



Ruud Bartholomeus, Vrije Universiteit van Amsterdam / KWR Watercycle Research Institute

Flip Witte, KWR Watercycle Research Institute / Vrije Universiteit van Amsterdam

Peter van Bodegom, Vrije Universiteit van Amsterdam

Jos van Dam, Wageningen Universiteit

Nieuwe maat voor bodemvochtregime ook geschikt onder toekomstig klimaat

Huidige maten voor zuurstofstress in het wortelmilieu van planten, zoals de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand en het percentage luchtgevulde poriën, zijn niet geschikt voor klimaatprojecties. Dat komt doordat ze correlatief en indirect zijn en geen rekening houden met veranderingen in temperatuur en neerslagpatronen. In natte omstandigheden is de respiratiestress wel een geschikte maat. Met een nieuw model is die nu voor alle locaties in Nederland te berekenen. In de nieuwe maat komen zowel de effecten op de vegetatie van extreme neerslag tot uitdrukking als die van hoge temperaturen. Zuurstofstress door een hevige regenbui op een warme zomerdag zal onder het toekomstige klimaat veel vaker voorkomen. De door het nieuwe model berekende hoge respiratiestress van een dergelijke gebeurtenis zal leiden tot natuurlijke vegetaties van nattere bodems dan de huidige, niet klimaatbestendige maten voorzien.

Zowel waarnemingen als modelvoorspellingen tonen aan dat het klimaat wereldwijd verandert. De temperatuur stijgt, de atmosferische CO₂-concentratie neemt toe en meer en meer worden langdurige droge perioden afgewisseld met extreme neerslaggebeurtenissen¹⁾. De effecten daarvan op natuurlijke ecosystemen zouden wel eens aanzienlijk kunnen zijn. Om de invloed van milieuveranderingen op de terrestrische vegetatie te voorspellen worden meestal habitatmodellen gebruikt, zoals Demnat²⁾, Duraveg³⁾, Waternood⁴⁾, Move⁵⁾ en Niche⁶⁾. De parameters die deze modellen gebruiken om habitats te karakteriseren, zijn echter vaak dusdanig indirect en eenvoudig, dat de relatie met de vegetatie een hoog correlatief gehalte heeft. Hierdoor zijn deze modellen niet geschikt voor het voorspellen van de effecten van klimaatverandering. Daarvoor moeten we gebruik maken van relaties tussen standplaats en vegetatie die zijn gebaseerd op processen die de wisselwerking tussen bodem, vegetatie en atmosfeer beschrijven. Dit artikel illustreert deze noodzaak aan de hand van relaties tussen bodemvochtregime en vegetatie. Het bodemvochtregime is bepalend voor de vegetatiesamenstelling in terrestrische systemen.

Bodemvocht, planten en atmosfeer

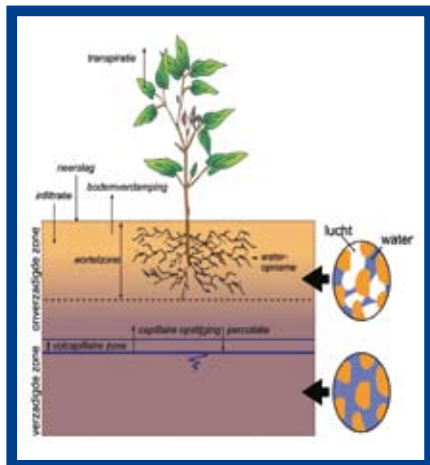
Of planten op een bepaalde plek kunnen overleven, wordt onder meer bepaald door de beschikbaarheid van zuurstof en water in de bodem⁷⁾. Planten proberen altijd voldoende zuurstof en water op te nemen uit de bodem. Als daarvan onvoldoende beschikbaar is in de wortelzone, zullen planten die fysiologisch niet zijn aangepast aan deze omstandigheden lijden aan zuurstof- of droogtestress. Om het optreden van beide soorten stress te kunnen begrijpen, is enige hydrologische kennis van de ondergrond noodzakelijk. De ondergrond is te verdelen in twee belangrijke zones: de verzadigde zone (de zone onder de grondwaterspiegel en de volcapillaire zone) en de onverzadigde zone (boven de volcapillaire zone) (zie afbeelding 1).

