

Droge duinvegetatie zeer zuinig met water

Over de gevolgen van droogte voor de soortensamenstelling en de verdamping van grondwateronafhankelijke duinvegetaties is heel weinig bekend. Op basis van verkennend onderzoek verwachten wij dat meer droogte in de zomer leidt tot een toename van het aandeel mossen en kale grond. Daardoor daalt de verdamping en neemt de winderosie toe. Klimaatverandering zou zo gunstig kunnen uitpakken voor zowel de noodzakelijke dynamiek in het duin, als voor de aanvulling van de ondergrond met neerslagwater.

Door het optreden van klimaatverandering is gedegen onderzoek naar de verdamping van duinvegetaties steeds belangrijker geworden. Dat het klimaat in Nederland in rap tempo verandert, is met metingen aangetoond: de neerslag is de afgelopen eeuw gemiddeld met bijna 20% toegenomen en de temperatuur met 1,7°C (Anonymus, 2009). Neerslag valt steeds meer in de wintermaanden en in de vorm van buien met een hoge neerslagintensiteit. Voor Nederland publiceerde het KNMI vier klimaatscenario's die betrekking hebben op de jaren 2050 en 2100 (Van den Hurk et al., 2006). Deze scenario's verschillen in de mate van verandering, maar hebben gemeen dat de temperatuur en de potentiële verdamping stijgen, dat de hoeveelheid neerslag in de winter stijgt en dat de intensiteit van de buien toeneemt. Volgens het KNMI zijn thans het W en W+ scenario het aannemelijkst, dat wil zeggen de scenario's waarbij de temperatuur in 2050 wereldwijd met 2°C is gestegen en waarbij de windrichting in ons land hetzij onveranderd blijft (W), hetzij in de zomer vaker uit het oosten komt (W+). Recent onderzoek geeft aan dat de intensiteit van de buien nog meer toeneemt met een stijging van de temperatuur dan werd aangenomen in 2006, toen de klimaatscenario's werden uitgegeven, (Lenderink & Van Meijgaard, 2008).

De beschikbaarheid van water voor de vegetatie wordt onder meer bepaald door het neerslagoverschot. Dat definiëren we hier als het verschil tussen neerslag en de verdamping van een korte grasmat die optimaal van zoet

water wordt voorzien: de zogenaamde referentiegewasverdamping. Als we de voorspellingen toespitsen op de kustduinen van Noord- en Zuid-Holland, zal het jaargemiddelde neerslagoverschot onder het natte W scenario in 2050 met 8% zijn gestegen en onder het droge W+ scenario met 42% gedaald (Van den Hurk et al., 2006), zie tabel 1. Voor de vegetatie is vooral de beschikbaarheid van water in droge perioden van belang. Beschouwen we de drie zomermaanden, dan laat tabel 1 zien dat het neerslagtekort (negatief neerslagoverschot) onder W met 10% stijgt en onder W+ met 100%. In beide scenario's worden de zomers dus droger, in W+ het meest. Wat deze veranderingen betekenen voor de hoeveelheid regenwater die doorsijpelt naar het grondwater, de grondwateraanvulling, valt met de huidige stand van kennis echter nauwelijks te zeggen. Zal de aanvulling onder scenario W+, net als het neerslagoverschot, op jaarbasis afnemen of, door een aantal terugkoppelingsmechanismen van de vegetatie, juist toenemen? In het eerste geval verdrogen de duinvalleien, in het laatste geval vernatten ze juist. Onderzoek naar het verdampingsgedrag van duinvegetaties is nodig voor zowel betrouwbare en klimaatrobuuste hydrologische berekeningen, als voor het vaststellen van de haalbaarheid van natuurdoelen. In dit artikel bespreken we hoe de vegetatie van duinen zich aanpast aan perioden met droogte. Daarna leggen we uit waarom het voor hydrologen zo belangrijk is de verdamping van droogteminnende duinvegetaties nauwkeurig te kennen. Ten slotte gaan we in op ons on-

FLIP WITTE, RUUD
BARTHOLOMEUS,
BERNARD VOORTMAN,
HARRIE VAN DER
HAGEN & SJOERD VAN
DER ZEE

Prof. Dr. Ir. J.P.M. Witte
KWR Watercycle Research
Institute, Postbus 1072,
3430 BB Nieuwegein
flip.witte@kwrwater.nl
Dr. Ir. R.P. Bartholomeus
KWR Watercycle Research
Institute
B.R. Voortman MSc. KWR
Watercycle Research
Institute
Drs. H. van der Hagen
Dunea Duin & Water
**Prof. Dr. Ir. S.E.A.T.M.
van der Zee** Wageningen
Universiteit

Foto **Marije Louwma** droog
duin op Texel.

