

Gedegen, innovatieve en verbindende monitoring
van het waddengebied

FACTSHEET OPTISCHE TECHNIEKEN

Valentijn Venus

Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation (ITC)
University of Twente

INHOUDSOPGAVE

1	INLEIDING	4
2	OPTISCHE TECHNIEKEN.....	5
	2.1 Nauwkeurigheid	9
	2.2 Inzetbaarheid & leverbetrouwbaarheid	9
	2.3 Uniformiteit.....	10
	2.4 Regionale geschiktheid.....	10
	2.5 Continuïteit.....	11
	2.6 Prijs/kwaliteit	11
3	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN.....	13
4	REFERENTIES	15

1 INLEIDING

Het doel van deze *factsheet* is inzicht te geven in hoeverre optische aardobservatie technologie tot op heden iets heeft kunnen betekenen voor het themadossier Schelpdiervisserij. Een beter begrip van de verspreiding van litorale schelpdieren in ruimte en tijd is relevant gelet op de natuurlijke populaties die onder druk staan. Zo is de oester (*Ostrea edulis*) vrijwel helemaal verdwenen uit de Waddenzee, terwijl de invasieve Japanse oester (*Crassostrea gigas*) juist erg is toegenomen. De redenen hiervoor zijn niet onomstotelijk vastgesteld maar zijn waarschijnlijk te vinden in de overbevissing van de inheemse platte oester, vanwege zijn grote populariteit (zie Figuur 1).



Figuur 1. De platte oester is verdwenen uit de Waddenzee door overbevissing.

De geïntroduceerde Japanse oester breidt zich steeds verder uit, want deze:

- kan beter tegen lage temperaturen dan gedacht
- heeft zich waarschijnlijk genetisch aangepast.

De inventarisatiemethoden die tot op heden worden gebruikt zijn vrijwel volledig gebaseerd op veldwaarnemingen, en zijn hierdoor kostbaar. De vraag is of aardobservatie kosten-effectievere methoden te bieden heeft.

2 OPTISCHE TECHNIEKEN

Pogingen om optische aardobservatie technologie, vanuit de lucht of ruimte, in te zetten voor de detectie en kartering van wadplaten worden al gedaan sinds 1920 (Kleijn, 1999). Toen gaf de Nederlandse regering voor het eerst de opdracht aan een drietal buitenlandse firma's om een gedeelte van de kustlijn, de Wadden, en een aantal Zeeuwse eilanden te karteren volgens verschillende fotogrammetrische methoden.

Tussen 1920 en 1930 werd de outillage van de Foto-afdeling drastisch uitgebreid en gemoderniseerd opdat ook luchtfotogrammetrie in het takenpakket kon worden opgenomen. Dit had tot gevolg dat al in 1931 ca. 32.000 ha grond langs fotografische weg werd gekarteerd, een oppervlakte die een jaar later zou oplopen tot 40.000 ha. Tot de opdrachten van de regering behoorde een waterstaatkundige survey van de Oosterschelde, een gebied van ongeveer 15.000 ha, gevolgd door een nieuwe opdracht voor het Waddengebied. Deze proefnemingen werden in de periode tot 1932 mede gefinancierd door de KLM.

De ontwikkeling van de stereofotogrammetrie, waarbij gebruik werd gemaakt van elkaar goeddeels overlappende luchtfoto's, leverde een belangrijk aandeel in het opmeten en modeleren van de geografische ruimte: niet alleen horizontale, maar ook verticale waarden zoals terrein- en bouwhoogten konden uit luchtfoto's worden afgeleid. Het plotten van stereofotoparen, zowel aërische als terrestrische opnamen, tot kaarten was mogelijk geworden met de stereoplanigraaf van Bauersfeld (Zeiss, Duitsland 1923), maar pas in 1932 werd de stereofotogrammetrie voor het eerst in Nederland bij de KLM geïntroduceerd. In 1934 werd de opnametaak definitief overgenomen door de KLM (Klein, 1999).

Onduidelijk is welke geometrische inwinnauwkeurigheid kon worden gewaarborgd of wat de nauwkeurigheid was na verwerking, maar de interpretatie van deze beelden zal veelal plaats hebben gevonden middels het overtrekken van landoppervlak, informatie die met het menselijke oog konden worden onderscheiden op basis van luchtfoto karakteristieken (textuur, contrast, kleur, etc.) en later ook op basis van de hoogte-informatie die ontstond door het gebruik van stereofotoparen.

