

# VU Research Portal

## Dense Water and Fluid Sand

Hommersom, A.

2010

### **document version**

Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link to publication in VU Research Portal](#)

### **citation for published version (APA)**

Hommersom, A. (2010). *Dense Water and Fluid Sand: Optical properties and methods for remote sensing of the extremely turbid Wadden Sea*. [PhD-Thesis - Research and graduation internal, Vrije Universiteit Amsterdam].

### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

### **Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

### **E-mail address:**

[vuresearchportal.ub@vu.nl](mailto:vuresearchportal.ub@vu.nl)

---

## Samenvatting

Dit proefschrift, met als titel “‘Dik Water” en “Vloeibaar Zand” Optische eigenschappen en methoden van remote sensing voor de extreem troebele Waddenzee’ onderzoekt in hoeverre data van het satelliet-instrument MERIS gebruikt kunnen worden om waterkwaliteit te monitoren in de Waddenzee.

Remote sensing betekent letterlijk “op afstand bestuderen”. In dit proefschrift gaat het over metingen en modellen ten behoeve van optische remote sensing van waterkwaliteit met behulp van satellietdata (space borne remote sensing). Het eerste hoofdstuk beschrijft de principes van optische remote sensing en hoe het zonlicht beïnvloed wordt door atmosfeer en water voor het wordt opgevangen door een remote sensing instrument. Uiteindelijk bevat maar een klein deel van het gedetecteerde licht informatie over de stoffen in de waterkolom. Remote sensing werd al in de 19e eeuw bedreven door de waterkleur te bepalen met een kleurenschaal, maar kwam pas echt op gang in de jaren 60 en 70 van de vorige eeuw, toen waterkwaliteit in de belangstelling kwam. De Coastal Zone Scanner, gelanceerd in 1978, was de eerste water-observatie satelliet.

De vier stoffen die de kleur van het water het meest bepalen zijn: 1) water zelf; 2) fytoplankton, dat vooral de kleur heeft van het belangrijkste pigment chlorofyl-a (Chl-a); 3) zwevend stof (SPM); en 4) gekleurde opgeloste organische stoffen (CDOM). Omdat deze stoffen alle vier specifieke absorptie- en verstrooiingsspectra hebben, kunnen de concentraties hiervan in principe afgeleid worden uit een reflectiespectrum (oftewel: uit de kleur van het water). Dat is lastiger in kustzones, waar de specifieke inherente optische eigenschappen (SIOPs) van de verschillende stoffen sterk kunnen variëren, terwijl ook andere factoren (hoge concentraties, een mix van stoffen die lastig te onderscheiden zijn, bodemreflectie en aangrenzend effect) het afleiden van concentraties uit reflectiespectra sterk beïnvloeden.

Om verschillende redenen is remote sensing van waterkwaliteit in kustzones toch interessant. Ten eerste omdat monitoring noodzakelijk is om de ecologische en economische waarden van kustzones op peil te houden. Ten tweede omdat remote sensing een hoge frequentie en een grote hoeveelheid ruimtelijke informatie kan toevoegen ten opzichte van de conventionele monitoringsmethoden. Dit proefschrift onderzoekt daarom twee veelbelovende modellen voor waterkwaliteitsmonitoring met behulp van optische remote sensing. De Waddenzee, een extreem troebel kustgebied, wordt gebruikt als praktijkvoorbeeld. De onderzoeksvragen gaan in op de variabiliteit in concentraties van optisch actieve substanties en de optische eigenschappen in de Waddenzee en twee modellen: een invers bio-optisch model en een endmember-model.

De Waddenzee is een heterogeen gebied waar met laag water wadplaten droogvallen, waar verschillende rivieren uitmonden (o.a. de Eems, Jade en Weser en ook de Rijn via de Noordzeekust en de IJssel) en mengen met water uit de Noordzee. De Waddenzee is bovendien een natuurgebied en staat sinds juli 2009 op de UNESCO Werelderfgoedlijst, zodat het monitoren van waterkwaliteit belangrijk is. Aan het eind van Hoofdstuk 1 wordt informatie over de gebruikte satellietdata en de hydrologie van de Waddenzee gegeven.

