomerseizoen positief uitwerken op de natuur. Het belangrijkste probleem zal ontstaan in extreem droge zomers, wanneer de afvoer van de rivieren reduceert en door minder afvoer (en verhoudingsgewijs meer afvalwater) de zout- en nutriëntenconcentraties gaan stijgen.

3. Hoog Nederland (inclusief duinen)

De oostelijk zandgronden in Nederland kennen een grotendeels vrije afwatering via beken en rivieren. Afvoer van grotere neerslag hoeveelheden vindt plaats via deze afwatering; grote watertekorten zoals met klimaatverandering voorspeld wordt, kunnen niet opgelost worden door het aanvoeren van water onder vrij verval. Vooral de beekdalen en beken zullen droogte stress ondervinden. Voor de natuur in deze gebieden ontstaan twee extreme situaties. Ten eerste zal met de klimaatverandering een droge periode langer kunnen duren waardoor diverse soorten een watertekort ondervinden; in de tweede situatie kan de neerslaghoeveelheid zo hoog worden dat er tijdelijk een ongewenste overstroming plaats vindt.

De meest gevoelige gebieden voor hydrologische veranderingen zijn ten eerste de aquatische gebieden zoals beken en vennen, die droog kunnen vallen. Ten tweede zijn het de gebieden met een voor natuur gewenste hoge grondwaterstand zoals hoogvenen (afhankelijk van geregelde neerslag) en kwelgebieden, waar continu grondwater toegevoegd moet worden om de bestaande natuur te behouden. Juist deze grondwater-afhankelijke systemen zoals beekdalen en duinvaleien zullen bedreigd worden door directe en indirecte gevolgen van verdroging. Er bestaan systemen op provinciaal niveau met doelstellingen voor de na te streven grondwaterpeilen bij natuurtypen (GGOR). Modellering van grondwaterstromingen kan indicaties geven over de meest kwetsbare locaties en de potenties om natuur te behouden cq. te versterken.

Buiten het bereik van het water zijn ook grote invloeden op de natuur te verwachten. Binnen de droge duinen kunnen grote veranderingen gaan optreden. Typerende (Atlantische) ecosystemen van oostelijk Nederland zoals heide en hoogveen zullen direct door de verdroging en de hogere temperaturen in hun functioneren aangetast worden. Ook is te voorspellen dat bepaalde bostypen door deze veranderingen aangetast zullen worden (Vos et al. 2007).

4. Laag-Nederland

Schematisch weergegeven is dit het “polderland” waar met bemaling en inlaatwater de gewenste polderpeilen gehandhaafd worden. Een klimaatverandering met grotere neerslag vormt meestal geen probleem aangezien dit overschot uitgemalen wordt op boezem/rivier/zee. Een klimaatverandering met

langere droge perioden heeft voor de natuur wel grote invloed. Bij watertekort wordt er boezemwater ingelaten ter handhaving van het peil; de waterkwantiteit wordt op deze wijze gewaarborgd.

In droge zomers zal echter de kwaliteit van het boezemwater sterk achteruitgaan, want dit boezemwater is deels rivierwater dat hogere zout- en nutriëntenconcentraties bevat dan het oorspronkelijke polderwater. Hierdoor ontstaat het probleem van systeemvreemd water en interne eutrofiering, waarbij de natuur in kwaliteit achteruit gaat (Geurts et al. 2009). Modelleren van de natuur in Laag-Nederland wordt hiermee een bepaling van de invloed van de veranderde chemie van het oppervlakte- en grondwater.

Tevens ontstaat er binnen de percelen van een polder een lokale verdroging waarbij het grondwaterpeil door verdamping daalt (hol peil tussen sloten). In de uitgestrekte veengebieden in Laag-Nederland resulteert dit in versterkte mineralisatie van het veen en hiermee het vrijkomen van nutriënten en CO₂.

Error! Reference source not found.

5 Modellering van effecten van klimaatverandering op de natuur

De ingeschatte verandering in de klimaatomstandigheden kent een onzekere afgeleide voor de natuur want het is onduidelijk in hoeverre bestaande modellen de reactie van het ecosysteem kunnen voorspellen onder de (nog niet bestaande) veranderende condities. Momenteel vinden pogingen plaats om de voorspellingsmodellen zgn. klimaatbestendig te maken (Van Bodegom et al., 2009). Dit zal echter nog veel onderzoek vergen. Doel van het project *KKF- Model platform Coupling* is juist na te gaan wat er met bestaande modellen zou kunnen.

Twee essentiële factoren die de ontwikkeling in het ecosysteem sturen zijn vochthuishouding en nutriëntenbeschikbaarheid, die in een complexe relatie met elkaar staan. De vegetatie reageert hierop, maar stuurt zelf ook in dit evenwicht via verdamping. Hierdoor vindt extra doorluchting van de bodem plaats, met invloeden op pH en nutriëntenbeschikbaarheid. Tevens is er nog een terugkoppeling, want door de stijging in CO₂ concentratie neemt de assimilatie toe en zullen planten hun huidmondjes meer sluiten of neemt de hoeveelheid en grootte van de huidmondjes af. Dit heeft tot gevolg dat de verdamping vermindert. Dit staat nog apart van de mineralisatie die bij verhoogde temperatuur versneld zal worden.

