



Remote sensing waterkwantiteits- en waterkwaliteitsbeheer

De snelle ontwikkelingen van Remote Sensing zorgen ervoor dat er steeds meer mogelijkheden binnen het bereik komen voor het waterbeheer, zoals het bepalen van gewasgroei, verdamping, bodemvocht en waterkwaliteit. Op deze laatste aspecten is deze Deltafact gericht.

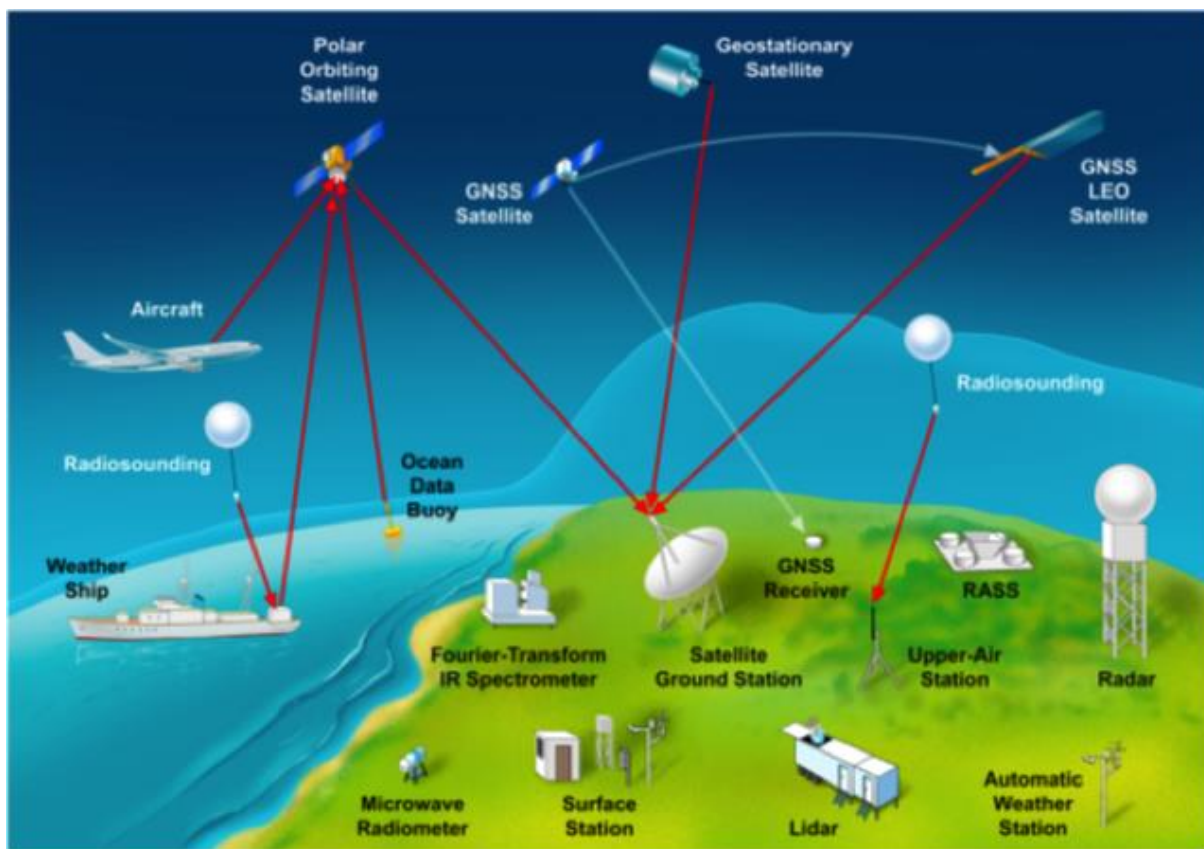
1. INLEIDING
2. GERELATEERDE ONDERWERPEN EN DELTAFACTS
3. STRATEGIE
4. SCHEMATISCHE WEERGAVE
5. TECHNISCHE KENMERKEN
6. GOVERNANCE
7. KOSTEN EN BATEN
8. PRAKTIJKERVERINGEN EN LOPEND ONDERZOEK
9. KENNISLEEMTES
10. BRONNEN & LINKS
11. DISCLAIMER

1. Inleiding

Het gebruik van remote sensing (RS) voor waterbeheer lijkt toekomstmuziek, maar er wordt al veel gebruik van gemaakt ([STOWA-rapport 2016-17](#)). Er is veel belangstelling voor het onderwerp. Toepassingen van RS zien we o.a. bij het Actueel Hoogtebestand Nederland ([AHN](#)), het Landelijk Grondgebruiksbestand Nederland ([LGN](#)), en de [neerslagradar van het KNMI](#). Dit zijn toepassingen die zich al bewezen hebben ("proven technologies"), en andere RS technieken met behulp van satellieten en UAV's (Unmanned Aerial Vehicle of drones) zijn veelbelovend. De snelle ontwikkelingen in dit veld zorgen ervoor dat er steeds meer mogelijkheden binnen bereik komen voor het waterbeheer, zoals het bepalen van gewasgroei, verdamping,

bodemvocht en waterkwaliteit. Op deze laatste aspecten is deze Deltafact gericht. RS biedt de mogelijkheid om waterparameters te kwantificeren in tijd en ruimte, voor grote oppervlakten. Maar niet alles is mogelijk. Nauwkeurigheid, resolutie en toepassingsmogelijkheden verschillen per onderwerp. In deze factsheet komen zowel de do's als don't (s) aan bod.

Wat is [remote sensing](#) en wat zijn de voordelen? [Aardobservatie](#) (RS) is het verzamelen van gegevens over het aardoppervlak door middel van satellieten, vliegtuigen, UAV's of andere platformen (Figuur 1). Met aardobservatietechnieken kunnen moeilijk bereikbare gebieden vlak dekkend in beeld worden gebracht.



Figuur 1. Voorbeeld van verschillende RS technieken (Bron: [Wulfmeyer et al., 2014](#)).

Het overgrote deel van de Nederlandse waterschappen en een afvaardiging van de drinkwatersector zijn onder de vlag van STOWA verenigd in het [SAT-WATER consortium](#). Dit samenwerkingsverband inventariseert satelliet gebaseerde informatie en hydrologische informatieproducten over verdamping, bodemvocht en gewasgroei ten behoeve van het strategische, tactische en operationele peil- & waterbeheer. In deze Deltafact wordt specifiek ingegaan op de mogelijkheden om

met RS bepaalde waterkwaliteits- en waterkwantiteitsparameters te meten die hiervoor van belang kunnen zijn.

2. Gerelateerde onderwerpen en Deltafacts.

Deltafacts: [Blauwe diensten](#), [Remote sensing en Waterveiligheid](#), [Bodemvocht gestuurd beregenen](#), [Zoetwatervoorziening](#), [Effectiviteit waterinlaat](#), [Dynamisch peilbeheer](#), [Sedimentaire systeem van de Waddenzee](#).

3. Strategie

RS is van nut voor operationeel waterbeheer, zoals het instellen van een waterinlaatverbod bij een blauwalgbloei of bij het formuleren van een beregeningsadvies bij (extreme) droogte. RS kan ook bijdragen aan besluitvorming in strategisch waterbeheer, zoals bij beslisregels over water allocatie en nutriëntuitwisseling tussen watersystemen. In het [programma Slim Watermanagement](#) (Deltaprogramma, 2016; HKV, 2015) wordt hieraan gewerkt. De sterke kanten van het gebruik van RS zijn in het kort:

- RS kan gebruikt worden voor kartering van bepaalde waterkwaliteits- en waterkwantiteitsparameters, onder andere als zeer recente waarnemingen in bijna een real-time modus. Deze kunnen vervolgens als invoer voor waarschuwingsmodellen ("early warning", of een beslissingsondersteunend systeem) worden gebruikt;
- Er kan eenvoudig informatie over een groot gebied verkregen worden, ook voor gebieden die moeilijk toegankelijk zijn;
- RS kan voor monitoring en trend analyses gebruikt worden, want data opnames voor hetzelfde gebied wordt op vaste tijdstippen herhaald;
- RS levert objectieve en onafhankelijke waarnemingen;

RS kan als validatie voor modellen gebruikt worden.

