

# De kleur van het water gezien

## vanuit de ruimte

*D. Spitzer*

*Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee*

### 1. Voorgeschiedenis en achtergronden

De wisselwerking tussen het zonlicht en het zeewater, aangeduid met het begrip 'de kleur van de zee', dient vanouds niet alleen als een bron van inspiratie voor verscheidene vormen van kunstzinnige uitingen maar ook als een bron van informatie voor haar aanschouwers en gebruikers van haar natuurlijke rijkdommen. Vissers beoordelen hun vangstmogelijkheden ter plaatse o.a. aan de hand van de blauwgroene kleurverschillen in het water. Menging- en transportprocessen in de kust-zeeën worden waargenomen m.b.v. de concentratiemetingen van een geel gekleurde component ('yellow substance') van opgelost organisch materiaal aangevoerd door de rivieren. Aanwezigheid van bepaalde planktonsoorten is te herkennen aan de kleurvariaties tijdens de algenbloei-perioden. De studie van het lichttransport in het water richtte zich in het verleden op de verschijnselen zoals de gelaagdheid- en troebelheidsvariaties, het zicht en beeldvorming onderwater, fotosynthese, primaire produktie en bioluminescentie.

Met de komst van de moderne aardobservatietechnieken vanuit de lucht en de ruimte, de remote sensing (RS), wordt steeds meer aandacht besteed aan de interpretatie van de vanuit het water opwaarts gerichte stralingsflux i.v.m. de samenstelling van de waterkolom. Laboratorium- en op-zee-waarnemingen werden en worden verricht met de bedoeling om de juiste relaties, al dan niet lokaal en temporeel afhankelijk, theoretisch en experimenteel te onderzoeken. Deze relaties, ook wel de waterkleuralgoritmen genoemd, beschrijven dan het verband tussen de optische groot-

heden en de concentratie van de in het water opgeloste en gesuspenderde stoffen.

Vele meetexperimenten vanuit de vliegtuigen en enkele op de oceaan gerichte ruimte-missies hebben reeds plaatsgevonden met het doel om de toepassingsmogelijkheden en nauwkeurigheid van deze algoritmen te toetsen over grotere zeegebieden. De recente waarnemingen van het Coastal Zone Color Scanner (CZVD) optische instrument aan boord van de Nimbus 7 satelliet hebben opmerkelijke resultaten geleverd, maar ook de knelpunten onthuld, zoals de juiste correctie voor atmosferische invloeden en onzekerheden in de gegevensinterpretatie boven de troebele kustgebieden.

Nieuwe nu al als pre-operationeel genoemde missies met verbeterde optische instrumentatie zijn in voorbereiding. Hieronder vallen ook de Europese inspanningen voor de remote sensing van de oceanen, nog te realiseren door middel van de ERS satellieten van de European Space Agency (ESA). Een van de voor de ERS 2 missie geplande instrumenten is de Ocean Colour Monitor (OCM), reeds gedocumenteerd door enkele voorstudies en ontwerpen, thans onderworpen aan de beoordeling en voorbereidende studies leidend tot de realisatie.

De spectrale samenstelling van het door het water terugverstrooide straling, uitgedrukt door middel van de grootheid irradiantiereflectie  $R$  (verhouding tussen de opwaartse en de neerwaartse irradiantie) is afhankelijk van de optische eigenschappen van het zeewater. Deze zijn bepaald door

de vier 'gekleurde' bestanddelen: het zuivere zeewater zelf, zwevende deeltjes van organische (plankton) afkomst, zwevende anorganische deeltjes (zand, klei) en de opgeloste organische afbraakprodukten (humus zuren) hoofdzakelijk van terrestrische afkomst. De hoeveelheden en hun onderlinge verhouding van deze al dan niet natuurlijke opgeloste en gesuspendeerde stoffen zijn verantwoordelijk voor de verandering van de oorspronkelijk blauwe (door de moleculaire verstrooiing) waterkleur naar het groen, bruin, geel of zelfs melkachtig of zwart. Uit de stralings-transportvergelijking geldt dan

$$R = \frac{B + \sum_i B C_i}{A + \sum_i A C_i}$$

waar B de specifieke verstrooiingssignaturen zijn, bepaald door de terugverstrooiingcoëfficiënten van het zuiver zeewater (index w) en van elk ander bestanddeel afzonderlijk (index i), A de specifieke verzwakkingssignaturen zijn, hoofdzakelijk bepaald door de absorptie coëfficiënten (indexering analoog B), C<sub>i</sub> zijn de concentraties van de betreffende materialen in het water.

