
Is het Nationaal Hydrologische Instrumentarium gereed voor het voorspellen van natuureffecten?

Jan-Philip Witte, Rien Pastoors, Dirk-Jan van der Hoek, Ruud Bartholomeus, Arnaut van Loon en Peter van Bodegom

Inleiding

Grondwatermodellen worden doorgaans geijkt op en gevalideerd aan stijghoogten die gemeten zijn in peilbuizen en, in het gunstige geval, ook aan gemeten balanstermen, zoals afvoeren en verdampingsfluxen. Vaak liggen de peilbuizen om praktische redenen op locaties, zoals wegbermen, die weinig representatief zijn, vooral voor natuurgebieden (Hoogewoud, 2009). Bovendien kan het aantal peilbuizen te beperkt zijn of is de waarnemingsreeks soms te kort voor het afleiden van bijvoorbeeld een gemiddelde grondwaterstand.

Een alternatieve bron voor het valideren van grondwatermodellen is de in de natuur aanwezige vegetatie (Engelen en Jones, 1986). De in een terrein aanwezige vegetatie weerspiegelt namelijk de vochtcondities in de bodem over een lange reeks van jaren. Vegetatieopnamen en vegetatiekaarten kunnen worden gebruikt om de grondwaterstand, het vochttekort en de aanwezigheid van kwel op te sporen. Alleen al in de 20^e eeuw zijn er in Nederland ongeveer een half miljoen vegetatieopnamen gemaakt. Die vormen een zeer waardevolle potentiële bron van (deels historische) hydrologische informatie. Wij gebruikten die informatie om te onderzoeken in hoeverre de uitkomsten van het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium (Goes en Verkaik (2008) en www.nhi.nu) aansluiten bij de huidige vegetatie van Nederland.

Het onderzoek voerden we uit binnen het FES-programma 'Klimaat voor Ruimte', project A1 (Biodiversity in a changing environment: predicting spatio-temporal dynamics of vegetation), dat in 2005 van start ging. Een drietal promovendi werkten in dat project – samen met onderzoekers van KWR, VU en WUR – aan de bouwstenen voor een klimaatrobuuste versie van het ecohydrologische voorspellingsmodel Probe (Witte e.a., 2007a, Witte e.a., 2010). In dit model worden standplaatsfactoren die op een

Jan-Philip M. Witte, Ruud Bartholomeus en Arnaut van Loon zijn werkzaam bij KWR Watercycle Research Institute, Postbus 1072, 3430 BB Nieuwegein, flip.witte@kwrwater.nl, tel (030) 606 96 47, ruud.bartholomeus@kwrwater.nl, tel (030) 606 95 30 en arnaut.van.loon@kwrwater.nl, tel (030) 606 95 50. **Rien Pastoors en Dirk-Jan van der Hoek** zijn werkzaam bij het Planbureau voor de Leefomgeving, Antonie van Leeuwenhoeklaan 9, 3721 MA Bilthoven, rien.pastoors@pbl.nl, tel (030) 274 33 53 en dirk-jan.vanderhoek@pbl.nl, tel (030) 274 41 69. Het adres van **Peter van Bodegom** is De Boelelaan 1085, peter.van.bodegom@falw.vu.nl, tel (020) 598 69 64.

directe manier het functioneren van planten bepalen, zoals de beschikbaarheid in het wortelmilieu van nutriënten, water en zuurstof, voorspeld op basis van bodemeigenschappen en hydrologische en klimatologische grootheden. Met deze factoren worden vervolgens planteigenschappen voorspeld, omdat de selectie van soorten plaatsvindt via de functies van planten en niet op basis van individuele soorten. Ten slotte worden in Probe vegetatietypen voorspeld op basis van verschillen in planteigenschappen tussen vegetatietypen.

Een van de doelen van het project was met Probe op nationale schaal de vegetatie in natuurgebieden te voorspellen onder een aantal klimaatscenario's. Deze kaarten zouden wellicht de eerste landelijke schetskaart van klimaateffecten op de vegetatie (Witte e.a., 2009) kunnen vervangen. Invoer voor de simulaties zouden de uitkomsten van de nationale modellentrein zijn, dat wil zeggen van het NHI aangevuld met het modellen-duo SMART (Kros e.a., 1995) en SUMO (Wamelink e.a., 2000) voor de simulatie van de zuurgraad en de nutriëntenbeschikbaarheid in het wortelmilieu.

Een voorwaarde voor het succes van een dergelijke voorspelling is dat de gesimuleerde waarden voor vocht, zuurgraad en nutriënten onder het huidige klimaat, voldoende overeenkomst vertonen met wat de thans aanwezige vegetatie aan deze grootheden indiceert. Wij hebben die overeenkomst onderzocht en doen in deze publicatie verslag van de overeenkomst tussen de uitkomsten van het NHI en de indicatiewaarden voor vocht, afgeleid van gelokaliseerde vegetatieopnamen. Tevens gaan we kort na in hoeverre de met het NHI gesimuleerde grootheden geschikt zijn voor klimaatprojecties.

Methode

Hydrologische grootheden

Voor het onderzoek gebruikten we versie 2.0 van het NHI, die op 1 april 2010 door Deltares en Alterra werd opgeleverd aan de Waterdienst van Rijkswaterstaat. In deze versie wordt de werkelijke verdamping en het vochttransport in de onverzadigde zone gesimuleerd met het model MetaSWAP (Schaap en Dik, 2007). De berekening is uitgevoerd met rastercellen van 250 x 250 m en op dagbasis. De uitkomsten van het NHI voor zowel het huidige klimaat (1976–2005), als voor de nationale klimaatscenario's W en W+ (Van den Hurk e.a., 2006) met als referentiejaar 2050, stonden tot onze beschikking. In beide scenario's is de temperatuur in 2050 mondiaal met 2 °C gestegen en zijn de winters natter geworden. In het W+ scenario is er bovendien een verandering in de atmosferische circulatie boven Nederland opgetreden, waardoor de zomers veel droger worden.

