
Hoe met remote sensing via de vegetatie bodem en water kunnen worden gekarteerd

Hans Roelofsen¹, Jorg van Amerongen²,
Lammert Kooistra³, Han Runhaar⁴ en Jan-Philip Witte⁵

Inleiding

Remote sensing is de verzamelterm voor diverse vormen van aardobservatie. De meest klassieke vorm zijn de zwart-wit luchtfoto's, terwijl tegenwoordig de Google Earth beelden van bijna de hele wereld het meest bekend zijn. Minder bekend zijn de observaties van het aardoppervlak door satellieten (spaceborne remote sensing). Hierin zijn verschillende categorieën te onderscheiden: optische sensoren die in diverse golflengtes de intensiteit registreren van de door het aardoppervlak gereflecteerde zonnestraling; passieve sensoren die de door het aardoppervlak uitgezonden langgolvlige straling registreren (zogenaamde radiometers); en actieve sensoren die door middel van radiopulsen de afstand tot het aardoppervlak bepalen (RADAR en LiDAR). Observaties vanuit vliegtuigen (airborne remote sensing) zijn eveneens mogelijk. Deze kenmerken zich door een hogere ruimtelijke resolutie (meer detail zichtbaar) en registratie van een groter bereik aan golflengtes (hogere spectrale resolutie). Airborne remote sensing is relatief duur omdat de beelden slechts op bestelling worden gemaakt, in tegenstelling tot spaceborne gegevens die continu worden ingewonnen. Gebruik van remote sensing data voor diverse commerciële - en onderzoekstoepassingen wordt gestimuleerd door middel van het de Satellietdataportaal (<http://www.spaceoffice.nl/nl/Satellietdataportaal>). In dit door de overheid gefinancierde portaal worden ruwe beelden van diverse satellieten gratis beschikbaar gesteld. De beschikbaarheid van nieuwe remote sensing gegevens voor de nabije toekomst is gegarandeerd door de lancering van de Landsat Data Continuity Mission door NASA, in februari dit jaar, en door de 'Sentinel' reeks observatiesatellieten die vanaf 2014 gelanceerd worden door de European Space Agency (ESA) (Berger e.a., 2012).

De vraag wat remote sensing kan betekenen voor hydrologische toepassingen stond centraal tijdens de NHV voorjaarsbijeenkomst, in mei 2012. Daar betoogden wij dat

¹ **Hans Roelofsen**, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein, (Hans.Roelofsen@kwrwater.nl)

² **Jorg van Amerongen**, Wageningen Universiteit, (jorg.vanamerongen@wur.nl)

³ **Lammert Kooistra**, Laboratorium voor Geo-informatiekunde en Remote Sensing, Wageningen (lammert.kooistra@wur.nl)

⁴ **Han Runhaar**, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein (Han.Runhaar@kwrwater.nl)

⁵ **Jan-Philip Witte**, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein & VU Systems ecology, Amsterdam (Flip.Witte@kwrwater.nl)

diverse hydrologische grootheden afgeleid kunnen worden van remote sensing beelden. Dit artikel is een verdere uitwerking van dit betoog. We willen met deze bijdrage aantonen dat de natuurlijke vegetatie een nuttige vertaalsleutel kan vormen tussen remote sensing observaties enerzijds en eigenschappen van de ondergrond anderzijds. Eerst beschrijven we een methode om het bodemmilieu waarin wilde planten leven, de standplaats, te karakteriseren in de vorm van zogenaamde indicatiewaarden. Daarna behandelen we remote sensing technieken om die waarden ruimtelijk te extrapoleren. Ten slotte schetsen we de mogelijkheden om de aldus verkregen kaarten van indicatiewaarden te vertalen naar hydrologische grootheden, evenals de mogelijkheden om de gevolgen van verdroging voor natuurgebieden te monitoren.

Indicatiewaarden als karakteristieken van vegetatie en standplaats

Om de soortensamenstelling van het plantendek te beschrijven worden door veldbiologen vegetatieopnamen gemaakt. Een vegetatieopname is een lijst van plantensoorten die zijn aangetroffen in een rechthoekig oppervlak binnen het plantendek (afbeelding 1). Een gemiddelde maat voor een dergelijk vlak, in feite een steekproef uit het continue plantendek, is ongeveer vier vierkante meter. Vanaf de jaren dertig van de vorige eeuw zijn overal in Nederland zulke opnamen gemaakt. De Nederlandse biologen zijn fanatiek, want onderhand zijn de gegevens van meer dan 500000 opnamen opgeslagen in het gegevensbestand Synbiosys (Schaminée e.a., 2012). Opnamen kunnen worden gebruikt om informatie over de standplaats af te leiden. Er zijn verschillende lijsten in gebruik waarop de voorkeur van iedere soort voor standplaatsfactoren zoals zout, water, voedselrijkdom en zuurgraad wordt uitgedrukt op een ordinale (rangorde) schaal. Internationaal bekend is de lijst van Ellenberg, met indicatiewaarden op een negendelige schaal (Ellenberg, 1992). Een soort met bijvoorbeeld een



	OPNAME	Indicatiewaarde
Vegetatietype Associatie van Moeraswolfsklauw en Snavelbies	<i>Aulacomnium palustre</i> →	2.64
	<i>Drosera rotundifolia</i> →	2.20
	<i>Erica tetralix</i> →	2.00
	<i>Lycopodium inundatum</i> →	2.50
	<i>Rhynchospora alba</i> →	2.00
	<i>Rhynchospora fusca</i> →	2.00
	<i>Scirpus cespitosus</i> →	2.00
	Gemiddelde	2.19

