
Evaluatie van hoge resolutie satelliet bodemvochtproducten met behulp van grondwaterstandmetingen

Richard de Jeu¹ en Anne de Nijs¹

Twee recent ontwikkelde 100x100m bodemvochtproducten zijn vergeleken in Nederland met freatische grondwaterstandmetingen. Het ene product is gebaseerd op C-band satellietobservaties van de Japanse Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR-2) en het andere op L-band observaties van de NASA Soil Moisture Active Passive (SMAP) missie. Uit deze studie is gebleken dat peilbuismetingen een uitstekend alternatief zijn voor evaluatie in plaats van in situ bodemvochtsensoren. In deze studie zijn zeer hoge correlaties gevonden tussen de satelliet bodemvochtproducten en grondwaterstanden. Beide satelliet gebaseerde bodemvochtproducten functioneren goed over geheel Nederland, waarbij het L-band product beter presteert dan het C-band product ($R_{SMAP}=0.74$ versus $R_{AMSR-2}=0.62$ voor de mediaan van de grondwaterstandmetingen). Verder komt naar voren dat met name de ondiepe freatische grondwaterstanden de beste correlaties geven met onze data, waarbij de correlatie (logischerwijs) substantieel degradeert wanneer de gemiddelde grondwater stand lager wordt dan 150 cm onder het maaiveld. Tenslotte geeft deze studie ook veel aanknopingspunten voor verder hydrologisch onderzoek; combinaties tussen satelliet bodemvocht en grondwaterstanden kunnen bijdragen aan een verbeterde kennis omtrent hydrologische processen en vooral ook de hydraulische eigenschappen van bodem en ondergrond, wat kan leiden tot een efficiënter en effectiever waterbeheer.

Inleiding

De technologie om uit satellietobservaties het vochtgehalte van de bodem te bepalen lijkt nieuw maar is in werkelijkheid al bijna 50 jaar oud. Zo werden er in de jaren zestig door de Russen al de eerste stappen gezet om uit satellietobservaties bodemvocht te verkrijgen, door met radiometer observaties van de Cosmos-243 satelliet te experimenteren. Uit deze studie bleek dat met name de microgolfmetingen van het landoppervlak gevoelig waren voor variaties in bodemvocht (Basharinov e.a., 1971). Binnen het elektromagnetisch spectrum is de microgolf regio namelijk het enige gedeelte binnen het spectrum waarbij het mogelijk is om bodemvocht direct te kwantificeren. Dit komt omdat het verstorende effect dat water heeft op het elektromagne-

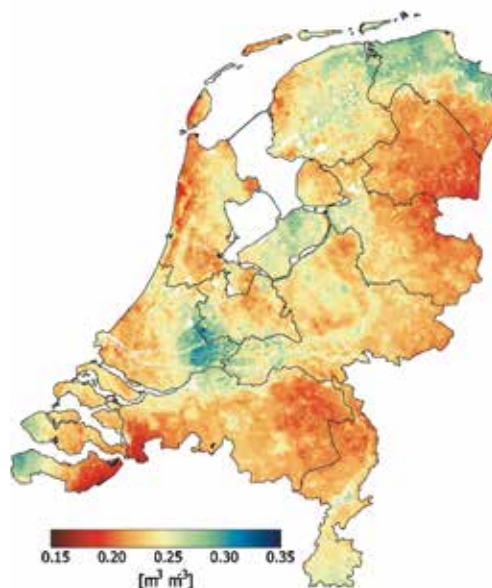
¹ VanderSat, Wilhelminastraat 43A, 2011 VK, Haarlem (rdejeu@vandersat.com, adenijs@vandersat.com)

tische veld goed gedetecteerd kan worden met microgolfsensoren (De Jeu, 2003). Dit gedrag vormt vandaag de dag dan ook de basis voor vele algoritmes die bodemvochtdynamiek bepalen uit microgolfobservaties (e.g. Mladenova e.a., 2014 voor een uitgebreid overzicht).

Mede door het gebrek aan computerkracht en beperkingen in de ontwikkelingen van sensortechnologie heeft het echter heel lang geduurd voordat men in staat was om op een meer systematische manier bodemvochtdata uit satellietobservaties te verkrijgen (De Jeu e.a., 2014).

Eind jaren 90 volgde het eerste grote omslagpunt, en verschillende onderzoeksgroepen kregen het voor elkaar om op mondiale schaal bodemvocht te bepalen met microgolf satellietobservaties (e.g. Njoku e.a., 1999; Wagner e.a., 1999; Owe e.a., 2001). Zowel de nauwkeurigheid als de ruimtelijke resolutie van deze bodemvochtproducten vormde echter nog wel een probleem; door de wat lagere kwaliteit van de satelliet-sensoren zat er nog relatief veel ruis op het signaal en de ruimtelijke resolutie was in veel gevallen nog niet hoger dan 50 km. Met de ontwikkeling van nieuwe satelliet missies waaronder de Soil Moisture Ocean Salinity Mission (SMOS) van ESA en de Soil Moisture Active and Passive (SMAP) missie van NASA, ging de sensor kwaliteit flink omhoog wat resulteerde in verbeterde bodemvochtproducten (e.g. Kerr e.a., 2016, Van der Schalie e.a., 2016). Daarnaast zorgden deze nieuwe missies ook voor een sterke wetenschappelijke boost om de algoritmes door te ontwikkelen en verder te verfijnen (e.g. Dorigo e.a., 2015; Van der Schalie e.a., 2017). Deze boost heeft er uiteindelijk toe geleid dat we anno 2017 in een nieuwe fase terecht zijn gekomen. Door het beter vertalen van de originele antenne patronen van de gevoelige microgolf-sensoren op de satellieten zijn we nu op het niveau gekomen dat we in staat zijn om tot een resolutie van 100 m te komen met de huidige satellieten die dagelijks data produceren (zie Afbeelding 1).

