



Vegetatiedynamiek in droge duinen

atmosferische depositie
ecosysteemdiensten
klimaatverandering
kustduinen
vegetatiesuccessie

Modellering ecosysteemdiensten onder invloed van klimaat en stikstof

De vegetatie van droge duinen is zeer gevoelig voor klimaatverandering en luchtvervuiling omdat zij voor de aanvoer van water en stikstof aangewezen is op de atmosfeer. Om te begrijpen hoe de atmosfeer op de lange termijn ingrijpt op het duinecosysteem, ontwikkelden we een dynamisch successiemodel voor grondwateronafhankelijke bodems. De eerst resultaten zien er aannemelijk uit, maar geven ook aanleiding tot vervolgonderzoek om beter te begrijpen hoe droge duinen zich zullen ontwikkelen in een wereld die verandert.

Onze kustduinen vervullen verschillende belangrijke functies voor de maatschappij. Ze beschermen het achterland tegen de zee, vormen een landschap waarin het een genot is om te vertoeven, huisvesten tal van bijzondere plant- en diersoorten en ze voorzien in drinkwater van zeer goede kwaliteit. Het overgrote deel van de duinen heeft een zo lage grondwaterstand dat de duinvegetatie daar niet bij kan. Deze vegetatie is voor de aanvoer van water daarom geheel afhankelijk van de atmosfeer. Ook de aanvoer van stikstof verloopt vrijwel geheel via de atmosfeer. Grondwateronafhankelijke vegetaties zijn daardoor erg gevoelig voor veranderingen in het klimaat en atmosferische stikstofdepositie. Onderzoek naar de gevolgen van deze veranderingen kan bestaan uit het analyseren van langjarige reeksen van vegetatieopnamen in permanente kwadraten (PQ's) en uit het vergelijken van kustduinen met verschillende klimaten en stikstofbelastingen. Met deze werkwijze is het echter moeilijk grip te krijgen op de dynamische wisselwerking tussen bodem, water en vegetatie. Daarom is het bouwen van een simulatiemodel waarin de relevant geachte processen zo goed mogelijk zijn vertegenwoordigd een volgende stap in de kennisvergaring. Wij hebben een procesmodel ontwikkeld – PROBE-3 – dat onder invloed van successie, klimaat en atmosferische stikstofbelasting drie ecosysteemdiensten simuleert. Deze diensten betreffen de biodiversiteit (ontwik-

keling), stikstofuitspoeling (reductie) en grondwater (aanvulling). Schoon water dat uit de wortelzone naar het grondwater percoleert – de resultante van de laatste twee ecosysteemfuncties – levert een bijdrage aan de voeding van natte duinvalleien, maar kan ook een bron zijn voor de drinkwatervoorziening.

Klimaatrobuuste vegetatie-indicatoren

PROBE-3 bouwt voort op PROBE-1 dat tien jaar geleden voor de drinkwaterbedrijven in de duinen werd ontwikkeld om de gevolgen voor de vegetatie te kunnen beoordelen van grondwaterbeheer, atmosferische depositie, maaien en plaggen (Witte *et al.*, 2007a). Deze versie, die is toegepast in een aantal m.e.r.-studies (De Haan & Doomen, 2006; De Haan & Witte, 2010), stoelt op correlatieve verbanden, ontleend aan het klimaat waarin de benodigde veldgegevens zijn verzameld (ongeveer 1970-2000) en is daardoor niet geschikt voor klimaatprojecties. Zo is standplaatsfactor 'vochttoestand' in het model beschreven als functie van de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG) die maar gedeeltelijk rekening houdt met wat werkelijk van belang is voor de plantengroei: water in de bodem dat door de wortels wordt opgenomen en verdampt, en zuurstof in de bodem voor de wortelademhaling (respiratie). Zowel de beschikbaarheid van, als de behoefte aan water en zuurstof veranderen onder invloed van het klimaat. Daar houdt de

Prof. Dr. Ir. J.P.M. (Flip) Witte

KWR Watercycle Research
Institute, Postbus 1072
3430 BB Nieuwegein
flip.witte@kwrwater.nl