Uit dertig jaar simulaties voor het huidige klimaat berekenden wij de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand GVG, een maat die ecologen vaak gebruiken voor het typeren van vochtige en natte standplaatsen, waar planten zijn aangepast aan perioden met een gebrek aan zuurstof (Runhaar e.a., 1997). Een nadeel van de GVG is dat de grondwaterstand een tamelijk indirecte maat is voor datgene waar het de planten werkelijk om gaat, namelijk: voldoende zuurstof om te ademen en voldoende vocht om te transpireren. Zo houdt de GVG geen rekening met het effect van extreme neerslag, temperatuur, bodemtextuur en het gehalte aan organische stof op de zuurstofstress.

Uit de landbouw, bijvoorbeeld, is bekend dat juist de combinatie van een hoge temperatuur (die de zuurstofvraag van planten verhoogt) en een intensieve neerslag (die de zuurstofbeschikbaarheid in de wortelzone verlaagt) schadelijk is voor de planten. Een ander nadeel is dat de GVG gedefinieerd is 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 ongeschikt voor klimaatprojecties.

Binnen het eerder genoemde project van Klimaat voor Ruimte is daarom een nieuwe maat voor een tekort aan zuurstof ontwikkeld, de zuurstofstress ZS (Bartholomeus e.a., 2010b). Deze wordt berekend aan de hand van een geïntegreerd bodem-plant-atmosfeer-model dat het zuurstoftransport van de atmosfeer naar de plantenwortels berekent, en dit vergelijkt met de hoeveelheid zuurstof die de plantenwortels nodig hebben om volledig (potentieel) te kunnen ademen (Bartholomeus e.a., 2008). Het verschil tussen het potentiële en het werkelijke zuurstofverbruik resulteert in een zuurstoftekort. De zuurstofstress ZS hebben we berekend door per jaar uit het dagelijkse zuurstoftekort de maximale tiendaagse som te selecteren en deze vervolgens te middelen over een periode van 30 jaar. Door deze berekeningswijze wordt per jaar de periode met het hoogste zuurstoftekort geselecteerd, een periode die beslissend is voor de plantengroei. ZS hangt af van het bodemvochtgehalte – en zo de fractie luchtgevulde poriën, de bodemtemperatuur, het bodemtype en van enkele gewaseigenschappen. In deze studie werden, voor elke rastercel, de eerste twee grootheden gesimuleerd met de nationale modellentrein, het bodemtype afgeleid van de Bodemkaart van Nederland, en de gewaseigenschappen van een standaardgewas gedefinieerd volgens Bartholomeus e.a. (2008).

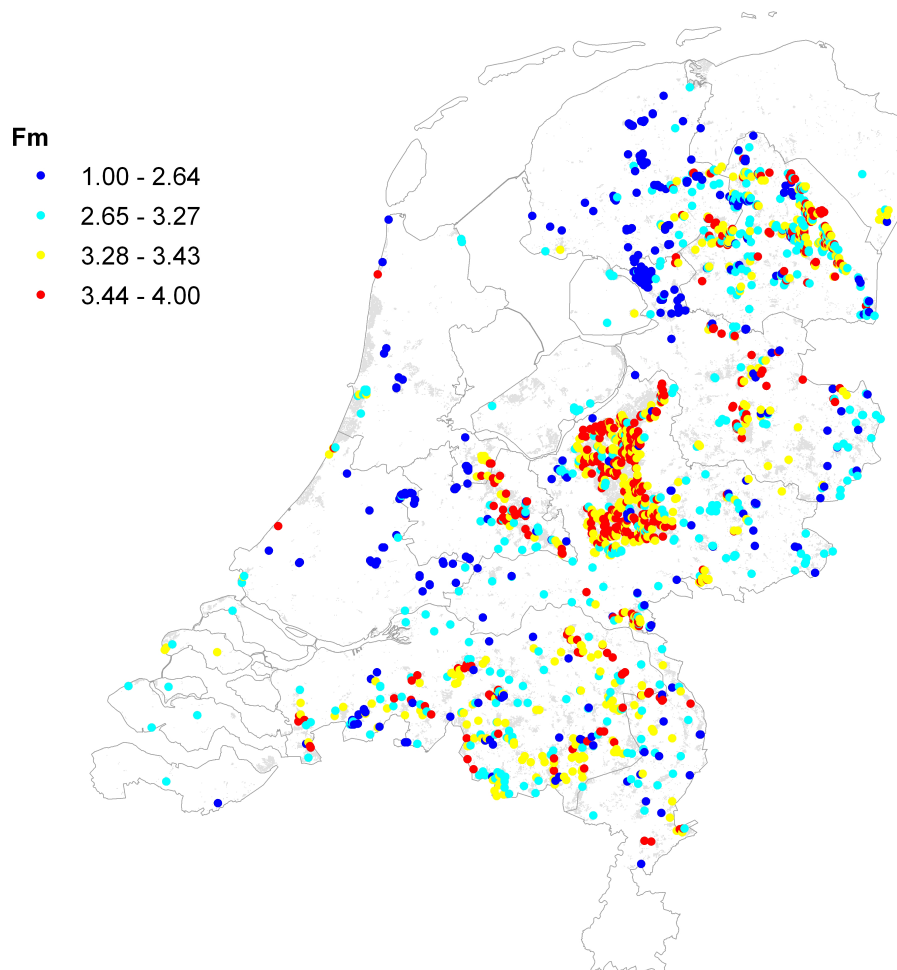
Planten kunnen ook lijden aan een tekort aan water, waardoor ze niet meer optimaal kunnen transpireren. Per rekencel berekenden we op een vergelijkbare manier de droogtestress DS, namelijk als de maximale transpiratiereductie in een aaneengesloten periode van tien dagen, gemiddeld over 30 jaar.