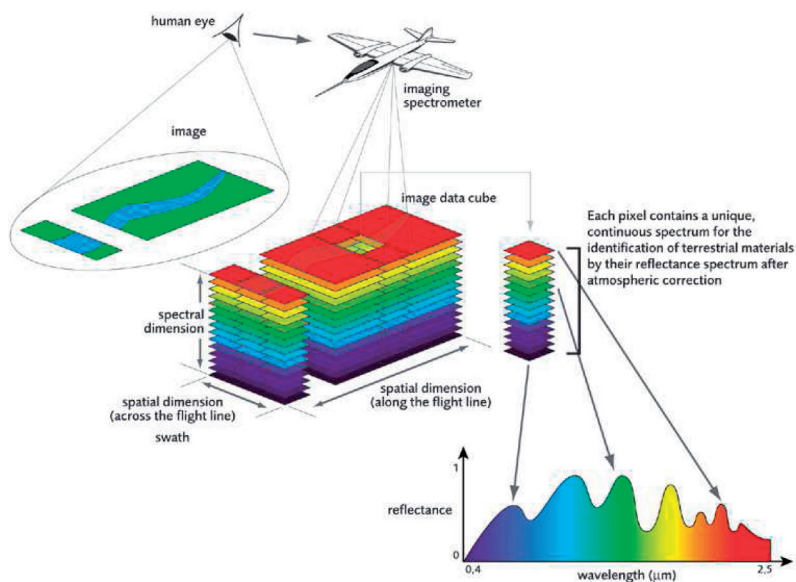
Afbeelding 1: Een vegetatieopname en het daarvan afgeleide vegetatietype. De indicatiewaarde per plantensoort wordt gebruikt om de gemiddelde indicatiewaarde voor vocht te berekenen door Witte e.a. (2007) afgeleid van Runhaar e.a. (2004b).

vochtindicatie van 1 komt, volgens deze lijst, bij voorkeur op extreem droge bodems voor; een soort met een indicatie van 9 op zeer natte bodems. Voor Nederlandse plantensoorten is een indeling gemaakt van plantensoorten in ecologische groepen (Runhaar e.a., 2004a), waarvan later indicatiewaarden zijn afgeleid voor vochtgehalte (mF, 1= open water tot 4= zeer droog), voedselrijkdom (mN, 1= zeer voedselarm tot 3= zeer voedselrijk), zoutgehalte (mS, 1= zoet water tot 3= zout water) en zuurgraad (mR, 1= zuur, 3= basisch) (Witte e.a., 2007). Een belangrijke eigenschap van deze indicatiewaarden is de continue schaal, dat wil zeggen dat de indicatiewaarde elke reële waarde op de schaal kan aannemen. Indicatiewaarden van alle soorten binnen een opname worden vaak gemiddeld om op die manier de standplaats van de vegetatie te karakteriseren (Käfer en Witte, 2004) (afbeelding 1).

Internationaal wordt momenteel volop onderzoek gedaan aan functionele eigenschappen van soorten ('*plant traits*'), zoals planthoogte, bewortelingsdiepte, '*specific leaf area*' (een maat voor de dichtheid van bladeren in mm² mg⁻¹) en fosfaatgehalte van het blad (Cornelissen e.a., 2003). Met behulp van een lijst met planteigenschappen kan weer een gemiddelde planteigenschap van een vegetatieopname worden bepaald, welke als alternatief voor indicatiewaarden gebruikt kan worden.

Karteren van gemiddelde indicatiewaarden met remote sensing

De ruimtelijke resolutie van de huidige remote sensing sensoren is onvoldoende om de aanwezigheid van individuele planten te detecteren (tenminste van grassen en kruiden; identificatie van individuele boomkronen is wel mogelijk (Colgan e.a., 2012)). De meeste airborne sensoren hebben echter wel voldoende hoge ruimtelijke resolutie (pixels van 3-5 m) om kleinschalige variatie in de vegetatie te registreren. Daarnaast be-



Afbeelding 2: Waar het menselijk oog slechts gevoelig is voor straling in een beperkt golflengte bereik, zien hyperspectrale remote sensing sensoren een gedetailleerde spectrale handtekening voor elke pixel.