4. Schematische weergave

Wat is Remote Sensing en wat zijn de kenmerken?

RS is het op afstand verzamelen van gegevens over het aardoppervlak door middel van satellieten, vliegtuigen, UAV's of andere hulpmiddelen. RS is een hele goede manier om te begrijpen hoe mensen en natuurlijke processen het landschap hebben gevormd. Figuur 2 toont een satelliet opname (kleurenfoto of zgn. true-color beeld) van een deel van Friesland. Deze opname geeft in één oogopslag een zeer

gedetailleerd beeld van het landschap en de invloed van mens en natuur daarop. De uitdrukking “een beeld zegt meer dan 1000 woorden” gaat hier zeker op.

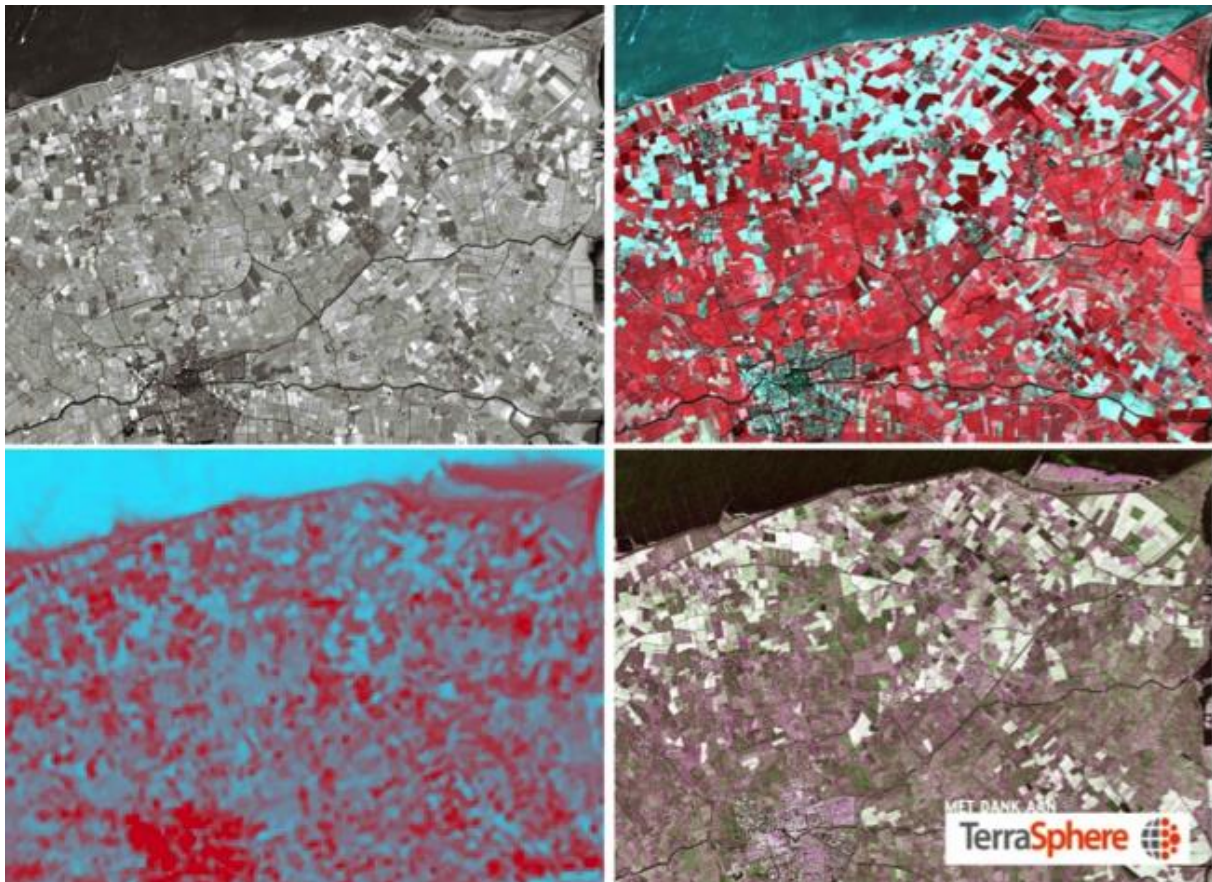


Figuur 2. Satelliet opname van een deel van Friesland (bron: Google Earth).

Net als het menselijk oog geeft een kleurenfoto (zoals figuur 2) een gekleurde samenstelling van 3 brede golfbanden (rood, groen en blauw) in het zichtbaar deel van het elektromagnetisch spectrum (EM-spectrum). Door met meerdere banden in verschillende delen van het EM-spectrum naar het aardoppervlak te kijken is het mogelijk om verschillende eigenschappen van het aardoppervlak (van bodem en vegetatie) af te leiden. De meest gangbare RS data wordt verkregen d.m.v. Multi Spectrale Scanning (MSS), thermografie, RADAR (RADar Detection And Ranging) en LIDAR (LIght Detection And Ranging). Figuur 3 toont een aantal verschillende soorten RS beelden: een panchromatisch beeld (linksboven), een multi-spectraal beeld (rechtsboven), een thermisch infrarood beeld (linksonder) en een radar beeld (rechtsonder). Alle beelden zijn representatief voor hetzelfde gebied en opgenomen op hetzelfde tijdstip.

Fotografie systemen kunnen geen onderscheid maken tussen de verschillende golflengten (een voorbeeld daarvan is de panchromatische opname (zwart-wit foto) in Figuur 3 - linksboven). Door de eenvoud van slechts 1 band hebben panchromatische beelden vaak wel een hoge ruimtelijke resolutie (meestal hoger dan spectrale beelden). De spectrale resolutie van MSS systemen is daarentegen veel beter, waardoor een MSS systeem verschillende (smalle tot brede) banden in het EM-spectrum kan onderscheiden. De meeste MSS systemen meten op 2 tot 10 specifiek geselecteerde banden. Figuur 3 (rechtsboven) is een multi-spectraal (zgn. false-color) beeld waarbij metingen in het infrarood zijn meegenomen, waarbij de kleur rood waar vegetatie staat en hoe actief de vegetatie is (weinig actief tot zeer actief: licht rood naar donker rood).

Thermische infrarode beelden geven informatie over de oppervlakte temperatuur en de ruimtelijke verdeling. De oppervlakte temperatuur geeft weer informatie over de gesteldheid van vegetatie. Natte gebieden en vegetatie die voldoende voorzien zijn van water (ondiepe grondwaterstand, kwel, irrigatie) zullen als relatief koude gebieden (blauwe pixels in figuur 3 - linksonder) zichtbaar zijn. Droge gebieden,



Figuur 3. Vier satellietbeelden van een deel van Friesland: panchromatisch (linksboven); multi-spectraal (rechtsboven); thermisch infrarood (linksonder); RADAR (rechtsonder) (bron: [NSO](#)).

bebouwing en vegetatie dat een watertekort heeft zullen daarentegen als relatief warme oplichten (rode pixels).

RADAR beelden (in de meeste gevallen zijn dit zwart-wit beelden) zijn meestal moeilijker te interpreteren. Omdat we hier in feite kijken naar de zgn. backscatter coëfficiënt, zien we hier informatie over de ruwheid van het oppervlak: hoe ruwer het oppervlak, hoe hoger de backscatter coëfficiënt (des te 'witter' in Figuur 3 - rechtsonder). Vegetatie is over het algemeen redelijk ruw met een gemiddelde backscatter coëfficiënt en daardoor zichtbaar als donker- tot lichtgrijs. Kale grond is daarentegen redelijk wit (hoge backscatter coëfficiënt) waarbij natte gronden (zeer wit) meer reflecteren dan droge gronden (redelijk wit). Hier speelt dus naast de ruwheid ook het vochtgehalte in de bodem een rol.