Voor een historische vergelijking kan gebruik worden gemaakt van de Dijkema atlas (Dijkema et al. 1989). Dit is een atlas met gegevens van mosselbank verspreidingen in de trilaterale Waddenzee in de jaren '60 en '70. De systematische interpretatie van luchtfoto's, ook gebruikt voor de litorale wadplaten, werd uitgevoerd met behulp van een spiegel stereoscoop om hoge-energie gebieden (megaribbels), mosselbanken en kwelders toe te kunnen voegen aan de basiskaart.

Op basis van panchromatische zwart-wit beelden beschikbaar voor de Dijkema atlas alleen, en de grote variatie in de data die werd gebruikt, bleek het niet mogelijk om alle habitattypen te onderscheiden zoals eerder wel werd bereikt door Botzen (1975) voor de Nederlandse Waddenzee. De donkere kleuren op de foto's die in de Dijkema-studie werden gebruikt (inwinning 1968) zijn bijvoorbeeld beter gecorreleerd met het watergehalte dan met het slibgehalte van het wad.

De kleinste eenheid die kon worden opgenomen in de definitieve kaarten is ongeveer 2 x 5 mm. Op een schaal van 1: 100 000 is dit gelijk aan 200 x 500 m (10 ha) als kleinste karteerbare eenheid, wat betekent dat mossel- en oesterbanken met een oppervlak van minder dan 10 ha niet konden worden ingetekend. Voor validatie zijn verschillende bronnen gebruikt, evenals vluchten over het gebied, en observaties in geselecteerde gebieden. De resultaten van deze validatie zijn echter niet gerapporteerd, noch in de atlas noch in de publicatie voorafgaand aan de atlas (Dijkema et al. 1989).

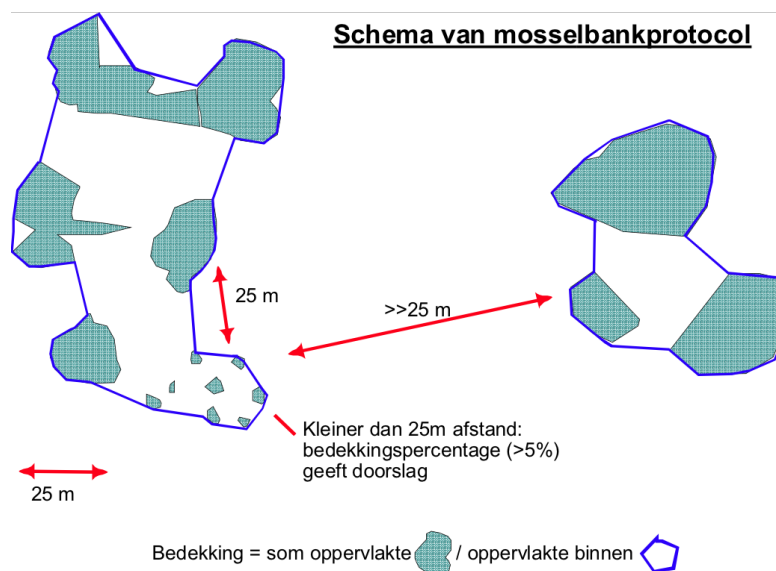
Hoewel de huidige methode verschilt van de methode die gehanteerd werd om mosselbanken in de Dijkema atlas te demarkeren blijkt het toch mogelijk om de ruimtelijke verspreidingen van toen en nu globaal te vergelijken. Voor een gedetailleerde vergelijking tussen de kartering van Dijkema et al (1989) op basis van luchtfoto's en de huidige praktijk kan het best de studie van Brinkman et al (2003) worden geraadpleegd. Vandaag de dag is er methodisch niet veel veranderd bij de interpretatie van luchtfoto's, behalve dan dat de stereo fotogrammetrische technieken nu, dankzij de brede beschikbaarheid van software en hardware, ook digitaal mogelijk zijn geworden.

De opkomst van differentiële GPS instrumentaria en satellietensoren met een erg hoge resolutie, zoals Wordview-2, heeft de beschikbaarheid en geometrische nauwkeurigheid van het beeldmateriaal helpen verbeteren (fout van 0.5 ~1 pixel), wat afhankelijk van de horizontale beeldresolutie neerkomt op een geometrische fout van tientallen cm tot 1 m. Echter, het in kaart brengen van schelpdieren op deze manier is een tijdrovende en dure activiteit gebaseerd op de handmatige interpretatie van luchtfoto's. Een bijkomend nadeel van handmatig werken is een gebrek aan objectiviteit, en dus herhaalbaarheid (Janssen, 2001). Een aantal prangende voorbeelden van de hieruit voortvloeiende onzekerheid in gekarteerde schelpdierbanken word uitgebreid gepresenteerd en bediscussieerd in Brinkman et al (2003).