Tabel 1 gemiddelde neerslag P , referentieverdamping ET_{ref} en neerslagoverschot $P-ET_{ref}$ (in mm) voor de drie zomermaanden (juni, juli augustus: jja), de drie wintermaanden (december, januari, februari: djf) en een heel jaar, in het huidige klimaat en in het klimaat van de scenario's W en W+ (2050). Cijfers hebben betrekking op de Amsterdamse Waterleidingduinen en zijn berekend uit (naar 2050 getransformeerde) metingen (1960-2006) van P te AWD en van ET_{ref} te De Kooy en Vlissingen (Witte *et al.*, 2008).

Table 1 average precipitation P , reference crop evapotranspiration ET_{ref} and precipitation excess $P-ET_{ref}$ (in mm) for the three summer months (June, July August: jja), the three winter months (December, January, February: djf) and for a whole year, both in the current climate and in the climate of the scenarios W and W+ (2050). Figures relate to the Amsterdam Water Supply dunes (AWD) and were calculated from (to 2050 transformed) measurements (1960-2006) of P , measured at AWD and of ET_{ref} , measured at De Kooy and Vlissingen (Witte *et al.*, 2008).

	Huidig			W			W+		
	jja	djf	jaar	jja	djf	jaar	jja	djf	jaar
P	197	191	803	207	204	854	158	218	780
ET_{ref}	279	31	582	298	32	616	321	32	651
$P-ET_{ref}$	-82	160	221	-90	172	238	-163	186	129

derzoek naar de mogelijke gevolgen van klimaatverandering voor waterhuishouding en vegetatie van onze kustduinen.

Vegetatie past zich aan

Om maximaal (potentieel) te kunnen verdampen, moet er voldoende water voor de planten beschikbaar zijn. Aan grondwater heeft een duinvegetatie niets, want dat zit te diep om voor capillaire aanvoer naar de wortelzone te zorgen. Een droge duinvegetatie is daarom voor zijn watervoorziening geheel aangewezen op de neerslag en het in de wortelzone opgeslagen water. Nemen we als voorbeeld de Amsterdamse Waterleidingduinen (AWD), waar de jaarlijkse neerslag gemiddeld 803 mm bedraagt, en de referentiegewasverdamping 582 mm (tabel 1). Op jaarbasis is er dus sprake van een neerslagoverschot van 221 mm. Dat lijkt voldoende voor een schrale duinvegetatie die naar verwachting potentieel zelfs minder verdampst dan een mooie referentiegrasmat. Probleem is echter dat de vegetatie vooral 's zomers water voor verdamping nodig heeft. Plantenwortels kunnen dan water onttrekken aan de bovenlaag van de bodem, waarin een deel van het neerslagwater ligt opgeslagen dat in de winter is gevallen. De zandige duinbodems zijn doorgaans echter arm aan organische stof, waardoor de bodem in natte perioden maar weinig water kan opslaan voor drogere tijden. Het meeste water stroomt door naar de ondergrond, om zich te voegen bij het grondwater: de grondwateraanvulling. Tussen de zogenaamde veld-

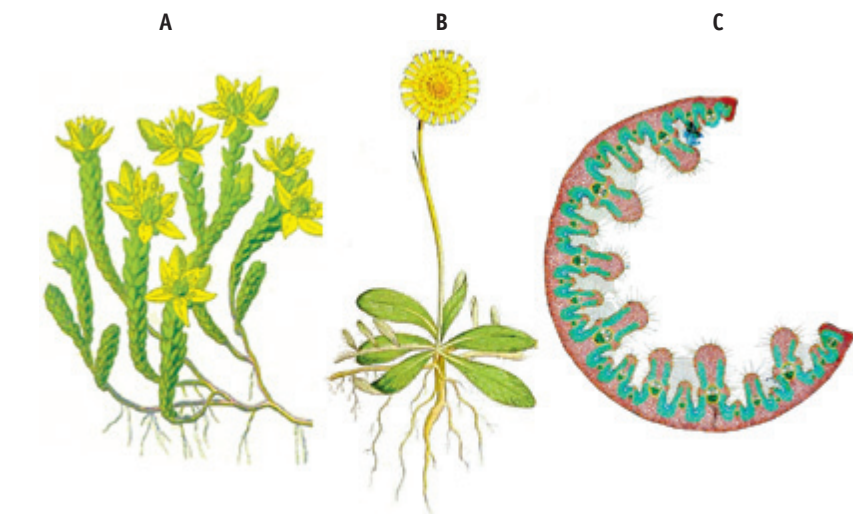
capaciteit en het verwelkingspunt van een duinbodem is ongeveer 5 volumeprocent water beschikbaar (Koorevaar *et al.*, 1983) wat, bij een worteldiepte van 30 cm, overeenkomt met een watervoorraad van 15 mm. Dat is veel te weinig om het in tabel 1 gepresenteerde neerslagtekort van 82 mm in een gemiddelde zomer te compenseren, laat staan de 200 mm die moet worden nageleverd in een droge zomer. Ter indicatie: die 200 mm was het neerslagtekort van begin juli 2011 op enkele plaatsen in Nederland, opgebouwd sinds het begin van het groeiseizoen (1 april).