Een aantal aspecten die een belangrijke rol spelen in RS data zijn de ruimtelijke, temporele, spectrale en radiometrische resolutie:

- Ruimtelijke resolutie: de grootte van het kleinste beeldelement (pixel). Voor precisie landbouw toepassingen is bijvoorbeeld een ruimtelijke resolutie van 5m (of kleiner) een vereiste voor het kunnen detecteren van variaties binnen percelen.
- Temporele resolutie: de frequentie van de herhaalde metingen, d.w.z. hoe lang duurt het voordat de satelliet weer exact hetzelfde gebied opneemt.
- Spectrale (het aantal banden) en radiometrische resolutie (het aantal grijswaarden tussen de minimale en maximale intensiteit van een band): het kleinst zichtbare verschil in golflengte en straling. Welke spectrale variatie kan de sensor registreren? Hyperspectrale sensoren beschikken bijvoorbeeld over meer dan 100 verschillende spectrale banden (in tegenstelling tot de eerdere genoemde MSS systemen met 'slechts' 10 tot 100 banden), waardoor gedetailleerde spectrale signaturen ('vingerafdruk') kunnen worden gemaakt en is het mogelijk om de verschillende landschapselementen en objecten beter te onderscheiden.

Over het algemeen werken de ruimtelijke resolutie en de temporele resolutie elkaar tegen, d.w.z. een satelliet met een hoge ruimtelijke resolutie heeft meestal een lage temporele resolutie en omgekeerd. Een manier om dit probleem (een hoge ruimtelijk én een lage temporele resolutie) op te lossen, is door gebruik te maken van constellaties van satellieten. Een voorbeeld daarvan zijn de [Sentinel](#) satellieten,

waarvan een aantal satellieten in tweevoud zullen worden uitgevoerd. Een ander voorbeeld is [Planet Labs](#), zij maken gebruik van meer dan 50 kleine (en goedkope) satellieten (Dove) om de aarde continue te kunnen observeren met een ruimtelijke resolutie van 3-5 meter.

Het huidige gebruik: Bestaande technieken en -producten in operationeel water beheer

[STOWA-rapport 2016-17](#) laat een uitgebreid overzicht zien van RS producten (aangeboden door het Nederlandse bedrijfsleven maar ook internationale producten en datasets) die kunnen worden toegepast in het waterbeheer. Enkele voorbeelden van RS producten die al geruime tijd worden toegepast in het operationele waterbeheer zijn ("proven technologies"):

- Landelijk Grondgebruik Nederland ([LGN](#)). LGN bevat gegevens omtrent het landgebruik in Nederland. Het biedt tevens mogelijkheden om veranderingen in landbedekking en landgebruik in de tijd te volgen.
- Actueel Hoogtebestand Nederland ([AHN](#)). Dit bestand is Nederland dekkend en bevat gedetailleerde en precieze hoogtegegevens.
- Neerslag radar van het [KNMI](#). Dit RS product gezien worden als de belangrijkste bron van neerslag in Nederland. Alle waterbeheerders in Nederland maken wel gebruik van een neerslag product dat is gebaseerd op deze radar.

Recent beschikbare toepassingen

Enkele toepassingen van RS die meer recent in waterbeheer gebruikt worden zijn:

- Verdamping
- Bodemvocht
- Vegetatiegroei
- Combinatie RS met modellen
- Waterkwaliteit

Deze toepassingen worden hieronder uitgewerkt.

Verdamping

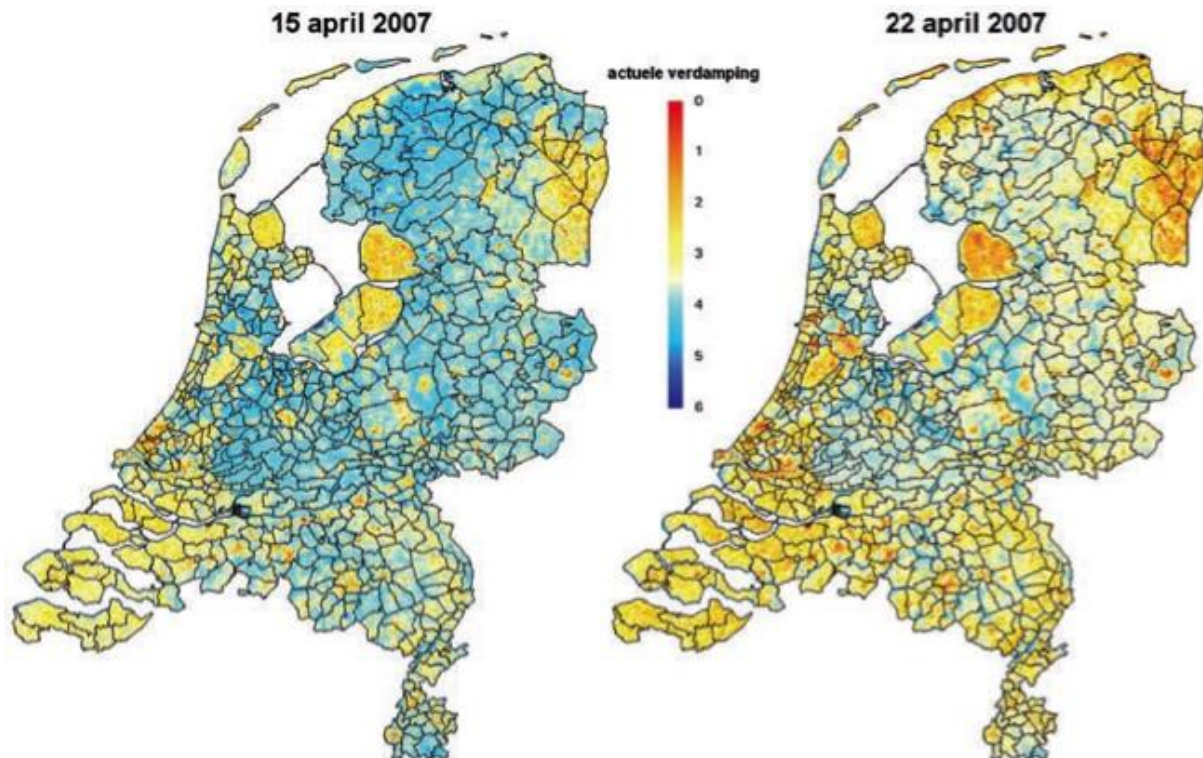
Actuele verdamping (ET) is, na neerslag, voor de meeste gebieden in Nederland de belangrijkste component van waterbalans en daarom essentieel voor waterbeheerders. Er bestaan verschillende algoritmes voor het schatten van de

actuele verdamping uit RS data. Deze complexe algoritmes kunnen grofweg worden onderverdeeld in 2 groepen.

De eerste groep (bestaande uit o.a. [SEBAL](#) (Bastiaanssen et al., 1998), SEBS (Su, 2002), SSEB (Senay et al., 2007) en METRIC (Allen et al., 2007)) maakt gebruik van thermische beelden in combinatie met optische beelden. De daaruit afgeleide oppervlakte temperatuur geeft inzicht in de vochttoestand (en ET) van de bodem of het gewas. Een nat oppervlak heeft een hoge verdamping en is daardoor koel; een droog oppervlak heeft een lage verdamping en is daardoor warm. Nadeel is echter dat maar een beperkt aantal satellieten beschikt over een thermische sensor met voldoende ruimtelijke en temporele resolutie (zie tabel 1 voor een overzicht). Daarnaast is de thermische data onbruikbaar voor ET-berekeningen als het bewolkt is (een veel voorkomend 'probleem' in Nederland). Bewolking en de beperkte temporele resolutie van thermische opnames staan een operationele toepassing in Nederland van deze groep ET-algoritmes in de weg. Op dit moment is [MODIS](#) (op Terra & Aqua) voor Nederlandse condities het meest geschikt, met een ruimtelijke resolutie van 1km (thermische sensor) die beide dagelijks overkomen. Toekomstige opvolger is Sentinel-3 [SLSTR](#), ook met een ruimtelijke resolutie van 1km (Tabel 1). Landsat 8 is op dit moment de enige satelliet die een thermische sensor heeft op 100m resolutie, maar de temporele resolutie is 16 dagen.