In een studie van Kramer (2003) is voor het eerst gepoogd de manuele methodiek te standaardiseren om daarmee de herhaalbaarheid te verbeteren. Hierbij zijn opnieuw luchtfoto karakteristieken gebruikt, maar nu automatisch geëxtraheerd middels software en vervolgens via logische expressies geïnterpreteerd en gecombineerd zodat segmenten ofwel contouren ontstaan van schelpdierbanken. Op basis van een eerdere studie van Mûcher et al (2001) werd hierbij gebruik gemaakt van het commerciële softwarepakket eCognition, wat inmiddels in handen van GPS fabrikant Trimble is.

Deze eerste verkenning van methoden voor de automatische detectie van mosselbanken heeft aanzet gegeven voor enkele vervolgstudies, zoals die van Roupioz et al. (2008) en Fey-Hofstede et al. (2009). De luchtfoto's in deze studies werden opnieuw door zowel het menselijk oog als de eerder genoemde herkenningsoftware (eCognition) geanalyseerd. Beide methoden werden op basis van veldwaarnemingen vergeleken op effectiviteit en efficiëntie. De resultaten tonen aan dat bij beide methoden mosselplaat structuren vaak foutief of zelfs geheel ten onrechte wel of niet werden herkend, ondanks dat de herkenning van schelpdierbanken op basis van het menselijk oog beter was in vergelijking met de softwarematige herkenning (Fey-Hofstede et al., 2009). Hierdoor blijven veldwaarnemingen noodzakelijk.

Wellicht kunnen veldwaarnemingen nu met minder kosten gepaard gaan omdat slechts gebieden met onzekerheden moeten worden gecontroleerd i.p.v. een volledige inventarisatie. Echter, tot op de dag van vandaag worden nog steeds alle schelpdierbanken gekarteerd door er om heen te lopen. Bij het protocol hoort de vastlegging van de contour van banken door middel van GPS-techniek. Tijdens het lopen langs de rand van de bank wordt de geografische positie met grote regelmaat (bijvoorbeeld elke 5 of 10 seconden) opgeslagen, dankzij het gebruik van D-GPS (differentieel). Het opgestelde protocol hiervoor is eenvoudig, en gaat uit van drie basisregels: De bank moet structuur hebben (1), er wordt een maximale afstand tot de volgende bult aangehouden (2), en een minimale bedekking (3). Het protocol is, samen met de daarbij gehanteerde definities, in figuur 2 weergegeven (Brinkman et al., 2003).



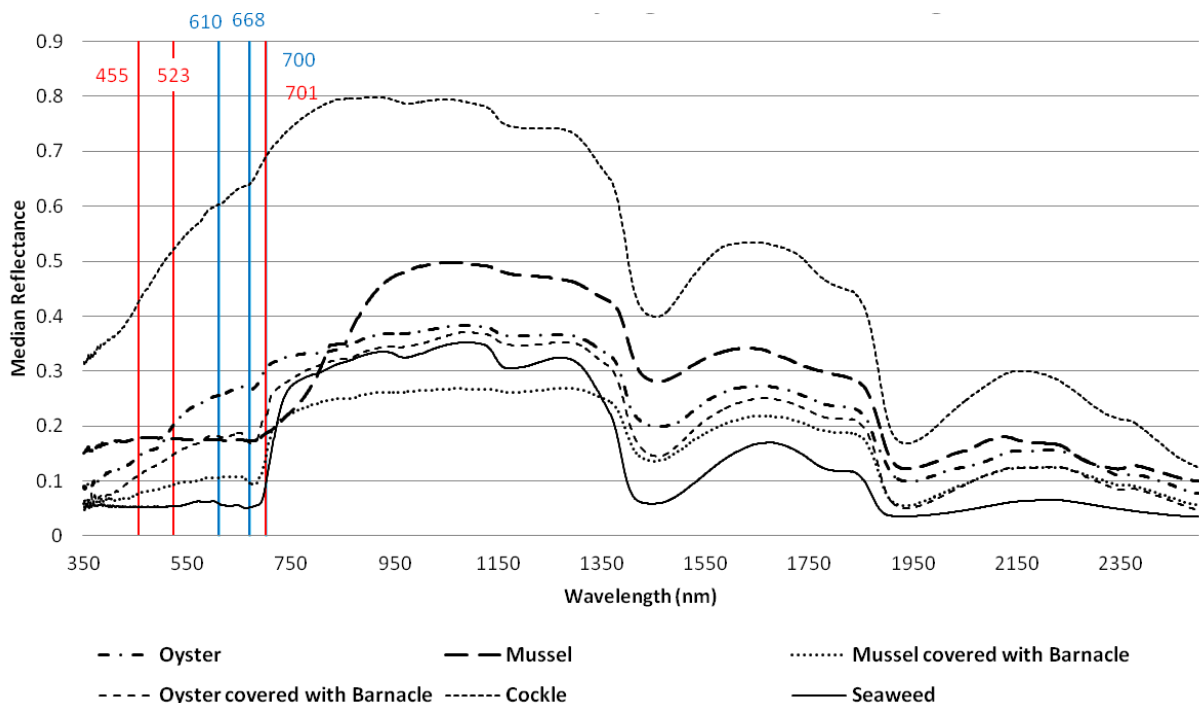
Figuur 2. Inventarisatiemethode schelpdierbanken (uit Troost et al 2012).

