
Radarsatellietinformatie voor Nederlands waterbeheer

Deel 2: Toevoeging van satellietradarmetingen met hoge resolutie

Rogier Westerhoff
Marco Kleuskens
Remko de Lange

Dit artikel is een vervolg op het eerder in dit vakblad gepresenteerde artikel over satellietinformatie voor Nederlands waterbeheer (Westerhoff e.a., 2011). Er wordt dieper ingegaan op de theorie van microgolfmetingen. Ook wordt een experimentele methode beschreven die met behulp van Synthetic Aperture Radar (SAR), een microgolf (radar) meting de schatting van bodemvocht in Nederland kan verbeteren door toevoeging van middel- tot hoge resolutiemetingen van de ENVISAT-ASAR-sensor. Deze toevoeging van hoge ruimtelijke resolutie lijkt pas operationeel te kunnen worden met de komst van de Sentinel-1-satelliet in 2012. De methode wordt gepresenteerd aan de hand van twee case studies over de toegevoegde waarde van SAR-data.

1 Introductie

Variatie in bodemvocht, een essentiële klimaatvariabele, speelt een belangrijke rol in de opbrengst van het boerenland (FAO, 2009), veenoxidatie en bodemdaling. Dat deze laatste twee factoren in grote delen van Nederland een belangrijke rol spelen, blijkt onder andere uit studies van Wösten e.a. (2001), waarin beschreven wordt hoe gevoelig het watersysteem van Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden reageert op klimaatverandering en bodemdaling, maar ook hoe belangrijk de toevoeging van hoge resolutie data in de modellering is (Wendt e.a., 2004). In dit artikel, dat voortbouwt op Westerhoff e.a. (2011) wordt verder gekeken dan een remote-sensing-methode op nationale en provinciale schaal. Om snel inzicht te kunnen geven in de actuele bodemvochtsituatie is onderzocht wat de toegevoegde waarde van hoge-resolutieradar kan zijn op bestaande methodieken van onder andere Westerhoff e.a. (2011) voor nu en in de toekomst. De beschreven methode is gebaseerd op het gebruik van middel tot hoge resolutie satellietradar data. De werkzaamheden beschreven in dit artikel zijn uitgevoerd in het onderzoeksproject "Radar service voor bepaling van bodemvocht", gesubsidieerd door het Netherlands Space Office.

Rogier Westerhoff en **Marco Kleuskens** zijn werkzaam bij Deltares, Postbus 85467, 3508 AL Utrecht.
Remko de Lange is werkzaam bij NEO, Postbus 2176, 3800 CD Amersfoort.

2 Theorie satellietradar

2.1 Algemeen

Voor het observeren van bodemvocht zijn verschillende satellietsensoren voorhanden. Dit zijn met name sensoren die gevoelig zijn voor microgolven met golflengten van 2 cm tot 1 meter. Deze golflengtes zijn vele ordes van grootte groter dan de zichtbare lichtgolven. Meten in het microgolfdomein heeft enkele voordelen ten opzichte van het meten in het optische domein. Allereerst bestaat er een relatie tussen de gemeten hoeveelheid energie en de hoeveelheid water van het bemonsterde oppervlak. Ook worden grotere golven weinig beïnvloed door atmosferische gassen en bewolking, in tegenstelling tot golflengtes kleiner dan 2 cm, die onder andere gebruikt worden door weerradarstations. Daarnaast zijn microgolfsensoren minder afhankelijk van de zon, omdat de zon vooral zichtbaar licht uitzendt en relatief weinig microgolfstraling. In plaats daarvan ontvangt de sensor de straling die het aardoppervlak zelf uitstraalt (passieve microgolfsensoren) of een actief signaal dat door de satelliet zelf is uitgezonden en is weerkaatst door het aardoppervlak (actieve radars). Door deze kenmerken opereren microgolfsatellieten ook 's nachts en onder bewolkte omstandigheden. In deze studie is gebruik gemaakt van actieve sensoren (radars) aangezien de huidige passieve microgolfsatellieten veel te lage ruimtelijke resoluties hebben (Gouweleeuw, 2000) of omdat het nog niet duidelijk is of deze satellieten aansluiten op toekomstige satellietmissies, met als risico een tussenliggende periode waar geen data wordt opgenomen. Voor de geraadpleegde sensoren is datalevering gegarandeerd in de toekomst – een essentiële conditie voor een operationele, duurzame dienstverlening.

Radarsatellietmethoden en optische satellietmethoden verschillen zoals genoemd in vele opzichten maar tonen ook overeenkomsten. Een wereldwijd bekende en goed ontwikkelde optische methode is bijvoorbeeld de SEBAL-methode van Bastiaanssen e.a. (1998), die uit albedo, vegetatie indices en oppervlaktemperatuur bodemvocht afleidt. De genoemde albedo is een kwantificering van het weerkaatsingsvermogen van het bodemoppervlak voor elektromagnetische straling, in dit geval zichtbaar licht. Radargolven zijn net als zichtbaar licht ook deel van het elektromagnetische stralingsspectrum. De term albedo wordt in radartheorie niet gebruikt, maar de term backscatter wel. Backscatter of 'terugverstrooiing' is de hoeveelheid teruggestraalde energie van een radarsignaal en is afhankelijk van dezelfde eigenschappen als waar de albedo van afhankelijk is. Het verschil is dat radargolven door hun grotere golflengte daadwerkelijk in de eerste centimeters grond penetreren en dus een meer directe link met bodemvocht hebben. Om tot inzicht in bodemvocht te komen berusten zowel SEBAL als alle radarmethoden op beperkte aannames en beperkingen in kennis over vegetatie. Idealiter worden ze – naast validatie door in-situ data – met elkaar gecombineerd.