Vochtindicatie van de vegetatie

Van Alterra (Stefan Hennekes) kregen we een bestand met 4193 goed gelokaliseerde vegetatieopnamen in natuurgebieden, waarvan 2847 opnamen binnen het modelgebied van het NHI vallen. Veruit de meeste opnamen hebben een grootte van 2 x 2 m. Per opname berekenden we een gemiddelde indicatiewaarde voor vocht, Fm (figuur 1). Daarvoor gebruikten we de indicatiewaarden van individuele plantensoorten voor vocht die door Witte e.a. (2007b) zijn afgeleid uit de indeling van soorten in ecologische groepen volgens Runhaar e.a. (2004). Die indicatiewaarden worden weergegeven op een continue schaal van 1, voor de waterplanten, tot 4, voor de planten van extreem droge milieus. Fm berekenden we als het rekenkundig gemiddelde van de soorten in een vegetatieopname. In navolging van Käfer en Witte (2004) werd de bedekking van de soorten binnen een opname niet meegewogen in de berekening van het gemiddelde.

Voor iedere opname bepaalden we vervolgens de locatie in het nationale 250 m raster, om daarna de indicatiewaarden te koppelen aan de uitkomsten van het NHI. Resultaten van de door het NHI gesimuleerde hydrologische grootheden en Fm werden gra-

fisch tegen elkaar uitgezet. Door middel van regressieanalyse werd ten slotte onderzocht hoe goed de gesimuleerde waarden overeenkomen met de van de gelokaliseerde vegetatieopnamen afgeleide vochtindicaties.



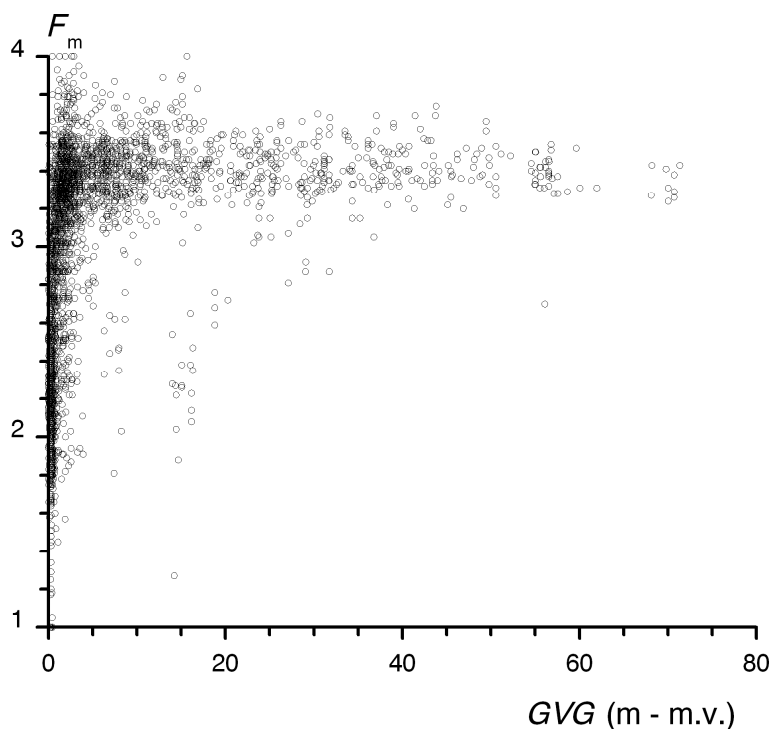
Figuur 1: Vochtindicatie Fm van de geanalyseerde vegetatieopnamen.

Kanttekening vooraf

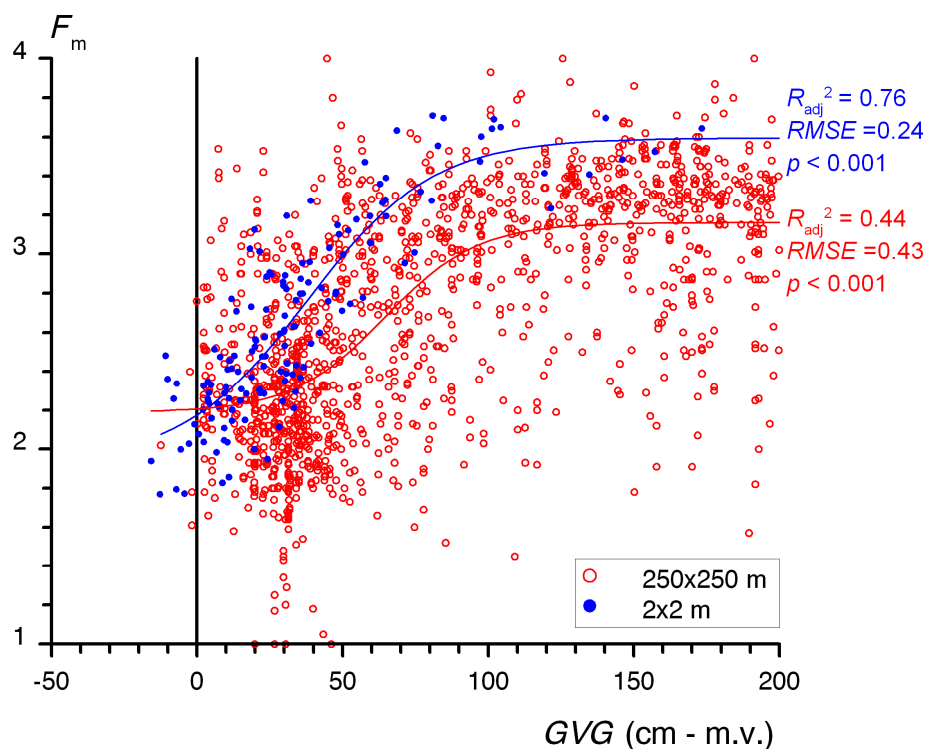
In het onderzoek vergelijken we hydrologische grootheden in cellen van 250 x 250 m met indicatiewaarden in opnamen van 2 x 2 m, een verschil in oppervlakte van maar liefst een factor 15625. Dit verschil in resolutie zal ongetwijfeld voor de nodige ruis zorgen. Niettemin moet er enig verband bestaan tussen wat het NHI berekent en wat de vegetatie aan vocht indiceert. Als dit niet het geval is, is het NHI ongeschikt voor de voorspelling van de vegetatie op nationale schaal, terwijl het NHI mede bedoeld is voor het bepalen van natuureffecten op dat schaalniveau (Anonymus, 2011). Dus: grosso modo moet het op zijn minst mogelijk zijn op basis van het NHI, natte natuurgebieden te onderscheiden van vochtige, en vochtige van droge.