Optische aardobservatie technologie beperkt zich niet tot waarnemingen in het zichtbare deel van het zonnenspectrum. Ook in golflengtes net naast die van luchtfoto's, bijv. in het nabij-infrarood (NIR) of juist ver daarbuiten (SWIR, MIR), kunnen zich interessante reflectie of absorptie karakteristieken voordoen die meer over de samenstelling van het aardoppervlak kunnen zeggen. Maar zijn litorale schelpdieren spectraal eigenlijk wel uniek genoeg om ze van elkaar en van de bodem te kunnen onderscheiden? Om deze vraag te kunnen beantwoorden werden er voor een academische studie van Gloria (2013) veldwaarnemingen ten zuiden van Texel gemaakt met behulp van een ASD spectrometer, ten einde de spectrale signatuur van schelpdieren vast te leggen.

Na een statistische analyse (Mann-Whitneytoets) bleken de meeste unieke verschillen zich voor te doen in het zichtbare deel van het spectrum, in het bijzonder in het bereik tussen 450-700 nm (zie Figuur 3, blauwe lijnen 99% significant en rode lijnen 95% significant). De spectrale reflectie van de blauwe mossel en de Japanse oester werden verder onderzocht in het VNIR-SWIR bereik en bleken ook daar uniek van elkaar te zijn. Ook werden in deze studie absorptie karakteristieken gevonden die niet konden worden toegeschreven aan carbonaat of een andere

chemische stof waarvan bekend is dat die zich op het oppervlak van de mossel- en oesterschelpen bevinden. Een voorbeeld hiervan is de absorptie rond 680 nm die vrijwel zeker samenhangt met chlorofyl, wat biochemisch kenmerkend voor de aanwezigheid van fotosynthetisch actieve stoffen, zoals zeealgen.

Bij de interpretatie van deze resultaten, en de mogelijkheden die dit biedt voor het karteren van schelpdieren, moet men niet vergeten dat de samenstelling van een schelpdierenbank 'een biologisch gemedieerde combinatie van organische stoffen met een anorganisch materiaal' is (Jacob et al., 2008), waarvan het biomineralisatie proces afhankelijk is van de omgevingsomstandigheden (Farson, geen datum). Een ander voorbeeld van beperkte toepasbaarheid zijn de steeds frequenter voorkomende gemengde banken, bestaande uit zowel mossels als oesters, die moeilijker karteerbaar blijken omdat de spectrale verschillen kleiner zijn.



Figuur 3. Uniekheid spectrale handtekening van de belangrijkste schelpdieren in de Waddenzee (Gloria 2013). Blauwe lijnen: 99% significant, rode lijnen: 95% significant.

2.1 Nauwkeurigheid

Geometrische nauwkeurigheid: fout van 0.5 ~1 pixel, wat afhankelijk van de horizontale beeldresolutie neer komt op een geometrische fout van tientallen cm tot 1 m.

Tabel 1. Nauwkeurigheid van detectie van schelpdierbanken na verwerking¹

Soort	Nauwkeurigheid	Bron
Mosselbedden North Frisia – handmatig op basis van luchtfoto's	~70%	Stoddard (2003)
Mosselbedden Rottum – handmatig op basis van luchtfoto's	54.3%	Fey-Hofstede et al. (2009)
Mosselbedden Schiermonnikoog – handmatig op basis van luchtfoto's	35.5%	Fey-Hofstede et al. (2009)
Mosselbedden Rottum en Schiermonnikoog – automatisch op basis van luchtfoto's (textuur en reflectie in RGB)	27%	Roupioz et al. (2008)
Mosselbedden Rottum en Schiermonnikoog – automatisch op basis van luchtfoto's (textuur en reflectie in RGB)	34.5%	Fey-Hofstede et al. (2009)