Door deze gemaakte stappen ontstaan er voor deze bodemvochtproducten plotseling legio nieuwe toepassingen, met name binnen het waterbeheer en de landbouw sector. Zo kunnen er bijvoorbeeld in potentie op een veel effectievere en efficiëntere manier maatregelen getroffen worden bij hydrologische calamiteiten (e.g. watertekort en wateroverlast) wanneer dit soort producten op een optimale manier geïntegreerd worden in de huidige beslissingssystemen. Zo kan veel gericht



Afbeelding 1: Snapshot van het VanderSat bodemvochtproduct voor 23 juni 2015 met een ruimtelijke resolutie van 100 m. Het beeld is gebaseerd op microgolf observaties van de SMAP satelliet van NASA.

sturing gegeven worden aan waterverdeling en beter geanticipeerd worden op voorspelde neerslag hoeveelheden. Daarnaast kunnen de huidige hydrologische modellen verder geoptimaliseerd worden met dit soort onafhankelijke datasets en kunnen calamiteiten veel beter gekwantificeerd en in beeld gebracht worden. Een belangrijke vraag is echter of de kwaliteit van deze nieuwe producten voldoende is voor dit soort hydrologische toepassingen.

Het bepalen van de kwaliteit van een satelliet bodemvochtproduct gaat traditioneel met grond observaties van bodemvocht, waarbij ondiepe grondsensoren (<10 cm diepte) worden vergeleken met de satellietobservaties. Op dit gebied zijn in het verleden zeer veel studies uitgevoerd (*e.g.* Wagner e.a., 2007; Gruhier e.a., 2010; Dorigo e.a., 2015; Holgate e.a., 2016), en een terugkerend thema zijn de beperkingen door het gebruik van bodemvochtsensoren voor validatie, vooral omdat bodemvochtsensoren en satellietobservaties verschillende metingen zijn met ieder hun eigen karakteristieken en schaalgrootte.

Traditionele bodemvochtsensoren meten over het algemeen op een zeer lokaal niveau (meestal een centimeter rondom de sensor) waardoor deze metingen niet altijd even representatief zijn voor de schaal waarop satellieten werken. Bodemeigenschappen kunnen namelijk heel lokaal bepalend zijn door de hydrologische condities, zeker in de ondiepe ondergrond. Een voorbeeld hiervan zijn macroporiën en scheuren in de ondergrond die de ondiepe waterhuishouding sterk lokaal kunnen bepalen. Door dit soort zaken kan er eenvoudig een mismatch ontstaan tussen grond- en satellietobservaties. Tenslotte is er het verschil tussen de daadwerkelijke meetdiepte van satelliet-sensoren en die van grondobservaties. Een satelliet-sensor ziet over het algemeen de eerste centimeters van de bodem terwijl een grondsensoren vaak ergens tussen de 5 en 10 cm in de bodem geplaatst wordt.

Naast de bovengenoemde beperkingen zijn in Nederland nauwelijks bodemvocht metingen van grondsensoren vrij beschikbaar voor de (wetenschappelijke) gemeenschap. Zo stelt Nederland bijvoorbeeld geen enkele dataset beschikbaar bij het Internationale Soil Moisture Network (ISMN, zie <https://ismn.geo.tuwien.ac.at>), waardoor een grondige kwaliteitsevaluatie voor satelliet bodemvochtproducten voor ons land beperkt is. Daarentegen heeft Nederland een zeer groot landelijk netwerk van peilbuizen waarvan de meetgegevens wel vrij beschikbaar zijn via het DINOLOket (zie <https://www.dinoloket.nl>). Een groot gedeelte van deze grondwaterwaarnemingen zijn ondiepe freatische metingen die fysisch gezien een sterke relatie zouden moeten hebben met bodemvocht van de bovenste laag. Daarnaast hebben grondwatermetingen vaak een wat grotere ruimtelijke support dan in situ bodemvocht (Western e.a., 1999). Hierdoor zijn ze in gebieden met een beperkt beschikbaar bodemvocht netwerk mogelijk zelfs beter geschikt voor de evaluatie van de kwaliteit een bodemvochtproduct dan de traditionele validatie met in situ bodemvochtmetingen.