Het gevolg is dat de duinvegetatie zijn verdamping drastisch moet reduceren. Dat kunnen vaatplanten doen door hun huidmondjes te sluiten. Wanneer de droogte echter vaak optreedt en ernstig is, zoals in de duinen, zal de structuur en de soortensamenstelling van de vegetatie zich daarop moeten instellen. Plantensoorten hebben dan een aan droogte aangepaste morfologie, of overleven de droge zomerperiode in de vorm van zaad. Deze soorten worden aangeduid als xerofyten. Xeromorfe kenmerken zijn onder meer een kleine verhouding tussen bladoppervlakte en bladvolume, de zogenaamde succulente bouw, de aanwezigheid van haren op de bladeren, en het verzonken zijn van huidmondjes in bladgroeven, zie figuur 1. Doordat ze geen wortels hebben waarmee ze water aan de zandondergrond kunnen onttrekken, gaan ook mossen en korstmossen heel zuinig om met water. Ten slotte kan het ontstaan van kale grond worden opgevat als een aanpassing aan

droogte, niet op plantniveau, maar op ecosysteemniveau. Kale grond verdampt heel weinig, ongeveer 200 mm/jaar, zodat er meer water overblijft voor de aanwezige planten.

Binnen de duinen zijn aanpassingen aan droogte af te lezen aan het verschil in noord- en zuidhellingen. Fraaie voorbeelden daarvan zijn te vinden in Meijendel waar de zuidhellingen veel kaler en mosrijker zijn dan de noordhellingen (figuur 2, p. 112). Door droogte veroorzaakte verschillen in vegetatie op hellingen met verschillende helling en expositie worden in eerste instantie bepaald door verschillen in inkomende zonnestraling (Bennie *et al.*, 2008; Jansen & Runhaar, 2005; Witte *et al.*, 2008). Hogere straling op zuid- dan op noordhellingen resulteert in een hogere verdampingsvraag en hierdoor in drogere zuidhellingen. Als gevolg van deze drogere condities is de vegetatie op zuidhellingen meer xerofiel, zie figuur 3 op pagina 112 (Bartholomeus *et al.*, 2011), heeft deze een lagere bovengrondse biomassa en bedekking (Witte *et al.*, 2008), en is deze meer gefragmenteerd dan op noordhellingen. Zulke aanpassingen van de vegetatie aan droogte hebben invloed op andere factoren, zoals erosie door wind en neerslag (Arens, 1996; Munson *et al.*, 2011), waterafstotendheid van de bodem, hittestress en nutriëntenhuishouding (Porporato *et al.*, 2001). Deze standplaatsfactoren worden dus geïnitieerd door droogtestress. Hittestress, bijvoorbeeld, vindt alleen plaats als een tekort aan water de verdamping reduceert; wind krijgt alleen grip op een droge bodem met lage bedekking.

Wat de aanpassing aan droogte voor de grondwateraanvulling zou kunnen betekenen, is voor een gemiddeld duin in de AWD weergegeven in figuur 4 (p. 113). De aanvulling bedraagt gemiddeld 350 tot meer dan 400 mm/jaar, afhankelijk van de helling en de oriëntatie ten opzichte van de zon. Dat is dus veel meer dan het eerder ge-



noemde neerslagoverschot van 221 mm/jaar. Deze cijfers zijn echter, door gebrek aan kennis over de verdamping van droogteminnende vegetaties, met grote onzekerheden omgeven.

Betrouwbare cijfers voor hydrologen

Hydrologen hebben in de afgelopen decennia prachtige computermodellen ontwikkeld waarmee men de stroming van water in de bodem en de diepere ondergrond kan simuleren en waarmee men het verloop in ruimte en tijd van grootheden als de grondwaterstand en het bodemvochtgehalte kan nabootsen. Die modellen berekenen de werkelijke verdamping, meestal als functie van neerslag, referentieverdamping, bodem- en vegetatie-eigenschappen.