De backscatter van radargolven van de eerste centimeters aardoppervlak is van een aantal factoren afhankelijk. Zo heeft de aard en de ruwheid van het oppervlak invloed, maar ook de aanwezigheid van vegetatie bepaalt hoeveel energie terugkeert bij de sensor. De afhankelijkheid van de aard van het oppervlak is van belang aangezien deze gekoppeld is aan de vochtigheid van de bodem. Dit komt doordat de eigenschappen van het weerkaatste signaal onder meer afhankelijk zijn van de diëlectrische eigen-

schappen van het materiaal. Aangezien de diëlectrische constante van water vele malen hoger is dan van droge bodem (o.a. Jol, 2009), is het onderscheid tussen droge en natte bodem meetbaar. Om het onderscheid tussen droge en natte bodem te vergroten dienen de andere effecten gereduceerd te worden. Het geometrische en diëlectrische reliëf (van micro- (mm's) tot macroschaal (m's tot km's)) heeft invloed op het signaal. Het signaal kan direct gereflecteerd of verstrooid worden afhankelijk van het microreliëf. Ook speelt het macroreliëf een rol aangezien het bepaalt of golven enkele of meerdere keren reflecteren. Daarnaast is de hellingshoek van het aardoppervlak ten opzichte van de invalshoek van de radar bepalend voor de hoeveel energie die terugkeert bij de sensor. Voor de meeste radars geldt een invalshoek variërend tussen de 15 en 45 graden. Het effect van de invalshoek is het meest prominent bij gladde oppervlakken zoals oppervlaktewater, aangezien deze min of meer als spiegels werken. Bij bossen is dit effect gering doordat het signaal naar alle richtingen gelijk verstrooid wordt. Deze 'volumetrische verstrooiing' komt zowel bij vegetatie als bij droge oppervlakken voor (woestijn, droge sneeuw maar ook bevroren grond). Buiten deze volumetrische verstrooiing om is de penetratiediepte van het radarsignaal afhankelijk van golflengte, bodemtype en watersaturatie. De penetratiediepte ligt ruwweg in de orde van één tot een halve golflengte. Het radarsignaal bevat dus alleen informatie over dit gedeelte van de bodem. Hoe langer de golflengte van de radargolf, hoe minder verstoring er is door de vegetatie. De lange golven (L-band, 15-30 cm) zijn dan ook uitermate geschikt voor bodemvochtmetingen (Dubois e.a. (1995), Dekker e.a. (2009)). Er zijn echter weinig satellieten voorhanden met L-band sensoren aan boord. Bodemvocht kan ook bepaald worden met de kortere C-band golven (3,75-7,5 cm) indien de invloed van vegetatie weggehaald of geminimaliseerd wordt (Wagner e.a., 1999). Het voordeel van de C-band is dat deze radarsensoren zich ook bevinden op operationele satellieten. De invloed van vegetatie kan onder andere verminderd worden door in specifieke richtingen te meten. Microgolven kunnen gericht worden door polarisatie in twee richtingen, namelijk horizontaal (H) en verticaal (V). Door te variëren in uitzenden en ontvangen zijn de volgende polarisatiemodi mogelijk: VV, HH, VH, HV. In de praktijk blijkt dat de HH combinatie het minste last heeft van verstoring door vegetatie. Door het operationele karakter van enkele C-band (VV en HH) satellieten lenen deze zich bij uitstek voor bodemvochtonderzoek en dienstverlening. Daarom is in deze studie gekozen voor onderstaande bodemvochtextracties uit C-band radar.