Resultaten

Figuur 2 geeft de relatie weer tussen de GVG gesimuleerd in het nationale raster van 250 x 250 m cellen en de 'waargenomen' vochtindicatie F_m in vegetatieopnamen. Merk op dat de schaal van de GVG doorloopt tot maar liefst 80 m -mv. Hoewel de GVG in de praktijk soms wordt gebruikt voor grondwateronafhankelijke standplaatsen, is deze grootte daar niet voor bedoeld en kan hij alleen worden gebruikt voor standplaatsen die onder invloed staan van het grondwater. Na een aanvankelijk zeer sterke stijging buigt de puntenwolk in figuur 2 daarom snel af naar een gemiddelde waarde van ongeveer 3,5. De spreiding in F_m bij diepere GVG's heeft alles te maken met verschillen in bodemtextuur en humusgehalte, die de vochtleverantie en dus de vochtindicatie van de vegetatie bepalen. Figuur 3 geeft dezelfde relatie, maar nu alleen voor de 1403 opnamen (49% van het totaal) met een ondiepe GVG, dat wil zeggen met een GVG van minder dan 2 m -mv. Door de puntenwolk is een sigmoïde getrokken, die 44% van de variantie verklaart. In veldonderzoek waarbij de grondwaterstand langdurig is gemeten ter plaatse van vegetatieopnamen op natte en vochtige standplaatsen, is een verklaarde variantie van 76% gevonden (Bartholomeus e.a., 2010b). Deze relatie en de waarnemingspunten zijn ook in figuur 3 opgenomen. In vergelijking tot de veldmetingen liggen de gesimuleerde waarden systematisch dieper.



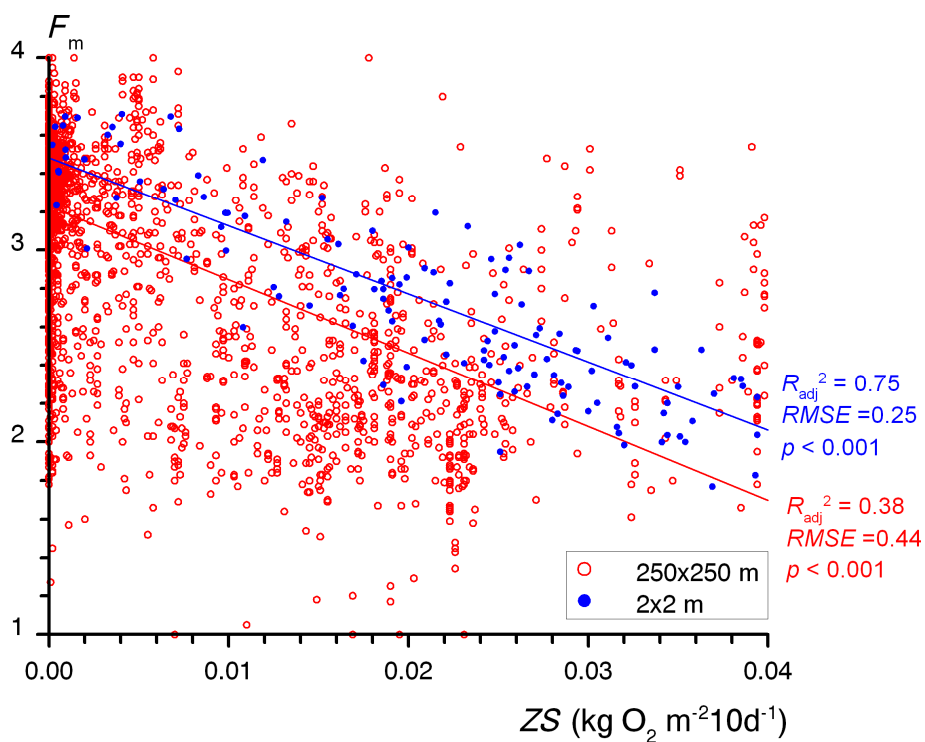
Figuur 2: Relatie tussen gesimuleerde GVG in 250 m cellen en vochtindicatie F_m (1 = water t/m 4 = droog) in vegetatieopnamen van gemiddeld 2 x 2 m.