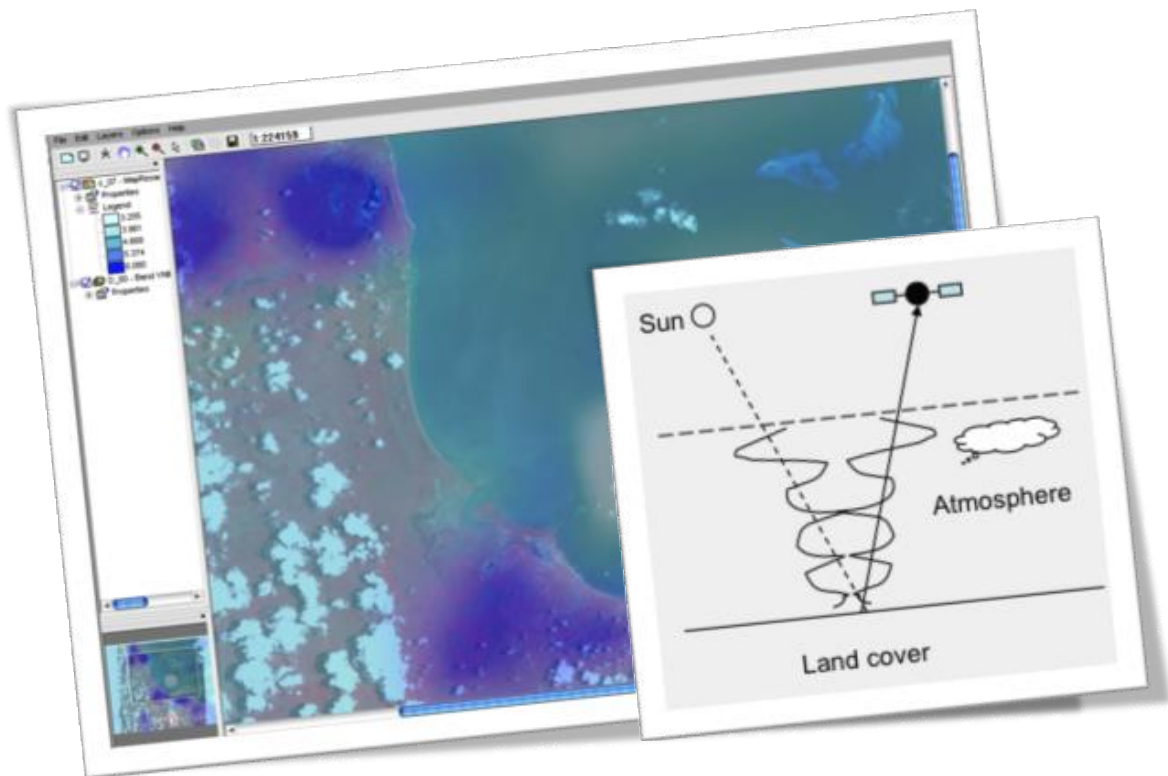
2.2 Inzetbaarheid & leverbetrouwbaarheid

Luchtfoto's zijn geschikt voor het bepalen van de contouren en het oppervlak van alle schelpdierbanken mits de opnameschaal zodanig groot is dat de schelpdierbulten daarop kunnen worden waargenomen (Millat, 1996). Daarvoor moeten de foto's van professionele kwaliteit zijn en de opnameschaal niet kleiner dan ongeveer 1: 30 000. Bovendien moeten ze behoorlijk overlappen zodat vergrotingen stereoscopisch geanalyseerd kunnen worden. Overigens wordt de bruikbaarheid van de foto's mede bepaald door de lichtval en het contrast.

Weersomstandigheden moeten daarom optimaal zijn tijdens het invliegen, en zelfs tijdens de vlucht kan de beeldkwaliteit verslechteren door bijv. ijsvorming op de optische onderdelen. Satellietbeelden zijn geschikt mits ze atmosferisch goed gecorrigeerd kunnen worden (zie variabiliteit waterdamp binnen een beeld zoals weergegeven in Figuur 4) en de horizontale resolutie van de beeldelementen

¹ Deze nauwkeurigheid zegt overigens niets over de ruimtelijke exactheid van de contouren van de gedetecteerde mosselbanken omdat die zich lastig laten duiden op basis van het huidige protocol voor veldwaarnemingen.

dichtbij die van luchtfoto's komen, bijv. Ikonos-2, GeoEye-1/2, Worldview-2, en banden bevatten die de golflengtes bedekken die in de studie van Gloria (2013) als relevant zijn geïdentificeerd voor de onderscheiding van schelpdieren. Ook een kwantitatieve weergave van de patronen die kunnen worden waargenomen binnen schelpdierbanken komt dan binnen bereik, bijvoorbeeld op basis van energiegolven in textuur waarneembaar in zeer-hoge resolutie panchromatische en multi-spectrale beelden (Lucieer en van der Werff, 2007) ten einde meer te kunnen zeggen over bedekkingsgraad, dikte, stabiliteit, en soortensamenstelling van banken.