De tweede groep (o.a. ETLook (Bastiaanssen et.al., 2012), ETMonitor (Hu and Jia, 2015) en GLEAM (Miralles et al., 2011)) maakt gebruik van op radar gebaseerde bodemvocht producten (ook in combinatie met optische beelden). Omdat radar ongevoelig is voor bewolking is de continuïteit van de data beter gewaarborgd. Nadeel is echter dat de ruimtelijke resolutie van de meeste RS-gebaseerde operationele bodemvocht producten zeer grof is (10 - 30 km), en dus ook de afgeleide verdamping. De verwachting is echter dat in de nabije toekomst (2017 - 2018) nieuwe bodemvocht producten zullen verschijnen met een resolutie van 1km tot wel 100m ([VanderSat](#)). Figuur 4 laat zien dat op RS gebaseerde ET-kaarten een duidelijk overzicht geven van de verdamping (of waterverbruik) voor een groot gebied. Tijdens een periode van droogte is het zelfs mogelijk om gebieden te detecteren waar een verdampingstekort is (verschil tussen actuele en potentiële verdamping). Zolang er nog geen hoge resolutie RS bodemvocht producten beschikbaar zijn is het beste alternatief een combinatie met een hydrologisch model. De validatie van actuele verdamping blijft een grote uitdaging, gezien de beperkte

beschikbaarheid van meetstations die actuele ET meten ([STOWA rapport 2010-36](#)). [STOWA-rapport 2014-18](#) bevat een uitgebreide analyse waarin actuele ET resultaten (o.b.v. ETLook voor Nederland) zijn vergeleken met ET metingen (gebaseerd op eddy-correlatie metingen) maar ook met een aantal hydrologische modelinstrumenten (NHI, HYDROMEDAH, Brabant modellen Deltaplan Hoge Zandgronden en IBRAHYM). Hierbij is zowel gekeken naar tijdseries als naar ruimtelijke patronen van ET.



Figuur 4. Actuele verdamping voor Nederland op 15 (links) en 22 april (rechts) 2007 (Bron: [STOWA-rapport 2009-11](#) - WaterWatch).

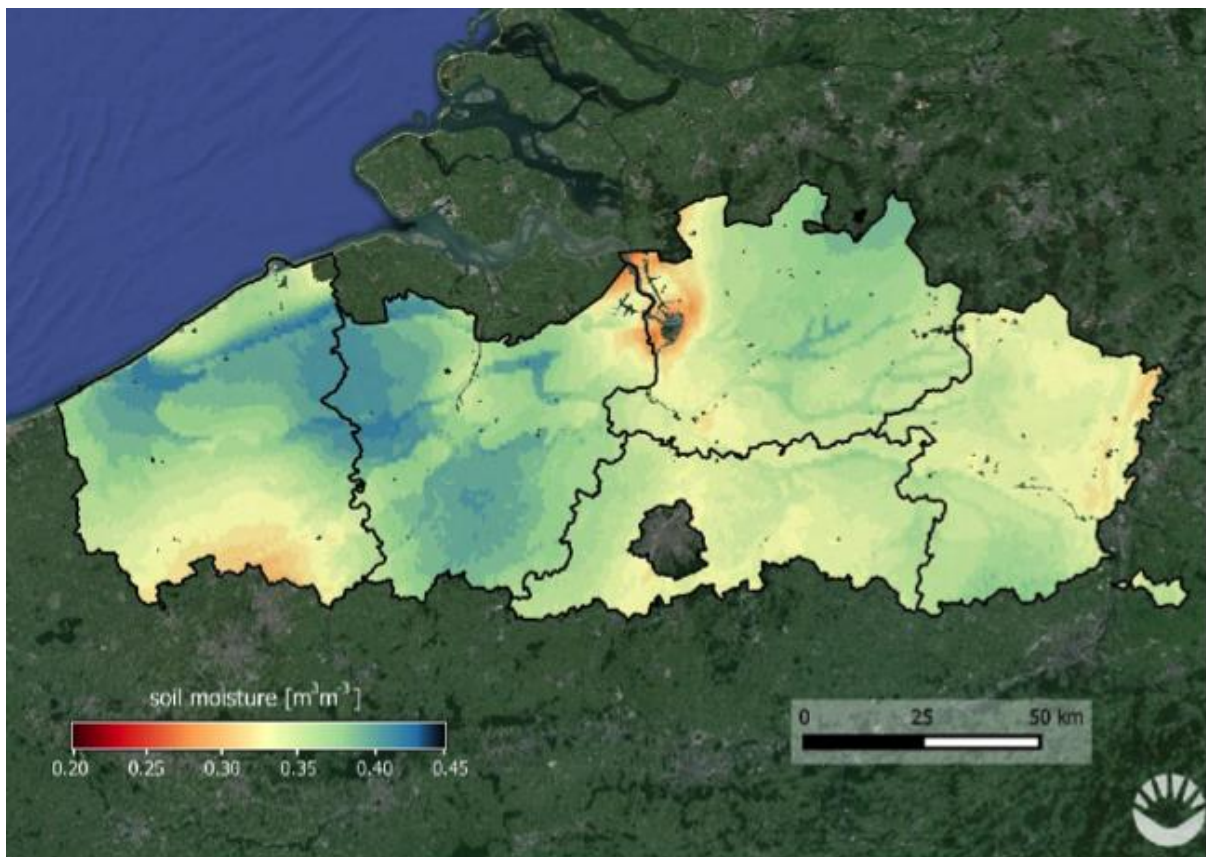
Bodemvocht (toplaag & wortelzone)

Op dit moment zijn er meerdere bodemvocht producten (actieve en passieve radar) gratis beschikbaar, zoals [EUMETSAT-ASCAT](#), [JAXA-AMSR2](#), [NASA-SMAP](#) en [ESA-SMOS](#). Deze RS-producten geven informatie (dagelijks) over het vochtgehalte in de toplaag van de bodem (eerste ~5cm). Zoals eerder gezegd is de ruimtelijke resolutie van deze producten zeer grof. In combinatie met de randvoorwaarden waaraan het landoppervlak moet voldoen maakt dat de bruikbaarheid van deze producten in Nederland nog zeer beperkt is (zie bv de zeer beperkte relevantie van DRYMON in operationeel waterbeheer in [STOWA-rapport 2016-20](#)). Echter de verwachting is dat binnen redelijk korte termijn hogere resolutie producten beschikbaar komen. Een

mooi voorbeeld (van VanderSat B.V.) daarvan is te zien in Figuur 5.

Voor waterbeheerders is het echter ook van belang om een goed beeld te hebben van de vochttoestand in de gehele wortelzone. Er bestaan verschillende technieken om het vochtgehalte in de wortelzone af te leiden. Van redelijke eenvoudige (met een zgn. exponentieel filter als maat voor de infiltratiesnelheid) tot geavanceerde assimilatie technieken in combinatie met een hydrologisch model.

In tegenstelling tot de beperkte beschikbaarheid van meetstations die ET meten, zijn er veel meer bodemvocht netwerken beschikbaar voor o.a. validatie van RS-bodemvocht producten (dit geldt voor Nederland maar ook internationaal). Zo heeft bijvoorbeeld de Faculteit Geo-Information Science and Earth Observation (voormalig ITC) een operationeel bodemvocht netwerk bestaande uit 20 locaties opgezet in Twente ([Dente et al., 2011](#)). Veel van dit soort bodemvocht netwerken werken samen in het International Soil Moisture Network ([ISMN](#)), waar de data gratis toegankelijk is. Tabel 1 bevat een overzicht van RS-bodemvocht producten (toplaag als voor de wortelzone).



Figuur 5. Bodemvocht toplaag voor Vlaanderen (België) op 20 maart 2016 (Bron: [VanderSat](#)).