Op basis van de literatuur, bijvoorbeeld Massop *et al.* (2005), Moore & Heilman (2011), Zhang *et al.* (2010), schatten wij dat de fout in de berekening van de werkelijke verdamping in de meeste studies minimaal 10% bedraagt. Die tikt in het Nederlandse klimaat gemiddeld ongeveer twee tot drie keer zo hard door in de berekende

Figuur 1 Xerofyten kunnen hun verdamping reduceren door bijvoorbeeld een succulente bouw, haren op de bladeren en door bladeren met huidmondjes die verzonken liggen in de bladgroeven. Deze drie mechanismen zijn respectievelijk aanwezig bij (A) muurpeper, (B) muizenoortje en (C) helm (foto van de dwarsdoorsnede van een blad).

Figure 1 Xerophytes can reduce their evaporation by, for example, a low ratio between leaf surface and leaf volume, i.e. a succulent structure, the presence of hairs on the leaves, and stomata submerged in leaf grooves. These three mechanisms are respectively present at (A) Biting Stonecrop (*Sedum acre*), (B) Mouse-ear Hawkweed (*Hieracium pilosella*) and (C) Marram grass (*Ammophila arenaria*; photo from the cross-section of a leaf).



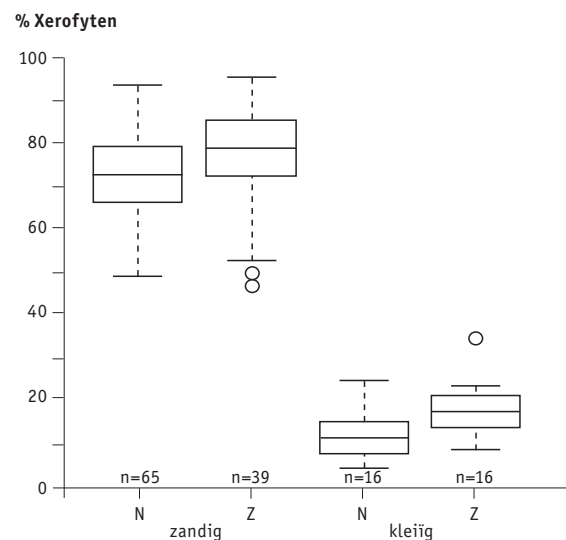
Figure 2 aanpassing van de vegetatie aan droogte in Meijendel: links een grazige en bedekte noordhelling, rechts een mosrijke en kale zuidhelling. Foto: Flip Witte.

Figure 2 adaptation of the vegetation to drought in nature reserve Meijendel. Left: a grassy northern slope; right: a south slope rich in mosses and bare sand. Photo: Flip Witte.

Figure 3 percentage xerophytes in vegetation plots on sandy and clayey soils on North and South slopes (Bartholomeus *et al.*, 2011).

Figure 3 percentage of xerophytes observed in vegetation plots on sandy and clayey soils on North and South slopes (Bartholomeus *et al.*, 2011).

grondwateraanvulling. Een voorbeeld op basis van cijfers van de AWD (tabel 1): een fout van 10% in de verdamping van 582 mm (dus 58 mm) veroorzaakt een afwijking van 26% op het neerslagoverschot van 221 mm. Dergelijke verschillen zijn ernstig, want de drijvende kracht achter de stroming van grondwater is de grondwateraanvulling. Bij benadering is de grondwaterstand ten opzichte van een drainerende omgeving rechtevenredig aan de grondwateraanvulling. Is de grondwaterstand in een duin in werkelijkheid bijvoorbeeld 4 m hoger dan de infiltratiekanalen of de duinvalleien die het duin draineren, dan wordt dit 3 m als de grondwateraanvulling eigenlijk 25% kleiner is, en 5 m als die aanvulling eigenlijk 25% groter is. In het huidige Nederlandse klimaat komt een fout in de verdamping dus eveneens minimaal 2-3 keer sterker terug in de gesimuleerde grondwaterstand. Op dit soort fouten worden we veelal niet attent gemaakt. Dat komt doordat hydrologen hun modellen ijken aan gemeten grondwaterstanden: men verhoogt of verlaagt bijvoorbeeld een weerstand in de ondergrond



zodanig, dat de gesimuleerde waarden overeenstemmen met de waarnemingen. Het is echter discutabel een dergelijk hydrologisch model vervolgens te gebruiken voor extrapolaties, dus voor toepassingen onder andere omstandigheden dan die waarop het model is geijkt. Deze tekortkoming klemt des te meer bij klimaatprojecties, omdat de verdampingseigenschappen van de vegetatie door klimaatverandering wel eens zouden kunnen gaan veranderen. Beter verdampingscijfers voor hydrologen zijn dus noodzakelijk.