Figuur 4. Variabiliteit in atmosferische waterdamp bij een kustwaarneming van een optische satelliet (TERRA/ASTER) die alleen met ruimtelijke expliciete informatie kan worden verwijderd ten einde landbedekking goed te kwalificeren.

2.3 Uniformiteit

De techniek is vergelijkbaar en bruikbaar voor de gehele Waddenzee aangezien dezelfde data voor het gehele gebied geleverd kan worden.

2.4 Regionale geschiktheid

De techniek is vergelijkbaar en bruikbaar voor de gehele Waddenzee.

2.5 Continuïteit

Er is reeds een verscheidenheid aan optisch beeldmateriaal ingewonnen.

Een onvolledig overzicht:

Hyper-spectraal:

- Schiermonnikoog, HyMap Flight Campaign, 27 May 1999, DLR.
- Schiermonnikoog, AHS Flight Campaign, 19 June 2005 (APEX consortium, VITO)
- Ameland (AHS, as above)

Multi-spectraal:

- Verscheidende ²optische waarnemingen (incl. MERIS, LANDSAT, ASTER, etc.)
- Luchtfoto's, etc.

Voor een gedetailleerd overzicht van beschikbare historische en actuele satellietgegevens zie Davaasuren et al. (2013).

De inwinning van beelden via satellieten is op de lange termijn betrouwbaarder dan inwinning via luchtvoertuigen, gezien de (veranderende) restricties voor inwinningsvluchten.

Voor het in het waddengebied gebruiken van luchtvoertuigen is toestemming van de Luchtverkeersleiding Nederland (LVNL) nodig. Momenteel (sinds 2014) gelden er vanuit Defensie strenge restricties op vliegbewegingen in het waddengebied. Ook bij defensie moet toestemming gevraagd worden. Momenteel kan er alleen in het weekeinde gevlogen worden. Hierdoor zijn nieuwe inwinningsvluchten slechts beperkt mogelijk.

2.6 Prijs/kwaliteit

De prijs van goed beeldmateriaal varieert sterk, maar laat zich als volgt inschatten:

- | | |
|---|-------|
| - Worldview-2 Bundle (Pan + 4 bands RGBNir) | €14,- |
| - Worldview-2 Band Bundle (Pan + 8 MS) | €25,- |

De prijzen zijn per km² en de minimale afname is 5 km². Ortho-rectificatie kost €88,- extra. Hyper-spectrale vluchten kosten bij DLR of VITO ongeveer 20.000 euro per vlucht (3 stroken die in totaal 55 x 10km bedekken). Radiometrisch en atmosferische correctie kost ongeveer 450 euro per beeld.

Uitgaande van geometrisch, radiometrisch en atmosferisch gecorrigeerd beeldmateriaal, is de totale tijd om een beeld volledig te analyseren uit te drukken in uren i.p.v. dagen (Roupioz et al., 2008). De totale kosten voor de

² Voor een gedetailleerd overzicht van beschikbaar van historische en actuele satellietgegevens, zie Davaasuren et al. (2013).

herkenningssoftware is ongeveer 13.000 euro voor het ontwikkelaar deel en 16.000 euro voor het serverdeel, alhoewel het huren hiervan ook een optie is (ongeveer 1600 euro voor 3 maanden, zie CloudEO workbench³).