---

Om te weten te komen welke processen er van invloed zijn op de optische eigenschappen van de Waddenzee en om er achter te komen waar rekening mee gehouden moet worden bij gebruik van remote sensing data in dit gebied, wordt in Hoofdstuk 2 een overzicht gegeven van de bestaande informatie over Chl-a, SPM, CDOM, optische eigenschappen en remote sensing van de Waddenzee. Ook wordt gekeken naar remote sensing algoritmen voor de Waddenzee en andere extreem troebele gebieden.

Een overzicht van alle processen die de optische eigenschappen van de Waddenzee bepalen wordt gegeven in Figuur 2.3. Er is variabiliteit over het gebied door de invloed van CDOM uit verschillende rivieren, dat mengt met relatief helder Noordzeewater dat binnenkomt door de geulen tussen de eilanden en door het voorkomen van ondiepe delen met wadplaten (waarop bentische algen en soms macroalgen voorkomen) op de beschutte plaatsen tussen de eilanden en het vasteland. Op plaatsen waar het water kalm is kan het SPM vlokken vormen, waarbij de optische eigenschappen van het SPM veranderen. Op de meest beschutte plaatsen in de Waddenzee groeit zeegras. Getijdestromingen zorgen voor opwerveling (resuspensie) van bodemmateriaal, wat leidt tot verhoogde concentraties SPM, Chl-a (vanwege bentische algen) en CDOM (uit poriewater). Ook wind zorgt voor opwerveling; dit effect is sterker in de winter, omdat er dan minder bodemalgen zijn die het sediment met hun excretieproducten stabiliseren. Een ander belangrijke jaarlijkse variatie is de algenbloei in het voorjaar, waarbij hoge concentraties Chl-a voorkomen. Een algenbloei wordt vaak gevolgd door verhoogde concentraties CDOM, omdat CDOM kan worden uitgescheiden door algen en ook ontstaat als een afbraakproduct na een bloei.

Remote sensing is in de Waddenzee veel gebruikt om kaarten te maken van wadplaten, die bijvoorbeeld sedimentsoorten en gebieden met zeegras aangeven. Ook is de Waddenzee veel gebruikt voor studies die gebruik maken van laser en radar om kustlijnen te detecteren. Over de optische eigenschappen van de stoffen in het water is echter weinig bekend; er is ook maar door enkelen onderzoek gedaan naar remote sensing algoritmen die bruikbaar zijn in de Waddenzee. Hoofdstuk 2 refereert daarom ook naar algoritmen die ontwikkeld zijn voor andere extreem troebele gebieden, zoals het estuarium van de Tamar in Groot Brittannië, en het C2R-algoritme dat voornamelijk is ontwikkeld voor de Duitse Bocht en daarom mogelijk ook bruikbaar is in de Waddenzee. Verder wordt er een lijst gegeven met voorwaarden die remote sensing in een gebied als de Waddenzee mogelijk moeten maken. Dit zijn: een satelliet met hoge ruimtelijke resolutie, een atmosferische correctie die geschikt is voor kustwateren, algoritmen die zijn afgesteld op de extreem hoge concentraties van de verschillende stoffen, een gelijktijdige detectie van waterkleur en de land-water grenzen of een ander model dat aangeeft waar op moment van acquisitie drooggevallen wadplaten zijn, genoeg kennis van de lokale omstandigheden om de resultaten te kunnen interpreteren, gelijktijdige satellietopnamen en in situ metingen voor validatie omdat veranderingen snel kunnen optreden, en kennis van de lokale optische eigenschappen om een algoritme te kunnen calibreren.