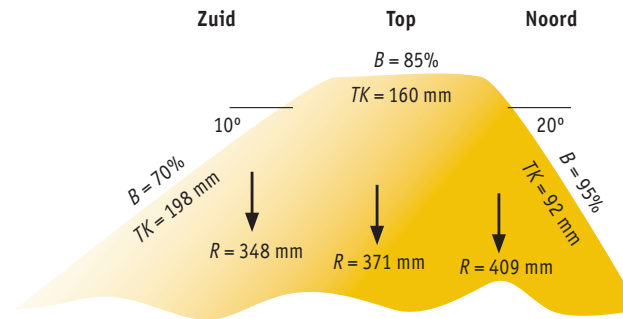
Ook voor de drinkwaterbedrijven is een betrouwbare berekening van de grondwateraanvulling van belang. Ongeveer tweederde van het leidingwater dat de drinkwaterbedrijven in Nederland produceren, is immers ontrokken grondwater, water dat door grondwateraanvulling is ontstaan. De werkelijke grondwateraanvulling is ook van belang voor de bedrijven die water winnen via infiltratie van rivierwater, zoals de Amsterdamse Waterleiding Duinen. Daar is slechts ongeveer 15% van het gewonnen drinkwater afkomstig van de natuurlij-

ke grondwateraanvulling. De verwachting is echter dat door klimaatverandering de afvoer van rivieren in de zomer dramatisch kan gaan dalen. De Rijnafvoer kan 's zomers in 2050 tot 35% zijn gedaald en in 2100 zelfs tot 60% (Vellinga *et al.*, 2009). Een dergelijk lage afvoer gaat gepaard met een slechtere waterkwaliteit (Van Vliet & Zwolsman, 2008; Wuijts *et al.*, 2012) en met een grotere concurrentie om het beschikbare zoete water tussen landbouw, natuur en andere belanghebbenden. Het is nog maar de vraag of er dan voldoende over blijft voor duininfiltratie. Pompstations in de duinen worden door veranderde rivierafvoeren dus meer afhankelijk van de natuurlijke grondwateraanvulling.

Verdamping in de duinen

In de vorige paragraaf schatten we de door hydrologische modellen berekende fout in de werkelijke verdamping op minimaal 10%. Voor droge duinvegetaties komt die fout echter misschien nog wel een stuk hoger uit. Dat komt doordat er onvoldoende onderzoek gedaan is naar het verdampingsgedrag van droogteminnende vegetaties (Witte *et al.*, 2012). Daar is een aantal onderzoekstechnische redenen voor.

Ten eerste kan de verdamping moeilijk met lysimeters worden gemeten. Lysimeters zijn in de bodem geplaatste bakken, gevuld met grond en de te onderzoeken vegetatie, waarvan de waterbalans nauwkeurig wordt bijgehouden zodat de verdamping als restpost kan worden bepaald. Lysimeters in grondwateronafhankelijke bodems worden regelmatig gewogen om hun gewichtstoename (door neerslag) of -afname (door verdamping) te kunnen vaststellen. Deze lysimeters moeten aan hun onderkant water kunnen verliezen door vrije drainage in een daartoe uitgespaarde ruimte. Die drainage treedt echter pas op bij een overdruk aan de onderkant van de lysimeter ten opzichte van de atmosferische druk. In



feite betekent dit dat de lysimeter aan de onderkant volledig verzadigd moet zijn met water, voordat hij water aan het reservoir afstaat. De vegetatie in zo'n lysimeter heeft daardoor veel meer water voor verdamping tot zijn beschikking dan een ongestoorde vegetatie, tenzij men de lysimeter heel diep maakt (in een duinzandgrond minstens 2,5 m diep bij een worteldiepte van 30 cm). Dat is echter onpraktisch en kostbaar.

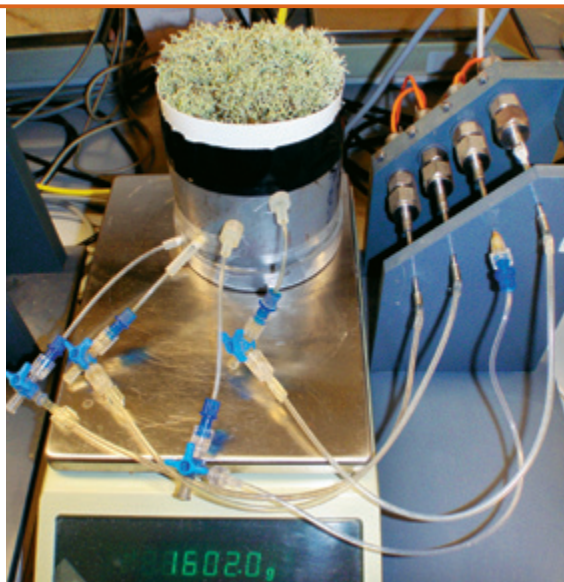
Ten tweede ligt er een probleem in het feit dat de meeste hydrologische modellen de werkelijke verdamping berekenen via de potentiële verdamping, dat wil zeggen via de verdamping van het vegetatietype wanneer dit optimaal van zoet water zou worden voorzien. Door rekening te houden met de droogte van de bodem wordt deze potentiële verdamping in de rekenprocedure gereduceerd tot de werkelijke verdamping. De vaststelling van de potentiële verdamping gebeurt met gewasfactoren die afhangen van het vegetatietype. Gewasfactoren behoren door metingen in het veld te worden vastgesteld. In de praktijk is het echter onmogelijk om op empirische wijze voor droogteminnende vegetatietypen een gewasfactor vast te stellen. Daarvoor zou de vegetatie optimaal van zoet water moeten worden voorzien, waarmee binnen de kortste keren het te onderzoeken