Y. (Yuki) Fujita, PhD

KWR Watercycle Research
Institute

Dr. Ir. R.P. (Ruud) Bartholomeus

KWR Watercycle Research
Institute

Drs. B.J. (Bernard) Raterman

KWR Watercycle Research
Institute

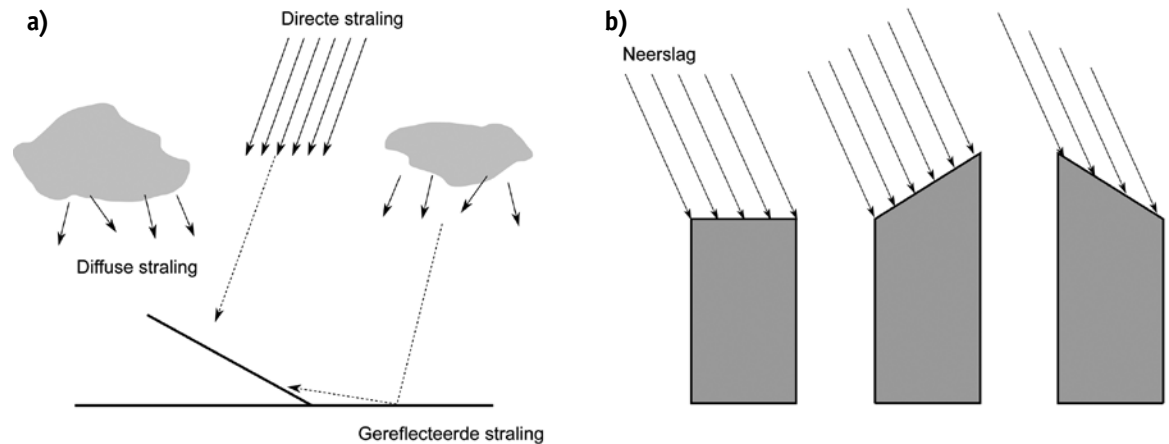
Ir. C.E.M. (Karin) Rood

Dunea Duin & Water

Foto **Flip Witte** beginnende successie op de kust van Ameland.

Figuur 1 correcties voor de globale straling (a) en neerslag (b) die een duinhelling bereiken t.o.v. een horizontaal oppervlak (bewerkt naar Bartholomeus *et al.*, 2012).

Figure 1 corrections for the amount of global radiation (a) and precipitation (b) that reaches a dune slope in comparison to a horizontal soil surface (adapted from Bartholomeus *et al.*, 2012).



GVG geen rekening mee. In opdracht van het bedrijf Dunea, dat de duinen van Zuid-Holland beheert, hebben we daarom een zekere mate van klimaatrobustheid ingebouwd door 'droogtestress' en 'zuurstofstress' in het model op te nemen (Witte *et al.*, 2015). De eerste maat geeft aan hoeveel water een referentievegetatie in een kritische periode van het groeiseizoen tekort komt om maximaal te kunnen verdampen via de huidmondjes (Bartholomeus *et al.*, 2011). De tweede maat geeft het maximale zuurstoftekort van die referentievegetatie in een kritische periode weer (Bartholomeus *et al.*, 2010). Beide maten hangen af van de bodemtextuur, het humusgehalte, de hoeveelheid inkomende zonnestraling en de hoeveelheid neerslag. De inkomende zonnestraling varieert met de helling en expositie van het duin, en met de hoeveelheid schaduw die aangrenzende duinen veroorzaken; de hoeveelheid neerslag hangt af van de hellingshoek en de expositie ten opzichte van de overheersende windrichting tijdens neerslagbuien, zie figuur 1. Er is gerekend met een referentievegetatie omdat beide stressmaten dan de standplaats karakteriseren onafhankelijk van de werkelijke vegetatie met al

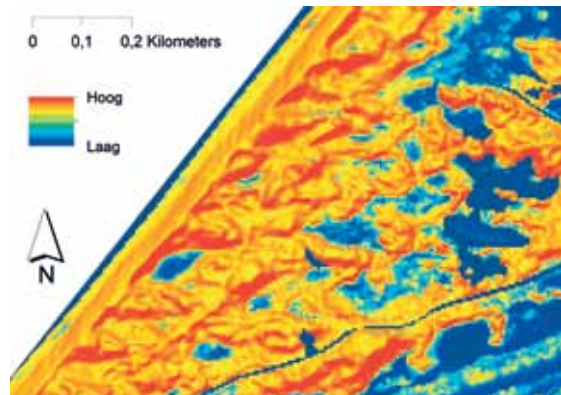
dan niet specifieke mechanismen om stress te voorkomen zoals luchtwortels of een cactusachtige bouw. Op basis van weersgegevens en het Actueel Hoogtebestand Nederland hebben we beide soorten stress gesimuleerd met een resolutie van twee meter (figuur 2). Aan de hand hiervan, en van schattingen van de voedselrijkdom en zuurgraad van de bodem, wordt met PROBE de kans op voorkomen van plantengemeenschappen gesimuleerd.

Modelconstructie PROBE, SWAP en CENTURY

Met het inbouwen van klimaatrobuste indicatoren voor de vegetatie zijn we er niet. In de loop van de tijd vinden er namelijk structurele veranderingen in de bodem plaats die gevolgen hebben voor de vegetatie. Zulke veranderingen worden veroorzaakt door de vegetatie zelf, doordat die organische stof produceert en via wortelademhaling de bodem verzuurt, maar ook door het klimaat en de aanvoer van stikstof uit de lucht. In een jong ecosysteem, zoals het natuurtype 'open duin', gaan de veranderingen snel en juist dan is het van belang rekening te houden met het samenspel van bodem, water, vegetatie en atmosfeer. Dit samenspel hebben we voor

grondwateronafhankelijke duinen proberen na te bootsen met een dynamische eendimensionale versie van PROBE, waarin het transport van water en nutriënten is gekoppeld aan de groei van planten en de productie en afbraak van organische stof. Figuur 3 geeft het model schematisch weer. Voor een gedetailleerde beschrijving verwijzen we naar Fujita *et al.* (2016); hier volstaan we met de volgende samenvatting.