Hoofdstuk 3 gaat over de in situ metingen die gedaan zijn om meer te weten te komen over de optische eigenschappen van de Waddenzee. In mei, juni, juli, augustus en september 2006 en mei 2007 werden metingen gedaan naar chlorofyl, SPM en het anorganische deel daarvan en naar CDOM. De totale absorptie en uitdoving van het licht werden gemeten met een AC9 en reflectiespectra werden bepaald met behulp van een TriOS sensoren systeem. In mei 2007 werden bovendien met behulp van de “filter

---

pad" methode de specifieke absorptie van het aanwezige sediment en pigmenten gemeten. Uit de andere metingen werd de specifieke verstrooiing van SPM afgeleid. De concentraties Chl-a, SPM en CDOM waren inderdaad erg hoog: 2-67 mg m<sup>-3</sup> voor Chl-a, 2-254 g m<sup>-3</sup> voor SPM en 0.15-3.07 m<sup>-1</sup> voor CDOM. In deze concentraties werden de variaties gevonden die al in Hoofdstuk 2 werden genoemd: seisoensvariaties met vooral in het voorjaar veel Chl-a, getijde variaties met met korte tijd voor hoog en laag tij (wanneer de sterkste stroming staat) een hoge concentratie SPM en ook bij harde wind veel opwerveling en dus hoge concentraties SPM en Chl-a. CDOM concentraties waren vooral hoog in de monding van de Eems en - als de sluizen open stonden - vlakbij het IJsselmeer.

Het was eerder nog niet bekend dat de specifieke absorptie en verstrooiing van SPM in de Waddenzee vergelijkbaar waren met die in de Noordzee, terwijl de specifieke absorptie van pigmenten in de Waddenzee veel hoger bleek te zijn. De specifieke pigmentabsorptie bleek te correleren met de twee meest dominante algensoorten die aanwezig waren. De spectrale helling van de CDOM-absorptie kan een aanwijzing zijn voor wat voor soort CDOM aanwezig is, maar er werden geen correlaties gevonden tussen de spectrale helling van CDOM en enig andere parameter. De specifieke absorptie van SPM had ook geen correlatie met een andere parameter, maar de totale absorptie van SPM correleerde met het percentage modder in de bodem op de plaats van de meting. De totale absorptie en uitdoving volgden logischerwijs de variaties in de concentraties Chl-a, SPM en CDOM, zodat ook in de gemeten reflectiespectra deze variaties zichtbaar waren. De reflectiespectra konden grofweg in klassen worden ingedeeld naar gelang de diepte van het meetstation en lokale extreme waarden van SPM en CDOM. Deze gegevens van de in situ metingen kunnen gebruikt worden om algoritmen voor waterkwaliteitsmonitoring in de Waddenzee te calibreren en de resultaten te valideren.

Lokale calibratie is een actueel onderwerp in remote sensing van kustwateren. Hoofdstuk 4 gaat daarom over een model dat gecalibreerd kan worden met regionale (mediane) en lokale (station-specifieke) SIOP sets. Het gebruikte model heet HYDROPT; het is een invers bio-optisch model, wat wil zeggen dat het uit een reflectiespectrum de concentraties afleidt (invers) en gebaseerd is op biologisch-optische grootheden (de optische eigenschappen van de pigmenten, SPM en CDOM). In een eerste stap worden uit het reflectiespectrum de totale absorptie (a) en de verstrooiing (b) berekend en in een tweede stap worden de concentraties Chl-a, SPM en CDOM hieruit afgeleid. Omdat de afleiding van de totale absorptie en verstrooiing uit het reflectiespectrum in dit soort modellen helemaal fysisch is, wordt door verschillende wetenschappers gesteld dat dit in theorie de meest precieze optische modellen voor waterkwaliteit zijn. Hoofdstuk 4 besteedt uitgebreid aandacht aan de theorie van het HYDROPT-model en aan hoe het gecalibreerd wordt. In het model zit een opzoek-tabel met mogelijke reflectiespectra en bijhorende totale a en b. Als een reflectiespectrum in het model wordt gestopt (het input-spectrum) kijkt het model eerst op welk spectrum in de tabel het input-spectrum het meest lijkt en welke a en b daarbij horen. Vervolgens gaat het met de SIOPs waarmee het model is gecalibreerd en variabele concentraties proberen deze a en b te modelleren (de som van de SIOPs x concentraties = a en b). Als dat is gelukt geeft het als uitkomst onder andere de concentraties, het gemodelleerde reflectiespectrum (dat hoort bij de gemodelleerde a en b) en een maat voor hoeveel het gemodelleerde spectrum lijkt op het input-spectrum. Die maat is Chi-kwadraat ( $\chi^2$ ), hoe lager  $\chi^2$ , hoe beter het modelleren van het spectrum is gelukt. Een extra optie in het HYDROPT model is automatische lokale calibratie. Voor deze optie moet het gecalibreerd worden met verschillende sets SIOPs, het model kan vervolgens bepalen