2.2 *Envisat* – ASAR

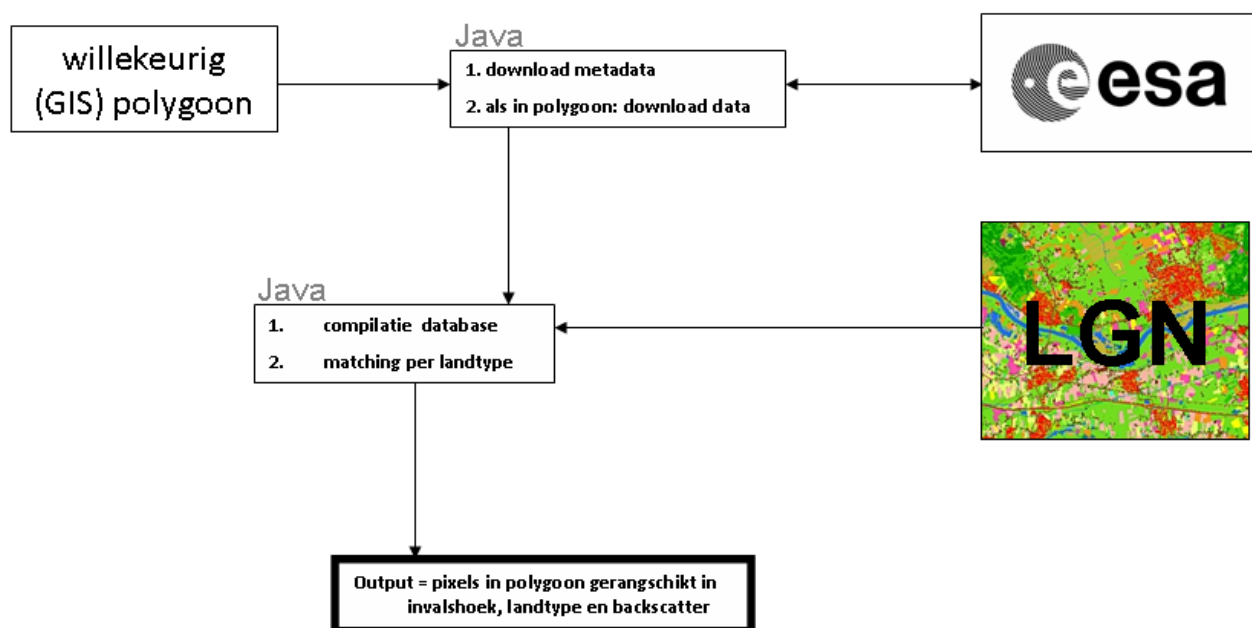
2.2.1 ALGEMEEN

De ASAR-sensor is een zogenaamde synthetic aperture radar (SAR) op de Europese Environmental Satellite (ENVISAT). SAR-sensoren verkrijgen een hoge resolutie doordat vele beelden van de bewegende satelliet worden gecombineerd. Hoewel SAR een hogere ruimtelijke resolutie heeft dan andere microgolfmethoden als ASCAT (Westerhoff e.a., 2011), wordt het signaal sterker verstoord door kleinschalige lokale effecten. ASAR kent verschillende opnamemodi waarbij oppervlakte en ruimtelijke resolutie gekoppeld zijn. De in dit artikel gebruikte ASAR-modus heet Wide Swath Mode (WSM) met een pixelresolutie van 75 x 75 m en een VV polarisatie. De dataverwerking van

ASAR tot bodemvochtgegevens is in een jonger en meer experimenteel stadium dan de in deel 1 van dit artikel beschreven ASCAT-methode. Er bestaan wel verschillende experimentele manieren om SAR-beelden te vertalen naar bodemvochtdata. Twee methodes worden kort belicht. De eerste berust op het principe dat de vegetatie langzamer verandert dan de hoeveelheid bodemvocht; Shoshany e.a. (2000) kijken naar relatieve verschillen ten opzichte van een vorige opname. Hiermee zouden regionale en jaarlijkse effecten moeten uitdempen. De tweede methode maakt gebruik van een empirisch verband tussen bodemvocht en radarsignaal (Ulaby e.a., 1986, Moran e.a., 2005), waarmee met in-situ data de exacte functie wordt geschat. Beide aanpakken zijn niet zonder risico's. Bij de eerste methode worden twee beelden met elkaar vergeleken, zodat de ruis van beide beelden terug te vinden is in het eindresultaat. Daarnaast is het zeer moeilijk om beelden exact aan elkaar te geo-refereren. De tweede aanpak neemt een verband aan op basis van slechts enkele in-situ waarnemingen. Hierdoor wordt er gecorrigeerd met een verband dat niet fysisch aanwijsbaar is voor de hele satellietopname. Om deze redenen beperken we ons tot het analyseren van de ruwe data in dit artikel. Zichtbare anomalieën in de visualisaties worden gekoppeld aan mogelijke verschillen in bodemvocht of andere fenomenen. De ruwe ASAR-data worden besproken aan de hand van twee case studies in het veenweidegebied en het Juliana-kanaal in Limburg.

2.2.2 ASAR-DATAVERWERKINGSPROCEDURE

Om tot een dataset te komen die vergeleken kan worden met bodemvochtgegevens en neerslag, is zoals gezegd gekozen voor een aanpak waarbij zoveel mogelijk gekeken wordt naar 'ruwe' data. De dataverwerkingsprocedure is weergegeven in figuur 1. Allereerst wordt een polygoon gedefinieerd die aangeeft welk gebied er geanalyseerd



Figuur 1: Om te komen tot een vergelijking van ASAR-data met bodemvocht per polygoon wordt er gebruik gemaakt van verschillende in het project ontwikkelde open source scripts om de data van een ESA server te halen en vervolgens te verwerken tot genormaliseerde backscatterplaatjes per landtype.

moet worden. Deze polygoon kan bijvoorbeeld in GIS worden gedefinieerd. Daarna wordt een script gestart dat de metadata op een ESA-server benadert en de data die binnen het polygoon vallen downloadt. Vervolgens wordt via een routine gekeken wat de invalshoek van de data is en op welk landtype de losse pixels in het gedownloadde plaatje vallen. Voor de classificatie naar landtype wordt een compilatie van landgebruikstypes van LGN5 gemaakt. Deze onderverdeling is weergegeven in de appendix van dit artikel. Vervolgens wordt een export gedaan per pixel met voor de invalshoek gecorrigeerde backscatter en een middeling van de gecorrigeerde backscatter per landtype. Eventuele subindelingen in pixelclusters, coördinaten of kleinere polygoonen kunnen optioneel ook worden gemaakt.