1. De vegetatie wordt bepaald als functie van droogtestress, stikstofmineralisatie, en bodem-pH. (Zuurstofstress is buiten beschouwing gelaten omdat het om grondwateronafhankelijke bodems gaat). Deze drie grootheden worden via empirische relaties, ontleend aan veldmetingen, omgezet in gemiddelde indicatiewaarden voor vocht, voedselrijkdom en zuurgraad. Uit deze indicatiewaarden wordt vervolgens de kans op voorkomen van vegetatietypen berekend. Dat gebeurt met driedimensionale kansdichtheidsfuncties die zijn ontleend aan een groot bestand met representatieve vegetatieopnamen (Witte *et al.*, 2007b).
2. Vegetatiebeheer is niet expliciet in het model opgenomen. We simuleren de opeenvolging van vegetatietypen als resultante van veranderingen in standplaatscondities, waarbij we aannemen dat de vegetatie kort blijft (dus geen ontwikkeling van struwelen en bomen). Het kort blijven is een gevolg van zowel extreme standplaatscondities als vraat door zoogdieren.
3. Droogtestress (volgens Bartholomeus *et al.*, 2012) wordt berekend met het model SWAP voor watertransport in de bodem (Van Dam *et al.*, 2008). De rekentijd-stap bedraagt één dag. De verdamping in SWAP hangt af van de hoeveelheid ontvangen neerslag en zonne-straling (figuur 1), de bodemtextuur, het gehalte aan organische stof, maar ook van het aandeel mos en kale grond in de vegetatie (zie punt 6). Op grond van recent verdampingsonderzoek aan mossen en korstmossen

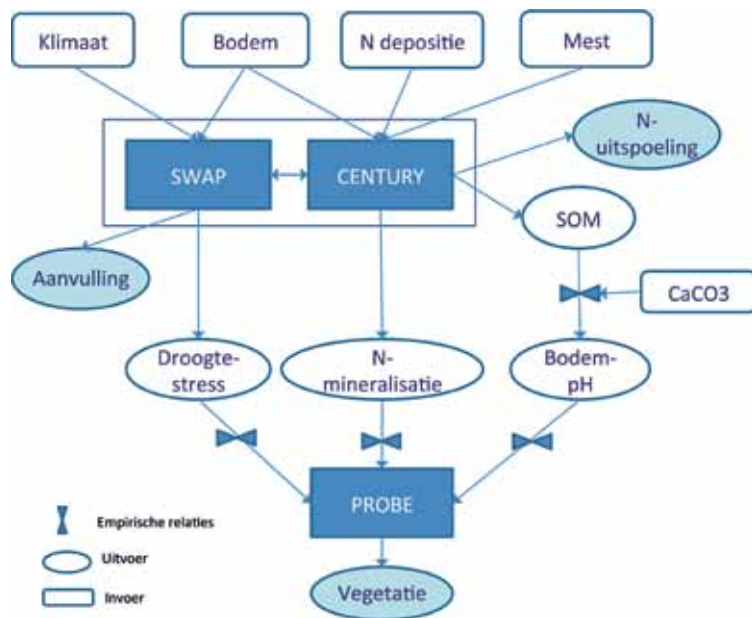


Figuur 2 gesimuleerde droogtestress in een deel van de duinen van Meijendel. Die is laag (blauw) in duinvalleien (met een ondiepe grondwaterstand), heel hoog (rood) op zuidhellingen, en matig hoog (oranje) op noordhellingen. Bron: Witte *et al.* (2015).

Figure 2 simulated drought stress in part of the Meijendel dune area. The stress is low (blue) in dune slacks (with a shallow groundwater table), very high (red) on south slopes, and moderate (on north slopes (orange). Source: Witte *et al.* (2015).

(Voortman *et al.*, 2015; 2016) is verondersteld dat deze vegetatielaag evenveel verdampt als kale grond.

4. Het gehalte aan organische stof in de bodem (SOM: soil organic matter) wordt, met een tijdstap van één dag, berekend met een eigen versie van het model CENTURY (Fujita *et al.*, 2013), dat ook de groei en het afsterven van planten simuleert. De afbraak van SOM is sterk afhankelijk van het vochtgehalte en de temperatuur in de bodem. Om beide goed te kunnen bepalen is CENTURY gekoppeld aan SWAP. CENTURY reduceert de afbraak van organische stof als de bodem heel nat is, en dus weinig zuurstof bevat, maar ook als hij heel droog is, waardoor microben inactief worden. Reductiefuncties voor droge en natte omstandigheden zijn ontleend aan Fujita *et al.* (2013).
5. Er is dus een koppeling van SWAP naar CENTURY, maar omgekeerd ook van CENTURY naar SWAP. De organische stof is namelijk van invloed op de waterhuishouding van de bodem. Hoe meer ervan aanwezig is, hoe meer water de bodem kan opslaan en hoe makkelijker het watertransport naar de wortels verloopt. Deze eigenschappen vertalen zich in twee hy-



Figuur 3 dynamische koppeling van modules voor bodemvocht (SWAP), organische stof en plantaardige productie (CENTURY), en vegetatiesamenstelling (vegetatiemodule PROBE). Drie modules in donkerblauw, drie ecosysteemfuncties in lichtblauw. Naar: Fujita *et al.* (2016).