In deze studie willen we daarom het grondwater netwerk inzetten als additionele evaluatietool voor onze bodemvochtproducten. Dit willen we doen aan de hand van een aantal stappen. Ten eerste willen we kijken in hoeverre deze bodemvochtproducten zich verhouden ten opzichte van gemeten bodemvocht en grondwaterstanden voor een sterk bemeten veld (in dit geval het meteorologisch veldstation van het KNMI in

Cabauw) om zo de evaluatiemogelijkheden van grondwaterstandmetingen voor bodemvochtproducten zo beter in perspectief te zetten. Vervolgens willen we de resultaten van deze analyse verder opschalen door het gehele grondwaternetwerk wat beschikbaar is in het DINOloket te gebruiken. Door deze ruimtelijke aanpak pogen we meer inzicht te krijgen in de kwaliteit van de verschillende bodemvochtproducten.

Data

Satelliet bodemvochtproducten

Voor deze studie maken we gebruik van 2 recent ontwikkelde dagelijkse bodemvochtproducten die gebaseerd zijn op passieve microgolfdeta. Het eerste product is ontwikkeld uit de microgolfobservaties van de Japanse satelliet sensor AMSR-2 en het tweede product van observaties van de NASA SMAP missie. We maken gebruik van een door VanderSat ontwikkelde methode waarbij originele satellietmetingen verscherpt en achtereenvolgens omgezet worden naar bodemvocht via een vernieuwde versie van ons Land Parameter Retrieval Model (Owe e.a., 2008; De Jeu e.a., 2014; Van der Schalie e.a., 2017). Beide producten hebben een ruimtelijke resolutie van 100 m. Het AMSR-2 product is gebaseerd op C-band observaties en het SMAP product op L-band. L-band is in theorie wat gevoeliger voor bodemvocht dan C-band en daarnaast is de penetratie diepte van L-band een paar centimeter groter dan C-band. Algemeen wordt aangenomen dat de penetratie diepte ongeveer 1/3 van de golflengte is (Schmugge, 1985), wat neerkomt op om en nabij 1-2 cm voor C-band en 6-7 cm voor L-band. Binnen deze studie leggen we de focus op Nederland en maken we gebruik van ons AMSR-2 bodemvochtproduct voor de periode juli 2012 tot eind maart 2017. Ons SMAP bodemvochtproduct bestrijkt de periode van april 2015 tot eind maart 2017. De bodemvochtproducten worden volumetrisch uitgedrukt in m^3m^{-3} . In dit artikel zal het SMAP en AMSR-2 bodemvochtproduct aangegeven worden als respectievelijk θ_{SMAP} en $\theta_{\text{AMSR-2}}$. Voor de analyse hebben we gebruik gemaakt van een 10 daags lopend gemiddelde om zo de dagelijkse ruis van de twee producten, die veroorzaakt wordt door de meeton nauwkeurigheden van de sensoren, te reduceren.

Cabauw veldstation data

Voor de grondwaarnemingen maken we gebruik van bodemvocht- en grondwaterstandobservaties van de KNMI monitoringsite Cabauw (xRD =123321 m, yRD=442529 m) nabij het dorp Lopik, in de Lopikerwaard (beheergebied van Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden). We maken gebruik van de bodemvochtmetingen op 3 centimeter diepte (θ_{TH03}) en freatische grondwaterstandmetingen (GWL_{WNS}). Alle metingen zijn gemiddeld naar dagelijkse waarden. De data is verkregen via de Cesar-database (<http://www.cesar-database.nl>) waar ook meer informatie gevonden kan worden over deze dataset. Voor deze studie hebben we gebruik gemaakt van data voor de periode juli 2012 tot eind maart 2017.

Grondwaterstandmetingen

De grondwaterstandmetingen (GWL) die we in deze studie gebruiken komen van het DINOloket (www.dinoloket.nl). Alle beschikbare freatische grondwaterstanddata voor Nederland zijn gedownload voor de periode juli 2012 tot eind december 2016. De data is daarna geselecteerd via een set criteria waaronder de hoeveelheid overlappen-

de observaties met het bodemvochtproduct (>50) en diepte van de onderkant van het grondwater filter (> -400 cm). Verder heeft er ook een kwaliteitscontrole plaatsgevonden, waaronder: geen of verkeerde informatie over locatie maaiveld ten opzichte van NAP, diepste stijghoogte van de peilbuizen niet lager dan onderkant filter, en de berekende gemiddelde grondwaterstand niet hoger dan het maaiveld. Peilbuizen die niet voldeden aan deze criteria zijn niet meegenomen in de analyse. Deze filtering leverde uiteindelijk 3982 peilbuislocaties binnen Nederland op voor de periode juli 2012 tot eind december 2016 en 2270 peilbuislocaties voor de periode april 2015 tot eind december 2016.

Tenslotte zijn voor de periode april 2015 tot eind december 2016 verschillende groepen gemaakt met gemiddelde grondwaterstanden om zo beter te kunnen analyseren in hoeverre de relatie tussen grondwaterstand en satelliet gebaseerd bodemvocht varieert over de diepte. Deze groepen zijn terug te vinden in Tabel 1 waarbij er rekening gehouden is om de hoeveelheid peilbuizen zo gelijk mogelijk te verdelen binnen de groepen. Hiermee kan vervolgens een zo betrouwbaar mogelijke statistiek gegeneerd worden.

