

Eutrofiëringsonderzoek met behulp van Remote Sensing, toegepast in Friesland

1. Inleiding

Het van oudsher verrichte waterkwaliteitsonderzoek van de Nederlandse waterkwaliteitsbeheerders dient primair voor:

- het vaststellen van de huidige waterkwaliteit (toestandsbeschrijving);
- het toetsen van de toestandsbeschrijving aan normen;
- het verkrijgen van inzicht in en opsporen van veranderingen in de waterkwaliteit (trenddetectie);

tegen het licht van de bruikbaarheid van satelliet-remote sensing voor eutrofiëringsonderzoek en de mogelijke inzet van remote sensing voor watersysteemverkenningen.

2. Waterkwaliteitsonderzoek

Vanuit en voor het waterkwaliteitsbeheer wordt in Friesland al vanaf 1960 waterkwaliteitsonderzoek verricht. Na een gebiedsroulerend onderzoekprogramma in

Samenvatting

Al vanaf 1960 wordt in Friesland routinematig waterkwaliteitsonderzoek verricht. Dit gebeurt aan de hand van steekmonsters op vaste punten. De Friese meren worden vanaf 1970 bemonsterd. De waterkwaliteit van 16 meren wordt aldus met evenzevele meetpunten gevolgd. Eutrofiëring in de Friese boezemmeren heeft geleid tot een door fytoplankton, vooral blauwalgen, gedomineerde levensgemeenschap. Waterkwaliteitsnormen voor doorzicht, chlorofyl, fosfaat en stikstof worden regelmatig overschreden. Zomerhalfjaar-gemiddelde waarden laten slechts een beperkte variatie zien tussen de meren. Variatie binnen meren blijft met één bemonsteringspunt per meer onbekend. Remote sensing kan inzicht geven in de mate waarin de eutrofiëring zich voordoet door een gebiedsdekkend ruimtelijk beeld te geven, waarin verschillen in troebelheid tussen meren en in afzonderlijke meren tot uiting komen. True en false colour beelden geven direct inzicht in visuele verschillen in de kwaliteit van het oppervlaktewater. Vervolgens zijn themakaarten gemaakt voor de parameters chlorofyl, zwevende stof, doorzicht en temperatuur. Voor dit aanvullend eutrofiëringsonderzoek zijn vier Landsat TM opnamen bewerkt. Voor het maken van de themakaarten zijn veldmetingen gebruikt van data, zo dicht mogelijk bij de satellietoverkomst. De resultaten waren verrassend: zowel binnen meren als tussen meren werden grotere verschillen in troebelheid en waterkwaliteit geconstateerd dan bekend was uit veldmetingen. Een aantal ruimtelijke patronen kon gerelateerd worden aan windinvloeden, het inlaatregiem (van IJsselmeerwater) en de morfometrie van de meren. De lokalisering van een meetpunt in een meer kan soms van grote invloed zijn op het resultaat van een waterkwaliteitsbeschrijving. Remote sensing is zo een hulpmiddel bij het optimaliseren van het meetnet. Satelliet remote sensing heeft ook z'n beperkingen: het aantal geschikte opnamen is gering; voor het maken van themakaarten blijven veldgegevens nodig; en de mate van betrouwbaarheid van de themakaarten is nog onduidelijk. Het oplossend vermogen van de Landsat is voldoende voor grotere meren. Voor kleinere wateren en gebiedsgerichte studies biedt vliegtuig remote sensing veel perspectief. Remote sensing verbreedt de blik op integraal waterbeheer en de watersysteembenadering.



T. H. L. CLAASSEN
Waterschap Friesland,
afdeling Watersystemen,
Leeuwarden



H. BUTTEVELD
RIZA, Lelystad



P. B. ROETERS
RIZA, Lelystad



K. APPELMAN
Meetkundige Dienst,
afdeling Remote Sensing,
Delft

- het nagaan van effecten van genomen maatregelen; en
- het zonodig aangeven van (aanvullende) maatregelen ter (verdere) verbetering van de waterkwaliteit.