In deze studie wordt met name gekeken naar ecologische modellen die veranderingen in vochthuishouding en nutriëntenbeschikbaarheid (bepaald op basis van hydrologische en bodemchemische simulatiemodellen) kunnen doorvertalen naar effecten op flora en fauna. Er zijn twee niveaus waarop de effecten van klimaatverandering op de natuur beschouwd kunnen worden.

Ten eerste zijn dat de voorkomende *soorten* in Nederland, tegenwoordig vaak aangeduid met “biodiversiteit”. In totaal zijn dat in ons land ca. 37.000 soorten aan planten en dieren, die ieder hun eigen eisen stellen aan hun leefmilieu. Deze eisen worden vaak aangeduid als standplaatsfactoren. Er zijn soorten die kenmerkend zijn voor droge omstandigheden welke groeien onder invloed van neerslagwater. Er zijn ook veel soorten kenmerkend voor natte omstandigheden in Nederland, welke voorkomen in het oppervlaktewater of waar het grondwater hoog staat. De omstandigheden voor dieren zijn vaak nog complexer omdat dieren migreren binnen het systeem.

Ten tweede zijn dat de *ecosystemen*, waar bepaalde planten- en diersoorten met overeenkomstige eisen aan de standplaatsfactoren gezamenlijk voorkomen. Binnen deze systemen zijn allerlei interacties (concurrentie, maar ook facilitatie) die bepalen welke soorten een plek in het systeem kunnen behouden. De vegetatiekunde gebruikt het soortenspectrum dat in een systeem voorkomt

ter beschrijving van de typen; de aanwezigheid van deze typen kan hierna gekoppeld worden aan de milieuomstandigheden zoals de vochthuishouding.

Modellering van het voorkomen van *soorten* gebruikt in de meeste gevallen de kennis over de soortspecifieke standplaatsfactoren, zoals deze uit de literatuur bekend zijn. Deze factoren omvatten een breed scala. Voor de hogere planten zijn de meest genoemde de waterstanden, de pH en de beschikbaarheid van nutriënten (voedselrijkdom), naast een serie aan vaste omstandigheden zoals bodemgesteldheid, hoogteligging en expositie. In de wetenschappelijke literatuur worden per plantensoort standplaatsfactoren vermeld op basis van door experts ingeschatte waarderingslijsten (bijv. Ellenberg 1974, Londo 1988), of op basis van gemeten waarden in het veld ter plaatse van het voorkomen van de soort (Bloemendaal & Roelofs 1988, Barendregt et al. 1990). De door experts ingeschatte waarderingslijsten zoals door Ellenberg (1974) kunnen ook worden gecalculeerd met grote bestanden van vegetatieopnamen uit het veld; door middel van iteratie en regressie kunnen de indicatiewaarden van soorten ten opzichte van elkaar vastgesteld worden. Daarnaast bestaat de mogelijkheid om grote hoeveelheden veldwaarnemingen als de basis voor een soortmodellering te nemen. Hiermee kunnen correlatieve (multiple logistische regressie) voorspellingsmodellen opgesteld worden die op gemeten waarden gebaseerd zijn (Barendregt et al. 1993, Ertsen et al. 1995).

Modellering van *ecosystemen* is moeilijker te realiseren. Het specifieke probleem is dat er allerlei bodemprocessen gekoppeld aan de hydrologie meegenomen moeten worden. Daarnaast hebben de soorten allerlei onderlinge relaties, zodat competitie t.a.v. diverse factoren in optimale situatie verwerkt moet worden (planten onderling, maar ook reactie van fauna). Er zijn vele terugkoppelingen in een systeem en tevens zijn er vele overgangen tussen systemen mogelijk. In de meest ideale situatie is er een beschrijving van het systeem waarin het sturende proces voor het voorkomen van het ecosysteem verwerkt is. Complicatie hierbij is dat er in de praktijk meestal niet één proces, maar verschillende processen tegelijkertijd van toepassing zijn. Zo zal een droge periode de vochthuishouding in een bodem beïnvloeden waardoor vochtminnende planten achteruit zullen gaan. Tegelijkertijd zal zuurstof dieper in de bodem doordringen waardoor organisch stof afgebroken wordt en de hierin aanwezige nutriënten vrijkomen, met tevens als gevolg een verandering van de zuurgraad die bepalend is voor het voorkomen van vele soorten.



6 Overzicht van bestaande ecologische modellen

Er zijn in Nederland vele ecologische modellen ontworpen die de ontwikkeling van ecosystemen trachten in te schatten. De meeste werken via de milieucondities ofwel de waarden van abiotische factoren op de standplaats, waaruit de kans op aanwezigheid van planten of de vegetatie berekend wordt. Deze voorspelling wordt vaak als basis voor de ontwikkeling van de natuur gezien omdat de vegetatiestructuur het voorkomen van de fauna sterk bepaalt.