Tabel 1: Selectie van 5 groepen op basis van DINOloket data gebaseerd op gemiddelde grondwaterstanden.

Groep	Gemiddelde grondwaterstand ten opzichte van het maaiveld in cm	N
1	> -60	483
2	-60 t/m -90	420
3	-90 t/m -120	499
4	-120 t/m -150	438
5	-150 t/m -400	430

Methode

De methode die in deze studie toegepast wordt om de hoge resolutie bodemvochtproducten te evalueren is gebaseerd op twee stappen. Ten eerste evalueren we de satellietdata bodemvochtproducten voor Cabauw in de vorm van een correlatie-analyse waarbij we gebruik maken van grondobservaties van bodemvocht en grondwaterstanden. De correlatie coëfficiënten (Pearson's en Spearman) worden berekend tussen de verschillende bodemvochtproducten om zo meer inzicht te krijgen in de prestatie van de satellietproducten op deze locatie. Naast bodemvocht berekenen we ook de correlaties tussen de bodemvochtproducten en grondwaterstanden voor deze locatie. Hiermee kan een inschatting gemaakt worden over de verschillen en overeenkomsten tussen het gebruik van grondwaterstanden en in situ bodemvocht als evaluatietool.

Achtereenvolgens worden alle beschikbare grondwaterstanden van Nederland geanalyseerd waarbij er met name gekeken wordt naar de significante Spearman correlaties ($p < 0.05$) en ruimtelijke spreiding. Er wordt ingezoomd op een aantal locaties om goed te begrijpen wat de oorzaken zijn van de goede en slechte correlaties tussen satelliet bodemvocht en grondwaterstand. Door deze aanpak verwachten we meer inzicht te krijgen in de kwaliteit van de verschillende bodemvochtproducten. Daarnaast zal het ook handvatten geven over de mogelijkheden en beperkingen van het gebruik van een grondwaternetwerk als een (indirecte) evaluatieaanpak.

Evaluatie

Cabauw

Bij Cabauw is gekeken naar de vergelijking tussen de bodemvochtproducten en de metingen van de grondsensoren op 3 cm diepte. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 2, en hierbij springen een aantal zaken in het oog; de waarden van zowel de lineaire correlatie (Pearson) als de niet lineaire correlatie (Spearman) zijn over het algemeen hoger dan 0.75. Dit zijn hoge correlaties, met name in vergelijking met andere wetenschappelijke studies (e.g. de Jeu e.a. 2014, Dorigo e.a. 2015, van der Schalie e.a. 2016, Holgate et al., 2016). Bij deze studies liggen de correlaties gemiddeld vaak veel lager en komen dit soort hoge scores eigenlijk alleen maar voor in homogene semi aride gebieden gekenmerkt door sterke bodemvocht variaties, zoals in Australië of de Sahel regio. Wat verder opvalt, is dat met name de niet lineaire correlatie hoog is en dat θ_{SMAP} wat hogere correlaties geeft dan θ_{AMSR-2} .

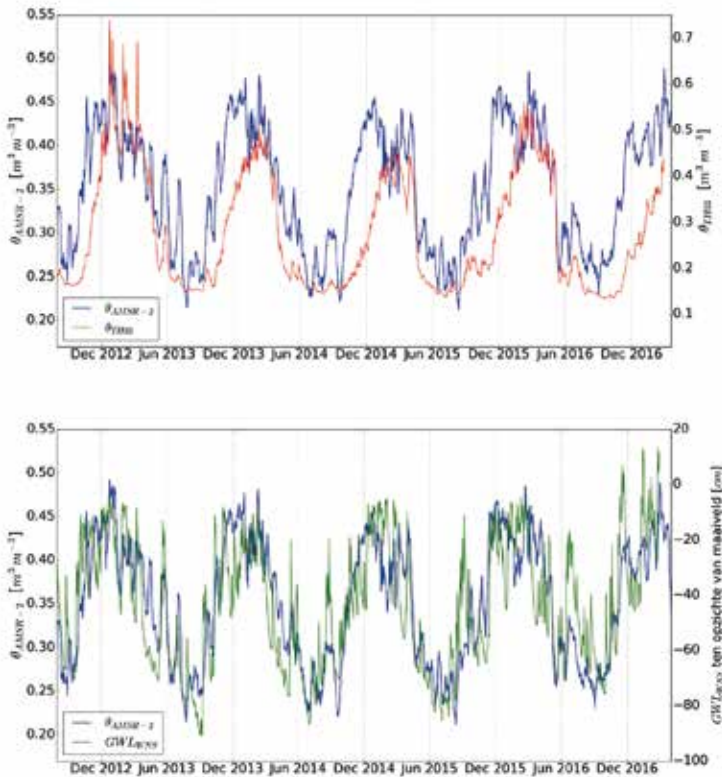
Tabel 2: Evaluatiestatistiek van de bodemvochtproducten (θ_{SMAP} en θ_{AMSR-2}) ten opzichte van de bodemvochtmetingen op 3 centimeter diepte (θ_{TH03}) en de gemeten grondwaterstanden (GWL_{WNS}) bij Cabauw. De met een asterisk (*) aangegeven statistiek is gebaseerd op dagen dat alle metingen aanwezig zijn tussen de periode april 2015 tot eind maart 2017. Dit is gedaan om de statistiek op een betrouwbare manier onderling te kunnen vergelijken.