Figure 3 dynamic coupling of modules for soil moisture (SWAP), soil organic matter and plant biomass production (CENTURY), and vegetation composition (vegetation module of PROBE). Three modules in dark blue, three ecosystem functions in light blue. Source: Fujita *et al.* (2016).

draulische functies: de pF-curve en de doorlatendheidskarakteristiek. In een simulatie met PROBE-3 worden beide functies in SWAP na ieder rekenjaar volgens Wösten *et al.* (2001) bijgesteld op basis van de met CENTURY berekende hoeveelheid SOM. Ons model houdt echter geen rekening met het verschijnsel dat duinbodems door organische stof waterafstotend (hydrofoob) kunnen worden.

6. Vaatplanten kunnen met hun wortels water aan de bodem onttrekken en verdampen daardoor meer dan kale grond en (korst)mossen. Het aandeel vaatplanten in de vegetatie is daarom van belang voor een correcte berekening van de totale verdamping. Een andere terugkoppeling van CENTURY naar SWAP verloopt via dit aandeel: de door CENTURY gesimuleerde bovengrondse drogestofproductie in het groeiseizoen wordt omgezet in het aandeel vaatplanten via een re-

latie die is ontleend aan meetgegevens in de duinen (Aggenbach *et al.*, 2013; Fujita & Aggenbach, 2015).

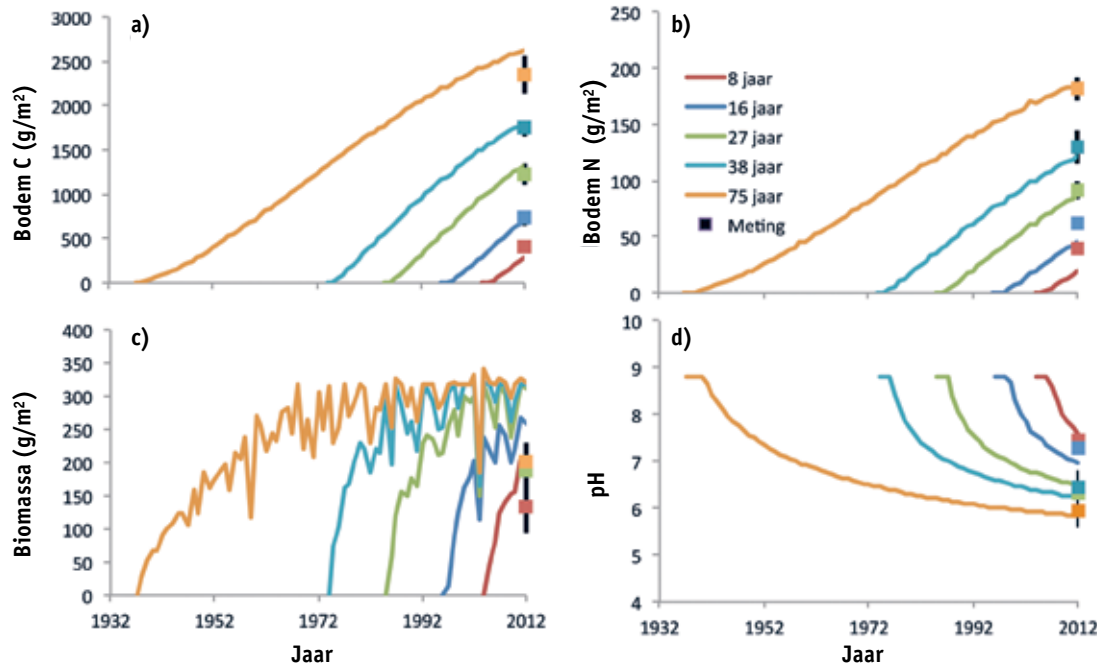
7. De bodem-pH is beschreven als functie van het kalkgehalte en de SOM, gebaseerd op veldmetingen in duinen door Aggenbach *et al.* (2013). Beide grootheden veranderen in de tijd: de eerste volgens een uitloogingsfunctie van Stuyfzand (2010), de tweede doordat CENTURY per rekentijdstap het gehalte aan organische stof bijstelt.

Beschreven modelconstructie genereert drie ecosysteemfuncties die in figuur 3 met lichtblauwe ovalen zijn aangegeven. Grondwateraanvulling (de hoeveelheid water die uit de wortelzone naar het grondwater percoleert) en nitraatuitspoeling uit de wortelzone worden berekend met een tijdstap van een dag. Hoe snel de vegetatie reageert op veranderingen in de standplaats hangt af van de intensiteit en duur van die veranderingen, maar ook van de vegetatie zelf. Een pioniervegetatie reageert bijvoorbeeld sneller dan een vegetatie van hoofdzakelijk geofyten. Over de snelheid van vegetatieaanpassingen is echter nauwelijks iets bekend (Bartholomeus *et al.*, 2008). Tamelijk arbitrair is daarom aangenomen dat de vegetatiesamenstelling in een bepaald jaar kan worden beschreven als functie van de gemiddelde standplaatscondities over de voorafgaande vier jaar.