Bron: apex-esa.org

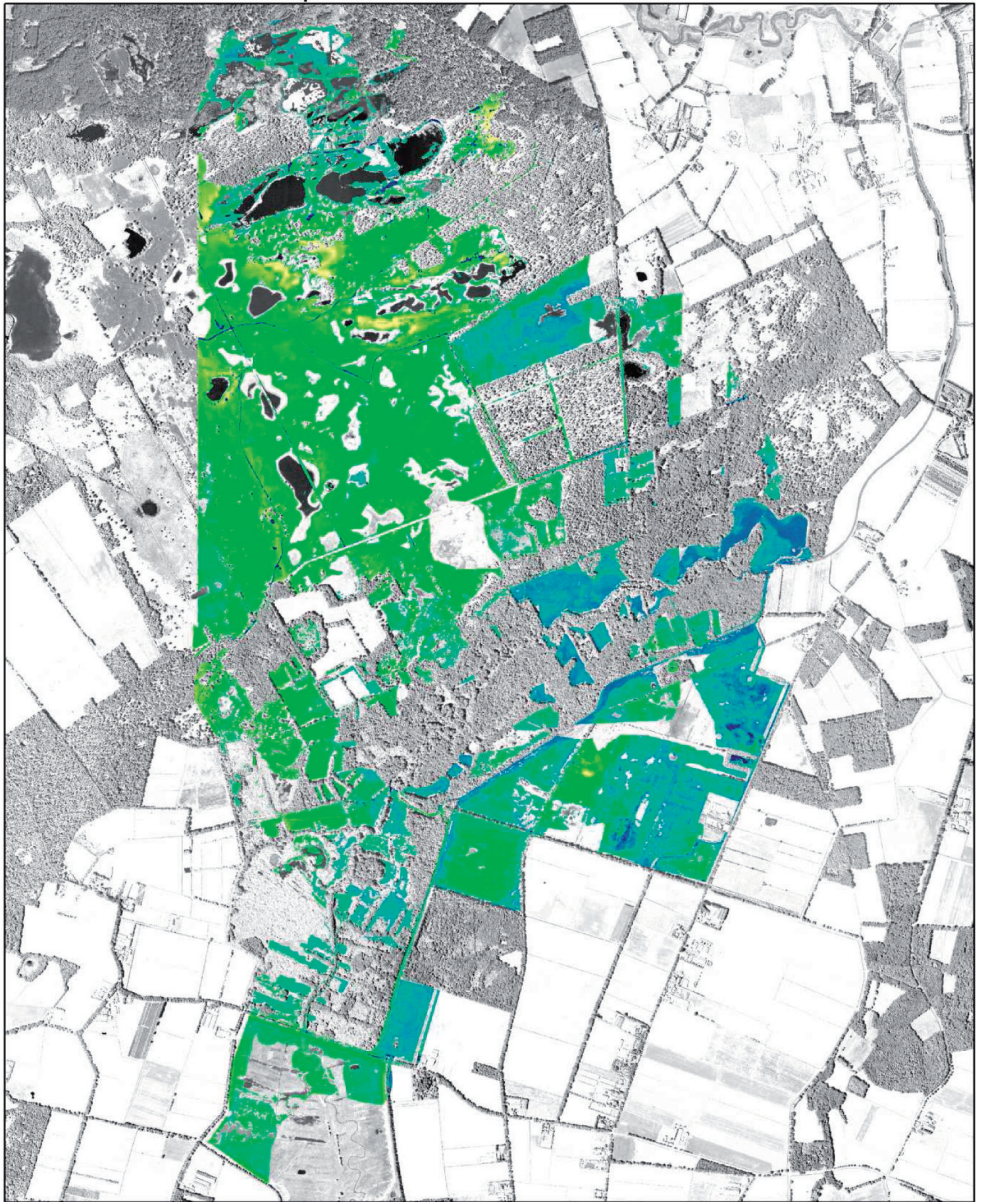
schikken zij over de juiste spectrale resolutie om bepaalde kenmerken van de vegetatie te detecteren. Zij registreren de gereflecteerde zonnestraling in een groot aantal (> 100) aaneengesloten spectrale banden, zodat ze per pixel een 'spectrale handtekening' waarnemen (afbeelding 2). Deze zogenaamde hyperspectrale sensoren verstrekken informatie van zowel het zichtbare spectrum (400-700 nm) tot diep in het infrarode spectrum (meestal tot ongeveer 2500 nm). Nuances in de vegetatie die niet zichtbaar zijn met het blote oog worden op deze manier zichtbaar.

Er staan de remote sensing wetenschapper verschillende methodes tot zijn beschikking om de spectrale gegevens te vertalen naar betekenisvolle informatie. Zo kunnen pixels met een bekend landgebruik worden gebruikt om delen van de 'spectrale ruimte' te identificeren die kenmerkend zijn voor een bepaald landgebruik. Met behulp van bijvoorbeeld een maximum likelihood classificatie (Foody e.a., 1992) kunnen vervolgens alle pixels worden toegekend aan een van de waargenomen landgebruikstypes. Een alternatieve methode is om het spectrale signaal van iedere pixel te ontleden in de relatieve bijdrage van verschillende klassen (bijvoorbeeld: 'het spectrale signaal wijst op 60% weiland, 10% water en 30% bebouwd oppervlak).

Indicatiewaarden zijn continue variabelen, wat ten opzichte van klassen als voordeel heeft dat ze statistisch kunnen worden gekalibreerd aan reflectiewaarden. Een geschikte regressie methode hiervoor is partial least squares regression (PLSR), een methode waarbij het grote aantal verklarende variabelen (de reflectiewaarden van de spectrale banden) worden geprojecteerd in nieuwe, onafhankelijke, variabelen en vervolgens met multi-lineaire regressie aan de afhankelijke variabelen (de opnamegemiddelde indicatiewaarden) worden gerelateerd (Wold e.a., 2001). Hiervoor is een set van vegetatieopnames binnen het remote sensing beeld nodig, zodat een kalibratie-set met bekende gemiddelde indicatie- en reflectiewaarden kan worden samengesteld. Eenmaal gekalibreerd kan het model gevalideerd worden met een aanvullende set vegetatieopnames en toegepast worden op alle resterende pixels van het beeld (Witte en Kooistra, 2008; Roelofsen e.a., in press).

Het schatten van de gemiddelde indicatiewaarden gaat uit van de hypothese dat planten met een bepaalde combinatie aan indicatiewaarden een consistente spectrale handtekening hebben. Er zijn aanwijzingen dat dit het geval is (Schmidtlein, 2005). Bijvoorbeeld, een hoge gemiddelde indicatiewaarde voor voedselrijkdom (Nm) bijvoorbeeld (dat wil zeggen: een voedselminnende vegetatie), manifesteert zich via plant-eigenschappen die het spectrale signaal direct beïnvloeden, zoals hoge LAI waarden (Leaf Area Index, blad oppervlak per eenheid bodemoppervlak), hoge chlorofylgehaltenes en een hoog nutriëntengehalte in de bladeren. Het is aangetoond dat chemische bladbestanddelen inkomende zonnestraling in bepaalde golflengtes sterk absorberen. Chlorofyl bijvoorbeeld, absorbeert rode en blauwe straling (rond 400 en 600 nm golflengte), reflecteert matig in het groene spectrum (500 nm) en zeer sterk in het nabij infrarood (700-1500 nm). De mate van absorptie correleert met de concentratie chlorofyl in het blad. Op soortgelijke manier uit een hoge gemiddelde zoutindicatie (mS) (hoog zoutgehalte) zich in dikke, vettige bladeren en duidt een lage gemiddelde vochtindicatie (mF) op weinig droge stof in de bladeren. Daarnaast draagt de ondergrond bij aan het spectrale signaal: op zeer droge of zeer voedselarme weinig begroeide standplaatsen kan de kale bodem bijdragen aan een karakteristiek spectraal signaal. Complicaties treden op als identieke indicatiewaarden aanwezig zijn bij zeer verschillende vegetaties. Bijvoorbeeld, een blauwgrasland en een droge heide zijn