	N	$R_{pearson}$	$R_{spearman}$	Periode
θ_{SMAP} vs θ_{TH03}	262 251*	0.81 0.81*	0.85 0.85*	apr 2015 t/m maart 2017
θ_{AMSR-2} vs θ_{TH03}	1533 251*	0.78 0.75*	0.85 0.81*	jul 2012 t/m maart 2017
θ_{SMAP} vs GWL _{WNS}	271 251*	0.75 0.76*	0.80 0.81*	apr 2015 t/m maart 2017
θ_{AMSR-2} vs GWL _{WNS}	1569 251*	0.78 0.75*	0.79 0.76*	jul 2012 t/m maart 2017
θ_{TH03} vs GWL _{WNS}	1654 251*	0.68 0.61*	0.74 0.72*	juli 2012 t/m maart 2017

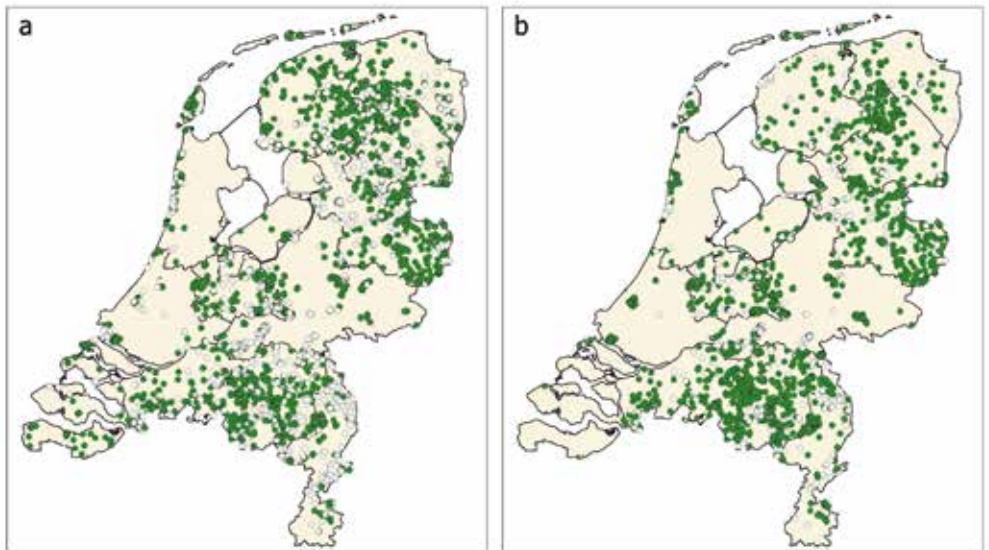
In Tabel 2 worden de tijdseries van θ_{AMSR-2} en grondobservaties gepresenteerd voor Cabauw. We zien hier een verdere bevestiging van het lokale gedrag van ondiepe in situ bodemvochtmetingen. Het valt op dat het seizoenspatroon van de bodemvochtsensoren afwijkt ten opzichte van het satelliet bodemvochtproduct. Verder vertonen de grondwaterstandmetingen (die over het algemeen minder lokaal bepaald zijn) een vergelijkbaar seizoenspatroon als de satelliet bodemvochtproducten. Dit geeft ons extra vertrouwen in het gebruik van grondwaterstandmetingen als evaluatietool. Dit vertrouwen wordt verder versterkt door de statistiek die in Tabel 2 wordt weergegeven. Hier zien we dat de vergelijkingen met grondwaterstandmetingen vergelijkbare correlaties geven als de vergelijkingen met in situ sensoren.

Nederland

Aan de hand van de resultaten van Cabauw zijn we onze benadering verder gaan opschalen door gebruik te maken van de beschikbare grondwaterstandsdata uit het DINOloket. De focus wordt daarbij vooral op de Spearman correlatie gelegd, omdat de relatie tussen bodemvocht en grondwaterstand per definitie niet altijd lineair hoeft te zijn. Afbeelding 3 toont de ruimtelijke spreiding van de beschikbare grondwaterstandmetingen, waarbij alle hogere correlaties ($R_{spearman} > 0.6$) tussen de bodemvocht-