Plantenwortels groeien over het algemeen in de onverzadigde zone. In tegenstelling tot de verzadigde zone bevatten de bodemporiën in de onverzadigde zone zowel lucht als water. Deze zorgen voor de voorziening van zuurstof en water naar plantenwortels. Het bodemvochtgehalte en het gehalte aan luchtgevulde poriën in de onverzadigde zone hangen af van de grondwaterstand, het bodemtype, de wateropname door de wortels, de neerslag en de bodemverdamping. Daardoor variëren

deze gehalten sterk in zowel tijd als plaats. De grondwaterstand heeft slechts een indirecte invloed op de hoeveelheid zuurstof en water in de onverzadigde zone, namelijk door capillaire opstijging. De hoeveelheid capillaire opstijging hangt sterk af van de bodemtextuur. De grondwateraanvulling wordt bepaald door de klimatologische omstandigheden en is, bij afwezigheid van oppervlakteafvoer, gelijk aan het verschil tussen neerslag en actuele evapotranspiratie (het neerslagoverschot). De grondwateraanvulling varieert zowel binnen als tussen jaren. Hierdoor zijn de overheersende meteorologische condities in een periode terug te zien in het verloop van de grondwaterstand en de bodemvochtgehalten in de wortelzone.

Zuurstofvoorziening en -vraag

Normaal gesproken verkrijgen plantenwortels voldoende zuurstof voor hun respiratie (ademhaling) direct uit de luchtgevulde poriën in de bodem (zie afbeelding 1). Maar als de bodem te nat wordt, wordt lucht in de bodemporiën vervangen door water. Hierdoor wordt de beschikbaarheid van zuurstof limiterend voor wortelrespiratie. Planten respireren om energie voor groei en onderhoud te verkrijgen. Een tekort aan zuurstof belemmert dus de energievoorziening voor het in stand houden van het

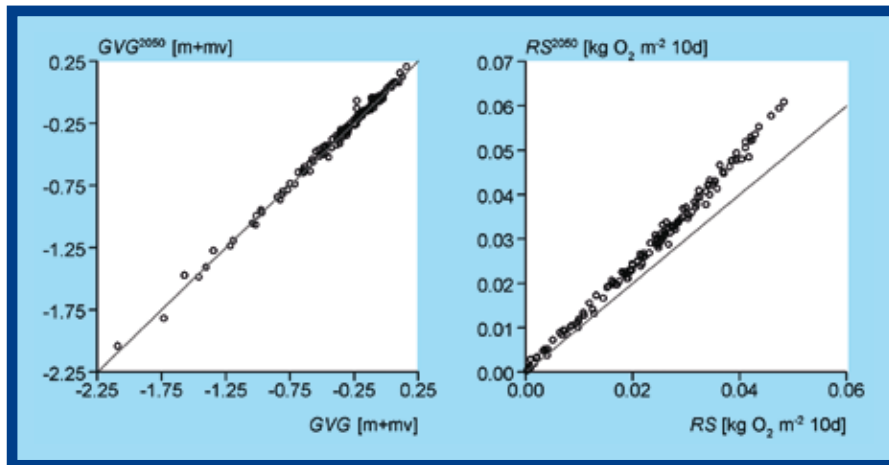


Afb. 1: De verdeling van de bodem in de verzadigde en onverzadigde zone, met de hydrologische processen die de bodemvochtcondities in de wortelzone bepalen. Planten zijn afhankelijk van zuurstof in de wortelzone. De grondwaterstand heeft daar alleen een indirecte invloed op.

metabolisme van de plant. Planten lijden dan aan zuurstofstress⁹⁾. Of planten zuurstofstress ondervinden, hangt niet alleen af van het gehalte aan luchtgevulde poriën in de bodem, maar is ook sterk temperatuurafhankelijk. Planten verbruiken namelijk meer zuurstof als het warm is. Juist de combinatie van intensieve neerslag en hoge temperatuur zal in de toekomst vaker voorkomen, waardoor de zuurstofstress toeneemt⁹⁾.

Huidige, indirecte maat voor zuurstofstress: GVG

Veelgebruikte maten voor de relatie tussen het vochtregime van de bodem en de vegetatie zijn de zogenaamde GxG-waarden. De meest gebruikte maat voor het karakteriseren van de vochtthuishouding is de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG). De GVG wordt gebruikt als maat voor zuurstofstress, gebaseerd op de aanname dat de zuurstofvoorziening aan het begin van het groeiseizoen bepalend is voor plantengroei¹⁰⁾. Een nadeel van de GVG is dat, zoals hiervoor betoogd, de grondwaterstand een indirecte maat is voor datgene waar het de planten werkelijk om gaat: voldoende zuurstof om te respireren en voldoende vocht om te transpireren. Zo houdt de GVG geen rekening met het effect van extreme neerslag, temperatuur, bodemtextuur en organische stofgehalte op de zuurstofstress. Uit de landbouw bijvoorbeeld is bekend dat juist de combinatie van hoge temperatuur (die de zuurstofvraag van planten verhoogt) en intensieve neerslag (die de zuurstofbeschikbaarheid in de wortelzone verlaagt) schadelijk is voor de planten. Een ander nadeel is dat de GVG is gedefinieerd als de gemiddelde grondwaterstand op 1 april, omdat dan het groeiseizoen zou beginnen. Door de stijgende temperaturen zal de start van het groeiseizoen echter steeds verder naar voren schuiven. Al met al is de GVG geen klimaatbestendige maat. We merken nu al dat het groeiseizoen eerder begint en dat hevige neerslag in de zomer steeds vaker voorkomt. De GVG houdt hier geen rekening mee is daarom ongeschikt voor klimaatprojecties.