Enkele resultaten

Hier tonen we een kleine selectie van de simulaties die we hebben uitgevoerd voor de Luchterduinen (Fujita *et al.*, 2016), het zuidelijk deel van de Amsterdamse Waterleidingduinen, beheerd door drinkwaterbedrijf Waternet.

Op basis van luchtfoto's zijn locaties geselecteerd van duingraslandvegetaties die verschillen in leeftijd, gerekend vanaf het moment dat de locatie nog uit kaal zand



Figuur 4 gesimuleerde hoeveelheid koolstof (a), bodemstikstof (b), maximale bovengrondse biomassa in het groei-seizoen (c), en bodem-pH in kalkrijke duinen (d) op een horizontale duinbodem in de Luchterduinen voor verschillende successieperiodes, elk beginnend met kaal zand: 8 jaar (2005-2012), 16 jaar (1997-2012), 27 jaar (1986-2012), 38 jaar (1975-2012) en 75 jaar (1938-2012). De vierkantjes tonen in 2012 gemeten waarden (gemiddelde en standaardfout). Bron: Fujita *et al.* (2016).

Figure 4 simulated amount of carbon (a), soil nitrogen (b), maximum above ground biomass in the growing season (c), and soil-pH in lime-rich dunes (d) on a horizontal dune soil in the Luchterduinen for different succession series, each of them starting with bare sand: 8 years (2005-2012), 16 years (1997-2012), 27 years (1986-2012), 38 years (1975-2012) and 75 years (1938-2012). The small squares show measurements in 2012 (mean and standard deviation). Source: Fujita *et al.* (2016).

bestond tot 2012. In dat jaar zijn de veldmetingen uitgevoerd (Aggenbach *et al.*, 2013). De luchtfoto's lieten een schatting van de ouderdom toe in vijf leeftijdsklassen. Figuur 4 toont het gesimuleerde verloop sinds de start van de successie van de hoeveelheid koolstof en stikstof in de bodem (bovenste 20 cm), de bodem-pH in kalkrijke duinen (op 0-5 cm diepte), en de maximale bovengrondse biomassa in het groeiseizoen. De metingen in 2012 komen goed overeen met het simulatieresultaat aan het eind van de successiereeks, wat een indicatie is dat de belangrijkste processen in het model goed zijn opgenomen. Alleen is de in 2012 gemeten biomassaproductie een stuk lager dan het simulatieresultaat (figuur 4c), vermoedelijk doordat een deel van de productie al was verdwenen door konijnenvraat voordat we de vegetatie gingen 'oogsten'.

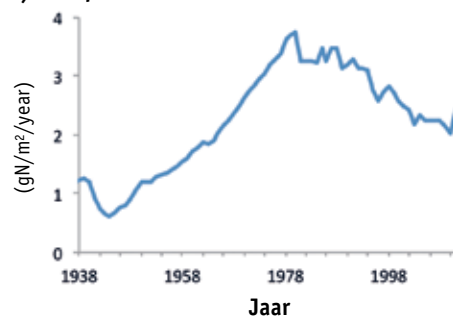
Het verloop sinds 1938 van de nitraatconcentratie in de grondwateraanvulling is weergegeven in figuur 5b. Dit verloop hangt tot circa 1980 sterk samen met de toename van hoeveelheid atmosferische N-depositie in het gebied (figuur 5a). De gesimuleerde concentratie van circa 20 mg NO₃/l vanaf 1980 komt overeen met metingen in het bovenste grondwater van de Luchterduinen. Merk op dat de nitraatconcentratie de laatste decennia hoog blijft, ondanks dat vanaf ongeveer 1980 de N-depositie aanzienlijk is verlaagd. Dit komt door het vrijkomen van stikstof die in de periode daarvoor is opgeslagen in de SOM (Aggenbach *et al.*, 2017).

De vegetatieontwikkeling hangt samen met de hoeveelheid ontvangen zonnestraling, wat in de duinen goed te zien is aan de verschillen tussen een noord- en een zuid-

Figuur 5 (a) historische stikstofdepositie (NH_x & NO_y) en **(b)** gesimuleerde nitraatconcentratie van de grondwateraanvulling in de Luchterduinen van 1938 t/m 2012. Bron: Fujita *et al.* (2016).

Figure 5 (a) historical nitrogen deposition (NH_x & NO_y) and **(b)** simulated nitrate concentration of the groundwater recharge in the Luchterduinen from 1938 till 2012. Source: Fujita *et al.* (2016).

a) N-depositie



b) N-uitspoeling



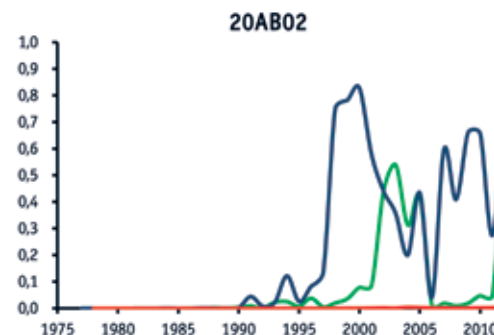
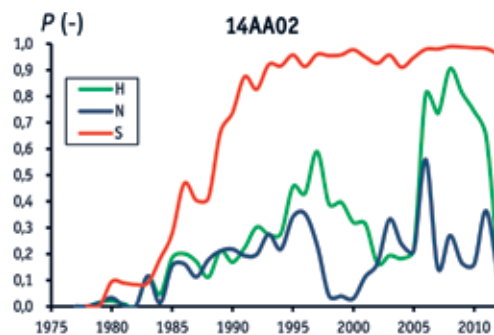
Figuur 6 ontwikkeling (uitgedrukt als kans op voorkomen P) van twee plantengemeenschappen gedurende 38 jaar van successie op een vlakke bodem (H) en op een noord- (N) en zuidhelling (S) van een kalkarm duin: Duin-buntgras-associatie (14Aa02) en associatie van eikvaren en kraaihei (20Ab02). Bron: Fujita *et al.* (2016).