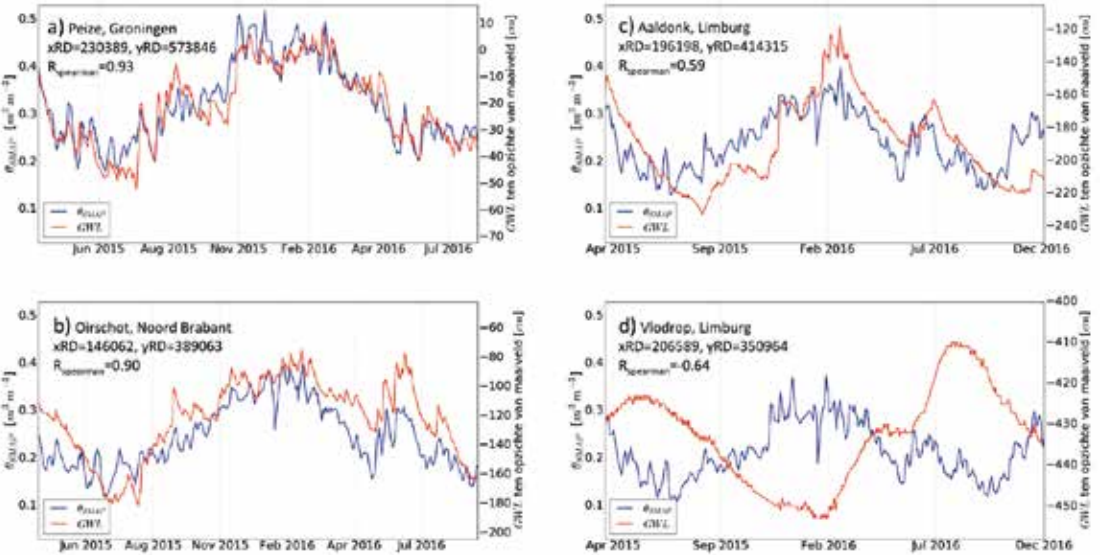


Afbeelding 2: Tijdsreefs van θ_{AMSR-2} (blauw) versus in situ bodemvocht op 3 cm diepte (rood) en grondwaterstandmetingen (groen) voor Cabauw.

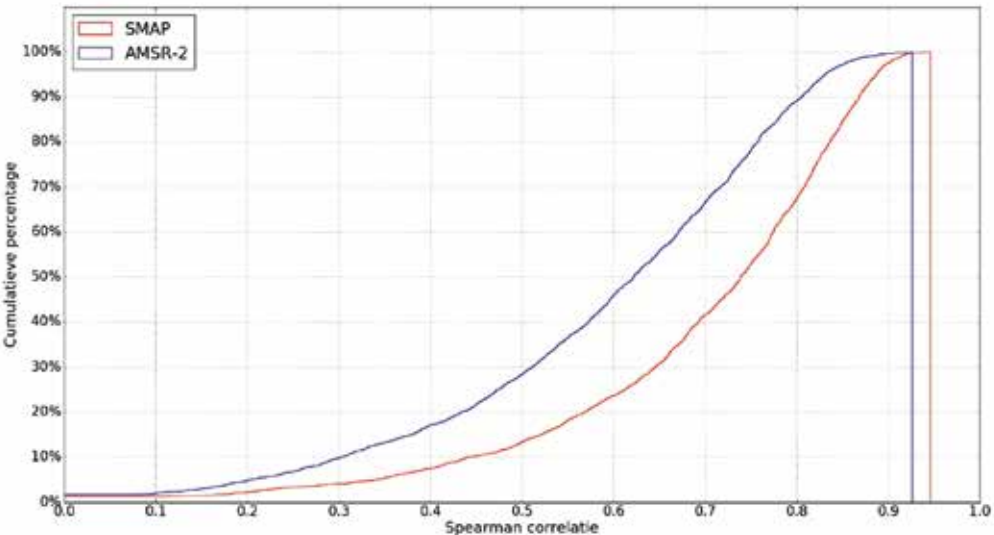


Afbeelding 3: Ruimtelijk beeld van de Spearman correlaties tussen de grondwaterstandmetingen en bodemvocht voor θ_{AMSR-2} voor de periode juli 2012 tot eind december 2016 (a) en θ_{SMAP} voor de periode april 2015 tot december 2016 (B). Groene punten geven locaties aan waar de correlaties gelijk of hoger zijn dan 0.6 en witte punten representeren correlaties lager dan 0.6.

democht en grondwater te zien met een faseverschuiving van ongeveer 2 maanden gedurende de droge periodes. Ter illustratie is er een tijdserie voor een zeer diepe grondwatermeting (<-400 cm) geprojecteerd in 4d (Vlodrop), en hierbij kan een nog sterkere (minimaal 6 maanden) verschuiving waargenomen worden dan de metingen in Aaldonk.

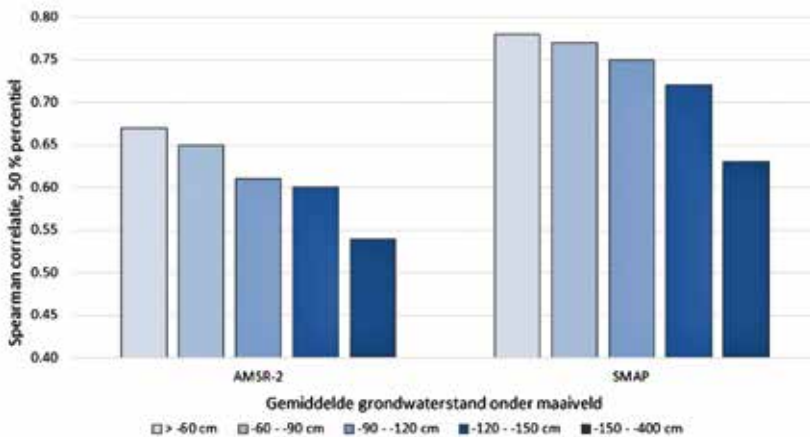


Afbeelding 4: Tijdseries van grondwaterstandmetingen en θ_{SMAP} voor vier verschillende locaties in Nederland.