mF estimation of Kampina



Legend



0 0.5 1 2 Kilometer



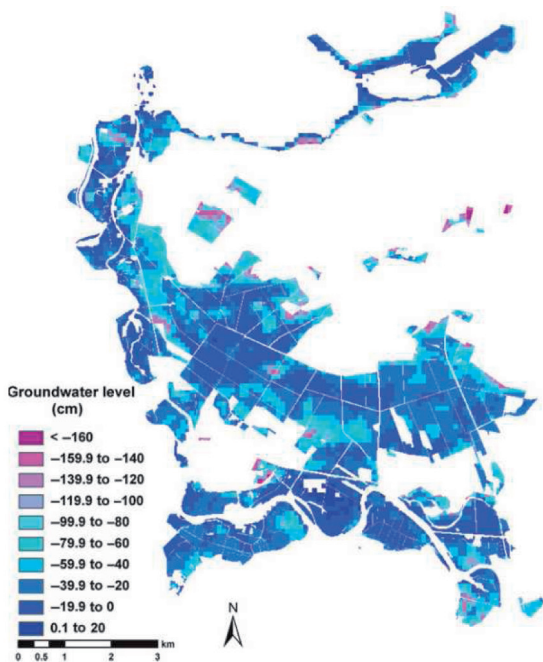
Afbeelding 3: Geschatte indicatiewaarden voor vocht gehalte in de Kampina. Bron: (Amerongen, 2013).

beide kenmerkend voor een voedselarme bodem (lage mN), maar verschillen sterk in vegetatiestructuur en vochtgehalte en daardoor tevens in spectrale handtekening. De eerste schatting van indicatiewaarden vanuit een remote sensing beeld zijn gemaakt voor een alpenweide in Oostenrijk (Schmidlein, 2005), waarbij mF, mN en zuurindicatie (mR) werden gerelateerd aan reflectiewaarden in het zichtbare en nabij infrarood spectrum. De verklaarde variatie in een kruisvalidatie bedroeg voor mF, mN en mR respectievelijk 58, 66 en 68%. De combinatie van optische gegevens en topografische gegevens kan de voorspelbaarheid van indicatorwaarden verhogen (Ecker e.a., 2010). De oppervlaktetemperatuur van het aardoppervlak wordt geregistreerd door de ASTER radiometer aan boord van de NASA Terra satelliet. Deze waarden werden gebruikt door (Kaiser e.a., 2012). Voor een graslandreservaat nabij Berlijn vonden zij een verklaarde variatie van 73% voor het verband tussen oppervlaktetemperatuur (gemeten in een resolutie van 90x 90 m) en mF (berekend uit gelijk met de satellietbeelden gemaakte vegetatieopnamen).

Onderzoek bij KWR Watercycle Research Institute beoogt op vergelijkbare wijze indicatiewaarden te karteren. Voor het oostelijk deel van Ameland is dit redelijk succesvol gedaan voor mS, mF en mN, gebruikmakend van superspectrale data (21 spectrale banden) met 3.5m ruimtelijke resolutie. Dankzij een geavanceerdere regressie techniek, Gaussian Process Regression (Verrelst e.a., 2012), vonden wij iets betere resultaten vergeleken met (Schmidlein, 2005), met verklaarde variaties van 77, 65 en 76% voor respectievelijk mS, mF en mN (Roelofsen e.a., submitted). In samenwerking met het Laboratorium voor Geo-informatiekunde en Remote Sensing van de Wageningen Universiteit (WUR) en de afdeling systeemecologie van de Vrije Universiteit (VU) wordt gewerkt aan een verdere verbetering van deze methode. In recent onderzoek in de Kampina (Noord-Brabant) combineerden wij hyperspectrale data met hoogtegegevens uit het Actueel Hoogtebestand (AHN-2). De verklaarde variatie bedroeg 82, 65 en 51% voor respectievelijk mR, mF en mN (afbeelding 3). Voor dit studiegebied waren de hoogtegegevens alleen voor mF van toegevoegde waarde (Amerongen, 2013), wat logisch is omdat de relatieve grondwaterstand, en daarmee het vochtgehalte van de bodem, gerelateerd is aan de hoogteligging.

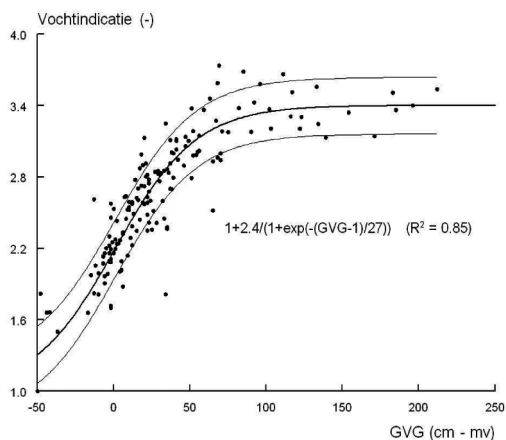
Van indicatiewaarden naar fysische grootheden