Er zijn nauwelijks modellen die de aanwezigheid van fauna voorspellen en in deze verkenning wordt niet ingegaan op voorspellingsmodellen voor de fauna. Dit heeft deels te maken met de mobiliteit van de dieren waardoor ze minder gefixeerd zijn aan standplaatsfactoren. Ze verplaatsen zich bij veranderende omstandigheden en/of gebruiken verschillende niches / verschillende locaties, waardoor de eenvoudige gedachte van aan de standplaats gebonden soorten niet meer van toepassing is. Relatief kortstondige veranderingen (enkele dagen een hoger grondwaterpeil) zijn nauwelijks van invloed op de fauna. Het voorbeeld van de otter maakt duidelijk welke andere randvoorwaarden van toepassing zijn bij fauna in tegenstelling tot planten. Voor het voorkomen van de otter gelden de volgende randvoorwaarden: rust, helder water, genoeg beschikbare vis en voldoende areaal leefgebied. Dit zijn andere standplaatsfactoren dan bij de vegetatie, die alle gerelateerd zijn aan bodem-, water- en luchtcondities. Naar het simuleren van de invloed van de ruimtelijke configuratie van milieuomstandigheden op het voorkomen van diersoorten is door Alterra (bijv. Opdam & Wascher 2004) onderzoek verricht.

In onderstaande tekst zal een kort overzicht gegeven worden van de werkwijzen waarop de verschillende voorspellingsmodellen voor plantensoorten / vegetatietypen opgesteld zijn. Alle redelijk bekende modellen die in Nederland gehanteerd worden, staan hierin genoemd. In de tekst zal een onderverdeling van modellen gebruikt worden op basis van resp.:

- 1) expertkennis
- 2) gemeten waarden
- 3) gekoppelde modellen
- 4) mechanistische modellen

6.1 Modellen op basis van expertkennis

Het multiple stress model voor de vegetatie MOVE bestaat uit twee modules, een bodem module (afgeleid uit SMART) en een vegetatie module (afgeleid uit de Ellenberg-waarden voor planten) (Latour & Reiling 1993). De Ellenberg-waarden voor Vocht, Nutriënten en Zuurgraad zijn hierbij verder onderbouwd met regressietechnieken, toegepast op grote gegevensbestanden met vegeta-

tieopnamen. Hierdoor wordt het mogelijk de drie typen stress ten opzichte van elkaar te evalueren. Door koppeling aan GIS-bestanden van standplaats factoren (bv. waterstand, bodemtype) kan een ruimtelijk beeld van een verandering in het milieu worden doorvertaald naar de veranderde kans op het aantreffen van plantensoorten.

Het NatuurTechnisch Model (NTM) is eveneens een expertkennis-model dat de relatie geeft tussen abiotische omstandigheden en de natuurwaarde (Gremmen 1990). Er zijn veel basale overeenkomsten met MOVE, want de invoer kan uit het bodemmodel SMART afkomstig zijn en net zoals bij MOVE zijn er drie factoren (vocht, zuur, nutrient) die van invloed zijn. NTM werkt niet met soorten maar met typen vegetatie. Het model berekent uiteindelijk de verandering in de natuurwaarde (ongeveer zeldzaamheid + achteruitgang; gedefinieerd op een glijdende schaal). Wamelink et al. (1998) geeft overzicht van de toepassing van het model.

Het model DEMNAT is een praktisch model dat geschikt is voor het aangeven van veranderingen op het hoger schaalniveau van het ecosysteem in plaats van de soorten (van Ek et al. 2000, Rinhaar et al. 1996). DEMNAT combineert ruimtelijke informatie over hydrologie, bodem en vegetatie (uit literatuur) in een schematisatie voor grondwater afhankelijke ecosystemen. Er wordt gebruik gemaakt van ecotoop-beschrijvingen in ecoseries; hiermee worden dosis-effect relaties van hydrologische veranderingen op de aanwezige vegetatie weergegeven. Als eerste stap worden de standplaatsfactoren berekend, waarna het effect van de verandering op de soorten-samenstelling aangegeven wordt. Hydrologische modellen geven verandering in waterstand en –toevoer, waarna de verandering in condities doorgerekend wordt naar de volledigheid van ecosystemtype.

6.2 Modellen op basis van gemeten waarden

Het model HYVEG maakt gebruik van de relaties tussen een grootaantal gemeten variabelen van de hydrologie in duinvalleien, en het voorkomen van 100 plantensoorten (Noest 1994). Variabelen die de water- en bodemkwaliteit beschrijven zijn niet meegenomen, zodat het een voorspelling voor planten betreft op basis van ca. 75 kwantitatieve hydrologische omstandigheden.

De modellen ICHORS en ITORS berekenen een multiple optimumcurve per soort, op basis van honderden veldwaarnemingen van soorten en aangetroffen (gemeten) abiotische variabelen, waarbij alleen variabelen in het model opgenomen worden die een verklarende waarde voor die soort geven. ICHORS richt zich op de relaties in aquatische ecosystemen beïnvloed door oppervlaktewater in westelijk Nederland en het voorkomen van 180 plantensoorten (Barendregt et al. 1993). ITORS richt zich op terrestrische systemen in westelijk Nederland die beïnvloed worden door grondwater en het voorkomen van 175 soorten (Ertsen et al. 1995). Beide modellen gebruiken veel chemische variabelen in water (macro-ionen, nutriënten, metalen, zuurgraad), hydrologie en bodem-



factoren (alle 'relevante' variabelen). Uitvoer is de kans op het voorkomen van plantensoorten bij gegeven waarden van de set abiotische variabelen. In tegenstelling tot alle andere modellen zijn ook variabelen die de invloed van saliniteit aangeven opgenomen in de modellering. Tevens is op dezelfde basis het model IMRAM (Amesz & Barendregt 1996) gemaakt dat de aquatische macrofauna voorspelt in de provincie Noord-Holland.