Afbeelding 5: Cumulatieve histogram van de Spearman correlaties tussen de grondwaterstandmetingen en de bodemvochtproducten.

In Afbeelding 5 zijn alle berekende correlaties van de verschillende data paren cumulatief uitgezet om zo meer inzicht te krijgen in de prestaties van de twee producten. We hebben hierbij voor zowel AMSR-2 als SMAP dezelfde periode gekozen (april 2015 tot eind december 2016) om zo de datasets op een eerlijke manier te vergelijken. Dit alles resulteerde uiteindelijk in 2270 dataparen. Vanuit Afbeelding 5 kunnen we opmaken dat θ_{SMAP} over de gehele lijn significant beter is dan $\theta_{\text{AMSR-2}}$. Bij bijvoorbeeld de mediaan (P_{50} percentiel) heeft θ_{SMAP} een correlatie van 0.74 en $\theta_{\text{AMSR-2}}$ een correlatie van 0.62. Deze curve kan ook bepaald worden voor de 5 verschillende grondwaterstandgroepen zoals gedefinieerd in Tabel 1. Afbeelding 6 laat de correlatie zien van de mediaan voor deze verschillende groepen voor zowel SMAP als AMSR-2. Hier valt op dat er inderdaad een sterke relatie is tussen de ondiepe grondwaterstanden en bodemvocht en dat deze bovendien sterk begint af te nemen wanneer de gemiddelde grondwaterstand lager wordt dan 150 cm onder het maaiveld. Dit komt met name door de ont koppeling die gepaard gaat met een fase verschuiving, welke ook duidelijk naar voren komt in Afbeelding 4.



Afbeelding 6: Staafdiagram van de gegroepeerde grondwaterdieptes ten opzichte van de berekende Spearman correlaties tussen de grondwaterstandmetingen en de bodemvochtproducten bij P_{50} (i.e. de mediaan bij Afbeelding 5). Deze grafiek laat duidelijk de ont koppeling zien tussen grondwater en bodemvocht aan de oppervlakte wanneer je naar diepere niveaus gaat.

Conclusies

Binnen deze studie hebben we onderzocht wat de kwaliteit is van recent gegenereerde bodemvochtproducten op basis van satellietdata. We hebben hiervoor gebruik gemaakt van data uit het DINOloket. Uit deze studie is gebleken dat ondiepe grondwatermetingen (> -400 cm) uitstekend geschikt zijn om satelliet bodemvochtproducten te evalueren. Ze hebben over het algemeen een beter ruimtelijke support dan in situ bodemvochtsensoren en in Nederland is er bovendien een netwerk beschikbaar met een hogere dichtheid.

Zowel θ_{SMAP} als $\theta_{\text{AMSR-2}}$ presteren prima in Nederland met hoge correlaties verspreid over heel Nederland. Zelfs langs de kust en op de Waddeneilanden worden hoge correlaties gevonden. θ_{SMAP} presteert in Nederland over de gehele lijn beter dan $\theta_{\text{AMSR-2}}$. De satel-

liet bodemvochtproducten zijn zeer goed in staat om de veranderingen in bodemvocht scherp in kaart te brengen.

Door de hoge kwaliteit van deze bodemvochtproducten hebben ze de potentie om een belangrijke bron van informatie te worden voor zowel hydrologisch onderzoek als het waterbeheer. Zo kunnen de combinaties tussen satelliet bodemvocht en grondwaterstanden gaan bijdragen aan een verbeterde kennis omtrent hydrologische processen in de ondergrond wat kan leiden tot een efficiënter en effectiever waterbeheer. Dit is mogelijk omdat dit soort producten ons bijvoorbeeld in staat kan stellen om grondwaterstandsmetingen verder op te schalen in de ruimte, verdampingschattingen kan verbeteren en ons meer inzicht kan geven in de hydraulische eigenschappen van de bodem.

De dagelijkse VanderSat bodemvochtproducten zoals hier beschreven zijn, zijn voor Nederland al beschikbaar vanaf 2002 en kunnen nu operationeel als een service geleverd worden met een vertraging van 6 uur na satelliet opname.

Dankwoord

Langs deze weg willen we Fred Bosveld van het KNMI bedanken voor het beschikbaar stellen van de grondwater en bodemvocht data voor het veldstation Cabauw. Verder danken wij Arnoud Soetens en Myrjam de Graaf van Waterschap Limburg en Arjan Peters van Waterschap AA en Maas voor hun inzichten waarmee ze een belangrijke bijdrage hebben geleverd aan deze studie.