Wanneer de specifieke signaturen bekend zijn, kan men uit de optische metingen de gezochte concentraties bepalen. Doet men dit voor elk element (pixel) van een vanuit de lucht of de ruimte bemeten wateroppervlak, kan de distributie van de opgeloste en zwevende stoffen in kaart gebracht worden. Periodieke metingen van de distributievariaties verschaffen dan een beeld van de dynamiek (biologische en transportprocessen) van het betreffende gebied. Afhankelijk van de ruimtelijke en de temporele resolutie van de waarnemingen kunnen dan kwantitatieve gegevens verzameld worden over de processen zoals algenbloei, uitstroming en menging van het rivierwater, verplaatsing van het slibmateriaal langs de kust, lozingen van zeeverontreinigende stoffen, snelheid van de oceaanstromen, enz.

Er bestaan echter wezenlijke beperkingen van een remote sensing systeem. Dicht wolkendek verhindert alle optische waarnemingen. De spectrale signaturen van een absorberend en verstrooiend medium bestaand uit verschillende soms onderling gecorreleerde componenten zijn niet eenvoudig te bepalen en zijn daarnaast ook vaak lokaal en temporeel gebonden. Het op een grote afstand gedetecteerde signaal moet gezuiverd worden van de dominerende atmosferische invloeden (transmissie en terugverstrooiing) die een eigen spectrale en ruimtelijke karakteristiek vertonen. Hetzelfde geldt voor de bijdrage aan het signaal door de reflectie van het directe zon- en hemellicht aan het wateroppervlak ('glitter'). De opwaarts gerichte straling vanuit water wordt beïnvloed ook door de verticale samenstelling van de waterkolom, zodat de eventueel aanwezige stratificatie een extra parameter inbrengt in de interpretatie algoritmen. Het is dus voor de hand liggend dat de nauwkeurigheid van de bepaling van de plaatselijke concentraties m.b.v. de remote sensing veel lager is dan m.b.v. de klassieke meetmethoden vanaf de schepen. Desalniettemin, door hun synoptische kunnen de remote sensing waarnemingen veel correctere gegevens verschaffen over de totale hoeveelheden van de verplaatste en geproduceerde materialen in een groter aan de veranderingen onderhevig zeegebied, dan de discrete asynchrone scheepsmetingen. Een combinatie van beide, d.w.z. de remote sensing gekoppeld aan de simultane insitu referentiemetingen ('sea truth') is meest voordelig.

## 2. Toepassingen

Mariene biologie en ecologie

De concentratie van het pigment chlorofyl, aanwezig in de algen, is een maat van de biomassa. Zoals recentelijk is aangetoond, kan deze concentratie in de open zee vanuit de ruimte worden bepaald met een nauwkeurigheid van 35%. Het in kaart brengen van de chlorofylverdeling over de zeeën en oceanen maakt de studie van de koolstofcyclus in het water alsook globale

en met de concentratie van het plankton, dus met de zeewaterkleur. Samen met de satelliet-meteorologische gegevens kunnen de gegevens over de kleurvariaties in de zee belangrijk bijdragen tot de visvangsttactiek en de daarmee samenhangende brandstofbesparing. Deze gegevens kunnen ook dienen voor het beheer van de visgebieden en voor de voorspelling en de controle van de vispopulaties. De commerciële visserij aan de westkust van de Verenigde Staten maakt reeds gebruik van dit soort informatie dat verkregen is via de CZCS-beeldverwerking.

### Zeevervuiling

Naast de natuurlijke produkten beïnvloeden ook de verschillende soorten zeeverontreinigende materialen, vaak gebonden aan de slibdeeltjes, het mariene milieu. Vervuiling door chemische verbindingen gaat vaak gepaard met toeneming van troebelheid en verhoogde planktonconcentratie in het water. Beide effecten veranderen de kleur van het water en zijn dus door optische instrumenten waarneembaar. Ook vervuiling van een luchtlaag boven het zeeoppervlak, veroorzaakt door het verbranden van chemisch afval op zee, kan worden waargenomen met behulp van

satellietbeelden zoals aangetoond in Figuur 2. Meer dan 100.000 ton industrieel afval wordt vanaf speciale vaartuigen jaarlijks verbrand op de open zee. De door het verbrandingsproces vrijgekomen HCl-pluim kan zich tot enkele honderden kilometers verspreiden. De monitoring en controle van de ontstane lucht- en watervervuiling met meetvliegtuigen en schepen blijken onvoldoende te zijn. De mogelijkheid om olieverontreinigingen op te sporen met behulp van de passieve optische methoden is nog niet volledig onderzocht.