6.3 Gekoppelde modellen

Gedurende de laatste 15 jaar wordt er bij het modelleren een integratie van informatie uit verschillende modellen toegepast. De ruimtelijke component wordt meestal meegenomen door de incorporatie van GIS-systemen, waarmee ook een koppeling tussen modellen mogelijk wordt. Een momenteel veel gebruikte combinatie is de modellen serie SMART-SUMO-MOVE, waarbij de condities in de bodem (en de veranderingen hierin wegens nieuwe omstandigheden) doorgegeven worden in de modellering van de plantensoorten in MOVE. MOVE4 is qua inhoud de laatste jaren beter onderbouwd (zie: Wamelink et al. 2009). SMART-SUMO is een combinatie van een dynamisch procesmodel SMART voor de onverzadigde bodem (stikstof beschikbaarheid, pH, mineralisatie en vocht) en een dynamisch successiemodel SUMO dat vooral om de beschikbaarheid van stikstof en biomassa groei draait (Wamelink et al. 2003, Mol-Dijkstra 2005, Wamelink et al. 2008). De variatie in fosfor concentratie / beschikbaarheid wordt niet meegenomen, ondanks het belang voor zeldzame soorten (Wassen et al. 2005).

6.4 Mechanistische modellen

De wetenschappelijk beste modellering van veranderingen in een ecosysteem wordt gegeven door het modelleren van een compleet ecosysteem met de sturende variabelen hierin en vervolgens het modelleren van een nieuw evenwicht. Het behoeft nauwelijks uitleg dat het incorporeren van alle sturende variabelen (zo ver deze bekend zijn) een grote investering vergen. Er zijn twee modelleringen bekend die voor geheel ecosystemen opgesteld zijn: NICHE / PROBE en NUCOM.

De modellen NICHE en PROBE zijn specifiek opgesteld voor de vegetatie in de duinen. In NICHE (Koerselman et al. 1999) dat voor vochtige tot natte duinsystemen ontwikkeld is, wordt de voedselrijkdom berekend uit de bodemgesteldheid, de hydrologie, het beheer en de inrichting van het gebied. De beschikbaarheid van stikstof en fosfor wordt berekend uit de mineralisatiesnelheid, de levering uit bodem, grondwater en atmosferische depositie, en het maaibeheer. Tevens wordt de neerslag van fosfaat berekend. Het model houdt rekening met de zuurgraad van de bodem.

Het model PROBE gebruikt de informatie uit NICHE en combineert dit met de kans op aantreffen van een vegetatietype (Witte et al. 2007). Het bevat de bodemchemie, de bodem hydrologie en de vegetatiekundige processen. Veranderingen in grondwaterstand, atmosferische depositie, vegetatiestructuur en beheersmaatregelen (maaïen/plaggen) geven een verandering in indicatiewaarden, waaruit een vegetatievoorspelling opgesteld kan worden.

Recent is de ontwikkeling van PROBE-2 (Witte et al. 2010, Douma in voorbereiding), een model waar milieufactoren gekoppeld worden aan traits van vegetatietypen. Vanuit deze traits wordt voorspeld met Gaussian vegetatietypen. Als milieufactoren zijn op dit moment transpiratiestress, zuurstofstress (volgens Bartholomeus et al. 2008), stikstofmineralisatie en tijd sinds verstoring verwerkt in het model. Indirect zijn waterinvloeden, CO₂ concentraties en temperatuur verwerkt. Bovendien is de zuurstofstress de potentiële stress die een plant ondervindt en kan zowel voor grondwater-afhankelijke als -onafhankelijke sites gebruikt worden. Aangevoerd is dat de zuurstofstress inderdaad robuuster is dan grondwaterstanden, wat in veel andere modellen wordt gebruikt.

Het NUCOM-model is een simulatiemodel dat de stikstof-, koolstof- en waterhuishouding van een ecosysteem simuleert op basis van een procesmatige beschrijving van plant- en bodemprocessen in ecosystemen (van Oene et al. 2000). Wijzigingen tijdens het successieproces binnen de vegetatie door gewijzigde licht-, vocht- en stikstofcondities, worden doorgerekend voor de concurrerende plantensoorten (van Oene et al. 1999a). Op deze wijze kunnen de belangrijkste N- en C-stromen in het ecosysteem gemodelleerd worden. Het model is toegepast in heidevelden, stuifzanden en sparren- en beukenbossen. Tevens is het effect van begrazing op de vegetatiesuccessie in de Oostvaardersplassen onderzocht (van Oene et al. 1999b). Een toepassing op de droge zandgronden van de Veluwe werd bereikt door de model resultaten te koppelen aan regressieberekeningen voor de stikstof-beschikbaarheid en de pH, uitgebreid met de Ellenbergwaarden voor licht (van Oene et al. 2001).

Deze goed onderbouwde modellering geldt voor de heidevelden en stuifzanden van de zandgronden van de Veluwe. Een uitbreiding naar andere ecosystemen zal opnieuw het opstellen van het model met honderden toestandvariabelen en parameters vergen. Een andere technische probleem is dat stikstof als beperkende factor beschouwd wordt; fosfaat blijft buiten beschouwing. Tevens kan er geen invloed van grondwaterstromingen (o.a. kwel) meegenomen worden, dus is het model alleen overdraagbaar naar droge ecosystemen zonder grondwaterstroming.