Literatuur

Basharinov A.E., A.S. Gurvich, ST Egorov, V.I. Zhukov, A.A. Kurskaya, L.I. Malafeev, D.T. Matvee, A.S. Mikhailov, and A.M. Shutko (1971) Results of Observation of the Thermal Radio Emission of the Earth Surface in an Experiment on the Cosmos-243 Satellite, *Kosmicheskie Issledovania* Vol. 9, pag. 268.

de Jeu, R. A., Holmes, T. R., Parinussa, R. M., & Owe, M. (2014). A spatially coherent global soil moisture product with improved temporal resolution. *Journal of Hydrology*, 516, 284-296.

De Jeu, R. A. (2003). *Retrieval of land surface parameters using passive microwave remote sensing*. PhD diss., Vrije Universiteit Amsterdam.

Dorigo, W. A., Gruber, A., De Jeu, R. A. M., Wagner, W., Stacke, T., Loew, A., ... & Kidd, R. (2015). Evaluation of the ESA CCI soil moisture product using ground-based observations. *Remote Sensing of Environment*, 162, 380-395.

Gruhler, C., Rosnay, P. D., Hasenauer, S., Holmes, T., Jeu, R. D., Kerr, Y., ... & Zribi, M. (2010). Soil moisture active and passive microwave products: intercomparison and evaluation over a Sahelian site. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(1), 141-156.

- Holgate, C. M., De Jeu, R. A. M., van Dijk, A. I. J. M., Liu, Y. Y., Renzullo, L. J., Dharssi, I., ... & McJannet, D.** (2016). Comparison of remotely sensed and modelled soil moisture data sets across Australia. *Remote Sensing of Environment*, 186, 479-500.
- Kerr, Y. H., Al-Yaari, A., Rodriguez-Fernandez, N., Parrens, M., Molero, B., Leroux, D., ... & Delwart, S.** (2016). Overview of SMOS performance in terms of global soil moisture monitoring after six years in operation. *Remote Sensing of Environment*, 180, 40-63.
- Mittelbach, H., & Seneviratne, S. I.** (2012). A new perspective on the spatio-temporal variability of soil moisture: temporal dynamics versus time-invariant contributions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(7), 2169-2179.
- Mladenova, I. E., Jackson, T. J., Njoku, E., Bindlish, R., Chan, S., Cosh, M. H., ... & Paloscia, S.** (2014). Remote monitoring of soil moisture using passive microwave-based techniques—Theoretical basis and overview of selected algorithms for AMSR-E. *Remote sensing of environment*, 144, 197-213.
- Njoku, E. G., & Li, L.** (1999). Retrieval of land surface parameters using passive microwave measurements at 6-18 GHz. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(1), 79-93.
- Owe, M., de Jeu, R., & Walker, J.** (2001). A methodology for surface soil moisture and vegetation optical depth retrieval using the microwave polarization difference index. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(8), 1643-1654.
- Schmugge, T.J.** (1985). Remote sensing of soil moisture. In Anderson, M. And Burt, T., editors, *Hydrological Forecasting*. John Wiley, New York.
- van der Schalie, R., de Jeu, R. A. M., Kerr, Y. H., Wigneron, J. P., Rodríguez-Fernández, N. J., Al-Yaari, A., ... & Drusch, M.** (2017). The merging of radiative transfer based surface soil moisture data from SMOS and AMSR-E. *Remote Sensing of Environment*, 189, 180-193.
- van der Schalie, R., Kerr, Y. H., Wigneron, J. P., Rodríguez-Fernández, N. J., Al-Yaari, A., & de Jeu, R. A.** (2016). Global SMOS soil moisture retrievals from the land parameter retrieval model. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 45, 125-134.
- Wagner, W., Lemoine, G., & Rott, H.** (1999). A method for estimating soil moisture from ERS scatterometer and soil data. *Remote sensing of environment*, 70(2), 191-207.
- Wagner, W., Naeimi, V., Scipal, K., de Jeu, R., & Martínez-Fernández, J.** (2007). Soil moisture from operational meteorological satellites. *Hydrogeology Journal*, 15(1), 121-131.
- Western, A. W., & Blöschl, G.** (1999). On the spatial scaling of soil moisture. *Journal of hydrology*, 217(3), 203-224.

Evaluation of high resolution satellite soil moisture products using a dense network of groundwater level observations

Richard de Jeu en Anne de Nijs

Two recently developed 100 m resolution soil moisture datasets are compared to groundwater levels from a dense observation network in the Netherlands. The first product was based on C-band satellite observations from the Japanese Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR2) and the other from the L-band NASA Soil Moisture Active Passive (SMAP) mission. This study revealed that the dense groundwater network serves as an excellent evaluation tool for satellite soil moisture products over the Dutch lowlands. High correlations were found between the satellite soil moisture products and groundwater observations. Both AMSR2 and SMAP surface soil moisture products perform well over the Netherlands. The L-band SMAP product has a better performance than the C-band AMSR2 product ($R_{SMAP} = 0.74$ versus $R_{AMSR2} = 0.62$ for the median of all groundwater observations). Shallow groundwater levels give the best correlations with the satellite soil moisture products. A substantial degradation in correlation occurred when the average groundwater level dropped >150 cm below the surface. We believe that these promising results of this study could set the base for additional hydrological research, with a special emphasis on hydrological processes in the unsaturated zone.