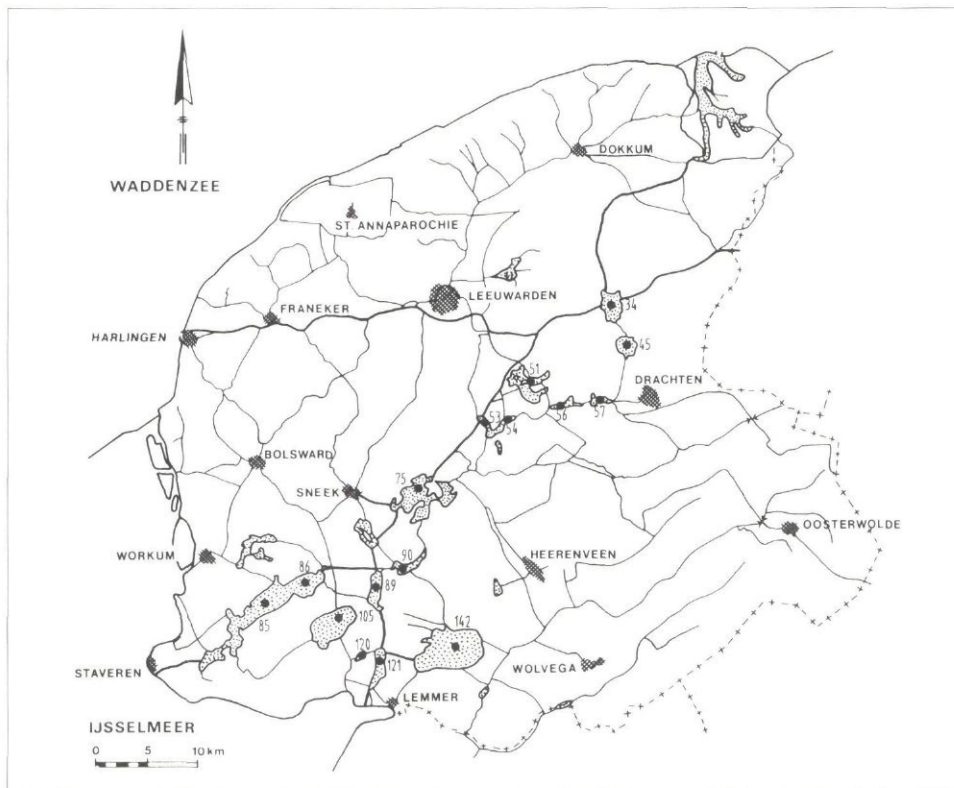
Hiervoor functioneert veelal een routinematig meetnet van vele punten verspreid over het beheersgebied, waarop een regelmatige – veelal maandelijks – bemonstering en analyse plaatsvindt. Naast dit routinematig onderzoekprogramma vindt de laatste jaren meer projectgebonden onderzoek plaats. Kenmerken van dit onderzoek zijn onder meer: begrensd gebied, beperkte looptijd, specifieke vraagstelling met bijbehorend bemonsterings- en analyseprogramma, en eerder maatregelen begeleidend dan normtoetsend. Remote sensing kan voor beide vormen van waterkwaliteitsonderzoek worden ingezet. Voor het gebruik van remote sensing voor projectmatig onderzoek (zie onder andere [Van Stokkom & Donze, 1988; Dekker *et al.*, 1990 en Dekker, 1993]).

Dit artikel spitst zich toe op de Friese ervaringen met remote sensing, primair aansluitend bij het routinematig waterkwaliteitsonderzoek. De sterke eutrofiëring van het Friese boezemwater vormde de aanleiding voor dit remote sensing onderzoek. Nadat in 1988 twee Landsat TM-satellietbeelden uit 1986 waren bewerkt [DHV, 1988; Claassen, 1990] zijn onlangs twee Landsat TM-beelden uit 1987 en 1989 bewerkt [Roeters & Buiteveld, 1993; Buiteveld *et al.*, 1993]. De opzet, aanpak en resultaten voor de Friese meren worden besproken en bediscussieerd

de eerste jaren (1960 tot en met 1963) ontstond vanaf 1964 een basismetnet bestaande uit 60 punten. Deze punten werden vier maal per jaar bemonsterd. Vanaf 1970 is dit meetnet uitgebreid tot 90 meetpunten. De bemonsteringsfrequentie breidde zich vanaf 1971 uit van 4 naar 6 maal per jaar, en vanaf 1974 naar 12 maal per jaar. Aanvullend werden vanaf 1970 merenpunten aan dit routinematig meetnet toegevoegd. Deze merenpunten werden tot en met 1992 alleen het zomerhalfjaar bemonsterd. Vanaf 1993 vindt ook hier een jaarrond bemonstering plaats. Inmiddels was het basismetnet van 90 punten vanaf 1984 ingekrompen tot 60 meetpunten. Het hiervoor genoemde oppervlaktewaterkwaliteitsmeetnet beperkt zich tot het Friese boezemwater.