6.5 Vergelijking van de verschillende modellen

De gepresenteerde modellen zijn toegepast in Nederlands en bleken voor hun (gedefinieerde) doelstelling te voldoen. Toch heeft ieder model zijn beperking



of is in de algemene toepasbaarheid beperkt (Olde Venterink & Wassen 1997, Van Bodegom et al. 2009).

In tabel 1 wordt een overzicht gegeven van de verschillende modellen met hun eigenschappen.

In het volgende hoofdstuk wordt nader ingegaan op de toepasbaarheid van de verschillende modellen binnen het project *KKF- Model platform Coupling*.

Tabel 1. Overzicht van vegetatievoorspellingsmodellen met hun eigenschappen

Model	Toepassingsgebied	Invoer – waterhuishoudingsvariabelen	Invoer – overige variabelen	Uitvoer
MOVE	Algemeen Nederland	Verandering vocht (niet gedefinieerd) -uit indicatiegetallen	Conditie pH en stikstof	Kans op soorten
NTM DEM-NAT	Algemeen Nederland, resp. nat Nederland	Verandering vocht, resp. grondwaterpeil - uit indicatiegetallen, resp. samenstelling ecotoop	Bodem + pH	Natuurwaarde, resp. compleetheid van ecotoop
ICHORS ITORS	Oppervlaktewater resp. grondwater gestuurde systemen in west Nederland	Verandering hydrologie + chemie oppervlakte-, resp. grondwater (uit veldwaarnemingen)	Complete ionenbalans + abiotische condities	Kans op soorten
SMART-SUMO-MOVE	Algemeen Nederland	Verandering vocht, via bodem deels gedefinieerd – tevens afgeleid uit bodemtype + indicatiegetallen	Bodemtypen, pH en successie stadium	Kans op soorten
NICHE PROBE	Duinen in Nederland	Verandering in waterstanden en beheer - uit veldwaarnemingen	Samenstelling bodem + structuur +beheersinvloeden	Kans op vegetatietype



PROBE-2	Algemeen Nederland	Transpiratie, waterstanden en temperatuur	Samenstelling bodem (stikstof) en successietijd	Kans op vegetatietype en RodeLijst soorten
NUCOM	Droge zandgronden (Veluwe)	Verandering in watertekort - uit veldwaarnemingen	Conditie in milieu met vele (> 100) variabelen	Kans op soorten

7 Toepasbaarheid van bestaande ecologische modellen

Uit voorgaande tekst hebben we kunnen leren dat de complexe relaties in het ecosysteem het beste via mechanistische modellen beschreven kunnen worden. Echter direct geldt de beperking dat de beschikbare mechanistische modellen NUCOM en PROBE slechts voor delen van Nederland geschikt zijn (de Veluwe resp. de duinen) en dat uitbreiding van de toepasbaarheid voor heel Nederland grote investeringen in tijd en geld zal vragen. Deze modellen zijn daarom niet bruikbaar voor het op korte termijn doorrekenen van effecten van klimaatverandering voor heel Nederland. Het zal wel mogelijk zijn om voor de Veluwe en de duinen in te zoomen op de effecten van klimaatverandering met deze modellen. Daarnaast is de toepassing van PROBE-2 komende, maar wegens de recente ontwikkeling is er nog weinig ervaring opgedaan in de praktijk.

Hetzelfde type probleem ontstaat bij de zgn. klimaatbestendige modellen, die aan allerlei voorwaarden moeten voldoen zoals in hoofdstuk 2 beschreven zijn. Er wordt gewerkt om met incorporatie van deze randvoorwaarden een nieuw type model op te stellen (zie: van Bodegom et al., 2009) maar de resultaten hiervan zijn niet op redelijk korte termijn beschikbaar. Deze proces-gebaseerde modellering van hydrologie en ecologie maakt gebruik van functionele karakteristieken van de vegetatie in plaats van de condities bij de bestaande vegetatietypen. Dit levert de oplossing voor de voorspelling van een verandering van de vegetatie in een nog onbekende richting (o.a. Fukami et al. 2005).

Het project *KKF – Model platform Coupling* is om praktische redenen gericht op het gebruik van bestaande modellen. Binnen het project is de modellering van hydrologische effecten van klimaatverandering voldoende onderbouwd. Het eindresultaat hiervan wordt dat voor grote delen van Nederland een overzicht van de waterbalans opgesteld kan worden. Vervolgens dient de invloed van de veranderingen in hydrologie op ecosystemen te worden gemodelleerd. Aangezien er op korte termijn geen klimaatbestendige ecologische modellen beschikbaar zijn, en de modellen NUCOM en NICHE / PROBE tot nu toe een beperkte geografische toepasbaarheid hebben, zal gebruik moeten worden gemaakt van ecologische modellen opgesteld voor de huidige toestand van het klimaat.

Hierbij dient rekening te worden gehouden met bepaling van effecten in verschillende delen van Nederland (hoofdstuk 3). De effecten op regenwatergevoede en grondwatergevoede ecosystemen in de hogere delen van het land (oosten, zuiden, duinen) met afwatering onder vrij verval, zullen verschillen van de cultuurtechnisch strikt gehandhaafde polderpeilen in het westen van het land. Uit de beschikbare modellen blijft daarbij een driedeling in keuze mogelijk.