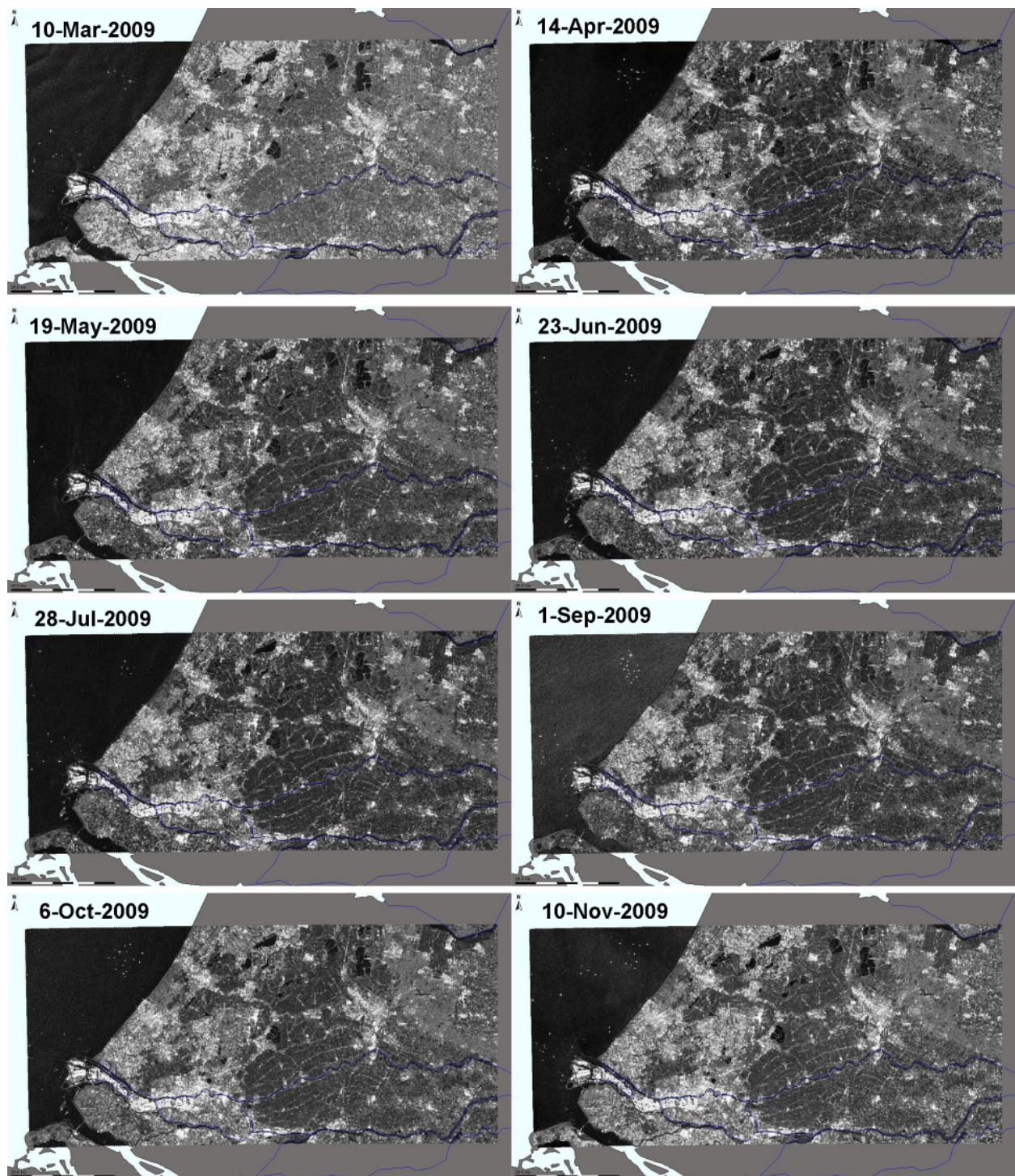
3 Resultaten

Case study 1: veenweidegebied

Op bepaalde plekken in het veenweidegebied ten westen van Utrecht is de marge tussen veenoxidatie en plassen op de velden dun. Daarom is het extra belangrijk om hier informatie te hebben over bodemvocht. Tabel 1 en figuur 2 geven in woord en beeld acht opeenvolgende ASAR-beelden en statistieken weer uit 2009 die allemaal onder dezelfde invalshoek zijn opgenomen met een interval van 35 dagen. Op deze manier zijn enkele fenomenen te zien: het landelijke gebied springt eruit op het eerste beeld (10 maart) en op de laatste twee (6 oktober en 10 november). Dit zijn de beelden met de meeste neerslag en de minste zon. Het effect is niet te zien op de beboste Utrechtse Heuvelrug. Daarnaast is op het beeld van 1 september de zee lichter dan op de andere beelden, hetgeen vermoedelijk te maken heeft met windrichting.

Tabel 1: Het weer vanaf 10 maart 2009 met een interval van 35 dagen. De kustmetingen komen uit Den Helder; de ander metingen uit de Bilt. Bron: KNMI.

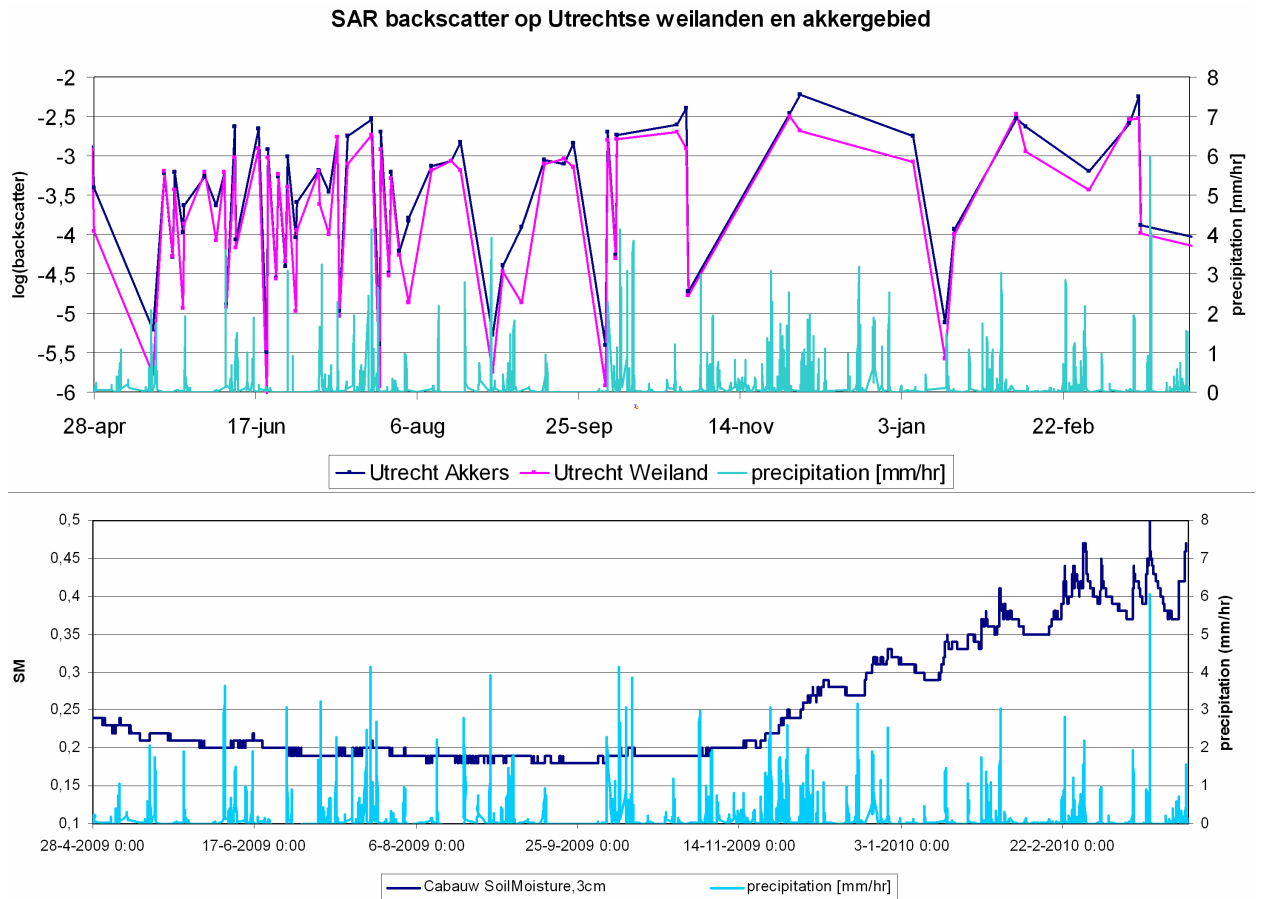
	Kust		Landinwaarts		Neerslag (mm)	zon (uur)
	windsnelheid (Bft)	windrichting	windsnelheid (Bft)	windrichting		
10 mrt	5	W	3	WZW	4,9	0,2
14 apr	4	NNO	3	NNO	0	8,5
19 mei	5	ZW	4	ZZW	0	7,3
23 jun	6	NNO	4	NNO	0	14,6
28 jul	5	WZW	3	ZW	0,2	7,2
1 sep	6	ZZW	4	ZZW	1,3	2,9
6 okt	6	ZZW	4	ZZW	5,4	0,1
10 nov	5	W	2	W	3,5	0