---

welke set tot het beste gemodelleerde reflectiespectrum leidt. Er wordt gekeken of deze methode werkt en of  $\chi^2$  gebruikt kan worden voor kwaliteitscontrole op de gemodelleerde concentraties.

De door HYDROPT gemodelleerde concentraties waren goed wanneer handgemeten reflectiespectra werden gebruikt als input. Verschillen tussen gemodelleerde en in situ gemeten concentraties werden gegeven als de wortel van de gemiddelde fout in het kwadraat (RMSE) en deze getallen waren 0.15-0.52  $\text{mg m}^{-3}$  voor Chl-a, 0.27-0.46  $\text{mg m}^{-3}$  voor SPM, en 0.17-0.34  $\text{g m}^{-3}$  voor CDOM. Per calibratie verschilden de uitkomsten, waaruit geconcludeerd kon worden dat de locale calibratie inderdaad invloed heeft op de uitkomsten. Het bleek echter ook, dat 70 % van de reflectiespectra ambigu zijn: deze kunnen met verschillende combinaties van SIOPs en concentraties goed gemodelleerd worden. Ook was het niet zo dat de calibratie die tot de laagste waarde van  $\chi^2$  leidde ook automatisch de beste concentraties gaf. De automatische calibratie en de kwaliteitscontrole op de uitkomsten werkten om deze redenen niet goed. Dat werd een probleem toen reflectiespectra van satellietbeelden als input gebruikt werden. Kaartjes met gemodelleerde concentraties die hier uit kwamen zagen er goed uit (Figuur 4.7). Maar toen de concentraties vergeleken werden met gelijktijdige in situ metingen waren de resultaten slecht, alhoewel niet slechter dan voor andere satellietprocessors. Omdat  $\chi^2$  niet voor de kwaliteitscontrole op de concentraties gebruikt kon worden was onduidelijk voor welke pixels de resultaten wel goed zijn en voor welke niet. Het leek er op dat de satelliet-resultaten vooral slecht waren voor de meetstations vlakbij wadplaten of bij land. Het was erg waarschijnlijk dat de platen of het land de reflectie van de pixels in het satellietbeeld daar beïnvloed hadden. De database met gelijktijdige satellietbeelden en in situ metingen (matchups) was echter te klein om hier zekerheid over te kunnen geven. Er zal eerst meer onderzoek gedaan moeten worden naar hoe ver de afstand tot wadplaat of land minimaal moet zijn om de uitkomsten van het model te kunnen vertrouwen.