Op basis van veldmetingen kunnen indicatiewaarden worden vertaald naar fysische grootheden. Zo bestaat er, op basis van langdurig gemeten grondwaterstanden bij vegetatieopnamen, een heel duidelijk verband tussen de gemiddelde voorjaars-grondwaterstand (GVG) en de indicatiewaarde voor vochttoestand (Runhaar e.a., 1997a; Bartholomeus e.a., 2008a; Kaiser e.a., 2012). Zie bijvoorbeeld afbeelding 5, dat het verband voor Nederland toont tussen de GVG en mF. Op basis van een dergelijk empirisch verband kan de GVG, inclusief standaardafwijking, worden geschat wanneer eenmaal de indicatiewaarde via remote sensing is vastgesteld. (Kaiser e.a., 2012) hebben dit voor hun graslandreservaat in Oost-Duitsland gedaan, waarbij mF is voorspelt met behulp van thermische satellietbeelden. Hierbij is geen rekening gehouden met de onzekerheid die wordt geïntroduceerd door het gebruik van satellietbeelden en door de empirische relatie tussen grondwaterstand en mF. Hun resultaat is weer gegeven in afbeelding 4.

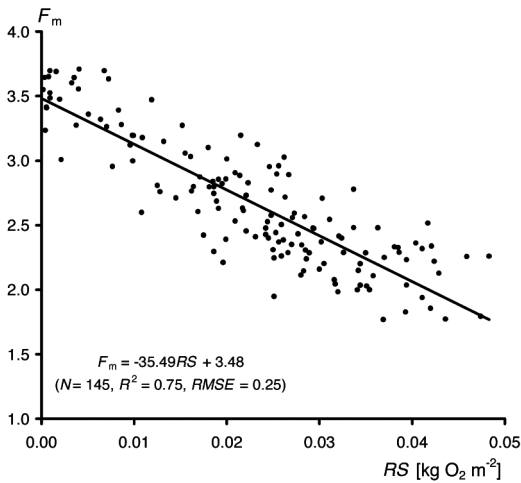


Afbeelding 4: Via thermische satellietbeelden en lokale vegetatieopnamen gekarteerde gemiddelde grondwaterstand (in cm ten opzichte van maaiveld) voor een graslandreservaat bij Berlijn.

Afbeelding 5 toont dat de GVG alleen een goede voorspeller is voor mF (en andersom), bij ondiepe grondwaterstanden. Beneden een GVG van pakweg 1 m min maaiveld verklaart de GVG niets meer: de regressielijn loopt dan nagenoeg horizontaal bij een waarde van $mF \approx 3.4$. Beneden deze grens hebben we overwegend te maken met hangwaterprofielen en zegt de GVG weinig of niets meer over de vochttoestand. Variatie rond de asymptoot heeft te maken met verschillen in de beschikbaarheid van bodemvocht, welke sterk samenhangen met de bodemtextuur en het organische stof gehalte. Ondiepe grondwaterstanden werken vooral door op de beschikbaarheid van zuurstof in het wortelmilieu (Runhaar e.a., 1997b). Hoewel de zuurstofbeschikbaarheid tevens wordt bepaald door bodemtextuur en organische stof (Bartholomeus e.a., 2008b) kan mF op natte en vochtige bodems in de praktijk goed uit de GVG worden geschat.

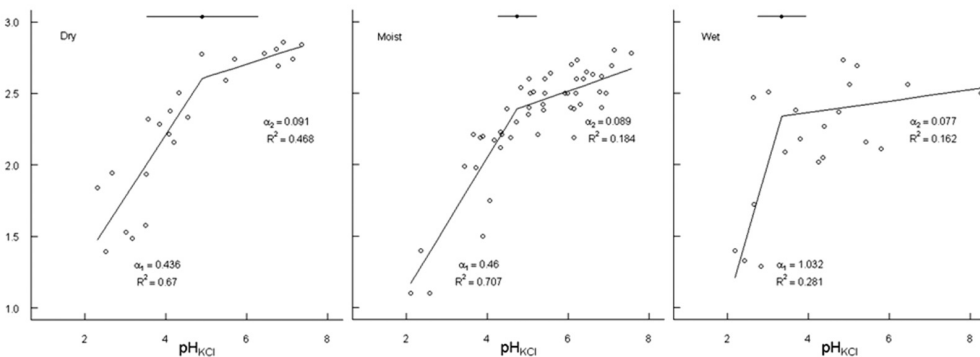


Afbeelding 5: Relatie, inclusief bandbreedte, tussen de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand en de van Runhaar e.a. (2004b) afgeleide gemiddelde vochtindicatie van de vegetatie (Witte e.a., 2007). Gegevens van Runhaar (1989).



Afbeelding 6: Relatie tussen gesimuleerde potentiële zuurstofstress en vochtindicatie (Bartholomeus e.a., 2012).

Hoe ook gedefinieerd, droogtestress is een maat met een fysiologische betekenis en daardoor geschikt voor gebruik voor extrapolaties naar bijvoorbeeld andere bodemtypen en klimaatscenario's. Dit geldt niet voor de GVG. De GVG, als schatter voor de beschikbaarheid van zuurstof in het wortelmilieu, is een tamelijk indirecte en correlatieve maat die heel goed werkt in Nederland onder het huidige klimaat. Voor extrapolaties is deze maat echter niet geschikt en dient men gebruik te maken van de potentiële zuurstofstress zoals berekend met de methode van (Bartholomeus e.a., 2008b). Deze maat hangt niet alleen af van de grondwaterstand, maar ook van de neerslag, de potentiële verdamping, de bodemtextuur, het gehalte aan organische stof en van de vraag naar zuurstof door de plant (die toeneemt door klimaatverandering). Afbeelding 6 geeft het verband tussen deze robuuste stressmaat en mF. Overigens zijn bij KWR, op basis van langdurige en dynamische simulaties, functies ontwikkeld waarmee de uitkomsten van grondwatermodellen eenvoudig en snel kunnen worden vertaald naar zuurstofstress en droogtestress (Bartholomeus en Witte, in prep; Ek e.a., in prep).