Vegetatiegroei (biomassa en gewas fenologie)

Planten, of beter gezegd groene biomassa, absorberen grotendeels het rode zonlicht middels de fotosynthese en reflecteren het merendeel van het nabij-Infrarode (NIR) licht. Bij kale bodems (rotsen, zand, geploegd land) is dit verschil veel kleiner. Dit principe wordt gebruikt om vegetatie indicatoren te berekenen. Een van de meest bekende en toegepaste indicator is de Normalised Difference Vegetation Index of kortweg NDVI. Met de NDVI kan vegetatie eenvoudig worden geïdentificeerd en geeft tevens informatie over hun conditie. Veel satellieten die zijn uitgerust met optische sensoren die beschikken over een rode en nabij-infrarode band om de NDVI te kunnen afleiden, meestal op een ruimtelijke resolutie variërend tussen de 5m en 30m (Tabel 1). En omdat er een behoorlijk aantal operationeel zijn is ook de temporele resolutie hoog (*Door het gebruik van een constellatie van identieke satellieten zoals Sentinel-2. Of door het combineren van verschillende satellieten (bv zoals in de Groenmonitor).*

NDVI op 30m resolutie is bv. zeer geschikt voor analyse op perceel niveau, zoals gewaskartering, plantontwikkeling en oogstvoorspelling. NDVI op 5m is geschikt voor analyse op pixelniveau binnen percelen, dus daadwerkelijke precisielandbouw toepassingen (bv. [Akkerweb](#)), zoals plaats-specifieke bemesting, berekening of loofdoding. Maar ook buiten naast de landbouw zijn er toepassingen mogelijk, zoals natuurontwikkeling ([Groenmonitor](#)).

Voor het monitoren van vegetatie in waterlopen is een hogere resolutie vereist (<1m), met name bij smalle sloten. Echter bij dit soort ruimtelijk resoluties ben je afhankelijk van commerciële satellieten zoals WorldView, GeoEye, Pleiades of SkySat. Het maakt ook uit waar de planten zich bevinden in de waterkolom, aan het oppervlak zien we ze direct, voor grotere diepte hebben we andere algoritmes nodig. Deze kennisleemte wordt aan het eind van deze factsheet benoemd.

Combinatie RS met modellen

RS-data kan ook een belangrijke rol spelen bij de parameterisatie, kalibratie, en validatie van allerlei modellen, zoals bijvoorbeeld bij de hydrologische modellen (SWAP, MetaSWAP en SIMGRO), de gewas-groei modellen (WOFOST), en de gekoppelde modellen (SWAP-WOFOST), mede vooral doordat de ruimtelijke dichtheid van gegevens behoorlijk toeneemt. Daarbij moet echter wel rekening worden gehouden met de betrouwbaarheid van de RS-producten. Dit geldt ook voor

data assimilatie technieken, waar ook rekening moet worden gehouden met de onzekerheid van de afzonderlijke informatie bronnen (zoals RS-data, maar ook model resultaten). Het kwantificeren van deze onzekerheden blijkt in de praktijk echter lastig (bron: [Discussienotitie parameterisatie, kalibratie, validatie van het modelsysteem SWAP-WOFOST](#)). Vergelijkbare studies zijn uitgevoerd voor assimilatie van waterkwaliteitsparameters ([El Serafy et al., 2011](#)). Gezien de toename aan hoge-resolutiebeelden valt een vlucht aan dergelijke studies voor binnenwateren te verwachten.

Waterkwaliteit

Uit spectra kan informatie over de waterkwaliteit afgeleid worden. Niet elke parameter kan bepaald worden. De stoffen moet licht absorberen of verstrooien. Dus wel chlorofyl in fytoplankton, zwevend stof en gekleurde organische humuszuren (denk aan het geel-gekleurde water in een veengebied), en niet saliniteit (kleurloos en opgelost). [Roland Doerffer](#) legt dit in een filmpje uit. Enkele sensoren bemonsteren het spectrum in voldoende detail in de golflengtegebieden die het mogelijk maken om chlorofyl-a te onderscheiden van zwevend stof: [MERIS](#) (op ENVISAT, mei 2002 – april 2012), [OLCI](#) (op [Sentinel-3A](#), data beschikbaar vanaf 2017), en [MSI](#) (op [Sentinel-2A](#), sinds medio 2015). Met UAV's kan men drijfvlagen (denk aan bv eendenkroos of algen flab) en sommige ondergedoken waterplanten in kaart brengen (vooral nabij de oevers waar waterrecreatie plaats vindt). Om het hele watersysteem te beschrijven is vergelijking of combinatie met modellen benodigd. Veldmetingen blijven een essentieel onderdeel van de informatievoorziening op basis van RS data. Idealiter worden concentraties, absorptie en verstrooiing, en spectra gemeten. In Waterschap Noorderzijlvest zijn autonome spectrale metingen, in dit geval met de [EcoWatch](#) succesvol ingezet. Ook hiervoor worden tegenwoordig UAV's met robotica en drones op het water ingezet.

Toekomstperspectief van RS

In 2008 maakte de United States Geological Survey ([USGS](#)) [Landsat](#) satelliet beelden gratis beschikbaar voor het grote publiek. Dit resulteerde in een exponentiele toename van het gebruik van Landsat beelden in allerlei toepassingen. Mede door dit succes en het feit dat steeds meer overheden (zowel nationaal als regionaal, bedrijven en organisaties) data en informatie gratis beschikbaar stellen voor het grote publiek (zgn. open data beleid) heeft ook de Europese Ruimtevaartorganisatie (European Space Agency, [ESA](#)) in samenwerking met de Europese Unie (EU)

besloten om satelliet data uit het [Copernicus programma](#) openbaar te maken. Dit betekent dat beelden van de [Sentinel](#)-satellieten (Sentinel-1 t/m 5), speciaal ontworpen voor het Copernicus programma, gratis toegankelijk zijn voor iedereen. Een groot voordeel van Sentinel t.o.v. Landsat is dat de meeste bestaan uit een constellatie van 2 satellieten waardoor de temporele resolutie veel beter is met behoudt van de ruimtelijke resolutie. Als voorloper op Sentinel is in Nederland in maart 2012 het [Nationaal Satellietportaal](#) geopend. Het gratis beschikbaar stellen van deze enorme hoeveelheid data moet o.a. leiden tot nieuwe ontwikkelingen in RS, nieuwe RS producten en meer gebruik van RS data en producten in allerlei toepassingen, o.a. in operationeel waterbeheer. Een IT ontwikkeling die hierop aansluit is het beschikbaarkomen van cloud processing services die het mogelijk maken met de grotere data volumes te rekenen. Cloud computing is het via het Internet op aanvraag beschikbaar stellen van gegevens, software en hardware. Meest bekende zijn [Google Earth Engine](#), en de [Copernicus Data and Information Access Service \(DIAS\)](#) die vanaf 2018 ontwikkeld wordt. Een aansprekend voorbeeld is oppervlakte water detectie en waterlijn detectie met [Aqua Monitor](#) (Donchyts et al., 2016).

Relevante satellieten voor waterbeheer

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de meest relevant satellieten (en sensoren) die veelvuldig gebruikt worden voor het monitoren van vegetatie en het schatten van verdamping en bodemvocht, en voor het bepalen van waterkwaliteitsparameters. Het merendeel van deze data is gratis beschikbaar (Sentinel, Landsat, MODIS) of zijn gratis beschikbaar (voor Nederland) via het nationaal satelliet data portaal (SPOT, DMC). NB Deze lijst is niet volledig en bevat vnl. level-1 en -2 producten die op hun beurt weer nodig zijn voor het afleiden level-3 of -4 producten zoals ET, bodemvocht of specifieke gewas- of waterkwaliteitskarakteristieken. Zoals eerder genoemd bevat [STOWA-rapport 2016-17](#) een uitgebreid overzicht zien van 'eind producten' aangeboden door het Nederlandse bedrijfsleven. Ook op de website van NSO ([roadmaps](#)) is veel informatie te vinden over de inzet van RS data in allerlei toepassingen.