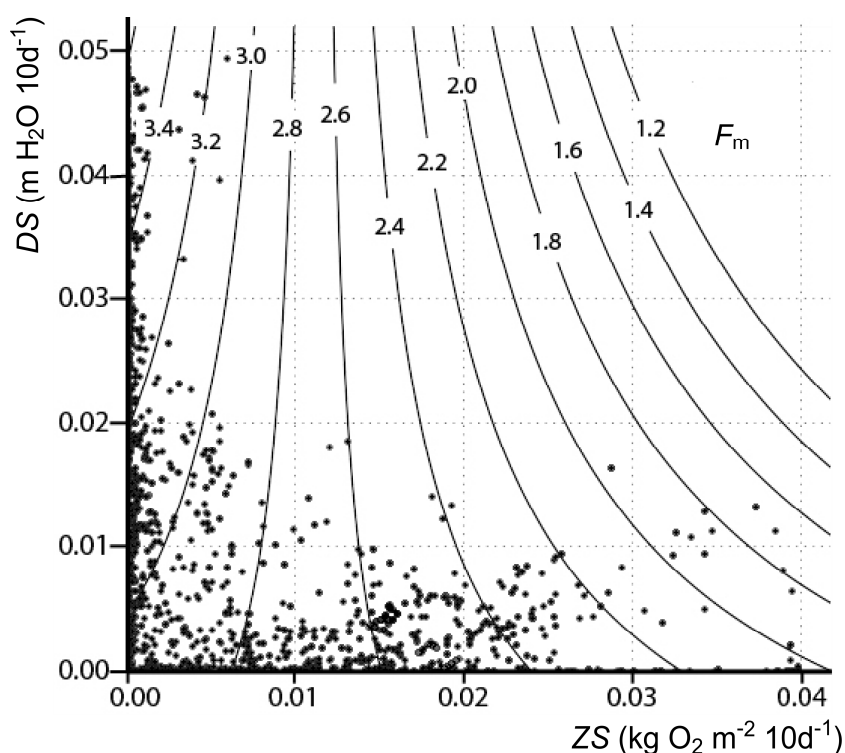
Figuur 3: Relatie tussen gesimuleerde GVG in 250 m cellen en vochtindicatie F_m in vegetatieopnamen voor opnamen met een GVG < 200 cm -m.v. Ter vergelijking is ook de relatie weergegeven voor GVG's die zijn afgeleid uit grondwaterstanden opgemeten bij de vegetatieopnamen van gemiddeld 2 x 2 m.

De relatie tussen zuurstofstress en vochtindicatie is weergegeven in figuur 4. Dit keer betreft het weer alle 2847 opnamen, dus ook die van droge standplaatsen. Lineaire regressie levert een verklaarde variantie op van 38%, waar, zie eveneens figuur 4, een betrekking op basis van veldgegevens uitkomt op 75% (Bartholomeus e.a., 2010b). Ook in dit geval wordt op basis van het NHI een drogere relatie gevonden. In tegenstelling tot de GVG is ZS een maat die, omdat hij samenhangt met de bodemtextuur, ook op grondwateronafhankelijke bodems bruikbaar is. Naarmate een bodem een fijnere textuur heeft zal hij in natte perioden eerder last hebben van een gebrek aan zuurstof, ook op grondwateronafhankelijke bodems. Tegelijk zal een dergelijke bodem wegens die fijne textuur minder snel last hebben van droogtestress. Beide stressfactoren zijn dus in zekere mate gecorreleerd, vandaar dat de punten in figuur 4 over het hele bereik van ZS verdeeld zijn. Nochtans voegt droogtestress DS wel degelijk wat aan de verklaarde variantie toe: is de verklaarde variantie 38% met alleen ZS (figuur 4), en 32% met alleen DS (resultaten hier niet getoond), beide factoren samen verklaren 46% van de variantie in F_m (figuur 5). Met hydrologische veldgegevens op opnameniveau bedraagt dit percentage 82.

Voor de opnamen hebben we ook nog onderzocht wat klimaatverandering kan gaan betekenen voor de hydrologische grootheden die van invloed zijn op de plantengroei (figuur 6). Onder het relatief natte W-scenario komt de GVG enigszins omhoog (figuur 6A1), maar onder het zeer droge W+ scenario verandert de GVG nauwelijks van plaats (figuur 6A2). Blijkbaar ligt de GVG net op een kruispunt tussen de nattere winters met een hogere grondwaterstand en de drogere zomers met een lagere grondwaterstand.



Figuur 4: Relatie tussen gesimuleerde zuurstofstress ZS in 250 m cellen en vochtindicatie Fm in vegetatieopnamen. Ter vergelijking is ook de relatie weergegeven voor ZS die gesimuleerd is op basis van het bodemtype en de grondwaterstanden opgemeten bij de vegetatieopnamen.