Figure 6 development (expressed as occurrence probability P) of two plant communities during 38 years of succession on a horizontal surface (H) and on a north- (N) and south (S) slope of a lime-poor dune: *Viola-Corynephorum* (14Aa02) and *Polypodium-Empetretum* (20Ab02). Source: Fujita *et al.* (2016).

helling. We hebben het verloop van verschillende plantengemeenschappen, beginnend met kaal zand, gesimuleerd. Figuur 6 toont twee van die simulaties voor een kalkarm duin. De Duin-buntgras-associatie (14Aa02) is na ongeveer 15 jaar successie het dominante vegetatietype op de zuidhelling, terwijl de kans van voorkomen op een noordhelling gemiddeld niet boven de 20% uitkomt. Op de noordhelling wordt in de loop der jaren de Associatie van eikvaren en kraaihei (20Ab02) dominant, maar op de zuidhelling maakt dit type geen enkele kans. Deze en andere simulaties komen in grote lijnen overeen met waarnemingen in het veld (persoonlijke mededeling Harrie van der Hagen, Dunea).

Tot slot het resultaat van een droog en warm klimaatsscenario, opgelegd aan een oud duingrasland op een hori-

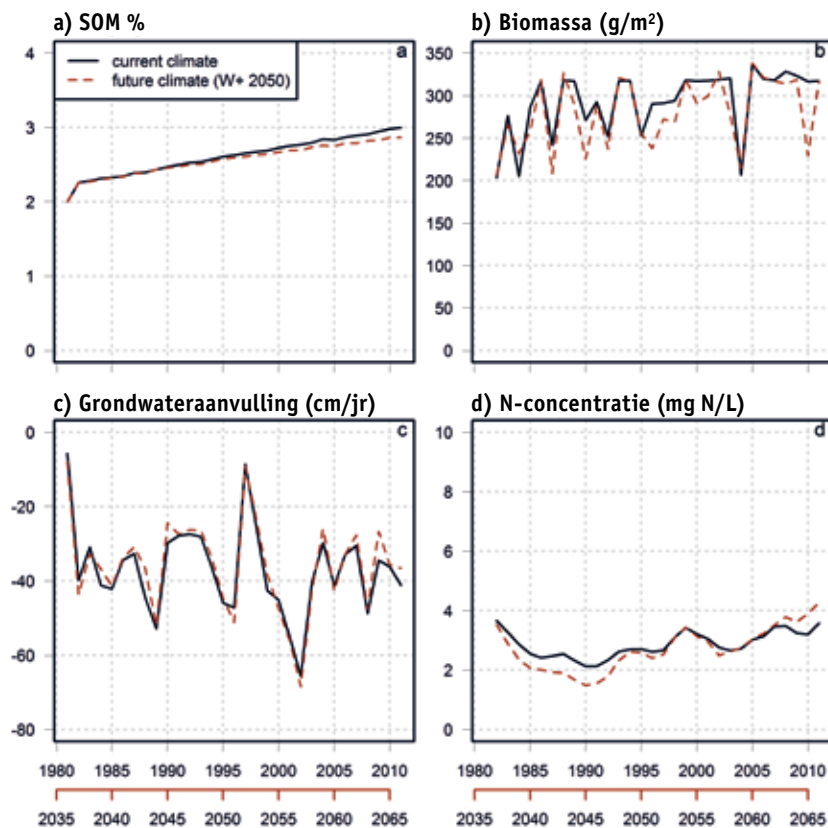
zontale bodem (figuur 7). Het gaat om het zeer warme en droge W+ scenario, zichtjaar 2050, dat is beschreven in Van den Hurk *et al.* (2006). In dit scenario is het verdampingsoverschot (neerslag minus referentiegewasverdamping volgens de formule van Makkink) in de drie zomermaanden vrijwel verdubbeld. Gedurende een simulatieperiode van 30 jaar neemt bij het huidige klimaat de hoeveelheid SOM en biomassa toe, terwijl in het verloop van de grondwateraanvulling en de nitraatconcentratie daarvan, hoewel grillig, geen duidelijke trend is te bespeuren. Opvallend is dat het opgelegde zeer warme en droge klimaatsscenario nauwelijks effect heeft op de resultaten: SOM en biomassaproductie dalen licht ten opzichte van het huidige klimaat, grondwateraanvulling en uitspoeling stijgen (op den duur) juist iets.