Figuur 2: ASAR-beelden van West-Nederland op respectievelijk 10 maart, 14 april, 19 mei, 23 juni, 28 juli, 1 september, 6 oktober en 10 november 2009.

We analyseren de weilanden en akkers ten westen van Utrecht door de totale SAR-backscatter te plotten. Dit is weergegeven in figuur 3, waar ook de regenval en door een sensor gemeten bodemvochttoestand op 3 cm diepte van het weerstation Cabauw te zien is. De SAR-backscatter van weilanden lijkt hier erg veel op die van akkers, waaruit wordt geïnterpreteerd dat de verschillen die er te zien zijn voor een groot deel door vochtverschillen komen en niet door verschillen in vegetatie. Deze aanname gaat niet op als akkers en grasland in het gebied met de zelfde snelheid groeien en het grasland op dezelfde momenten worden gemaaid. Er valt ook te zien dat veel verho-

gingen van backscatter te relateren zijn aan neerslag. Dit is te verklaren door het feit dat een vochtiger bodem een sterker contrast in diëlectrische constante teweegbrengt en hierdoor meer radarsignaal terugverstrooit. Wat verder opvalt, is dat er ook grote en plotselinge verlagingen te zien zijn in de backscatter. Dit kan duiden op een groter aantal pixels dat volledig onder water staat, maar kan ook duiden op vele andere factoren, zoals de relatie met de backscatter en invalshoek. Er moet vermeld worden dat in de periode van november – maart de satellietdata minder betrouwbaar zijn door mogelijk veranderde bodemreflectie-eigenschappen door sneeuw en vorst.