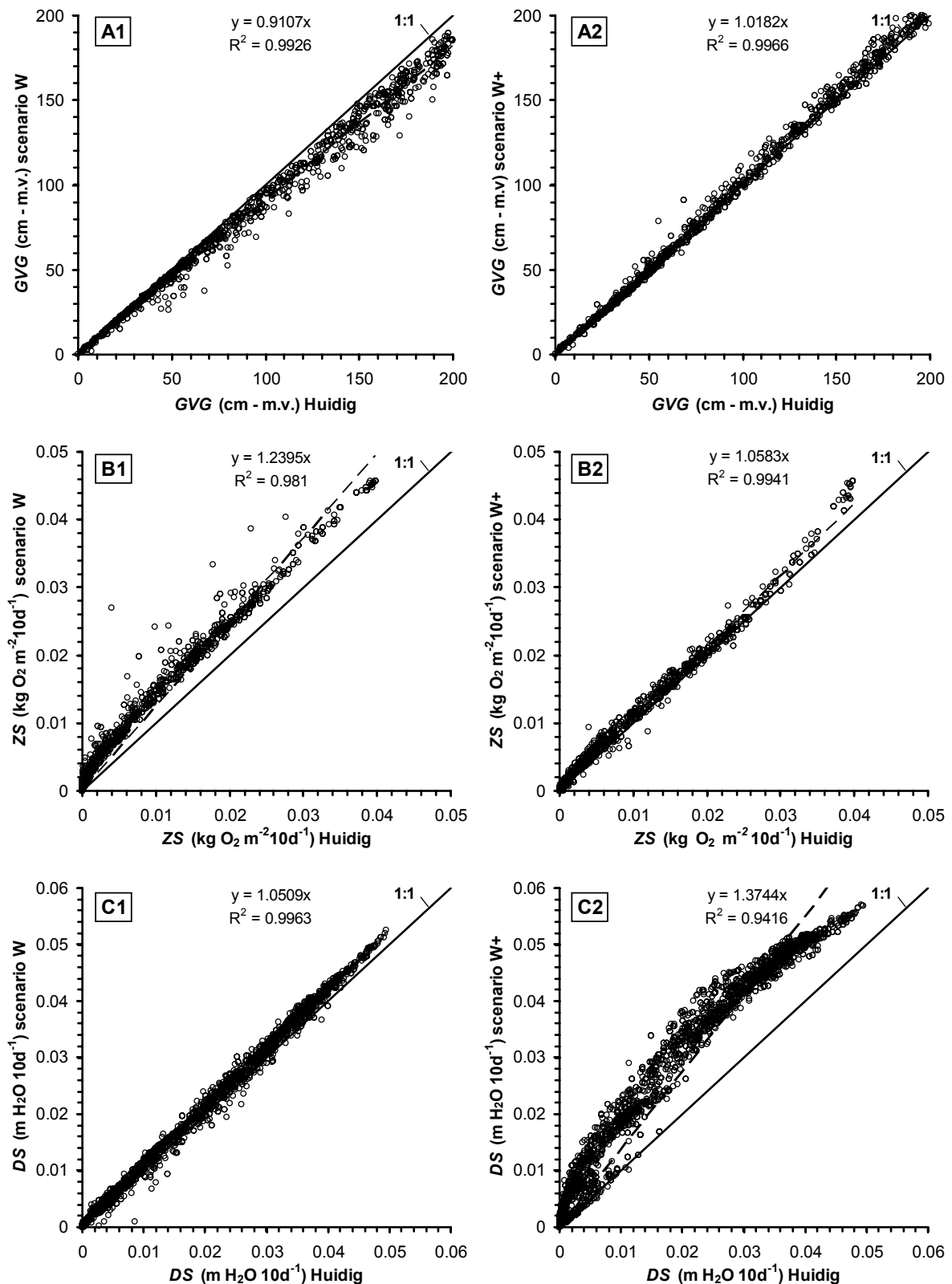
Figuur 5: Vochtindicatie Fm – weergegeven als contouren – als functie van op nationale schaal gesimuleerde zuurstofstress ZS en droogtestress DS ($R_{adj}^2 = 0,46$, $RMSE = 0,41$, $p < 0,001$).

Het effect van klimaatscenario's komt pas goed tot uitdrukking in de klimaatrobuuste maten zuurstofstress en droogtestress: zie figuur 6A en B. Beide maten nemen toe onder de twee scenario's, wat uitdrukking geeft aan een warmer en grilliger weer, met zowel watertekorten als wateroverlast. Onder het W-scenario is het vooral de zuurstofstress die flink stijgt (figuur 6B1), onder het droge scenario W+ neemt juist de droogtestress aanzienlijk toe (figuur 6C2). Zulke veranderingen in groeiomstandigheden kunnen grote gevolgen hebben voor de haalbaarheid van natuurdoelen (Knapp e.a., 2008, Bartholomeus e.a., 2011).

Discussie

In onze analyse vergeleken we de gegevens uit opnamen van 4 m² met die uit rastercellen van 62500 m², ofwel met cellen van maar liefst 12,5 voetbalveld groot. Iedereen die wel eens in de natuur rondbanjert en dan zijn ogen goed de kost geeft weet hoe enorm groot de variatie kan zijn binnen een dergelijke oppervlakte. Niet alleen de variatie in maaiveldhoogten kan enorm zijn, maar ook die in bodemtextuur en humusgehalte. Dat desondanks voor de natte en vochtige locaties een verklaarde variantie voor de vochtindicatie van 44% met de GVG wordt gevonden (figuur 4; alleen grondwaterafhankelijke standplaatsen) en 46% met zuurstofstress en droogtestress (figuur 5; alle punten), heeft ons positief verrast. Desondanks vinden we versie 2.0 van het NHI onvoldoende geschikt voor het voorspellen van de vegetatie van Nederland op nationale schaal, zoals de bedoeling was bij aanvang van project A1 in het FES-programma Klimaat voor Ruimte (zie Inleiding).