Afb. 2: GVG en RS voor het huidige klimaat (horizontale as), uitgezet tegen de waarden voor het klimaat in 2050 (verticale as). De lijn is de 1:1-lijn. De afwijking van deze lijn geeft dus de verschillen aan tussen het huidige en het toekomstige klimaat. De verandering in respiratiestress komt overeen met de verwachte stijging van zuurstofstress door de toename van extreme neerslag in combinatie met hoge temperaturen.

Nieuwe, directe maat voor zuurstofstress: RS

Om uitspraken te kunnen doen over het effect van klimaatverandering op de vegetatie zijn meer causale verbanden nodig. Omdat afname van de wortelrespiratie de meest directe reactie van de plant is op een tekort aan zuurstof in de bodem, is dit proces als basis gebruikt voor het definiëren van een nieuwe maat voor zuurstofstress. Als de zuurstofbeschikbaarheid in de bodem voldoende is om aan de vraag van de planten te voldoen, is sprake van potentiële respiratie. Wanneer de zuurstofbeschikbaarheid onvoldoende is, neemt de respiratie af. De actuele respiratie is dan dus lager dan de potentiële. Het verschil tussen potentiële en actuele respiratie is de respiratiereductie. Om deze te kunnen berekenen is een dynamisch bodemvocht-klimaat-plantmodel ontwikkeld⁸⁾. Voor dit model, dat op dagbasis rekt, hoeven geen aannamen te worden gedaan over de start en de lengte van het groeiseizoen.

Als maat voor zuurstofstress ofwel respiratiestress (RS)¹¹⁾ wordt voor een periode van 30 jaar de dagelijkse respiratiereductie bepaald. Voor de berekening van zuurstofstress wordt uitgegaan van een referentiegewas (zie kader). Uit de dagelijkse respiratiereductie wordt per jaar de maximale tiendaagse som berekend. Deze wordt vervolgens gemiddeld over een periode van 30 jaar en levert respiratiestress op. Door deze procedure selecteren we per jaar de periode waarin de hoogste zuurstofstress optreedt. Juist deze extreme perioden zijn beslissend voor de plantengroei. Respiratiestress maakt het mogelijk zowel de effecten van extreme neerslag als van hoge temperaturen te onderzoeken. Het gelijktijdig optreden van deze condities heeft grote invloed op de vegetatie en zal vaker gebeuren in het toekomstige klimaat.

GVG en RS voor het huidige en toekomstige klimaat

Voor 145 locaties in Nederland^{12),13)} waarvan zowel vegetatieopnamen, bodemgegevens als grondwaterstandsmetingen beschikbaar waren, zijn respiratiestress en de gemiddelde

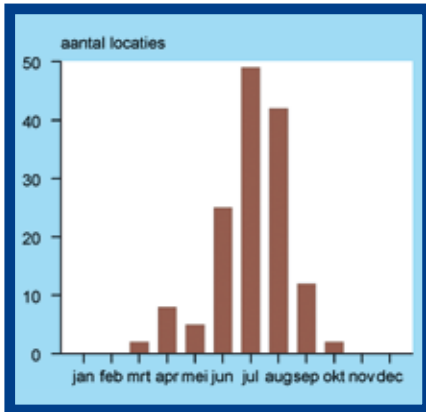
voorjaarsgrondwaterstand berekend in zowel het huidige als het toekomstige klimaat. De resultaten die hier gepresenteerd worden, hebben betrekking op klimaatscenario W+ van het KNMI¹⁾, maar de andere KNMI-scenario's geven gelijksoortige resultaten¹¹⁾. Met het tijdreeksmodel *Menyanthes*¹⁴⁾ werden tweewekelijkse grondwaterstandmetingen eerst verdicht tot dagwaarden en verlengd tot reeksen van 30 jaar¹⁵⁾. Vervolgens werden met het onverzadigde zone model SWAP¹⁶⁾ bodemvochtgehalten en -temperatuur in de wortelzone op dagbasis berekend. Deze gegevens dienden als invoer voor de berekening van RS met ons model. De GVG's werden direct uit de 30-jarige grondwaterstandreeksen berekend als de gemiddelde grondwaterstand op 1 april. Door de stijging van de temperatuur en de toename van extreme neerslag in de zomer, zal de zuurstofvraag van planten toenemen en de zuurstofbeschikbaarheid van de bodem afnemen. Hierdoor neemt de zuurstofstress toe. Dit effect komt, zoals verwacht, niet tot uiting in de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand. Uit afbeelding 2 blijkt dat deze in 2050 nagenoeg gelijk is aan de huidige GVG. De GVG onderschat dus de toekomstige zuurstofstress. Voor respiratiestress geldt dat de zuurstofstress in 2050 stijgt.