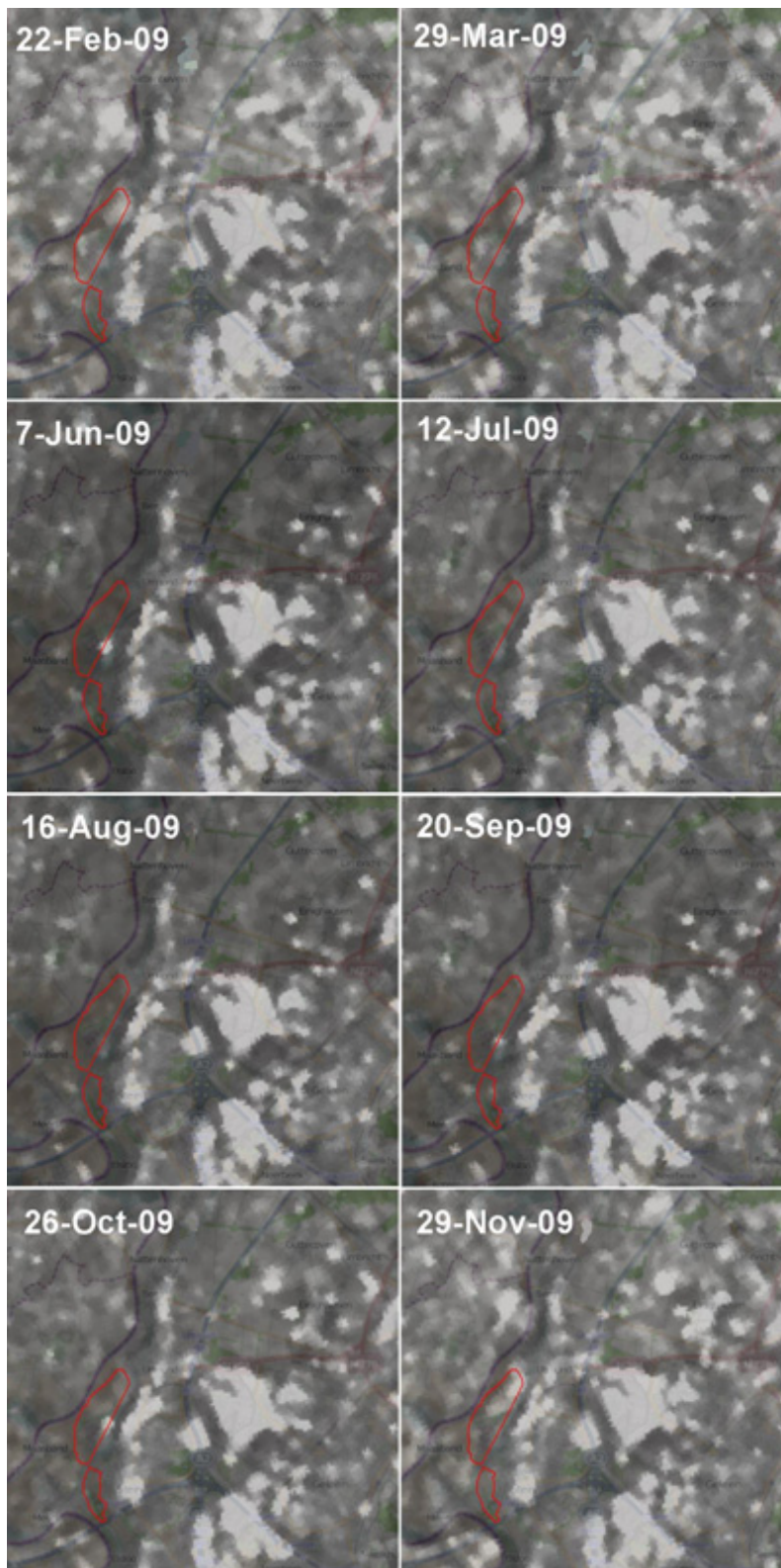


Figuur 3: De SAR-backscatter van ASAR voor Utrechts gebied voor meerdere invalshoeken. Ook de regenval (in mm/uur) en bodemvocht op 3cm diepte van het weerstation Cabauw zijn geplot.

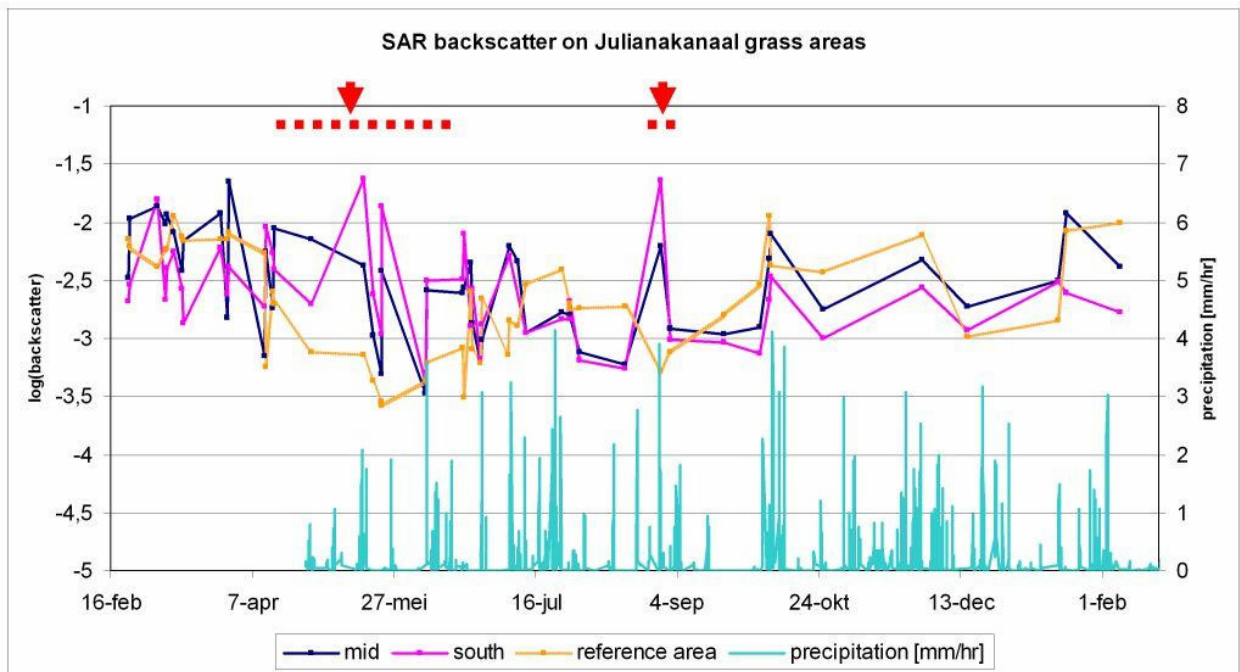
Case study 2: Limburg - Julianakanaal

Het Julianakanaal ligt ter hoogte van Stein verhoogd in het landschap en is gescheiden daarvan door een dijk. Hierdoor treedt vaak kwel op in de gebieden net achter de dijk. Deze gebieden zijn weergegeven in rood in figuur 4. De twee gebieden bestaan uit grasland. We bekijken deze backscatter in meer detail in figuur 5 naast een referentiegebied (gras waar geen kwel voorkomt) en de neerslag gemeten op het dichtstbijzijnde weerstation Roermond. Onderstaande figuren geven enkele beelden weer met dezelfde invalshoek en tijdreeksen van de gebieden, vergeleken met gebieden waar zeker geen kwel voorkomt. Uit de tijdreeksen blijkt dat het bodemvocht in het gehele gebied een jaarlijkse periodieke schommeling doormaakt. Deze schommeling is een gecombineerd

effect van vegetatie en jaarlijkse schommeling van neerslag en verdamping. Daarnaast is te zien dat de grasgebieden allebei verhoogde waarden tonen ten opzichte van het referentiegebied in de periode april-mei en kort in september, hetgeen door kwel of verminderde afvoer van regen kan zijn veroorzaakt.