Discussie

De resultaten van ons nieuwe dynamische model waarin bodem, water en vegetatie dynamisch en onderling gekoppeld reageren, voldoen grotendeels aan de verwachtingen. Dit model berekent de ontwikkeling van drie ecosystemendiensten (ruimte bieden aan biodiversiteit, productie van grondwateraanvulling, reductie van de stikstoflast naar het grondwater) onder invloed van klimaatverandering en de atmosferische aanvoer van stikstof. De resultaten geven aanleiding tot verder onderzoek om het functioneren van het duinecosysteem nog beter te begrijpen en te kunnen voorspellen hoe ecosystemendiensten zich kunnen ontwikkelen.

Ons model simuleert aanmerkelijke verschillen in de vegetatieontwikkeling van noord- en zuidhellingen (figuur 6). Omdat deze verschillen veroorzaakt worden door verschillen in (micro)klimaat, kunnen de uitkomsten vertrouwen geven in de capaciteit van PROBE-3 om de gevolgen van klimaatverandering realistisch in beeld te brengen. Daar staat echter tegenover dat de afname van zowel SOM als de biomassaproductie in onze simulaties zo gering is onder het warme klimaatscenario. Het langere groeiseizoen onder het W+ klimaatscenario is natuurlijk gunstig voor de biomassaproductie, maar van de veel drogere zomers hadden we een sterker reducerend effect verwacht. Droogte komt immers in het veld zeer geprononceerd tot uitdrukking in een veel schralere en opener vegetatie van zuidhellingen. Wij vermoeden dat de oorzaak van de onverwachte modeluitkomst komt doordat in CENTURY de vegetatie nooit helemaal afsterft en iedere keer weer ongestoord mag uitgroeien. Een andere verklaring is dat we een proces hebben gemist, zoals het effect van de vegetatie op het microklimaat en het directe effect van hittestress op de overlevingskansen en groeicondities van planten. Bekend is dat in de duinen de temperatuur op relatief kale zuid-



Figuur 7 gehalte organische stof (a), bovengrondse biomassa vaatplanten (b), grondwateraanvulling (c) en stikstofconcentratie van de grondwateraanvulling (d) gedurende 30 jaar voor een oud grasland (uitgangssituatie) bij het huidige klimaat (1981-2010) en onder het warme en droge W+ KNMI-klimaatscenario van Van den Hurk *et al.* (2006). Bron: Fujita *et al.* (2016).

Figure 7 organic matter content (a), above ground biomass of vascular plants (b), groundwater recharge (c) and nitrogen concentration (d) during 30 years for an old grassland (starting situation) both under the current climate (1981-2010) and under the warm and dry W+ climate scenario of Van den Hurk *et al.* (2006). Source: Fujita *et al.* (2016).

hellingen kan oplopen tot boven de 40 graden Celsius en dat verschillen in oppervlaktetemperaturen tussen noord- en zuidhellingen groot kunnen zijn (Cantlon, 1953; De Blois et al., 1991). Omdat organische stof in de bodem wordt gevoed door de strooiselproductie, hebben onzekerheden in de gesimuleerde hoeveelheid biomassaproductie invloed op de voorraad SOM. Tegelijk is de omzetting van organische stof, die uiteindelijk de nutriëntenbeschikbaarheid en daarmee de biomassaproductie bepaalt, gevoelig voor de bodemtemperatuur en het bodemvocht. Er bestaat dus een delicate terugkoppeling tussen de klimaatgevoeligheid van de vegetatie en de bodemvoorraad aan organische stof die uiteindelijk de reactie van het ecosysteem op klimaatverandering bepaalt.

De huidige modelversie kan door de duinbeheerder worden gebruikt om de potenties voor vegetatietypen en ecosystemendiensten te verkennen. We hopen de komende jaren het model zodanig verder te kunnen ontwikkelen, dat het met vertrouwen kan worden ingezet in studies voor het beleid en beheer van onze kustduinen op de lange termijn. Met een dergelijk model dienen vragen te kunnen worden beantwoord als: zijn de huidige natuurdoelen van droge duinen haalbaar onder het toekomstig klimaat? Kan met het stimuleren van windsedimentatie van kalkrijk zand de verzuring effectief worden gestopt? Wat wordt de hoeveelheid en kwaliteit van de toekomstige grondwateraanvulling? En, daarvan afgeleid: wat betekent dat voor de drinkwatervoorziening en de instandhouding van natte duinvalleien?

Summary

Vegetation dynamics in dry coastal dunes

Flip Witte, Yuki Fujita, Ruud Bartholomeus, Bernard Raterman & Karin Rood

atmospheric deposition, ecosystem services, climate change, coastal dunes, vegetation succession

Climate change may have large impacts on water-limited ecosystems and their services. On top of this, increased atmospheric nitrogen (N) deposition will add effects on ecosystem services in the near future too. Process-based models will help predicting such changes in ecosystem services. Yet the existing models are not able to project the long-term effects due to lack of interacting processes of water, soil, and vegetation. In this study, we developed an integrated model by dynamically

coupling a module for water transport in the unsaturated zone, a module for soil organic matter and a vegetation module. The model predicts three ecosystem services (groundwater recharge, reduction of nitrogen load to groundwater, and vegetation biodiversity) under different climate and N deposition scenarios. It explicitly takes into account long-term feedback mechanisms of vegetation on hydrology and soil. The model was able to reliably mimic ecosystem properties, though we had some doubts about the simulated ecosystem development under a warm and dry climate scenario. Further model development will be needed to properly predict ecosystem services in a reliable manner, such that the results will support policy makers and managers of coastal dunes to optimally conserve and develop our coastal dunes in a changing world.