### 3. De Ocean Colour Monitor (OCM)

De specificaties van de OCM, zoals gegeven in de Ocean Color Working Group ESA Progress report (2) zijn gebaseerd op de 777 km polaire baanhoogte en een 800 m pixelgrootte. De specificaties van de spectrale kanalen staan in Tabel 1. Er bestaan twee principieel verschillende ontwerpen voor dit eerste Europese optische satellietinstrument voor de zeeobservatie. In het eerste ontwerp is de aardoppervlak aftasting gerealiseerd door middel van een roterende spiegel (z.g. mechanische scanning) en afzonderlijke detectoren voor elk spectraal kanaal. Dit is een nu reeds klassieke oplossing toegepast in de instru-

*Spectral radiometric spatial resolution*

no	$\lambda_c$ (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)	$\frac{NE\Delta\rho}{NE\Delta I} \theta, -60^\circ$	$\Delta x$ (m)	Comments
1	400	20	$< 10^{-3}$	800	Yellow substance
2	445	20	$< 5 \times 10^{-4}$	800	First priority chlorophyll
3	520	20	$< 5 \times 10^{-4}$	800	Chlorophyll Turbidity
4	565	20	$< 5 \times 10^{-4}$	800	Turbidity
5	640	20	$< 5 \times 10^{-4}$	800	Turbidity baseline fluo Cla
6	685	20	$< 5 \times 10^{-4}$	800	Chlorophyll fluorescence
7	785	30	$< 5 \times 10^{-4}$	800	Atmospheric correction
8	1020	60	$< 5 \times 10^{-4}$	800	
9	1600	100	$< 5 \times 10^{-2}$	800	Water ice clouds
10	3700	400	$< 0.17$ K	800	Day/Night sea-surface temperature and atmospheric corrections
11	8500	500	$< 0.12$ K	800	
12	10800	1000	$< 0.12$ K	800	
13	12000	1000	$< 0.12$ K	800	

Tabel 1  
Spectrale, radiometrische en ruimtelijke resolutie van de OCM kanalen (2).

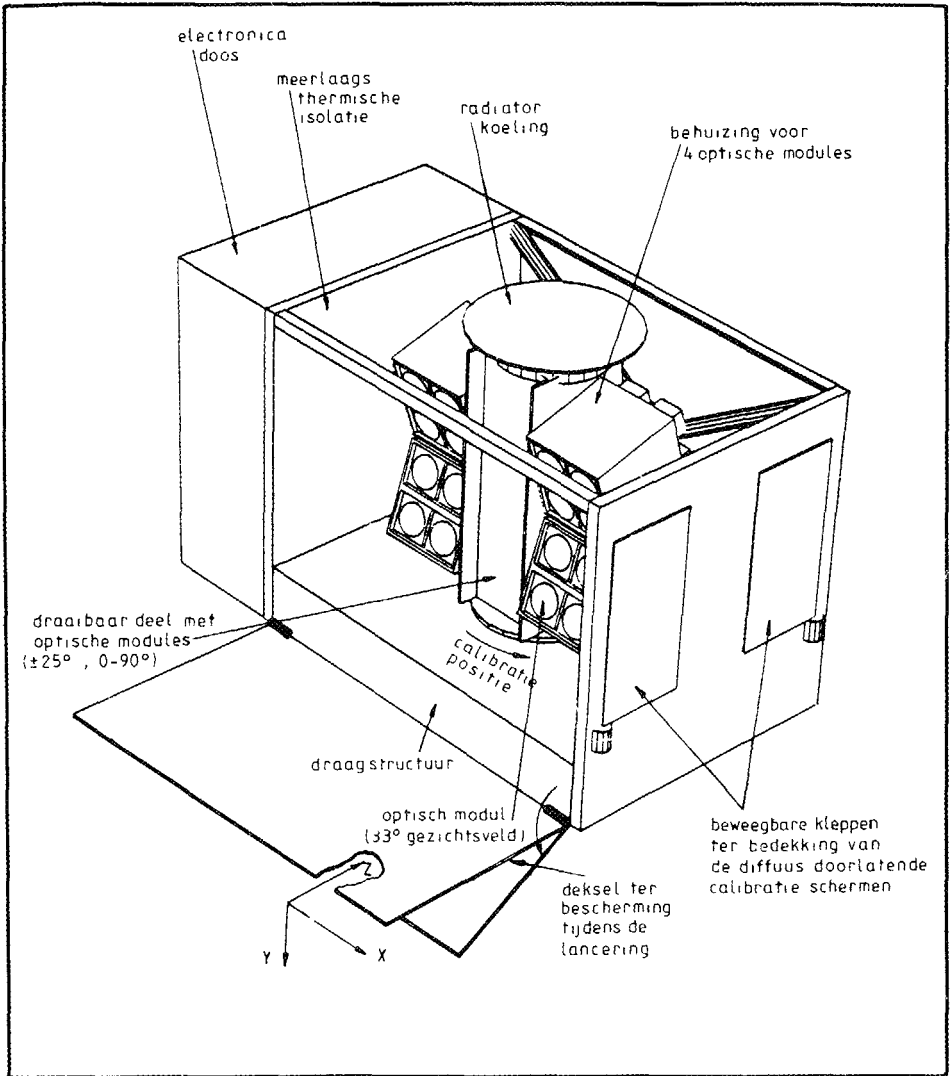


Fig. 3  
 Perspectief schets OCM (overgenomen van de Ref. (3)).