Figuur 4: Enkele ASAR-beelden van het gebied rond het Julianakanaal. De beelden zijn genomen op 22 februari, 29 maart, 7 juni, 12 juli, 16 augustus, 20 september, 26 oktober en 29 november. De rode contouren geven gebieden aan waar veel kwel voorkomt.



Figuur 5: SAR backscatter voor twee grasgebieden in het Julianakanaal geplot samen met een ‘droog’ referentiegebied en de neerslag in mm per uur in het gebied. In de periodes die met rood zijn aangegeven zijn de gebieden geïnterpreteerd als aanmerkelijk natter dan het referentiegebied.

4 Discussie

Ondanks dat er in de casestudies verschillen waarneembaar zijn die kunnen duiden op bodemvochtverschillen, is het nog niet goed mogelijk om ASAR-beelden op een nauwkeurige operationele manier te gebruiken en te corrigeren voor de textuur van het oppervlak. De voornaamste reden is dat er geen regelmatige beelden met meerdere polarisaties boven Nederland verkrijgbaar zijn. De verkregen beelden zijn bovendien VV (verticaal) gepolariseerd, waardoor de vegetatie een relatief grote invloed heeft ten opzichte van de gemeten bodem. Met de komst van de Sentinel-1 satelliet in 2012 kan de omschreven methode beter worden ingezet, aangezien dit een operationele missie zal worden die een periodieke (om de paar dagen) globale dekking van beelden met (waarschijnlijk) HH - polarisaties zal garanderen vanaf 2012. Doubkova e.a. (2010) laat zien dat nu al hogere resolutie bodemvocht (1 x 1 km) gerealiseerd kan worden wanneer gebruikt gemaakt wordt van een ander type ASAR-data. Dit type data is helaas niet voor Nederland te verkrijgen op regelmatige tijdstippen. De methode berust op het slim combineren van lage en hoge resolutie microgolfddata en is een methode die toepasbaar is met de komst van de Sentinel-1 in combinatie met bijvoorbeeld ASCAT-bodemvochtgegevens. Toch dienen er nog enkele wetenschappelijke stappen gezet te worden om de met elkaar gecorreleerde bodemeigenschappen operationeel om te zetten naar bodemvochtinformatie. Het vergt namelijk voornamelijk interpretatie- en expertkennis om tot verschillen in bodemvocht te komen. Een sprekend voorbeeld is dat een seizoensfluctuatie in de backscatter veroorzaakt wordt door vegetatieverschillen, regenverschillen of verdampingsverschillen en dat deze lastig los te koppelen zijn. Combinatie met SEBAL (Bastiaanssen e.a., 1998) en regenradarstations zou hier een belangrijke toevoeging zijn om gewasgroei, verdamping en regenval per pixel te bere-

kenen. Verder moet er ook rekening worden gehouden met het feit dat voor kleine invalshoeken de ASAR correlatie beter is omdat de bodemruwheid dan het minste invloed op het signaal heeft (o.a. Dubois e.a. (1995), McNairn e.a. (2010)). In de loop van het project (De Lange e.a. 2010) zijn te weinig ASAR-beelden verkregen om een goed beeld te krijgen van de seizoensfluctuatie, aangezien deze pas naar voren komt bij meerjarige data. Ook hierop wordt gewacht tot de Sentinel-1.

De puntmetingen door een bodemvochtsensor zijn qua temporele resolutie (elke 10 minuten) vele malen beter dan het synoptische ASAR-beeld (temporele resolutie varieert tussen de 2 en 35 dagen); met het oog op toekomstige SAR-missies is het belangrijk dat deze typen data makkelijk met elkaar worden gecombineerd om zowel temporeel als ruimtelijk voldoende monitoringdata te hebben. Er wordt aangeraden om deze data zoveel mogelijk in open-standaard systemen zoals Delft-FEWS te gebruiken, zodat eventuele nieuwe toekomstige data ook eenvoudig te gebruiken zijn.

5 Conclusie

In dit artikel is een analyse gepresenteerd naar de meerwaarde van hoogresolutive SAR-data voor waterbeheerders met het oog op operationeel gebruik, waarin ASAR-data van de Envisat-satelliet met een resolutie van 75 x 75 m is gebruikt. In twee casestudies blijkt dat deze data een duidelijke en zichtbare link hebben met bodemvocht, maar dat er ook nog veel andere factoren zijn die het signaal beïnvloeden. Met de komst van de operationele Sentinel-1-satelliet zullen deze data in betrouwbaarheid en temporele en ruimtelijke resolutie verbeterd worden.

6 Dankwoord

Dit project was niet mogelijk geweest zonder de PEP-subsidie (Prequalification for ESA Proposals) van Netherlands Space Office. Ook de enthousiaste reacties tijdens het project van Ruud Grim (NSO) hebben geleid tot een zeer gemotiveerd projectteam.

Graag willen wij Joost Heijkers van Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden, Han de Lange en Herman Peters Van Rijkswaterstaat Data- en Informatie Dienst en Timo Kroon van Rijkswaterstaat Waterdienst bedanken voor de zeer waardevolle input tijdens de projectinterviews.

Ook willen wij Fred Bosveld van het KNMI bedanken voor het aanleveren van in-situ bodemvochtmetingen uitgevoerd bij de KNMI meetmast bij Cabauw en bedanken we Ab Veldhuizen (Alterra) voor het ter beschikking stellen van LGN5.

Het projectteam bestond uit de auteurs van dit artikel, alsmede Tamara van de Ven (TNO), Dave Smulders (Deltares), Mijntje Crone en Paul de Beurs van NEO.