[Bekijk tabel 1 \(PDF\)](#)

5. Technische kenmerken

Er zijn vele soorten RS data en producten beschikbaar, die verschillen in temporele resolutie; ruimtelijke resolutie; spectrale resolutie, etc. mede omdat ze zijn gebaseerd op verschillende sensoren (en satellieten) met verschillende sensor karakteristieken en eigenschappen en omdat ze op verschillende manieren worden verwerkt (zgn. *data processing levels*). In het algemeen worden de volgende niveaus onderscheiden (deze zijn te verdelen in een viertal stappen: voorverwerking; beeldverbetering; datafusie en beeldclassificatie. Value adding zijn alle bewerkingen op de oorspronkelijke data om die beter op de klantvraag aan te laten sluiten. Vaak ga je naar een hoger level (level)):

- Level-0: Ruwe onverwerkte satelliet data. Wordt meestal niet beschikbaar gesteld aangezien dit alleen nuttig is voor de echte RS-experts.
- Level-1A: Ruwe onverwerkte satelliet data (DN-waarden), aangevuld met zgn. additionele informatie waaronder radiometrische en geometrische kalibratie coëfficiënten en geo-referentie parameters berekend en toegevoegd (maar niet toegepast).
- Level-1B & C: Level-1A verwerkt satelliet data o.b.v. de bijgevoegde additionele informatie. Een aantal van die correcties zijn: geometrische correctie, radiometrische correctie en orthorectificatie.
- Level-2: Afgeleide geofysische variabelen (bv golfhoogte, bodemvocht nabij het aardoppervlak (~5cm), reflecties aan het aardoppervlak, oppervlakte temperatuur, etc.) met dezelfde resolutie en locatie als Level-1.
- Level-3: Afgeleide geofysische variabelen in kaart gebracht met een uniforme ruimtetijd projectie. Meestal zijn deze zgn. composiet beelden (meestal wereld dekkend) opgebouwd uit meerdere beelden, welke eerder (of later) zijn opgenomen (afkomstig van andere banen) of afkomstig zijn van andere satellieten (bv in het geval van een constellatie), dan wel geïnterpoleerd om tot een vlak dekkend product te komen. In het algemeen is de ruimtelijke resolutie wat grover dan de level-2 producten.
- Level-4: Model resultaten, c.q. algoritmen, (variabelen die niet direct worden gemeten door satelliet sensor, maar in plaats daarvan zijn afgeleid van de metingen) gebaseerd op data van een lager niveau. Voorbeelden van level-4 producten zijn bv verdamping (ET) en bodemvocht in de wortel zone. De ruimtelijke resolutie is meestal wat grover dan de level-3 producten.

De bovengenoemde data processing niveaus zijn over het algemeen van toepassing voor de meeste satelliet data en producten, maar op detail niveau is er wel een duidelijk verschil per satelliet. Optische, thermische en radar beelden vereisen immers specifieke processing. Eenzelfde soort onderscheid (niveaus) is ook van toepassing voor beelden van UAV's.

Voor toepassing van deze data is een informatieproduct gewenst: bijvoorbeeld vertaling van actuele verdamping naar een droogte indicator, of integratie van verschillende gegevens.

6. Governance

De ontwikkelingen van RS, in het bijzonder op basis van satellieten, gebeuren op internationaal niveau. Toepassingen van RS in het waterbeheer hangen af van specifieke lokale condities. Het is een belangrijk 'governance' vraagstuk hoe wensen vanuit de waterschappen ten aanzien van satellietproducten kunnen worden meegenomen waar op veel technischer niveau over RS wordt nagedacht.

Een ander governance-aspect is de toepassing van UAV's (drones). Na een aanvankelijke wildgroei (en exponentiele toename van 't aantal drone gebruikers) zijn er nu regels opgesteld in Nederland voor zowel de particuliere als commerciële drone gebruiker. Dit vraagstuk blijft een aandachtspunt gezien de snelle ontwikkelingen van drones (grotere en zwaardere drones met nieuwe sensoren zoals LIDAR en hyper spectrale camera's).

Ook is een relevante vraag wie de eigenaar is van satellietproducten. Gaat het om een publiek of private voorziening? En als de data bewerkt moet worden ten bate van waterbeheer mag dan de 'bewerker' dan vrij gebruik maken van de 'ruwe data', alsmede inzicht hoe bijvoorbeeld een algoritme werkt (concurrentie gevoelige informatie).

7. Kosten en baten

Aangezien de kosten van het gebruik van RS data enorm verschillen per gekozen techniek, product en bewerkingsniveau, is het moeilijk de kosten hier in valuta uit te drukken. Er zijn hierover enkele inventarisaties uitgevoerd door RS groepen in Nederland, bijvoorbeeld NSO en SAT-WATER. De SAT-WATER doelmatigheidsstudie (STOWA [rapport 17](#) (2016)) geeft een overzicht van huidige lokale situatie aanbieders. Maar deze zijn, ook gezien de snelle ontwikkelingen zeker niet uitputtend.

De meerwaarde (baten) is primair de informatie die RS aan veldwerk kan toevoegen, aangezien RS data aanvullend zijn aan in situ metingen. Indien er consistent hele sterke correlaties gevonden worden, zou bekeken kunnen worden of RS een deel van de in situ metingen zou kunnen vervangen, maar in situ data ("ground truthing") blijft een essentieel onderdeel van de informatievoorziening op basis van RS data.

8. Praktijkervaringen en lopend onderzoek

Relaterend aan waterkwantiteit

Verdamping

SAT-WATER consortium: Het merendeel der Nederlandse waterschappen is onder de vlag van STOWA verenigd in het SAT-WATER consortium. Dit samenwerkingsverband inventariseert satelliet gebaseerde informatie en hydrologische informatieproducten over verdamping, bodemvocht en gewasgroei ten behoeve van het strategische, tactische en operationele peil- & waterbeheer. In 2014 is er een rapport verschenen waarin enkele schattingsmethode voor actuele verdamping zijn vergeleken (STOWA rapport 18, 2014).

Vegetatiegroei

Muizenplaag: Hierbij is o.a. gekeken hoe RS data (in dit geval o.b.v. de Groenmonitor) kan worden gebruikt bij de inventarisatie, maak bij de beheersing van een muizenplaag. Dit onderzoek is tot stand gekomen n.a.v. de muizenplaag in het najaar van 2014 in Friesland.

Precisielandbouw: Op dit moment loopt Precisielandbouw 2.0 (PL 2.0), een Publiek-Private Samenwerking (PPS) van ongeveer 20 partners. Het gaat bij PL 2.0 om integratie van de componenten sensoren data, modellen, ICT en mechanisatie in effectieve en duurzame toepassingen. Een van de onderzoeken binnen PL 2.0 is gericht op het verbeteren van de oogstvoorspelling van suikerbieten o.b.v. van een gewasgroeimodel met gegevens uit de Groenmonitor.

UAV-facility: Binnen de Wageningen UR is er een UAV facility opgezet waar o.a. wordt gekeken naar de inzet van drones binnen de RS en het toepassingen van drones in allerlei vakgebieden. Zo wordt er op dit moment gekeken naar de inzetbaarheid van drones voor het inventariseren van mosselbanken. Drones voor

veiligheid tegen overstroming worden opgepakt door kennisinstututen zoals Deltares, maar ook door universiteiten en commerciële partijen.