Bovendien blijkt uit berekeningen van de respiratiestress dat de hoogste zuurstofstress niet aan het begin van het groeiseizoen optreedt, maar juist midden in de zomer (zie afbeelding 3). Dan is de combinatie van een natte bodem en hoge temperaturen blijkbaar doorslaggevend.

Doordat de gemiddelde grondwaterstand in het voorjaar de zuurstofstress in een toekomstig klimaat systematisch onderschat, levert het gebruik van de GVG in habitatmodellen systematisch te droog voorspelde vegetaties op. De verschillen zijn zo groot dat deze overeenkomen met het wel of niet succesvol in stand houden van bijvoorbeeld een blauwgrasland of een natte heidevegetatie.

Praktische toepasbaarheid

Voor de berekening van respiratiestress zijn



Afb. 3: Histogram waarin het aantal locaties uitgezet is tegen de start van de tiendaagse periode waarin de hoogste respiratiestress optreedt. Voor de meeste locaties geldt dat de hoogste stress in de zomerperiode voorkomt. Achteraf bezien blijkt de vegetatie ook iets beter te correleren met de gemiddelde grondwaterstand in juli dan met de gemiddelde grondwaterstand in het voorjaar.

meer gegevens nodig dan voor berekening van de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand. Om het toepassen van RS te vergemakkelijken, zijn eenvoudige functies afgeleid, zogenaamde reprofuncties, die het gedrag van de gedetailleerde model-simulaties benaderen. Deze functies versnellen het rekenproces aanzienlijk, terwijl nauwelijks ingeleverd wordt op de nauwkeurigheid van de resultaten. Ook is het mogelijk de gedetailleerde SWAP-simulaties over te slaan en uit te gaan van de grondwaterstand en de aanname van een hydrostatisch evenwicht. Deze methode levert toch nog een acceptabele schatting van de zuurstofstress op. De effecten van bodem en temperatuur worden immers nog steeds meegenomen in de analyse.

In de toekomst: klimaatbestendige HELP-tabellen?

Net als voor de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand zijn de gemiddeld hoogste (GHG) en laagste grondwaterstand (GLG) indirecte maten om de effecten van het bodemvochtregime op planten te voorspellen. Zoals al gezegd is niet de grondwaterstand belangrijk, maar de vocht- en luchtgehalten in de wortelzone en de bodemtempe-

ratuur. De GHG en GLG worden nu bijvoorbeeld gebruikt in de HELP-tabellen die ontwikkeld zijn om nat- en droogteschade bij landbouwgewassen vast te stellen¹⁷. Hoewel bekend is dat deze schade groter is bij de combinatie van een natte bodem en een hoge temperatuur, kan het effect van deze combinatie met de HELP-tabellen niet worden bepaald. Onze nieuwe maat RS biedt mogelijkheden om dat voortaan wel te doen.

Deze resultaten komen voort uit een samenwerking van KWR Watercycle Research Institute, Vrije Universiteit Amsterdam en Wageningen Universiteit en maken deel uit van het proefschrift van Ruud Bartholomeus, getiteld 'Moisture Matters; Climate-proof and process-based relationships between water, oxygen and vegetation' waarop hij op 26 januari jl. aan de Vrije Universiteit Amsterdam promoveerde.