Het laatste deel van Hoofdstuk 4 gaat over het modelleren van watertypen. Als HYDROPT kiest welke set SIOPs leidt tot de laagste  $\chi^2$ , geeft het als uitkomsten niet alleen de concentraties en  $\chi^2$ , maar ook welke SIOP-set het gebruikt heeft. Als de gekozen SIOP-sets per pixel in een kaartje worden weergegeven komen er de kaartjes zoals Figuur 4.11 uit (elke kleur staat voor een SIOP-set). Het water op plaatsen waarvoor het model één SIOP-set heeft uitgekozen, heeft blijkbaar vergelijkbare optische eigenschappen, mogelijk omdat het zelfde soort algen er voorkwam, of het SPM of CDOM vergelijkbaar was. Water met vergelijkbare SIOPs wordt hier een “watertype” genoemd. De watertypen uit HYDROPT konden logisch verklaard worden met wat bekend is over waterstromingen in de Waddenzee en de Duitse Bocht. Er was bijvoorbeeld te zien dat er een ander watertype in de Noordzee was dan in de Waddenzee (Figuur 4.11). Bij laag tij (Figuur 4.11a) was in de monding van de grote Duitse rivieren en vanaf daar naar het noorden (met de reststroming mee) een derde watertype te zien: waarschijnlijk rivierwater. Bij hoog tij (Figuur 4.11b) had dit rivierwater blijkbaar minder invloed en kwam het Noordzeewater tot veel dichterbij de kust. Waarschijnlijk kunnen de resultaten van de watertype-analyse verbeterd worden met meer goede SIOP-sets. SIOPs zijn erg lastig te meten: ze bestaan uit een hele serie metingen. Alle fouten in de SIOPs komen samen in de SIOP-sets, die daarom erg foutgevoelig zijn. Deze resultaten gaven echter wel aan dat watertypen modelleren met een invers bio-optisch model zoals HYDROPT goed mogelijk is.

Hoofdstuk 5 gaat verder in op het onderwerp van watermassa's. Watermassa's monitoren kan interessant zijn in gebieden waar het monitoren van precieze concentraties met remote sensing data

---

lastig is. Daarbij moet rekening worden gehouden met het feit dat sommige stoffen die in een watermassa aanwezig zijn langzaam verdwijnen (bijvoorbeeld SPM zinkt uiteindelijk naar de bodem en CDOM wordt afgebroken), terwijl andere stoffen, zoals zout, wel langdurig aanwezig blijven (conservatief zijn). Het maakt daarom verschil of een watermassa wordt gedefinieerd als water waarin de SIOPs gelijk zijn terwijl de concentraties misschien wel veranderen, of dat een watermassa wordt gedefinieerd als water waarin de totale optische eigenschappen gelijk zijn, zodat het dus een andere watermassa wordt wanneer de concentraties veranderen. In dit proefschrift noemen we daarom water waarvan de SIOPs hetzelfde zijn een “watertype” en water waarvan de concentraties of de totale optische eigenschappen vergelijkbaar zijn een “waterklasse”.

Vervolgens worden twee methoden van watermassa identificatie vergeleken: één gebaseerd op watertypen (HYDROPT, zoals in Hoofdstuk 4) en één op waterklassen (met een endmember methode). De endmember-methode is nieuw voor het monitoren van watermassa's. De methode wordt vaak gebruikt in remote sensing van land om percentages van een bepaalde bodembedekking aan pixels toe te kennen. Grenzen tussen watermassa's zijn niet zo scherp als tussen bodembedekkers; daarentegen kan water op één plek bestaan uit een mix van verschillende watermassa's. Daarom kan zowel op land als op water eenzelfde endmember- methode gebruikt worden. Verschillende manieren om de benodigde endmembers te bepalen komen aan de orde. Voor het genereren van endmembers werd het Gordon-model gebruikt, met de in de Waddenzee gemeten SIOPs zoals beschreven in Hoofdstuk 3. Er waren in totaal 9 endmembers: één voor puur water, één gegenereerd met lage concentraties Chl-a, SPM en CDOM, één gegenereerd met hoge concentraties voor de drie de stoffen en vervolgens steeds één voor alle combinaties, waarbij één of twee stoffen een hoge concentratie hebben en de rest een lage.