Er zal eerst nog een aantal verbeteringen moeten worden doorgevoerd voordat het NHI een geschikt instrument is voor het bepalen van natuureffecten op nationale schaal. Uit een recent uitgevoerde validatie van de door ons gebruikte modelversie 2.0, bleek dat het NHI nog te onnauwkeurig is voor het beantwoorden van vragen uit de regio (Stowa, 2011). Het NHI is nog niet gekalibreerd en bovendien is versie 2.0 nog niet door alle partijen die deelnemen aan de ontwikkeling goedgekeurd voor landelijke beleidsanalyses. Ook onze analyse lijkt een onvolkomenheid aan het licht te hebben gebracht, namelijk dat natte locaties systematisch te droog worden berekend (figuur 3). Dat kan te maken hebben met de voor ecologische doeleinden toch nog betrekkelijk grote rastercellen, waardoor kleine depressies in het landschap, zoals langs beeklopen, te droog uitpakken, maar mogelijk is er meer aan de hand, zoals een te laag ingevoerde lekweerstand. Sinds het verschijnen van versie 2.0 is er weer een aantal verbeteringen aan het NHI doorgevoerd met versie 2.1 als resultaat (Hoogewoud e.a., 2011) en in oktober 2012 zal er een gekalibreerde modelversie verschijnen.



Figuur 6: Het huidige klimaat (x-as) en de klimaatscenario's W en W+ (y-as, respectievelijk linker en rechter figuren) met elkaar vergeleken op basis van drie met het NHI gegenereerde hydrologische groot-heden: (A) gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand GVG; (B) zuurstofstress ZS en (C) droogtestress DS. In figuur A zijn alleen opnamen met een ondiepe GVG opgenomen, figuur B en C bevatten alle opname-punten.

Daarnaast hebben wij vergissingen gemaakt bij de nabewerking van de NHI-uitkomsten, namelijk bij de berekening van beide stressfactoren. Die hebben wij gebaseerd op de werkelijke vegetatie en niet, zoals had gemoeten, op de vegetatie van een standaardgewas. Dit behoeft enige uitleg: om het vochtregime van een standplaats te karakteriseren kan men de berekening van ZS en DS het beste uitvoeren voor een standaardgewas (Runhaar e.a., 1997, Dyer, 2009), zoals voor een korte en de grond volledig bedekkende grasmatten (Allen e.a., 2005). In de natuur zijn planten namelijk aangepast aan een tekort aan zuurstof of water. Een soort als Riet, bijvoorbeeld, heeft luchtwoefsels (aerenchym) waarmee hij zuurstof naar zijn wortels transporteert, zodat hij zelden of nooit aan zuurstofstress lijdt, ook niet op anaerobe bodems. Een relatie tussen deze soort en de zuurstofloosheid van de bodem, zal dus niet of bijna niet aan het licht komen op basis van de werkelijke stress die hij ondervindt. Hetzelfde geldt voor droogtestress: een vegetatie op een duintop zal niet veel droogtestress ondervinden omdat de planten er hun verdampingsverlies beperken met een gunstige anatomische bouw (zoals de cactusachtige Muurpeper) én door het creëren van veel kale grond, die weinig verdampt zodat er meer water overblijft voor de wortelende planten (Witte e.a., 2008, Bartholomeus e.a., 2010a). Door nu te rekenen met de eigenschappen van een standaardgewas krijgen we maten voor het vochtregime van de bodem die onafhankelijk zijn van de werkelijke, aangepaste vegetatie. Op basis van zulke maten kan de vegetatie veel beter worden voorspeld, dan op basis van de werkelijke stress die planten ondervinden. Zoals vermeld is de berekening van beide stressfactoren echter niet helemaal goed gegaan: ZS is weliswaar gebaseerd op een standaardgewas, maar ook op de vochtgehalten die horen bij de verdampingseigenschappen van de 'werkelijke' vegetatie zoals die is geschematiseerd in het NHI. En DS hebben we volledig gebaseerd op de transpiratie van de in het NHI geschematiseerde vegetatie. Deze combinaties zullen zeker voor de nodige fouten hebben gezorgd.

Met een verbeterd NHI willen we de berekeningen van beide stressfactoren graag nog eens over doen, maar dan op de juiste manier. Daarnaast willen we een volgende analyse meteen aangrijpen om de uitkomsten van het NHI ruimtelijk neer te schalen, onder andere aan de hand van het Actueel Hoogtebestand Nederland. Na deze acties verwachten we zeker 60% van de variantie in vochtindicatie te kunnen verklaren, een percentage dat erop begint te lijken voor een voorspelling van de vegetatie op nationale schaal. Als het zo ver is presenteren we de resultaten graag in dit tijdschrift.

Besluit

In dit artikel hebben we laten zien dat vegetatieopnamen kunnen worden gebruikt voor het valideren van hydrologische modellen. Er zijn in Nederland zeer veel goed gelokaliseerde opnamen voor dit doel te gebruiken; desgewenst kan men gericht opnamen bijmaken om extra informatie te verzamelen van het modelgebied. Bovendien schept deze studie gunstige verwachtingen van het NHI om samen met ecohydrologische modellen te komen tot een goede voorspelling van de vegetatie op nationale schaal. Worden die modellen gebruikt voor klimaatprojecties, dan geldt dat klimaatrobuuste maten als zuurstofstress en droogtestress moeten worden toegepast en dat karakteristieke grondwaterstanden, zoals de GVG, uit den boze zijn. Onzekerheden in het NHI zullen altijd blijven bestaan en de kunst is daar verstandig mee om te gaan. Dat kan

met Probe, want dit model biedt de mogelijkheid onzekerheden in de hydrologische invoer door te vertalen in de uitkomsten. Dat leidt dan, per rastercel, tot de gesimuleerde kans op voorkomen van vegetatietypen, inclusief de bandbreedte rond die kansen (Witte e.a., 2010). Deze informatie kan daarna weer worden geaggregeerd tot handzame informatie, bijvoorbeeld tot gesimuleerde oppervlakten van verschillende natuurtypen binnen de EHS of tot een kaart met de natuurwaarde van Nederland, uiteraard weer met vermelding van de onzekerheidsmarges.