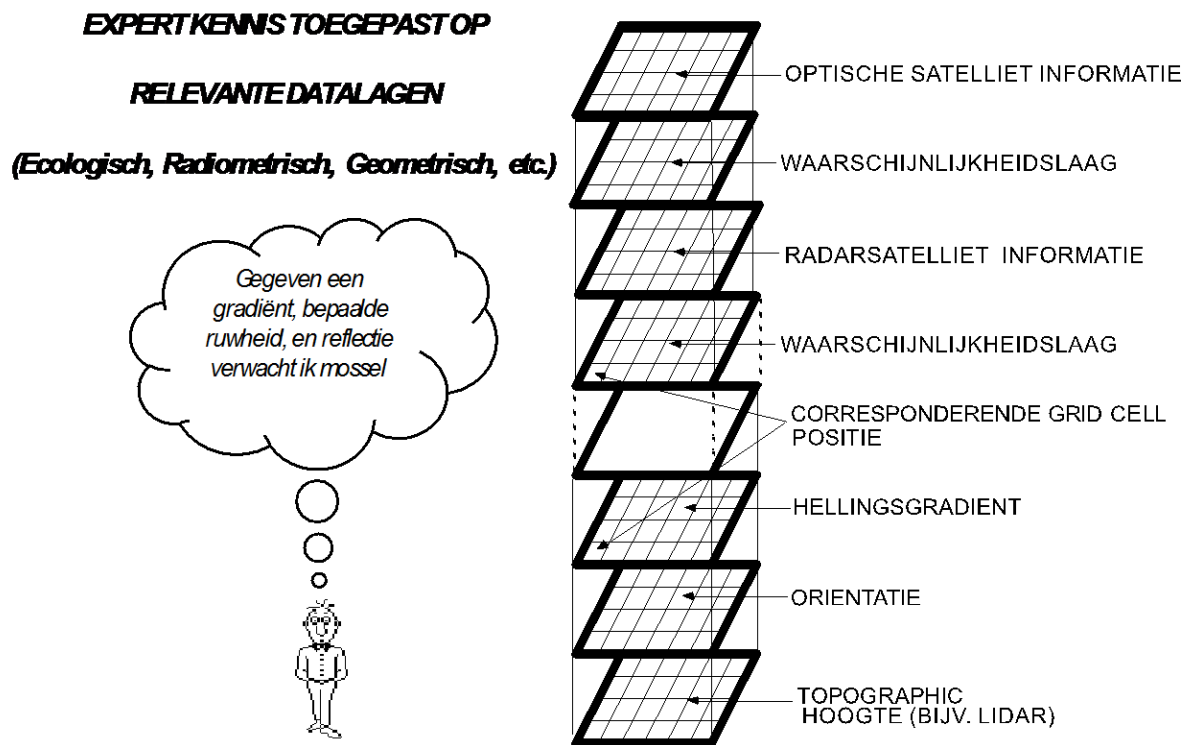
³ <http://www.cloudeo-ag.com>, laatst bezocht: 02/02/15.

3 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

De resultaten van de pogingen om schelpdierbanken goed te karteren met behulp van optische aardobservatie technieken vallen tot nu toe enigszins tegen omdat de gemiddelde nauwkeurigheid in het karteren van schelpdierbanken niet veel verder komt dan 50% (zie tabel 1). Ook wordt er hierbij vaak geen onderscheid gemaakt tussen de nauwkeurigheid van detectie (correctheid aanwezig/afwezig van schelpdierbanken) en die van de ruimtelijke vorm (juistheid van omtrek van schelpdierbanken), terwijl dit voor beheerdoeleinden juist vaak wel essentiële managementinformatie is. Daarbij komt dat bij het huidige protocol gebruikt voor de inventarisatie van schelpdierbanken dit soort differentiatie (nog) niet gemaakt wordt en daarom validatie op deze losse aspecten moeilijk te realiseren is. In rapporten, overzichten en conferenties over de waarde van satellietgegevens voor de lange-termijn monitoring in de Waddenzee wordt daarom wellicht soms wat te positief gerapporteerd. Hiermee hangt samen dat er economische belangen zijn om resultaten niet objectief genoeg te rapporteren.

Dit betekent effectief dat het onderzoek in deze discipline nog in de kinderschoenen staat. Er is nog te weinig bewezen kennis die bijvoorbeeld de spectrale eigenschappen van schelpdiersoorten beter duidt ten einde de vraag te kunnen beantwoorden of hun reflectie eigenschappen, zoals in de studie van Gloria (2013) zijn vastgesteld, wel onderscheidend blijven bij verandering in het seizoen, getij, lichtinval, en kijk-hoek van de sensor.

Daarnaast is het maar de vraag of toekomstige satellietsensoren banden zullen bevatten op de unieke golflengtes zoals geïdentificeerd in de studie van Gloria (2013). Alleen wanneer de Waddenzee-landen lobbyen voor betere sensoren bij ESA kunnen operationele toepassingen van dit soort fundamenteel onderzoek leiden tot verbeterde monitoringsmogelijkheden. Ook de analyse technieken verdienen verdere aandacht, zoals multi-criteria analyse, kunstmatige intelligentie, Bayesiaanse wiskunde, etc., die de integratie van ecologische kennis, optische beelden, en andersoortige waarnemingen, zoals hoogte modellen, ruwheid vanuit RADAR, mogelijk maken ten einde te komen tot een verbeterde classificatiemethode. Een voorbeeld hiervan is het werk van Schmidt et al. (2002) dat aantoont dat wanneer hyper spectrale optische beelden in een expertsysteem (zie Figuur 5) gecombineerd worden met terreingegevens uit bijv. radaraltimetrie de nauwkeurigheid en efficiëntie van de productie van een gedetailleerde kweldervegetatiekaart voor Schiermonnikoog verhoogd kon worden van 43% naar 66% ten opzichte van conventionele luchtfoto interpretatie.