Het voordeel van de endmember-methode is dat de overgangen en het mixen van waterklassen duidelijk zichtbaar wordt; de meeste andere klassificatiemethoden leiden tot strikte grenzen. Een nadeel van de endmember-methode ontstaat met veranderende concentraties. Bijvoorbeeld, als SPM bezinkt terwijl het water horizontaal verder beweegt, wordt het water als een andere klasse geklassificeerd, zodat de watermassa niet meer te volgen is. In de resultaten van de twee methoden werd een duidelijk verschil gezien in de Noordzee. Bijna het hele gebied buiten de Waddeneilanden werd getypeerd als één watertype met HYDROPT, terwijl het water in hetzelfde gebied met de endmembermethode op sommige plaatsen geclassificeerd werd met de lage-concentraties endmember en op andere plaatsen met de Chl-gedomineerde endmember. Vermoedelijk waren in de hele Duitse Bocht dezelfde soorten fytoplankton algemeen aanwezig, terwijl de totale concentraties sterk verschilden. Dit zou de verschillen tussen de resultaten van de twee methoden verklaren. Voor de beste watermassa-monitoring zouden de twee methoden daarom gecombineerd moeten worden. Een andere mogelijkheid is om het endmember-model te gebruiken om te bepalen waar welke calibratie van het inverse bio-optische model het beste is om zo tot een locale calibratie te komen om concentraties te modelleren. Enkele onderzoekers hebben vergelijkbare methoden al met positief resultaat toegepast.

Hoofdstuk 6 beschrijft de praktische toepassingen van de endmember-methode zoals die is geïntroduceerd in Hoofdstuk 5. Eerst werden de in situ gemeten reflectiespectra als input voor het model gebruikt. De percentages (“abundances”) voor elke endmember die uit het model kwamen werden vergeleken met de concentraties Chl-a, SPM en CDOM die op de stations gemeten waren. De

lage-concentratie endmember werd in bijna elke uitkomst in relatief hoge abundances gezien, daarnaast werden in elk reflectiespectrum één of twee andere endmembers gevonden die de dominantie van één of twee stoffen op de vorm van het reflectiespectrum aangaven. Als de concentraties (relatief) vergelijkbaar waren had het SPM de grootste invloed op het spectrum. Dit is in overeenstemming met eerdere bevindingen.

Omdat het endmember-model goed leek te werken werd het op satellietbeelden toegepast. De reflecties in beelden van verschillende seizoenen, van verschillende momenten in de getijdencyclus, van situaties met en zonder wind en met verschillende windrichtingen werden met het endmember model gescheiden in abundances van de endmembers om te zien of het model de verwachte variaties (zoals beschreven in Hoofdstuk 2) zichtbaar kon maken. Het bleek dat de processen die de variaties in de concentraties van Chl-a, SPM en CDOM beïnvloeden - die in Hoofdstuk 2 aan de orde zijn gekomen - terug te zien waren in de resultaten van het endmember-model. Variatie over het gebied met relatief helder Noordzeewater in de diepe geulen tussen de eilanden en erg troebel water in de Dollard bij de Eems waren te zien in de abundances van de lage-concentratie endmember, de SPM-gedomineerde endmember en de SPM-Chl-gedomineerde endmember (bijvoorbeeld Figuur 6.6). In Figuur 6.7 was te zien dat de SPM-Chl-gedomineerde endmember met hoog tij, wanneer er veel helder Noordzee water is, het minst aanwezig was en ongeveer twee uur voor hoog tij, wanneer de getijdestroming het hoogst is en de meeste opwerveling plaats vindt, het meest. Met laag tij waren veel wadplaten te zien, maar waren de abundances van de SPM-Chl-gedomineerde endmember relatief laag, waarschijnlijk omdat in het ondiepe kalme water sediment weer naar de bodem zinkt. Met de beelden van het voorjaar van 2007 kon het ontstaan en de verplaatsing van een algenbloei gevolgd worden (Figuur 6.5). De Figuren 6.9 en 6.10 tenslotte laten zien dat er met veel wind erg hoge abundances van de SPM-Chl-gedomineerde endmember en de SPM-gedomineerde endmember ontstonden, in vergelijking met rustige omstandigheden (Figuur 6.3 en 8b). De windrichting had invloed op waar de hoogste abundances aangetroffen konden worden.