Afbeelding 7: Relatie tussen bodem-pH en zuurindicatie. Deze relatie hangt af van de vochttoestand van de bodem (Cirkel e.a., 2012). De totale verklaarde varianties zijn 84, 31 en 39% voor respectievelijk de droge, vochtige en de natte bodems.

Bovenstaand betoog over het verband tussen de vochtindicatie van de vegetatie en de beschikbaarheid van vocht en zuurstof is niet bedoeld om zaken te compliceren.

De boodschap is dat er diverse bruikbare relaties zijn waarmee indicatiewaarden kunnen worden omgezet in fysische grootheden, maar dat die altijd met kennis van zaken en gezond verstand dienen te worden toegepast.

De waterhuishouding van natuurgebieden is niet alleen van belang voor de hiervoor besproken hoeveelheid vocht en zuurstof in het wortelmilieu, maar ook voor andere standplaatsfactoren, waarvan binnendijks de voedselrijkdom en de zuurgraad wel de belangrijkste zijn. Ook gemiddelde indicatiewaarden voor voedselrijkdom en zuurgraad kunnen worden omgezet in fysische grootheden. Een postdoc bij KWR, Yuki Fujita, heeft een redelijk goed verband gevonden tussen de gesimuleerde hoeveelheid fosfaat in de bodem, en mN. Over dit resultaat wordt binnenkort gepubliceerd. Een andere promovendus, Gijsbert Cirkel, vond zeer sterke verbanden tussen bodem-pH en mR (Cirkel e.a., 2012). De zuurgraad kan worden gebruikt als indicatie voor de herkomst van het bodemwater: in natuurgebieden in Pleistoceen Nederland (waaronder Noord-Brabant) duidt een lage pH op infiltratie, terwijl een hoge pH indicatief is voor kwel.

Toepassingsmogelijkheden en onmogelijkheden bij het monitoren van verdroging

We stellen dat vegetatie informatie verschaft over de standplaats (bodem en water) die via remote sensing kan worden ingewonnen. In het gebied Beekvliet (Achterhoek) is eerder een vergelijking uitgevoerd tussen de resultaten van een vla dekkende grondwaterkartering en een vegetatiekartering. Hieruit bleek dat in de natte terreindelen een goede overeenstemming bestaat tussen de geïnterpreteerde vegetatiekaart en de grondwaterkaart (van Delft e.a., 2002; van Delft e.a., 2004). Mede op basis van deze studie werd geconstateerd dat grondwaterstandsmetingen en vegetatiekarteringen elkaar goed aanvullen, waarbij grondwaterstanden vooral een goed beeld geven van de ontwikkelingen in de tijd en de vegetatiekarteringen van de omvang van het probleem (Runhaar e.a., 1999). Deze conclusie blijft geldig wanneer de indicatiewaarden afgeleid uit vegetatiekaarten worden vervangen door indicatiewaarden die zijn bepaald op basis van luchtfoto-beelden in combinatie met vegetatieopnamen. Het belangrijkste verschil is de wijze waarop de indicatiewaarden worden afgeleid uit de vegetatie (rechtstreeks via remote sensing of indirect op basis van gemiddelde indicatiewaarde per vegetatietype).

De toepassing van de vegetatie als intermediair tussen het remote sensing beeld en de standplaats vereist echter de nodige deskundigheid op ecohydrologisch gebied. De methode werkt waarschijnlijk het beste in graslandreservaten, vooral die met een uniform maa- of begrazingsbeheer. Denk aan gebieden als de Drentse Aa. Voor bossen is de methode vermoedelijk minder geschikt, niet alleen omdat de meeste bomen in Nederland zijn aangeplant, en dan weinig indicatief zijn voor hun standplaats, maar ook omdat via remote sensing geen beeld wordt verschaft van de ondergroei in bossen, die vaak zeer indicatief is. Ten slotte kunnen woekerende en nauwelijks indicatieve plantensoorten een succesvolle toepassing in de weg staan. Een voorbeeld is wanneer Duinriet of Pijpenstrootje, die beide nauwelijks eisen stellen aan het vochtregime, in een monocultuur groeien. In vergraste duin- en heidegebieden is het daarom op basis van alleen de plantengroei vaak moeilijk te bepalen of er sprake is van verdroging, vermesting, en/of achterstallig beheer.

Een laatste kanttekening is dat recente veranderingen in bijvoorbeeld de waterhuishouding niet meteen tot uitdrukking komen in de vegetatie, omdat de vegetatie na-ijlt op zulke veranderingen. Dit nadeel heeft, om met een bekend amateur-filosoof te spreken, echter ook een voordeel: via de vegetatie krijgen we een beeld van de gemiddelde standplaatscondities over een reeks van jaren, zonder last te hebben van kortstondige variaties in weersgesteldheid. Grondwaterstanden en bodemvochtgehalten uit remote sensing zijn momentane waarden, die van dag tot dag en zelf van uur tot uur sterk kunnen variëren. Er zijn speciale technieken, die b.v. beschikbaar zijn via Menyanthes (Von Asmuth e.a., 2006), zoals stochastische tijdreeksanalyse nodig om uit zulke waarden variaties in weergesteldheid te filteren teneinde inzicht te krijgen in eventuele structurele veranderingen in de waterhuishouding. Met het toepassen van die technieken worden echter weer nieuwe onnauwkeurigheden geïntroduceerd.