Figuur 4 Schematische zuid-noord doorsnede van een grondwateronafhankelijk duin in de Amsterdamse Waterleidingduinen (Witte *et al.*, 2008). Behalve de waargenomen gemiddelde bedekking B zijn ook het berekende potentiële vochttekort TK en de grondwateraanvulling R voor het huidige klimaat gegeven (cijfers zeer indicatief, berekend uit een simulatie van 30 jaar met het model SWAP (Van Dam *et al.*, 2008)). TK is het vochttekort dat een hypothetische korte en de grond volledig bedekkende grasmat zou ondervinden, wanneer die op het duin zou groeien.

Figure 4 Schematic SE cross-section of a groundwater independent dune in the Amsterdam Water Supply dunes (Witte *et al.*, 2008). Besides the observed average cover B , also the simulated potential moisture deficit TK and the groundwater recharge R for the current climate are shown (figures very indicative, calculated from a simulation of 30 years with the model SWAP (Van Dam *et al.*, 2008)). TK is the moisture deficit of a hypothetical short grassland that fully covers the ground.

Figuur 5 meetopstelling in het Bodemfysica Laboratorium Wageningen waarin een bodemmonster met een korstmossvegetatie (open rendiermos) aan een verdrogingsexperiment wordt blootgesteld. Met de weegschaal wordt het gewichtsverlies en daarmee de verdamping bepaald; met in de bodemkolom op verschillende diepten geplaatste sensoren de zuigspanning. Uit de metingen worden de fysische eigenschappen van de korstmossvegetatie afgeleid (Voortman *et al.*, in voorbereiding b). Foto: Bernard Voortman.

Figure 5 measurement set-up in the laboratory of Wageningen where a soil sample covered with a lichen vegetation (of *Cladina portentosa*) is exposed to a drought stress experiment. With the balance the weight loss and thus the evapotranspiration is determined; with the tensiometers in the soil column the soil suction at different depths. The measurements have been used to derive the physical properties of the lichen vegetation (Voortman *et al.*, in voorbereiding b). Photo: Bernard Voortman.



vegetatietype zou veranderen. De planten zouden harder gaan groeien en sommige soorten zouden zich uitbreiden ten koste van andere. Men kan daarom vraagtekens plaatsen bij de in de literatuur gepubliceerde gasfactoren voor korstmossrijke duinen, buntgrasvegetaties, struikheide en andere droogteminnende vegetatietypen.

Nieuw onderzoek

Omdat het samenspel van klimaat, bodem, water en vegetatie in de duinen nauwelijks is begrepen, laat staan gekwantificeerd in modellen, zijn we in 2008 gestart met een verkennend onderzoek (Witte *et al.*, 2008). Daarin maakten wij aannemelijk dat meer droge zomers waarschijnlijk zorgen voor een stijging van zowel het aandeel kale grond, als van het aandeel niet wortelende planten (mossen en korstmossen). Onder het warme W+ scenario zou het aandeel kale grond op zuidhellingen in de AWD zelfs kunnen stijgen van 30% tot meer

dan 80%, aldus onze indicatieve berekeningen. Omdat kale grond en mossen veel minder verdampen dan wortelende planten, zou deze terugkoppeling van de vegetatie op het weer (en het klimaat) zorgen voor minder waterverlies naar de atmosfeer. De grondwateraanvulling onder de duinen zou zelfs licht stijgen, waardoor de duinvalleien natter zouden worden (Kamps *et al.*, 2008; Witte *et al.*, 2008; Witte *et al.*, 2012). Wat droog is zou dus droger worden, en wat nat is natter. De toekomst onder scenario W+ ziet er zonnig uit: de door de terreinbeheerders zo gewenste dynamiek zou met het droger worden van de duinen toenemen, terwijl gelijktijdig de zo gewaardeerde natte duinvalleien zouden herstellen. Het verkennende onderzoek was echter nog met enorme onzekerheden omgeven. Daarom is een promotie en een postdoctoraal onderzoek gestart.