LITERATUUR

- 1) Van den Hurk B., A. Klein Tankink, G. Lenderink, A. van Ulden, G. van Oldenborgh, C. Katsman, H. van den Brink, F. Keller, J. Bessembinder, G. Burgers, G. Komen, W. Hazeleger en S. Drijfhout (2006). KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands.
- 2) Van Ek R., J.-P. Witte, J. Runhaar en R. Klijn (2000). Ecological effects of water management in the Netherlands: the model DEMNAT. *Ecological Engineering* 16, pag. 127-141.
- 3) IWACO (1996). Het hydro-ecologische voorspellingsmodel DURAVEG.
- 4) Runhaar J., J. Gehrels, G. van der Lee, S. Hennekens, G. Wamelink, W. van der Linden en P. de Louw (2002). *Waterlood deelrapport Doelrealisatie Natuur*. STOWA.
- 5) Latour J., T. Reiling en J. Wiertz (1993). MOVE: a multiple stress model for vegetation. In: *The Use of Hydro-Ecological Models in the Netherlands*. CHO-TNO Proceedings and Information nr. 47.
- 6) Koerselman W., M. de Haan en A. Meuleman (1999). *Ecohydrologische effectvoorspelling duinen*. Standplaatsmodellering in NICHE duinen. Kiwa. Rapport SWE98.010.
- 7) Witte J.-P., R. Wójcik, P. Torfs, M. de Haan en S. Hennekens (2007). Bayesian classification of vegetation types with Gaussian mixture density fitting to indicator values. *Journal of Vegetation Science* 18, pag. 605-612.
- 8) Bartholomeus R., J.-P. Witte, P. van Bodegom, J. van Dam en R. Aerts (2008). Critical soil conditions for oxygen stress to plant roots: substituting the Feddes-function by a process-based model. *Journal of Hydrology* 360, pag. 147-165.
- 9) Drew M. (1983). Plant injury and adaptation to oxygen deficiency in the root environment: a review. *Plant and Soil* 75, pag. 179-199.
- 10) Runhaar J., J.-P. Witte en P. Verburg (1997). Groundwater level, moisture supply, and vegetation in the Netherlands. *Wetlands* 4, pag. 528-538.
- 11) Bartholomeus R., J.-P. Witte, P. van Bodegom, J. van Dam en R. Aerts (2009). A climate-proof relationship between soil moisture conditions and vegetation composition. In druk.
- 12) Runhaar J. (1989). Toetsing van het ecotopensysteem. Centrum voor Milieukunde. Rijksuniversiteit Leiden.
- 13) Beets C., P. Hommel en R. de Waal (2003). Selectie van referentiepunten t.b.v. het SBB-project terreincondities. *Staatsbosbeheer*.
- 14) Von Asmuth J., M. Bierkens en C. Maas (2002). Transfer function noise modeling in continuous time using predefined impulse response functions. *Water Resources Research* 38, pag. 2301-2312.
- 15) Bartholomeus R., J.-P. Witte, P. van Bodegom en R. Aerts (2008). The need of data harmonization to derive robust empirical relationships between soil conditions and vegetation. *Journal of Vegetation Science* 19, pag. 799-808.
- 16) Van Dam J., P. Groenendijk, R. Hendriks en J. Kroes (2008). Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP. *Vadose Zone J.* 2, pag. 640-653.
- 17) Van Bakel P. (2002). HELP-tabellen landbouw. *Waterlood deelrapport 04*. STOWA.

Planten in de natuur die op een bepaalde plek groeien, zijn fysiologisch aangepast aan de heersende vochtcondities. Zo minimaliseren deze planten de stress die ze ondervinden. Planten op natte standplaatsen hebben bijvoorbeeld luchtweefsels om zuurstof vanuit de lucht te transporteren naar de wortels. Respiratiestress wordt berekend als de zuurstofstress die een referentiegewas bij een gegeven vochtgehalte, bodem en temperatuur ondervindt. Het gebruik van een referentiegewas kennen we al uit het karakteriseren van droogtestress¹⁰. Voor zuurstofstress is het referentiegewas gedefinieerd als een grasland dat niet fysiologisch is aangepast aan zuurstofstress en dat dus afhankelijk is van de zuurstofvoorziening in de wortelzone. Door het gebruik van een referentiegewas is respiratiestress, net als de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand, een standplaatsfactor ofwel een maat voor de natheid van de bodem, onafhankelijk van de werkelijke vegetatie. Deze natheid bepaalt uiteindelijk of een plant of vegetatietype op een plek kan voorkomen. Zo zal struikheide voorkomen op een plek met zeer lage zuurstofstress en zegge en bies op een plek met zeer hoge zuurstofstress. Zegge en bies hebben immers luchtweefsel via welke ze zuurstof uit de atmosfeer naar hun wortels transporteren. Respiratiestress geeft dus per definitie de zuurstofstress waaraan de werkelijke vegetatie moet zijn aangepast om er te kunnen groeien.