Over de snelheid waarmee de vegetatie verandert, is weinig bekend. Onze inschatting is dat veranderingen in de vegetatie door verdroging en vernatting zichtbaar worden in de vegetatie na een periode van één tot vele jaren. Bij pioniersvegetaties gaat de verandering heel snel (na één jaar zichtbaar), bij graslanden wat langzamer (denk aan vijf jaar) en bij struwelen en bossen gaat de verandering heel langzaam (tien jaar of meer). Op basis van langjarige meetreeksen werd door Runhaar e.a. (1999) geconcludeerd dat het ca. 10 jaar duurt voordat na vernatting in grazige vegetaties de vegetatie weer in evenwicht verkeert met de gewijzigde hydrologische omstandigheden, waarbij de grootste veranderingen optreden in de eerste jaren na de ingreep. Dit betekent dat voor het monitoren van veranderingen in de waterhuishouding moet worden gedacht aan een tijdsinterval van ca. 5-10 jaar. Door kaartbeelden van bijvoorbeeld de vochtindicatie van twee tijdsintervallen te vergelijken, wordt inzichtelijk waar gebieden zijn vernat, onveranderd zijn gebleven, of zijn verdroogd. Indicatiewaarden kunnen, zoals aangegeven, worden omgezet in fysische waarden, zoals de GVG en de pH. Daardoor kunnen de met remote sensing verkregen beelden worden vergeleken met puntwaarnemingen, zoals met metingen in grondwaterstandbuizen of met een pH-sonde.

De via remote sensing verkregen beelden van indicatiewaarden, en daarvan afgeleide fysische grootheden, kunnen ook worden vergeleken met een natuurdoeltypenkaart. De eisen die ieder natuurdoeltype stelt aan zijn standplaats zijn immers beschreven, zowel in termen van indicatiewaarden als in termen van fysische grootheden (Runhaar e.a., 1999). Een bepaald natuurdoeltype komt bijvoorbeeld voor in een mF range van 2.5-2.9, volgens afbeelding 5 overeenkomend met een GVG van 14-40 cm min maaiveld (met standaardafwijking van 20 cm). Voor ieder kaartvlak met dat natuurdoeltype kan worden nagegaan welke pixels, volgens het remote sensing beeld, binnen die range vallen. Er is vervolgens enige geostatistiek nodig om een uitspraak te kunnen doen over de doelrealisatie per kaartvlak. Het is daarbij raadzaam rekening te houden met de interne heterogeniteit van kaartvlakken, anders bestaat het gevaar een veel te pessimistisch beeld te krijgen van de toestand van de natuur (Runhaar en Witte, 2010). Het lijkt bijvoorbeeld vrij eenvoudig om een methode te ontwikkelen die rekening houdt met maaiveldvariaties, waardoor 100% doelrealisatie via sturing van de grondwaterstand nooit helemaal te realiseren is.

Conclusies

Remote sensing kan inzicht bieden in de standplaats van vegetatie door vegetatie indicatorwaarden te karteren. Dit is mogelijk met diverse remote sensing bronnen en methodes. Omdat tevens is aangetoond dat indicatiewaarden correleren met diverse fysische grootheden van de standplaats, zijn deze grootheden indirect af te leiden vanuit remote sensing data. In hoeverre de opeenstapeling van ruis in beide relaties de nauwkeurigheid van de afgeleide grootheid beïnvloedt wordt momenteel nader onderzocht.

Het karakteriseren van de standplaats vanuit remote sensing data en via de vegetatie is niet eenvoudig. Dat geldt echter ook voor andere remote sensing methoden die bijvoorbeeld de hoeveelheid bodemvocht en voor de actuele verdamping bepalen maar nooit zijn gevalideerd op natuurgebieden. Van alle methoden verwachten we nog het meeste van degene die de vegetatie gebruikt als intermediair tussen remote sensing beeld en standplaats.

Literatuur

Amerongen, J.v. (2013) Mapping Plant Indicator Values using Airborne LiDAR and Hyperspectral Imagery. MSc. thesis, Laboratory for geo. information science and remote sensing, Wageningen University, Wageningen

Bartholomeus, R.P. en J.P.M. Witte (in prep) Ecohydrological Stress - Groundwater To Stress Transfer. Theory and manual version 1.0. KWR Watercycle Research Institute

Bartholomeus, R.P., J.P.M. Witte, P.M. van Bodegom en R. Aerts (2008a) The need of data harmonization to derive robust empirical relationships between soil conditions and vegetation; in: *Journal of Vegetation science*, vol 19, no 6, pag 799-808

Bartholomeus, R.P., J.P.M. Witte, P.M. van Bodegom, J.C. Dam, P. Becker en R. Aerts (2012) Process-based proxy of oxygen stress surpasses indirect ones in predicting vegetation characteristics; in: *Ecohydrology*, vol 5, no 6, pag 746-758

Bartholomeus, R.P., J.P.M. Witte, P.M. van Bodegom, J.C. van Dam en R. Aerts (2008b) Critical soil conditions for oxygen stress to plant roots: Substituting the Feddes-function by a process-based model; in: *Journal of Hydrology*, vol 360, no 1, pag 147-165

Berger, M., J. Moreno, J.A. Johannessen, P.F. Levelt en R.F. Hanssen (2012) ESA's sentinel missions in support of Earth system science; in: *Remote Sensing of Environment*, vol, pag

Cirkel, D.G., J.-P.M. Witte, P.M. Bodegom, J.J. Nijp en S.E. Zee (2012) The influence of spatiotemporal variability and adaptations to hypoxia on empirical relationships between soil acidity and vegetation; in: *Ecohydrology*, vol, pag

Colgan, M.S., C.A. Baldeck, J.-B. Féret en G.P. Asner (2012) Mapping Savanna Tree Species at Ecosystem Scales Using Support Vector Machine Classification and BRDF Correction on Airborne Hyperspectral and LiDAR Data; in: *Remote Sensing*, vol 4, no 11, pag 3462-3480