Figuur 5. Expertsysteem geïllustreerd voor de kartering van schelpdiersoorten (bron: ITC)

4 REFERENTIES

- Botzen, P. J., 1975. Een landschapskaart op geomorfologisch/geomorfogenetische basis van het waddengebied, Rijksuniversiteit Utrecht, afd. Fysische Geografie, Doktoraalverslag, 7 geomorphological maps 1:100000.
- Brinkman A.G., Bult T., Dankers N., Meijboom A., den Os D., van Stralen M.R. & de Vlas J., 2003. Mosselbanken kenmerken, oppervlaktebepaling en beoordeling van stabiliteit . Alterra- rapport 707.
- Dijkema, K.S., 1989. Habitats of The Netherlands, German and Danish Wadden Sea. 24 maps 1: 100,000 and legend. Research Institute for Nature Management, Texel and Veth foundation, Leiden.
- Davaasuren, N., Stapel, J. & Dankers, N.M.J.A., 2013. Overview of satellite data for long-term monitoring in the Wadden Sea, WaLTER.
- Farson, D., (n.d.). Parts of mollusk shells. Retrieved August 1, 2012, from http://www.ehow.com/info_8091304_parts-mollusk-shells.html
- Fey-Hofstede, F.E., Cremer, J.S.M., Dijkman, E.M., Jansen, J.M., Roupioz, L.F.S. & Schmidt, A.M., (2009). Development of analysis techniques for the use of aerial photography in the monitoring of intertidal mussel beds and oyster beds, Wageningen UR Digital Library.
- Gloria, G.A. (2013) Are mussels and oysters spectrally distinct? Enschede, University of Twente Faculty of Geo-Information and Earth Observation (ITC).
- Jacob, D. E., Soldati, A. L., Wirth, R., Huth, J., Wehrmeister, U., & Hofmeister, W. (2008). Nanostructure, composition and mechanisms of bivalve shell growth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72, 5401-5415.
- Janssen, J.A.M., 2001. Monitoring of Salt-Marsh Vegetation by Sequential Mapping, PhD dissertation, University of Amsterdam, Amsterdam, The Netherlands, 249 pagina's.
- Kleijn, H. C. M., 1999. Boven rusteloos land : remote sensing ten behoeve van morfologische analyse van het stadslandschap 1915-1980, Doctoraal Proefschrift.
- Kramer, H., (2003) Automatische detectie van mosselbanken. Interne rapportage Alterra.
- Lucieer, A. & van der Werff, H.M.A., 2007. Panchromatic wavelet texture features fused with multispectral bands for improved classification of high - resolution satellite imagery. Presented at IGARSS 2007 : International geoscience and remote sensing symposium, 23-27 July, 2007 Barcelona, Spain. 4 pagina's.
- Millat, G., 1996. Entwicklung eines methodisch-inhaltlichen Konzeptes zum Einsatz von Fernerkundungsdaten für ein Umweltmonitoring im Niedersächsischen Wattenmeer. Schriftenreihe der Nationalparkverwaltung Niedersächsisches Wattenmeer, Wilhelmshaven, Band 1, 125 pagina's.
- Mücher, C.A., Thunnissen, H.A.M., de Bont, C.[H.M.], Clement, J., Kramer, H. & Koomen, A.J.M., 2001. Toepassing IKONOS satellietbeelden in het Meetnet Landschap. Delft, BCRS, NRSP-2 Rep.
- Roupioz, L.F.S., Schmidt, A.M. & Kramer, H., 2008. Mapping of mussel beds in the Wadden Sea based on automated detection on digital aerial photographs. Interne rapportage Alterra.
- Stoddard, P., 2003. Reconstruction of Blue Mussel Beds using Aerial Photographs from 1989 and 2002 of the North Frisian wadden Sea. Report BIO Consult SH.

Schmidt, K. S., Skidmore, A. K., Kloosterman, E. H., van Oosten, H., Kumar, L. & Janssen, J., 2002. Using an expert system to map coastal vegetation. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.