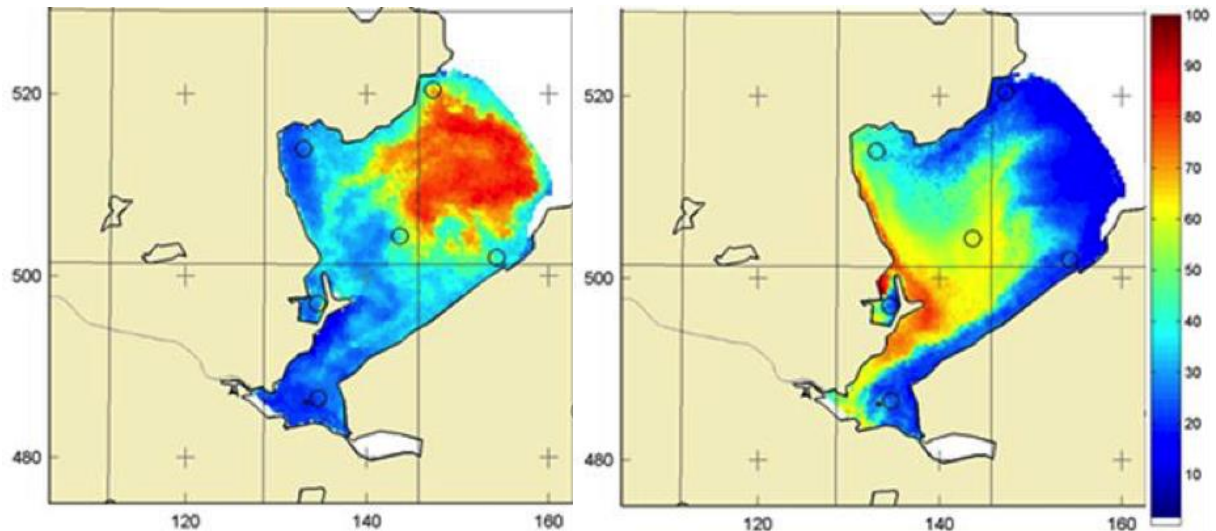
Fauna schade: De landbouw ondervindt grote schade als gevolg van ganzen die massaal gras eten. Er is een regeling om agrariërs tegemoet te komen, uitgevoerd door het Faunafonds, onderdeel van BIJ12. Tot nu toe gaan taxateurs het veld in om de schade op te nemen. Met moderne middelen kan dat objectiever. Door de continue aanvoer van satellietbeelden (zoals de Groenmonitor) kan op een objectieve manier zien waar en hoeveel gras er is verdwenen. Door de informatie te koppelen aan percelen is het mogelijk om het schadegebied heel precies in kaart brengen.

Combinatie RS en modellen: STOWA-rapport 2016-20 heeft een eerste verkenning gedaan naar de inzet van actuele bodemvocht (in dit geval DRYMON o.b.v. ASCAT) in operationeel waterbeheer. Daaruit bleek dat op dit moment bodemvocht producten zoals DRYMON nog niet geschikt zijn voor de monitoring van bodemvocht en actuele vullingsgraad bodem, specifiek voor de kleinere gebieden met een grote interne variatie. En dus nog niet relevant zijn voor operationeel peilbeheer. De op dit moment beschikbaar bodemvocht producten o.b.v. RS data zijn te grof, maar het lonkend perspectief is de inzet van Sentinel-1 voor verbetering van de resolutie.

Relaterend aan waterkwaliteit

Met behulp van sensoren die meten in het geschikte golflengte bereik (spectrale resolutie) kunnen waarden voor de verticale uitdoving van licht (K_d) en de secchi-diepte, chlorofyl-a en zwevendstof-concentratie, en troebelheid berekend worden. Hiervoor is een veelheid aan retrieval-algoritmen beschikbaar. Voorbeeld van retrieval met het HYDROPT algoritme is te zien in Figuur 6 (Van der Woerd en Pasterkamp, 2008; Eleveld, 2012).

De Europese Unie en de European Space Agency (ESA) financieren internationale projecten waarin gespecialiseerde partijen (de “value-adding industry”) algoritmes verder ontwikkelen, en dataverwerking voortdurend verbeteren en valideren. De parameters in de retrieval-algoritmen zijn voor het overgrote deel gebaseerd op kennis van de optische eigenschappen van de stoffen in het water (verstrooiing en absorptie over het spectrum van zichtbaar licht). Deze eigenschappen variëren per waterlichaam (en soms zelf binnen een waterlichaam in de loop van de tijd en



Figuur 6. Verschillen in wind condities bepalen de zwevend stof-concentraties (in mg/l) aan het oppervlak van het Markermeer (Eleveld, 2012).

plaats). Dit zorgt ervoor dat een algoritme dat bijvoorbeeld voor het ene waterlichaam werkt, niet per se ook goed hoeft te werken voor een ander waterlichaam.

Enkele voorbeelden zijn:

- In het verleden zijn atlassen gemaakt waarin RS data, naast modelresultaten zijn gepresenteerd, en zijn vergeleken met veldmetingen, zie bijvoorbeeld [algenatlas IJsselmeer 2003](#) (SPAC) en [de zwevend stof atlas Markermeer 2006](#) (SerVIJ)
- High Resolution Freshwater Monitoring (FRESHMON, dec. 2010 – dec. 2013). Freshmon biedt een catalogus met producten en services op het gebied van waterkwaliteit, waterdiepte en waterplant (macrofyten) kartering. Voor alle parameters geldt, de satelliet kan alleen informatie geven als het zonlicht de objecten in het water, op bodem, dan wel de planten bereikt en de satellietsensor het terug verstrooide signaal registreert. Bij extreme troebelheid ziet de sensor de bodem niet.
- Global Lakes Sentinel Services ([GLaSS](#), maart 2013 – feb. 2016). In GLaSS zijn tools ontwikkeld voor de datahandling van Sentinel-2 MSI en Sentinel-3 OLCI data voor het monitoren van meren en reservoirs. Het [GLaSS core system](#) is beschikbaar, en de GLaSS processing tools, o.a. om de kleur van meren mee te classificeren ([Eleveld et al., 2017](#)) zijn beschikbaar als software plug-ins voor [SNAP](#) (de Sentinel toolboxen), naast informatie over [in situ bemonstering](#) en [training materiaal](#).

- Cyanobacteria Monitoring Services ([CyMonS](#) feb. 2014 – jan 2015). In CyMonS wordt gewerkt verbetering van monitoring en voorspelling van drijflagen van blauwalgen. Om dit te bewerkstelligen is de aanpak in CyMonS een combinatie van aardobservaties, in situ monitoring (met de door Water Insight ontwikkelde WISP) en een algenvoorspellingsmodel. De WISP data dienen als input voor het model dat op zijn beurt weer de aardobservaties als validatie gebruikt. Voor één van de CyMonS eindgebruikers, waterschap Noorderzijlvest, zijn de verschillende databronnen en model ondergebracht in een FEWS omgeving om het hele proces van metingen → model → validatie m.b.v. aardobservatie → resultaatpresentatie volledig automatisch te laten verlopen. Op deze manier kan de beheerder direct zien of er blauwalgenoverlast zit aan te komen en kan direct en van te voren maatregelen treffen.
- Improved monitoring and forecasting of ecological status of European Inland waters by combining Future earth ObseRvation data and Models ([INFORM](#) feb. 2016-jan 2018). Hierin zijn algoritmes ontwikkeld voor verschillende waterkwaliteitsparameters, op basis van aardobservaties, ten behoeve van het determineren van de ecologische toestand van een binnenwater en waterkwaliteitsmodellen.

Earth Observation based services for Monitoring and Reporting of Ecological Status ([EOMORES](#) is in 2017 van start gegaan). Dit project heeft als doel het ontwikkelen van waterkwaliteitsdiensten op basis van RS.

Andere internationale projecten, waarin geen Nederlandse partners direct betrokken zijn: [Biodiversity-2](#) (sept. 2012 - okt. 2015), [Globolakes](#) (dec. 2015 – dec. 2020).

9. Kennisleemtes

Een aantal aspecten is echter nog onvoldoende onderzocht of getoetst in de praktijk, zoals:

- Het beter (en sneller) in beeld brengen van de (regionale/lokale/veldschaal) watervraag en/of vullingsgraad, gedifferentieerd naar type landgebruik (ook stedelijk), in periodes van droogte of wateroverlast met real time data (in situ en satelliet) van verdamping en landgebruik:
 - [STOWA-rapport 2014-18](#) bevat een uitgebreide analyse waarin op RS gebaseerde ET resultaten zijn vergeleken in situ metingen en

hydrologische modellen. Uit deze vergelijking blijkt dat de verschillen soms aanzienlijk zijn en roept om nader onderzoek om de verschillen te verklaren.