7 Referenties

Bastiaanssen, W.G.M., M. Menenti, R.A. Feddes en A.A.M. Holtslag (1998) The Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL): Part 1 formulation; in: *Journal of*

Hydrology, vol 212–213, pag 198–212.

- Dekker, R.J., J.M. Schuurmans, W.L. Berendrecht, W. Borren, T.J.M. van de Ven en R.S. Westerhoff (2009)** Improving Hydrological Models of the Netherlands using ALOS PALSAR; Proceedings of the ESA Symposium of Water Cycle Science, 18–20 november 2009, Frascati.
- Doubkova, M., A. van Dijk en B. Bauer-Marschallinger (2010)** Using the ESA's ASAR GM radar instrument to map physical soil properties (case study over Australia); *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 12, EGU2010-7114.
- Dubois, P.C. en J. van Zyl, T. Engman (1995)** Measuring soil moisture with imaging radar; in: *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, vol 33, nr 4, pag 915–926.
- Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations (2009)** T12-ECV: Assessment of the status of the development of the standards for the Terrestrial Essential Climate Variables: Biomass, GTOS-67.
- Gouweleeuw, B.T. (2000)** Satellite passive microwave surface moisture monitoring, proefschrift, Vrije Universiteit, Amsterdam. Geraadpleegd augustus 2011 via <http://www.hydrology.nl/phd-theses.html>.
- Jol, H.M. (2009)** Ground penetrating radar: theory and applications; Elsevier, Amsterdam, pag 45–57.
- Lange, R. de, R. Westerhoff en M. Kleuskens (2010)** Een RADAR service voor bepaling van bodemvocht; Rapport EZ Subsidieregeling prekwificatie ESA-programma's, Netherlands Space Office project 61918, NEO.
- McNairn, H., A. Merzouki en A. Pacheco (2010)** Estimating Surface Soil Moisture Using Radarsat-2; *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, Volume XXXVIII, Part 8, Kyoto Japan 2010.
- Moran, M.S., A. Vidal, D. Troufleau, Y. Inoue, J. Qi, T.R. Clarke, P.J. Pinter, T.Jr. Mitchell en C.M.U. Neale (1997)** Combining multi-frequency microwave and optical data for farm management; in: *Remote Sens. Environ.* 61, pag 96–109.
- Quesney, A., S. Le Hegarat-Masclé, O. Taconet, D. Vidal-Madjar, J.P. Wigneron, C. Loumagne en M. Normand (2000)** Estimation of watershed soil moisture index from ERS/SAR data; in: *Remote Sens. Environ.*, vol 72, pag 290–303.
- Shoshany, M., T. Scoray, P.J. Curran, G.M. Foody en A. Prevolotsky (2000)** The relationship between ERS-2 SAR backscatter and soil moisture: Generalization from a humid to semi-arid transect; *Int. J. Remote Sens.* 21, pag 2337–2343.
- Ulaby, F.T., R.K. Moore en A.K. Fung (1986)** *Microwave Remote Sensing: Active and Passive*, Vol. III: From Theory to Applications; Artech House, Boston, London.
- Wagner, W., G. Lemoine, M. Borgeaud en H. Rott (1999)** A Study of Vegetation Cover Effects on ERS Scatterometer Data; in: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Volume 37, Issue 2 II, March 1999, pag 938–948.
- Wendt, T.A., P.N.M. Schipper en W.J.M. Heijkers (2004)** Gedetailleerde modellering van grond- en oppervlaktewater maakt GGOR-model geschikt voor WB21-uitwerking; in: *Stromingen*, jrg 10, nr 1, pag 27–37.
- Westerhoff, R.S., M. Kleuskens en R. de Lange (2011)** Radarsatellietinformatie voor Nederlands waterbeheer; Deel 1: de DRYMON methode; in: *Stromingen*, jrg 17, nr, pag 9–19.
- Wösten J.H.M., G.J. Veerman, W.J.M. de Groot en J. Stolte (2001)** Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks; vernieuwde uitgave Alterra-rapport 153/IS/01-2001.

Appendix – van LGN naar ASAR-hoofdklassen

Legenda van het LGN5-bestand				ASAR #		
Code	Hoofdklasse	Subgroep	Klasse	nummer	<i>0 = overig</i>	
1			gras	2	<i>1 = akker</i>	
2			maïs	1	<i>2 = wei</i>	
3			aardappelen	1	<i>3 = bos</i>	
4			bieten	1	<i>4 = water</i>	
5	Agrarisch gebied		granen	1		
6			overige landbouwgewassen	1		
8			glastuinbouw	0		
9			boomgaard	0		
10			bollen	0		
11		Bos		loofbos	3	
12			naaldbos	3		
16	Water		zoet water	4		
17			zout water	4		
18	Bebouwd gebied		stedelijk bebouwd gebied	0		
19			bebouwing in buitengebied	0		
20			loofbos in bebouwd gebied	0		
21			naaldbos in bebouwd gebied	0		
22			bos met dichte bebouwing	0		
23			gras in bebouwd gebied	0		
24			kale grond in bebouwd buitengebied	0		
25		Infrastructuur		hoofdwegen en spoorwegen	0	
26	Agrarisch gebied		bebouwing in agrarisch gebied	0		
30	Natuur	Kustgebied	Kwelders	0		
31				Open zand in kustgebied	0	
32				Open duinvegetatie	0	
33				Gesloten duinvegetatie	0	
34				Duinheide	0	
35		Heidegebied		Open stuifzand	0	
36				Heide	0	
37				Matig vergraste heide	0	
38				Sterk vergraste heide	0	
39		Hoogveen		Hoogveen	0	
40				Bos in hoogveengebied	0	
41		Moeras		Overige moerasvegetatie	0	
42				Rietvegetatie	0	
43				Bos in moerasgebied	0	
44				Veenweidegebied	0	
45				Overig open begroeid natuurgebied	0	
46			Kale grond in natuurgebied	0		