Referenties

- Allen, R.G., L.S. Pereira, M. Smith, D. Raes en J.L. Wright (2005)** FAO-56 Dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions; *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 1, pag 2-13.
- Anonymus (2011)** Toetsing NHI 2.0 in de regio, Samenvatting; pag 24; STOWA, Amersfoort.
- Bartholomeus, R.P., B. Voortman en J.P.M. Witte (2010a)** De toekomstige grondwateraanvulling; in: *H₂O*, nr 17, pag 35-37.
- Bartholomeus, R.P., J.P.M. Witte, P.M. van Bodegom en J.C. van Dam (2010b)** Nieuwe maat voor bodemvochtregime ook geschikt onder toekomstig klimaat; in: *H₂O*, nr 3, pag 37-39.
- Bartholomeus, R.P., J.P.M. Witte, P.M. Van Bodegom, J.C. van Dam en R. Aerts (2008)** Critical soil conditions for oxygen stress to plant roots: substituting the Feddes-function by a process-based model; in: *Journal of Hydrology*, jrg 360, pag 147-165.
- Bartholomeus, R.P., J.P.M. Witte, P.M. van Bodegom, J.C. van Dam en R. Aerts (2011)** Climate change threatens endangered species by stronger and interacting water-related stresses; in: *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, ingediend.
- Dyer, J. (2009)** Assessing topographic patterns in moisture use and stress using a water balance approach; in: *Landscape Ecology*, jrg 24, pag 391-403.
- Engelen, G.B. en G.P. Jones (1986)** Developments in the analysis of groundwater flow systems; IAHS-publicatie 163.
- Goes, B. en J. Verkaik (2008)** Berekening van verzadigde grondwaterstroming met het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium; in: *Stromingen*, jrg 14, nr 4, pag 7-23.
- Hoogewoud, J.C. (2009)** GWNatura2000; Verbeteringen aan het regionale grondwatermodel MIPWA ten behoeve van Natura2000 toepassingen - deel 1: aanpassing van de grondwaterstanden in de Drentsche Aa; Deltares, Utrecht.
- Hoogewoud, J.C., A.A. Veldhuizen en G. Prinsen (2011)** NHI toetsing. Ontwikkeling en toepassing van methode voor toetsing van NHI 2.1, inclusief vergelijking met NHI2.0.
- Hurk, B. van den, A. Klein 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 en S. Drijfhout (2006)** KNMI Climate change scenarios 2006 for the Netherlands; KNMI, De Bilt.
- Käfer, J. en J.P.M. Witte (2004)** Cover-weighted averaging of indicator values in vegetation analyses; in: *Journal of Vegetation Science*, jrg 15, pag 647-652.

- Knapp, A.K., C. Beier, D.D. Briske, A.E.T. Classen, Y. Luo, M. Reichstein, M.D. Smith, S.D. Smith, J.E. Bell, P.A. Fay, J.L. Heisler, S.W. Leavitt, R. Sherry, B. Smith en E. Weng (2008)** Consequences of more extreme precipitation regimes for terrestrial ecosystems; in: *BioScience*, jrg 58, pag 811–821.
- Kros, J., G.J. Reinds, W. de Vries, J.B. Latour en M.J.S. Bollen (1995)** Modelling of soil acidity and nitrogen availability in natural ecosystems in response to changes in acid deposition and hydrology; SC-DLO, Wageningen.
- Runhaar, J., J.P.M. Witte en P.H. Verburg (1997)** Ground-water level, moisture supply, and vegetation in the Netherlands; in: *Wetlands*, jrg 17, pag 528–538.
- Runhaar, J., W. van Landuyt, C.L.G. Groen, E.J. Weeda en F. Verloove (2004)** Herziening van de indeling in ecologische soortengroepen voor Nederland en Vlaanderen; in: *Gorteria*, jrg 30, pag 12–26.
- Schaap, J. en P. Dik (2007)** MetsSWAP meet zich met SWAP. Simulatie van de onverzadigde zone voor regionale en nationale modellen; in: *Stromingen*, jrg 13, nr 3, pag 15–25.
- STOWA (2011)** Toetsing NHI 2.0 in de regio, samenvatting; STOWA, Amersfoort.
- Wamelink, G.W.W., J.P. Mol-Dijkstra, H.F. van Dobben, J. Kros en F. Berendse (2000)** Eerste fase van de ontwikkeling van het Successie Model SUMO 1; Verbetering van de vegetatiemodellering in de Natuurplanner; Alterra, Wageningen.
- Witte, J.P.M., J. Runhaar, R. van Ek en D.J. van der Hoek (2009)** Eerste landelijke schets van de ecohydrologische effecten van een warmer en grilliger klimaat; in: *H₂O*, nr 16/17, pag 37–40.
- Witte, J.P.M., M. de Haan en M.J.M. Hootsmans (2007a)** PROBE: een ruimtelijk model voor vegetatiedoelen; in: *Landschap*, jrg 24, pag 77–87.
- Witte, J.P.M., R.B. Wójcik, P.J.J.F. Torfs, M.W.H. de Haan en S. Hennekens (2007b)** Bayesian classification of vegetation types with Gaussian mixture density fitting to indicator values; in: *Journal of Vegetation Science*, jrg 18, pag 605–612.
- Witte, J.P.M., R.P. Bartholomeus, D.G. Cirkel en P.W.T.J. Kamps (2008)** Ecohydrologische gevolgen van klimaatverandering voor de kustduinen van Nederland; Kiwa rapport KWR 08.006, Nieuwegein.
- Witte, J.P.M., R.P. Bartholomeus, J.C. Douma, J. Runhaar en P.M. van Bodegom (2010)** De vegetatiemodule van Probe-2; KWR rapport BTO-2010.024(s), Nieuwegein.