- De betrouwbaarheid van grove resolutie bodemvocht producten (~25km ruimtelijke resolutie) is al redelijk goed in kaart gebracht. Naar verwachting zullen in 2017 de eerste hogere resolutie bodemvocht producten verschijnen (≤ 1 km). Hoe goed zijn deze producten en voldoen deze wel aan de wensen van de operationele water beheerders ([STOWA-rapport 2016-20](#))?
- Zoals eerder genoemd zijn er verkenningsstudies gedaan naar de combinatie van RS data en modellen. Daarbij moet echter wel rekening worden gehouden met de betrouwbaarheid van de RS-producten. Het kwantificeren van deze onzekerheden blijkt in de praktijk echter lastig.
- Er is ervaring met bepalen van chlorofyl-*a* en zwevendstof-concentraties voor binnenwateren. Voor binnenwateren is een product dat gevalideerd is aan lokale in situ metingen gewenst. Om het hele watersysteem te beschrijven is vergelijking of combinatie met modellen benodigd. Overige kennisleemtes die aandacht behoeven zijn:
 - De verschillende verschijningsvormen (aan de oppervlakte, goed gemengd) van cyanobacteriën (blauwalgen) vragen om differentiatie in algoritmes. Hierbij is ook de optische omgeving, en dus welke andere optisch actieve stoffen aanwezig zijn in het water, van belang. Hoe werkt dit voor typische Nederlandse oppervlaktewateren?
 - Hetzelfde geldt voor een integrale waterplantenkarting, nl. voorkomen aan het wateroppervlak, in het water en op de bodem;
 - Inzet van UAV's voor waterkwaliteit. Is het platform voldoende stabiel om een goede spectrale meting uit te kunnen voeren? Welke producten kunnen met voldoende nauwkeurigheid geleverd worden?
 - Het is onduidelijk hoe goed CDOM (gekleurd DOC) spectraal te onderscheiden is van andere optisch actieve stoffen in het water. Dit is van belang omdat CDOM de lichtverzwakking (K_d) beïnvloed omdat concentraties in onze binnenwateren hoog kunnen zijn.

10. Bronnen & links

- Akkerweb: <https://akkerweb.nl/>

- Allen, R.G., M. Tasumi and R. Trezza (2007). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Model. ASCE J. Irrigation and Drainage Engineering 133(4):380-394.
- Bastiaanssen, W. G. M., Menenti, M., Feddes, R. A., Holtslag, A. A. M. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. Journal of hydrology, 212, 198-212.
- Bastiaanssen, W. G. M., Cheema, M. J. M., Immerzeel, W. W., Miltenburg, I., and Pelgrum, H. (2012). The surface energy balance and actual evapotranspiration of the transboundary Indus Basin estimated from satellite measurements and the ETLook model, Water Resour. Res., 48, W11512, doi: 10.1029/2011WR010482.
- Cymons: <https://artes-apps.esa.int/projects/cymons>
- Deltaprogramma. [Slim Water management](#). 2016
- Donchyts, G., Baart, F., Winsemius, H., Gorelick, N., Kwadijk, J., van de Giesen, N. (2016). Earth's surface water change over the past 30 years. *Nature Climate Change* 6(9), 810-813.
- Eleveld, M.A., Koster, E., Boderie, P., Dury, S., Pasterkamp, R., van der Woerd, H., Oostinga, K., van der Geer, W. (2005). [Algenatlas IJsselmeer 2003](#). Lelystad: RWS-IJG-PAM, 74 pp.
- Eleveld, M.A. (2012). Wind-induced resuspension in a shallow lake from Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) full-resolution reflectances. *Water Resources Research* 48(4), W04508, [doi:10.1029/2011WR011121](https://doi.org/10.1029/2011WR011121) (Open Access Postprint)
- El Serafy, G.Y., Eleveld M.A., Blaas, M., van Kessel, T., Gaytan Aguilar, S., van der Woerd, H.J. (2011). Improving the description of the suspended particulate matter concentrations in the southern North Sea through assimilating remotely sensed data. *Ocean Science Journal* 46(3), 179-204. doi: 10.1007/s12601-011-0015-x (Open Access)
- GLaSS training materiaal remote sensing van waterkwaliteitsparameters. <http://www.glass-project.eu/training-material>
- Groenmonitor: <http://www.groenmonitor.nl/>
- HKV Lijn in Water. [WaterViewer](#): Slim Watermanagement
- Hu, G., Jia, L. (2015). Monitoring of Evapotranspiration in a Semi-Arid Inland River Basin by Combining Microwave and Optical Remote Sensing Observations. *Remote Sensing*, 7(3), 3056-3087.
- INFORM: <http://www.copernicus-inform.eu/>

- Kamps, R., Koster, E., Eleveld, M.A., Kuiper, M., Laanen, M. (2008). Zwevend stof atlas Markermeer 2006. Lelystad: RWS-IJG-WSM, 86 pp + Appendix. ISBN 9789036914611
- Miralles, D.G., Holmes, T.R.H., de Jeu, R.A.M., Gash, J.H., Meesters, A.G.C.A., Dolman, A.J. (2011). Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations, *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 453–469, doi: 10.5194/hess-15-453-2011.
- Noordhuis, R., Blaas, M. (2016) Monitoring van doorzicht en gerelateerde parameters in het Markermeer-IJmeer. Deltares: Utrecht. p. 93.
- SAT-WATER: <http://hydromedah.nl/satwater/>
- Senay, G. B., Budde, M., Verdin, J. P., Melesse, A. M. (2007). A coupled remote sensing and simplified surface energy balance approach to estimate actual evapotranspiration from irrigated fields. *Sensors* 7(6), 979-1000.
- SEOS remote sensing cursus: http://lms.seos-project.eu/learning_modules
- STOWA, rapport 2009-11, [Verbetering bepaling actuele verdamping voor het strategisch waterbeheer](#).
- STOWA, rapport 2010-36, [Gemeten actuele verdamping voor twaalf locaties in Nederland](#).
- STOWA, rapport 2014-18, [Vergelijking Van enkele schattingsmethoden voor de actuele verdamping](#).
- STOWA, [rapport 2016-17, Verkenning Remote sensing producten voor het waterbeheer](#).
- STOWA Drone tag-session
- STOWA, rapport 2016-20, [Nowcasten actuele vullingsgraad bodem \(met behulp van een model en remote sensing data\)](#).
- Stumpf, R. P., Davis, T. W., Wynne, T. T., Graham, J. L., Loftin, K. A., Johengen, T. H., Burtner, A. (2016). Challenges for mapping cyanotoxin patterns from remote sensing of cyanobacteria. *Harmful Algae*, 54, 160-173.
- Su, Z. (2002). The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology & Earth System Sciences* 6, pp. 85-99.
- Van der Woerd, H. J., Pasterkamp, R. (2008) .HYDROPT: A fast and flexible method to retrieve chlorophyll-a from multispectral satellite observations of optically complex coastal waters, *Remote Sens. Environ.*, 112(4), 1795–1807.
- Wulfmeyer, V., Hardesty, R.M., Turner, D.D., Behrendt, A., Cadeddu, M.P., DiGirolamo, P., Schlüssel, P., Van Baelen, J. , Zus, F. (2015) A review of the remote sensing of lower tropospheric thermodynamic profiles and its

indispensable role for the understanding and the simulation of water and energy cycles, Rev. Geophys.,53,819–895, doi:10.1002/2014RG000476.

Deze factsheet is opgesteld door Alterra en Deltares, oktober 2016 en laatst geactualiseerd in januari 2018.

Auteurs

- Wouter Meijninger (WUR-Alterra)
- Claire Jacobs (WUR-Alterra)
- Marieke Eleveld (Deltares)
- Miguel Dionosio Pires (Deltares)
- Meinte Blaas (Deltares)

11. Disclaimer

De in deze publicatie gepresenteerde kennis en diagnosemethoden zijn gebaseerd op de meest recente inzichten in het vakgebied. Desalniettemin moeten bij toepassing ervan de resultaten te allen tijde kritisch worden beschouwd. De auteur(s) en STOWA kunnen niet aansprakelijk worden gesteld voor eventuele schade die ontstaat door toepassing van het gedachtegoed uit deze publicatie.