(1) Het Natuur Technisch Model en DEMNAT berekenen mogelijke veranderingen in natuurwaarde resp. de compleetheid van het ecosysteem (alle elementen van een ecotoop aanwezig). Door koppeling met GIS-bestanden kan een landsdekkend beeld voor Nederland gegeven worden. Een belangrijk nadeel van deze benadering is het ontbreken van de bodemprocessen en de beschikbaarheid van nutriënten in deze modellen. Derhalve dienen aannames gemaakt te worden hoe het veranderende klimaat deze variabelen in de modellering beïnvloedt.

(2) De gekoppelde modellen SMART-SUMO-MOVE bieden een alternatief voor bovengenoemde modellen, aangezien via het SMART model kenmerkende bodemprocessen gemodelleerd worden. Hierbij geldt wel de aanname dat de bodem in een veranderd klimaat hetzelfde reageert als in het huidige klimaat. Door de koppeling van modellen kunnen effecten van veranderingen in waterstand worden doorvertaald naar veranderingen in bodemvariabelen en biotische variabelen. Via koppeling met GIS-bestanden kunnen landsdekkende beelden worden gegenereerd. Er is reeds ruime ervaring opgedaan met de modellen SMART-SUMO-MOVE, waardoor voortgebouwd kan worden op bestaande kennis. Er zijn twee nadelen bij deze modellen. Ten eerste is de klimaatgevoeligheid van de modellen onbekend (bv. effect lengte zomerperiode, en temperatuur- en CO₂-gevoeligheid), een voorbehoud dat voor alle drie modellen geldt. Ten tweede ontbreekt een goede onderbouwing van de effecten van een verandering in de saliniteit, zoals die in westelijk Nederland kan optreden bij klimaatverandering. De gebruikte Ellenberg-getallen zijn representatief voor midden-Europa, zonder aanwezigheid van de invloed van de zee. Voor de terrestrische systemen in oostelijk Nederland is dit niet bezwaarlijk vanwege het ontbreken van saliniteitsinvloeden vanuit zee. Echter voor het westen van Nederland met aanvoer van boezemwater en opkwellend brak grondwater kan dit terdege discriminerend werken in een nieuw evenwicht tussen (zilte) milieuomstandigheden en voorkomende plantensoorten.

(3) De benadering zoals via ICHORS-ITORS heeft het voordeel dat in het veld gemeten waarden van standplaatsfactoren bij verschillende plantensoorten de modelbasis vormt en dat een verandering in het fysiologisch optimum van vele soorten in concentraties van opgeloste stoffen resp. waterstanden doorgerekend kan worden. Deze modellering is beperkt ten aanzien van de verandering in bodemparameters welke niet worden berekend en derhalve moeten worden ingeschat als invoerwaarden van de modellen. Tevens geldt ook hier, zoals bij alle bestaande modellen, de beperking van de niet-klimaatbestendigheid van de modellen.

De grote datasets waarop deze modellen zijn gebaseerd dekken wel de zilte milieu van grond- en oppervlaktewater. Daarmee bieden ze mogelijk een invulling van de missende schakel in de serie SMART-SUMO-MOVE. Onderzocht zou kunnen worden op welke wijze de saliniteitsgegevens beschikbaar in de gegevensbestanden van ICHORS-ITORS, toegevoegd kan worden aan SMART-SUMO-MOVE. Dit lijkt een inspanning die op afzienbare termijn kan worden voltooid. In dit verband is een recente ontwikkeling in het bepalen van indicatiewaarden van soorten volgens de methode Iteratio (Holtland et al., 2010)

mogelijk een werkwijze om hieraan invulling te geven. Op deze wijze kan aan de drie beschikbare factoren uit MOVE (vocht, zuur, stikstof) een belangrijke vierde factor (zout) worden toegevoegd. Een verdere uitbreiding uit dezelfde bestanden van ICHORS-ITORS zou in de toekomst de incorporatie van het essentiële nutriënt fosfor / fosfaat kunnen zijn.

Indien gebruik gemaakt wordt van de serie Smart-Sumo-Move, dan zijn de belangrijkste benodigde invoergegevens voor de modellen:

- SMART2 – invoer: bodemkaart / grondwatertrap / kwel / kwelkwaliteit / depositie zuur en stikstof. Uitvoer: pH, stikstofbeschikbaarheid, kationen
- SUMO2 – vegetatieprocessen / biomassa
- MOVE4 – invoer: pH, stikstofbeschikbaarheid, grondwaterstand. Uitvoer: kans op soorten, gecombineerd naar vegetatietypen