In 2011 zijn in het laboratorium experimenten uitgevoerd, waarbij het effect van een mosbedekking op de verdamping is onderzocht (Voortman *et al.*, in voorbereiding b), zie figuur 5. Omdat (korst)mossen geen wortels hebben, onttrekken ze nauwelijks water aan de zandbodem: een moslaag blijkt te fungeren als een isolerende deken. Deze laag is alleen in staat enkele millimeters neerslag (in de vorm van regen of dauw) op te slaan. Zodra dit voorraadjie is verdampt, gaat de moslaag over in zomerslaap, een soort schijndood, waarin nauwelijks sprake is van activiteit. Terwijl men altijd dacht dat kaal zand het minst verdampte, blijkt nu uit de metingen dat een korstmossvegetatie met maar liefst eenderde minder water toekan. Deze verdampingsreductie komt ten goede aan de grondwateraanvulling. Ook is een meetsysteem ontwikkeld voor de bepaling van de werkelijke verdamping op de hogere zandgronden (Voortman *et al.*, in voorbereiding a). Op dit moment wordt de meetopstelling getest op een beperkt aantal vegetatiestructuren met verschillende verdam-

pingeigenschappen, zoals kale bodem, mos, gras en dwergstruiken. De resultaten zullen dienen ter verbetering van hydrologische modellen, maar ook kunnen de meetgegevens worden gebruikt om *remote sensing* algoritmen voor de werkelijke verdamping te ijken.

Het onderzoek is niet alleen van belang voor hydrologische modellen en natuurdoelen, het kan ook nieuw licht werpen op de kosteneffectiviteit van het natuurbeheer. Stel dat een duin met struwelen van Amerikaanse vogelkers 500 mm/jaar verdampt, en een korstmosrijke duinvegetatie 150 mm/jaar, dan levert het bestrijden van de exoot (en eventueel aanvullend plaggen om de nutriëntrijke bovenlaag te verwijderen) een extra grondwateraanvulling op van 350 mm/jaar. Dat is 3.500 m³/ha/jaar, ofwel per ha het jaarlijkse waterleidingverbruik van 70 mensen. Een hoeveelheid van 3.500 m³ rivierwater aanvoeren naar de duinen en voorzuiveren kost ongeveer € 600, het eenmalig bestrijden van Amerikaanse vogelkers ongeveer € 3.000/ha, zodat deze beheermaatregel in vijf jaar kan zijn terugverdiend, met als winst het behalen van een belangrijk natuurdoel.

Het onderzoek zal zich steeds meer moeten richten op de vraag hoe eigenschappen van plantensoorten op de lange termijn reageren op veranderingen in het klimaat. Een van de vragen daarbij is of meer droogte zal resulteren in minder accumulatie van organische stof in de bodem waardoor de droogtestress bij planten wordt versterkt. Voor langetermijnvoorspellingen, zoals bij klimaatprojecties, is het noodzakelijk dat we deze terugkoppelingsmechanismen tussen bodem, water en vegetatie begrijpen en kunnen kwantificeren, zodat we ze vervolgens kunnen inbouwen in dynamische modellen die de successie van het systeem van bodem, water en vegetatie simuleren. Omdat tot voor kort kon worden vertrouwd op empirische kennis, staat het onderzoek eigenlijk nog in de kinderschoenen.



Verantwoording

Deze publicatie is mogelijk gemaakt door het gemeenschappelijk onderzoeksprogramma van de Nederlandse waterbedrijven, alsmede door thema 3 (CARE) van het programma Kennis voor Klimaat.

Foto Aat Barendregt
geo.uu.nl/pictures/barendregt. Duindoorn (*Hippophae rhamnoides*).

Summary

Dry dune vegetation very economical with water

Flip Witte, Ruud Bartholomeus, Bernard Voortman, Harrie van der Hagen & Sjoerd van der Zee
drought, feedback, climate change, coastal dunes, vegetation

In the Netherlands, climate change will presumably lead to summers with less precipitation and higher temperatures. However, little is known about the effects of dry spells on the species composition and the evapotranspi-



ration of groundwater independent dune vegetation. On the basis of exploratory research we expect more droughts in the summer leads to an increase in the proportion of mosses and bare ground. These adaptations to drought will lead to less evapotranspiration loss and more erosion by wind. Climate change can thus turn out to be benefi-

cial for both the necessary dynamism in the dunes, and the addition of the subsurface with percolating precipitation water. These initial findings are very uncertain: more research into the evaporative behaviour of dune vegetation is required for reliable hydrological calculations, as well as for assessing the feasibility of natural goals.