Cornelissen, J.H.C., S. Lavorel, E. Garnier, S. Díaz, N. Buchmann, D.E. Gurvich, P.B. Reich, H. ter Steege, H.D. Morgan, M.G.A. van der Heijden, J.G. Pausas en H. Poorter (2003) A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide; in: *Australian Journal of Botany*, vol 51, pag 335-380

Ecker, K., L.T. Waser en M. Kuchler (2010) Contribution of multi-source remote sensing data to predictive mapping of plant-indicator gradients within Swiss mire habitats; in: *Botanica Helvetica*, vol, pag 1-14

Ek, R.v., J.P.M. Witte, J. Mol, W.d. Vries, G.W.W. Wamelink, J. Huinink, W.v.d. Linden, H. Runhaar, L. Bonten en R.P. Bartholomeus (in prep) Ontwikkeling van een gemeenschappelijke effect module voor terrestrische natuur. Advisering op basis van een vergelijking van drie ecologische effectmodellen. KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein; Deltares, Utrecht; Alterra, Wageningen

Ellenberg, H. (1992) Zeigerwerte der Gefäßpflanzen (ohne Rubus); in: *Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa*, vol. 3, ed. H. Ellenberg, H. E. Weber, R. Düll, V. Wirth, W. Werner en D. Paulißen

Foody, G.M., N. Campbell, N. Trodd en T. Wood (1992) Derivation and applications of probabilistic measures of class membership from the maximum-likelihood classification; in: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol 58, no 9, pag 1335-1341

Käfer, J. en J.P.M. Witte (2004) Cover-weighted averaging of indicator values in vegetation analyses; in: *Journal of Vegetation Science*, vol 15, no 5, pag 647-652

Kaiser, T., M. Wehrhan, A. Werner en M. Sommer (2012) Regionalizing ecological moisture levels and groundwater levels in grassland areas using thermal remote sensing; in: *Grassland Science*, vol 58, no 1, pag 42-52

Roelofsen, H.D., L. Kooistra, P.M. Bodegom, J. Verrelst, J. Krol en J.P.M. Witte (in press) Mapping a-priori defined vegetation associationplant associations using remotely sensed vegetation characteristics; in: *Remote sensing of Environment*, vol, pag

Roelofsen, H.D., L. Kooistra, P.M. Van Bodegom, J. Verrelst en J.P.M. Witte (submitted) Modeling a-priori defined vegetation types in coastal ecosystems using remote sensing derived plant characteristics; in: *Remote sensing of the environment*, vol, pag

Runhaar, J., W. van Landuyt, C.L.G. Groen, E.J. Weeda en F. Verloove (2004a) Herziening van de indeling in ecologische soortengroepen voor Nederland en Vlaanderen; in: *Gorteria*, vol 30, pag 12-26

Runhaar, J., J.P.M. Witte en P.H. Verburg (1997a) Ground-water level, moisture supply, and vegetation in the Netherlands; in: *Wetlands*, vol 17, no 4, pag 528-538

Runhaar, J.H. (1989) Toetsing van het ecotopensysteem, Universiteit van Leiden, Leiden

Runhaar, J.R., P. Jansen en J. Oude Voshaar (1999) Standaard meetprotocol verdroging; vegetatiemonitoring; in: *NOV-rapport (15.3)*, vol, pag

Runhaar, J.R., W. van Landuyt, C.L.G. Groen, E.J. Weeda en F. Verloove (2004b) Herziening van de indeling in ecologische soortengroepen voor Nederland en Vlaanderen; in: *Gorteria*, vol 30, pag

- Runhaar, J.R. en J.P.M. Witte** (2010) Reactie; Indicatiewaarden afdoende voor bepaling milieutekorten?; in: *De Levende natuur*, vol 111, no 6, pag 248
- Runhaar, J.R., J.P.M. Witte en P. Verburg** (1997b) Ground-water level, moisture supply, and vegetation in the Netherlands; in: *Wetlands*, vol 17, no 4, pag 528-538
- Schaminée, J.H., S.M. Hennekens en W.A. Ozinga** (2012) The Dutch national vegetation database; in: *Vegetation databases for the 21st century*, vol. 4, ed. J. Dengler, 201-209. BEE, Biocentre Klein Flottbek and Botanical Garden
- Schmidtlein, S.** (2005) Imaging spectroscopy as a tool for mapping Ellenberg indicator values; in: *Journal of Applied Ecology*, vol 42, no 5, pag 966-974
- van Delft, S.P.J., J. Holtland, H. Runhaar en J. Streefkerk** (2004) Verdroging natuurgebieden in kaart gebracht; in: *H2O*, vol 37, pag 13-15
- van Delft, S.P.J., J. Holtland, J.R. Runhaar, P. Mekking en P.C. Jansen** (2002) Verdrogingskartering in natuurgebieden; proefkartering Beekvliet. Alterra 107
- Verrelst, J., J. Muñoz, L. Alonso, J. Delegido, J.P. Rivera, G. Camps-Valls en J. Moreno** (2012) Machine learning regression algorithms for biophysical parameter retrieval: Opportunities for Sentinel-2 and -3.; in: *Remote Sensing of Environment*, vol 118, pag 127-139
- Von Asmuth, J., C. Maas en M. Knotters** (2006) Menyanthes manual, version 1.6. Kiwa Water Research
- Witte, J.P.M. en L. Kooistra** (2008) Vegetatiekartering via remote sensing. Kiwa Water Research
- Witte, J.P.M., R.B. Wójcik, P.J.J.F. Torfs, M.W.H. De Haan en S. Hennekens** (2007) Bayesian classification of vegetation types with Gaussian mixture density fitting to indicator values; in: *Journal of Vegetation Science*, vol 18, no 4, pag 605-612
- Wold, S., M. Sjöström en L. Eriksson** (2001) PLS-regression: a basic tool of chemometrics; in: *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, vol 58, no 2, pag 109-130