Literatuur

- Aggenbach, C., A. Kooijman, Y. Fujita, H. van der Hagen, M. van Til, D. Cooper & M.L.M. Jones, 2017.** Does atmospheric nitrogen deposition lead to greater nitrogen and carbon accumulation in coastal sand dunes? *Biological Conservation*, Volume 212, Part B: 416-422.
- Aggenbach, C.J.S., A.M. Kooijman, R.P. Bartholomeus & Y. Fujita, 2013.** Herstelbaarheid van droge duingraslanden in relatie tot accumulatie van organische stof en stikstof in de bodem. KWR Watercycle Research Institute.
- Bartholomeus, R.P., J.P.M. Witte & J. Runhaar, 2012.** Drought stress and vegetation characteristics on sites with different slopes and orientations. *Ecohydrology* 5: 808-818.
- Bartholomeus, R.P., J.P.M. Witte, P.M. van Bodegom, J.C. van Dam & R. Aerts, 2011.** Climate change threatens endangered plant species by stronger and interacting water-related stresses. *J. Geophys. Res.* 116: G04023.
- 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 & R. Aerts, 2008.** The need of data harmonization to derive robust empirical relationships between soil conditions and vegetation. *Journal of Vegetation Science* 19: 799-808.
- Cantlon, J.E., 1953.** Vegetation and Microclimates on North and South Slopes of Cushtunk Mountain, New Jersey. *Ecological Monographs* 23: 241-270.
- Dam, J.C. van, P. Groenendijk, R.F.A. Hendriks & J.G. Kroes, 2008.** Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP. *Vadose Zone J.* 7: 640-653.
- De Blois, P., J.H. van Boxel & J. Fanta, 1991.** Microklimaat en successie: ruimtelijke variabiliteit. *Nederlands Bosbouw Tijdschrift*: 269-276.
- Fujita, Y., R.P. Bartholomeus & J.P.M. Witte, 2016.** PROBE-3: A succession model for ecosystem services. Nieuwegein. KWR Watercycle Research Institute.
- Fujita, Y. & C.J.S. Aggenbach, 2015.** Patterns of soil development and plant species diversity in Grey Dunes in Meijendel. KWR Watercycle Research Institute.
- Fujita, Y., P.M. van Bodegom, H. Olde Venterink, H. Runhaar & J.P.M. Witte, 2013.** Towards a proper integration of hydrology in predicting soil nitrogen mineralization rates along natural moisture gradients. *Soil Biology and Biochemistry* 58: 302-312.
- Haan, M.W.A. de & J.P.M. Witte, 2010.** Onderdeel effectbeschrijving met behulp van PROBE van de Milieu Effect Rapportage Optimalisatie Bedrijfsvoering Noord Hollands Duinreservaat. Velsbroek. NV PWN Waterleidingbedrijf Noord-Holland.
- Haan, M.W.A. de & A. Doomen, 2006.** Optimalisatie natuur en waterwinning in de Amsterdamse Waterleidingduinen. Milieueffectrapport - deelrapport natuur en landschap. Nieuwegein. Kiwa Water Research.
- Hurk, B. van den, A. Klein Tankink, 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. De Bilt, KNMI.
- Stuyfzand, P.J., 2010.** Modellerings kwaliteit ondiep (duin)grondwater en ontkalking, inclusief effecten van atmosferische depositie, klimaatverandering en kustuitbreiding: DUVELCHEM.
- Voortman, B.R., F.C. Bosveld, R.P. Bartholomeus & J.P.M. Witte, 2016.** Spatial extrapolation of lysimeter results using thermal infrared imaging. *Journal of Hydrology* 543, Part B: 230-241.
- Voortman, B.R., R.P. Bartholomeus, S.E.A.T.M. van der Zee, M.F.P. Bierkens & J.P.M. Witte, 2015.** Quantifying energy and water fluxes in dry dune ecosystems of the Netherlands. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19: 3787-3805.
- Witte, J.P.M., R.P. Bartholomeus, E. Dorland, M. de Haan & B. Raterman, 2015.** PROBE voor de duinen van Dunea. Nieuwegein. KWR Watercycle Research Institute.
- Witte, J.P.M., M. de Haan & M.J.M. Hootsmans, 2007a.** PROBE: een ruimtelijk model voor vegetatiedoelen. *Landschap* 24/2: 77-87.
- Witte, J.P.M., R.B. Wójcik, P.J.J.F. Torfs, M.W.H. de Haan & S. Henekens, 2007b.** Bayesian classification of vegetation types with Gaussian mixture density fitting to indicator values. *J. Veg. Sci.* 18: 605-612.
- Wösten, J.H.M., G.J. Veerman, W.J.M. de Groot & J. Stolte, 2001.** Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks. Wageningen. Alterra.