8 Conclusies

1. Er zijn in Nederland diverse modellen voor bepaling van de effecten van verandering in hydrologie door klimaatverandering, op het voorkomen van plantensoorten.
2. Modellen die het effect van klimaatverandering op de fauna doorrekenen zijn momenteel niet beschikbaar.
3. De beschikbare vegetatie modellen zijn alle representatief voor het huidige klimaat in Nederland. Klimaatbestendige modellen zijn op korte termijn nog niet beschikbaar.
4. De beschikbare vegetatie modellen kunnen worden toegepast om effecten van veranderingen in hydrologische variabelen door klimaatverandering op de vegetatie door te rekenen, zij het onder de aanname dat andere invloeden van klimaatsverandering (o.a. lengte groeiseizoen, CO₂ concentraties) op de vegetatie verwaarloosbaar zijn.
5. Bestaande mechanistische modellen zijn wetenschappelijk gezien te prefereren, maar deze zijn nog niet toepasbaar in grote delen van Nederland. Het toepasbaar maken voor heel Nederland zal een grote inspanning vergen. De recente ontwikkeling van PROBE-2 vormt wel een eerste aanzet tot deze werkwijze.
6. De gekoppelde modellen SMART-SUMO-MOVE bieden de mogelijkheid effecten van klimaatverandering op water, bodem en plantensoorten gekoppeld door te rekenen, van een verandering in vochtigheid van de bodem, via modellering van de zuurgraad in bodem en bodemstikstof, naar een verandering in het voorkomen van plantensoorten.
7. Toepassing van de modellen SMART-SUMO-MOVE is niet mogelijk voor delen van westelijk Nederland waar brak/zout waterveranderingen door klimaatveranderingen kunnen optreden. Dit nadeel zou op redelijk korte termijn kunnen worden opgeheven door het toevoegen van de factor saliniteit aan deze modellen met behulp van de databestanden van de modellen ICHORS-ITORS aan het onderdeel MOVE.

9 Literatuur

Amesz, M. & A. Barendregt (1996). IMRAM: een voorspellingsmodel voor aquatische macrofauna in Noord-Holland. Faculteit Ruimtelijke Wetenschappen, Universiteit Utrecht. 47 pp. + 11 bijlagen.

Barendregt, A., J.W. Nieuwenhuis & P. de Joode (1990). Milieuindicatiewaarden van water- en oeverplanten in Noord-Holland. Rapport Provincie Noord-Holland & Milieukunde Utrecht.

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.) Landscape ecology of a stressed environment, pp. 79-99.. Chapman & Hall, London.

[Bartholomeus, R.P.](#), [Witte, J.P.M.](#), [van Bodegom, P.M.](#), [van Dam, J.C.](#), [Aerts, R.](#) (2008) Critical soil conditions for oxygen stress to plant roots: Substituting the Feddes-function by a process-based model. Journal of hydrology 360: 147-165.

Bloemendaal, F.H.J.L. & J.G.M. Roelofs (1988). Waterplanten en waterkwaliteit. KNNV, Utrecht.

Blois, J.L., J.L. McGuire & E.A. Hadly (2010). Small mammal diversity loss in response to late-Pleistocene climatic change. Nature 465: 771-774.

Butchard, S.H.M., M. Walpole, B. Collen, et al. (2010). Global biodiversity: indicators of recent declines. Science 328: 1164-1168.



De Vries, W., G.W.W. Wamelink, H. van Dobben, J. Kros, G.J. Reinds, J.P. Mol-Dijkstra, S.M. Smart, C.D. Evans, S. Belyazid, H.U. Sverdrup, A. van Hinsberg, M. Posch, J.P. Hettelingh, T. Spranger & R. Bobbink (2010). Use of dynamic soil-vegetation models to assess impacts of nitrogen deposition on plant species composition: an overview. *Ecological applications* 20: 60-79.

Douma, J.C., J.P.M. Witte, R. Aerts, R.P. Bartholomeus, J.C. Ordoñez, H. Olde Venterink, M.J. Wassen, P.M. van Bodegom (in voorbereiding). Towards a functional basis for predicting vegetation patterns; incorporating plant traits in habitat distribution models.

Ellenberg, H. (1974). Zeigerwerte der Gefäßpflanzen Mitteleuropas. *Scripta Geobotanica* 9. Göttingen.

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.

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.

Geelen, L., M. de Haan, W. Koerselman, & W. Droessen, 2001. Twee ecologische modellen

voor duinvalleien. Toepassing, vergelijking en toekomstperspectief. *Landschap* 18: 211-226.

Geurts, J.J.M., J.M. Sarneel, B.J.C. Willers, J.G.M. Roelofs, J.T.A. Verhoeven & L. P.M. Lamers (2009). Interacting effects of sulphate pollution, sulphide toxicity and eutrophication on vegetation development in fens: A mesocosm experiment. *Environmental Pollution* 157: 2071-2081.

Hinsinger, P., 2001. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by rootinduced

chemical changes: a review. *Plant and Soil* 237: 173-195

Hole, D.G, S.G. Willis, D.J. Pain, L.D. Fishpool, S.H.M. Butchart, Y.C. Collingham, C. Rahbek &

B. Huntley (2009) Projected impacts of climate change on a continentwide protected area network *Ecology Letters* 12: 420–431.

Holtland, W.J., C.J.F. ter Braak & M.G.C. Schouten (2010). Iteratio: calculating environmental indicator values for species and relevés. *Applied Vegetation Science* 2010.

Huntley, B., Y.C. Collingham, S.G. Willis & R.E. Green (2008) Potential Impacts of Climatic Change on European Breeding Birds. *PLOs ONE* | Issue 1 | e1439: 1-11.

Koerselman, W., Meuleman, A.F.M., & De Haan, M.W.A., 1999. *Ecohydrologische*

effectvoorspelling duinen. Standplaatsmodellering in NICHE Duinen. Nieuwegein: Kiwa Water

Research.



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.

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.