Literatuur

Anonymus, 2009. Wegen naar een klimaatbestendig Nederland. Planbureau voor de Leefomgeving.

Arens, S.M., 1996. Patterns of sand transport on vegetated fore-dunes. *Geomorphology* 17: 339-350.

Bartholomeus, R.P., J.P.M. Witte & J. Runhaar, 2011. Drought stress and vegetation characteristics on sites with different slopes and orientations. *Ecohydrology*.

Bennie, J., B. Huntley, A. Wiltshire, M.O. Hill & R. Baxter, 2008. Slope, aspect and climate: Spatially explicit and implicit models of topographic microclimate in chalk grassland. *Ecological Modelling* 216: 47-59.

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.

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.

Jansen, P.C. & J. Runhaar, 2005. Toetsing van het verband tussen het aandeel xerofyten en de droogtestress onder verschillende omstandigheden. Wageningen. Alterra.

Kamps, P., G. Nienhuis & J.P.M. Witte, 2008. Effects of climate change on the water table in the coastal dunes of the Amsterdam Water Supply. Proceedings of MODFLOW and more 2008.



Koorevaar, P., G. Menelik & C. Dirksen, 1983. Elements of soil physics, Amsterdam. Elsevier.

Lenderink, G. & E. Van Meijgaard, 2008. Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes. *Nature Geoscience* 1: 511-514.

Massop, H.T.L., P.J.T. van Bakel, T. Kroon, J.G. Kroes, A. Tiktak & W. Werkman, 2005. Op zoek naar de "ware" neerslag en verdamping; toetsing van de met het STONE 2.1-instrumentarium berekende verdamping aan literatuurgegevens en aan regionale waterbalansen, en de gevoeligheid van het neerslagoverschot op de uitspoeling van nutriënten. Wageningen. Alterra.

Moore, G.W. & J.L. Heilman, 2011. Proposed principles governing how vegetation changes affect transpiration. *Ecohydrology* 4: 351-358.

Munson, S.M., J. Belnap & G.S. Okin, 2011. Responses of wind erosion to climate-induced vegetation changes on the Colorado Plateau. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108: 3854-3859.

Porporato, A., F. Laio, L. Ridolfi & I. Rodriguez-Iturbe, 2001. Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress: III. Vegetation water stress. *Adv. Water Resour.* 24: 725-744.

Vellinga, P., C.A. Katsman, A. Sterl & J.J. Beersma, 2009. Exploring high-end climate change scenarios for flood protection of the Netherlands. International Scientific Assessment carried out at the request of the Delta Committee. De Bilt. KNMI.

Vliet, M.T.H. van & J.J.G. Zwolsman, 2008. Impact of summer droughts on the water quality of the Meuse river. *J. Hydrol.* 353: 1-17.

Voortman, B.R., R.P. Bartholomeus & J.P.M. Witte, in voorbereiding a. Quantifying evaporation and transpiration based on comparison of surface temperature with mini-lysimeters. *HES Hydrol. Earth Syst. Sci.*

Voortman, B.R., H. Gooren, R.P. Bartholomeus, P.M. van Bodegom, S.E.A.T.M. van der Zee & J.P.M. Witte, in voorbereiding b. Unsaturated hydraulic characteristics of xerophilous mosses. *Ecohydrology.*

Witte, J.P.M., R.P. Bartholomeus, D.G. Cirkel & P.W.T.J. Kamps, 2008. Ecohydrologische gevolgen van klimaatverandering voor de kustduinen van Nederland. Nieuwegein. Kiwa Water Research.

Witte, J.P.M., J. Runhaar, R. van Ek, D.C.J. van der Hoek, R.P. Bartholomeus, O. Batelaan, P.M. van Bodegom, M.J. Wassen & S.E.A.T.M. van der Zee, 2012. An ecohydrological sketch of climate change impacts on water and natural ecosystems for The Netherlands: bridging the gap between science and society. *Hess Hydrol. Earth Syst. Sci* 11: 3945-3957.

Wuijts, S., C.I. Bak-Eijsberg, E.H. van Velzen & N.G.F.M. van der Aa, 2012. Effecten klimaatontwikkeling op de waterkwaliteit bij innamepunten voor drinkwater. Analyse van stofberekeningen. Bilthoven. RIVM.

Zhang, K., J.S. Kimball, R.R. Nemani & S.W. Running, 2010. A continuous satellite-derived global record of land surface evapotranspiration from 1983 to 2006. *Water Resour. Res.* 46: W09522.

Foto **Flip Witte** panorama Meijendel.