Ook “novelty spectra”, oftewel uitzonderlijke spectra die niet binnen het bereik van de endmembers liggen, bleken gedetecteerd te kunnen worden met de endmember methode. In een beeld werd een vlek waargenomen met een veel hogere fout dan in de omliggende pixels. Uit in situ data en de vorm van de spectra bleek dat het hier waarschijnlijk ging om de bloei van coccholiten, een type fytoplankton met een hoge verstrooiing. Om deze direct te kunnen detecteren zou een speciaal gegenereerde endmember toegevoegd kunnen worden. De endmember-methode levert niet direct getallen voor concentraties, maar informatie over hoge of lage concentraties en dominantie van de verschillende optisch actieve stoffen op het reflectiespectrum. De resultaten voor het monitoren van waterklassen zijn positief. De verdere mogelijkheden van deze methode onderzoeken is daarom aan te bevelen.

Hoofdstuk 7 geeft de synthese van de resultaten in de voorgaande hoofdstukken alsmede aanbevelingen voor toepassing van optische remote sensing in de Waddenzee en andere extreem troebele gebieden. Refererend naar de voorwaarden waar aan voldaan moet worden om remote sensing in deze gebieden mogelijk te maken (Hoofdstuk 2), geeft Hoofdstuk 7 aan aan welke voorwaarden door middel van dit proefschrift is voldaan en voor welke onderwerpen meer onderzoek of andere methoden of materialen nodig zijn.

---

De nieuwe WorldView2-satelliet zal naar verwachting vooral gedurende laag tij, betere resultaten opleveren voor de gehele Waddenzee dan MERIS, vanwege een kleine pixelgrootte. Het bepalen van land-water grenzen, met of in combinatie met optische remote sensing, zal een belangrijk onderwerp blijven, meer onderzoek naar dit onderwerp is nodig. Het C2R-algoritme, toegepast op MERIS data, gaf veel betere reflectiespectra dan het standaard MERIS-algoritme. Toch is ook met dit algoritme meer onderzoek nodig naar de afstand die minimaal in acht moet worden genomen om reflectiespectra van een hoge kwaliteit te krijgen. Hoewel met dit proefschrift de beschikbare optische informatie van de Waddenzee sterk is vergroot, zijn er meer matchups (gelijktijdig gemeten in situ en satelliet metingen) nodig voor calibratie en validatie en zullen meer data leiden tot een grotere precisie van de algoritmes. Meetpalen kunnen een grote bijdrage leveren aan het genereren van dit soort data, die simultaan (zonder tijdsverschil) met de overkomst van de satelliet gemeten dient te worden. De algoritmen die in dit proefschrift zijn gebruikt hadden een bereik dat groot genoeg was voor de extreme concentraties in de Waddenzee, en de gemodelleerde concentraties met in situ gemeten reflecties als input waren goed. Echter, de HYDROPT concentratie-data gemodelleerd met MERIS data als input misten een geldige kwaliteitscontrole.

Watermassa-identificatie laat positieve resultaten zien in dit proefschrift. De watertype-modellering met HYDROPT kan verbeterd worden door meer SIOP-sets te bepalen en de kwaliteit van deze te verbeteren, bijvoorbeeld door op elke locatie meerdere metingen te doen en de mediaan te gebruiken. De monitoring van variaties in waterklassen met het endmembermodel was nieuw en lijkt tot goede eerste resultaten te leiden. Meer onderzoek naar het gebruik van deze methode is daarom aan te bevelen, bijvoorbeeld naar het gebruik van specifieke endmembers, zoals voor het detecteren van coccolieten. De beste watermassa-monitoring wordt verwacht wanneer beide modellen gecombineerd worden.