Londo, G. (1988). Nederlandse freatofyten. Pudoc, Wageningen.

Mol-Dijkstra, J.P. (2005). Ontwikkeling en beheer van SMART2-SUMO, ontwikkelings- en beheersplan en versiebeheerprotocol. WOt werkdocument 6. Wageningen UR.

Noest, V., 1991. HYVEG, een interaktiemodel hydrologie-vegetatie voor jonge vochtige

duinvalleien. DZH, Den-Haag.

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.

Opdam, P. & D. Wascher (2004) Climate change meets habitat fragmentation: linking landscape and biogeographical scale levels in research and conservation. *Biological Conservation* 117: 285–297.

Planbureau voor de Leefomgeving (2009). Natuurbalans 2009.

Runhaar, J., J.P.M. Witte & M. van der Linden, 1996. Waterbeheer en natuur; effectvoorspelling

met het landelijke model DEMNAT. *Landschap* 13: 65-77.

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

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.

Van Bodegom, P.M., S.C. Dekker, M. Wassen & J.P.M. Witte (2009). Geen adaptatiestrategie zonder een klimaatbestandige ecohydrologie. Een verkennend onderzoek naar de mogelijkheden om de biodiversiteit in Nederland onder een ander klimaat te voorspellen. KvK 005/09. Rapport Vrije Universiteit / Universiteit Utrecht / KWR Watercycle Research Institute.

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.

Van der Peijl M.J. & J.T.A. Verhoeven (2000). Carbon, nitrogen and phosphorus cycling in river marginal wetlands; using a dynamic simulation model to examine the importance of landscape geochemical flows. *Biogeochemistry* 50: 45-71.

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.

Van Oene, H., F. Berendse & C.G.F. de Kovel (1999a). Model analysis of the effects of historic CO₂ levels and nitrogen inputs on vegetation succession. *Ecological applications* 9: 920-935.

Van Oene, H., E.J.M. van Deursen & F. Berendse (1999b). Plant-herbivore interaction and its consequences for succession in wetland ecosystems: a modeling approach. *Ecosystems* 2: 122-138.

Van Oene, H., F. Berendse, W. Arp & R. Alkemade (2000). Veranderingen op de Veluwe. Simulatie van veranderingen in ecosysteemprocessen en botanische diversiteit op regionale schaal. *Landschap* 17: *65-80.

Van Oene, H. & F. Berendse (2001). Predicting responses of ecosystem processes to climate change and nitrogen deposition. In: Van Oene, H., Ellis, W.N., He-

ijmans, M.P.D., Mauquoy, D., Tamis, W.L.M, Van Vliet, A., Berendse, F., Van Geel, B., Van der Meijden, R. & Ulenberg, S.A. Long-term effects of climate change on biodiversity and ecosystem processes Bilthoven: Dutch National Research Programme on Global Air Pollution and Climate Change.

Vereniging Natuurmonumenten (2010) Klimaatverandering en natuurbeheer. Verkenning van de effecten van klimaatverandering op het functioneren van de natuur en de mogelijkheden tot het creëren van klimaatrobuuste natuur (adaptatie). 's Graveland.

Vos, C.C., B.S.J. Nijhof, M. Van der Veen, P.F.M. Opdam & J. Verboom (2007). Risicoanalyse kwetsbaarheid natuur voor klimaatverandering. Alterra rapport 1551, Wageningen.

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.

Wamelink, G.W.W., C.J.F. ter Braak & H.F. van Dobben (2003). Changes in large-scale patterns of plant biodiversity predicted from environmental economic scenarios. *Landscape Ecology* 18: 513-527.

Wamelink, G.W.W., J.P. Mol-Dijkstra & G.J. Reinds (2008). Herprogrammeren van SUMO2 – Verbeteringen in het kader van de modelkwaliteitsslag. WOt werkdocument 109. Wageningen UR.

Wamelink, G.W.W., R.M. Winkler & F.G. Wortelboek (2009). User documentation MOVE4 v 1.0. WOt werkdocument 154. Alterra, Wageningen.



Wassen, M.J., H. Olde Venterink, E.D. Lapshina & F. Tanneberger, 2005. Endangered plants

persist under phosphorus limitation. *Nature* 437: 547-550

Witte, J.P.M., M. de Haan, B. Raterman & C. Aggenbach, 2006. *PROBE — Versie 1: effecten*

van grondwaterbeheer, atmosferische depositie, maaien en plaggen. Kiwa rapport, Nieuwegein.

Witte, J.P.M., M. de Haan & M.J.M. Hootsmans, 2007. PROBE: een ruimtelijk model voor

vegetatiedoelen. *Landschap* 24: 77-87.

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. In opdracht van de de drinkwaterbedrijven en Deltares.



To develop the scientific and applied knowledge required for
Climate-proofing the Netherlands and to create a sustainable
Knowledge infrastructure for managing climate change

Contact information

Knowledge for Climate Programme Office

Secretariat:

c/o Utrecht University

P.O. Box 80115

3508 TC Utrecht

The Netherlands

T +31 88 335 7881

E office@kennisvoorklimaat.nl

Public Relations:

c/o Alterra (Wageningen UR)

P.O. Box 47

6700 AA Wageningen

The Netherlands

T +31 317 48 6540

E info@kennisvoorklimaat.nl

www.knowledgeforclimate.org