Het huidige meetnet in het boezemwater (60 punten vanaf de oever bemonsterd en 16 merenpunten met de boot bemonsterd) wordt momenteel geëvalueerd om zonodig tot een bijstelling per 1 januari 1995 te komen. Naast trenddetecties en de schematisatie van de Friese boezem voor modellering wordt bij deze evaluatie ook de remote sensing ervaring gebruikt. Daarvoor zijn, zoals gezegd, tot nu toe vier Landsat-beelden voor Friesland bewerkt (van 16-6-1986, 3-8-1986, 5-7-1987 en 23-5-1989).

Naast aanpassingen van het puntenmeetnet is de bemonsteringsfrequentie (momenteel maandelijks het jaar rond) en het analyseprogramma aangepast. Het analyseprogramma kent bijvoorbeeld de chlorofyl-analyse vanaf 1980 voor de merenpunten



Afb. 1 - Het vaste land van Friesland met de ligging van de 16 merenpunten.

en vanaf 1981 voor de overige punten. Tot en met 1983 werd chlorofyl zes maal 's zomers geanalyseerd, vanaf 1984 maandelijks het jaar rond. De zwevende stofbepaling vindt vanaf 1987 alleen plaats op de merenpunten. Temperatuur en zichtdiepte zijn al vanaf het begin bepaald. De maandelijkse merentochten worden vanaf 1988 zo mogelijk gepland op de overkomst van de Landsat TM satelliet. Zie afbeelding 1 voor de ligging van de merenpunten.

3. Waterkwaliteitsbeschrijving: methode en resultaten

Periodiek wordt gerapporteerd over het verrichte waterkwaliteitsonderzoek. Voor Friesland waren dat drie rapporten in de periode 1960-1963, gevolgd door rapporten voor de jaren 1963-1973, 1974-1978, 1979-1981, 1982-1983, 1984-1985, 1986-1988, 1989-1990 en vanaf 1991 rapporten per jaar. Met (kleuren)kaartjes worden de markantste feiten/parameterwaarden gepresenteerd. Het rapport 'Waterkwaliteit Friesland 1963-1973' kent aldus kleurenkaartjes met de beoordelingsmethode uit het Indicatief MeerjarenProgramma Water (IMP), gebaseerd op zuurstofverzadigingspercentage, biochemisch zuurstof verbruik en ammonium-stikstof. De kaartjes bevatten bolletjes per meetlocatie, ingekleurd met blauw (goed), groen (redelijk goed), geel (matig), oranje (slecht), en rood (zeer

slecht). Het rapport 1974-1978 bouwt hierop voort, maar presenteert de bevindingen voor de drie parameters ook afzonderlijk. Daaruit blijkt duidelijker de sterke eutrofiëring van het oppervlaktewater. Een (extra) kaart voor totaal fosfaat onderstreept dat. De rapporten 1979-1981, 1982-1983 en 1984-1985 presenteren naast de IMP-index bolletjes-kaarten van totaal fosfaat, totaal stikstof en chlorofyl, ook in vijf (kleuren)klassen.

De drie daarop volgende rapporten (1986-1988, 1989-1990 en 1991) presenteren de boezemwaterkwaliteit niet langer per lokatie, maar gebiedsdekkend. Aan ieder meetpunt is daartoe vooraf handmatig volgens best professional judgement een traject toegekend. Dezelfde vijf kleurenklassen als voor de IMP-index worden gehanteerd. Overigens wordt vanaf 1991 de IMP-index niet meer gehanteerd. Voor 1986 tot en met 1991 is de waterkwaliteit voor het Friese boezemwater aldus oppervlaktewaterdekkend in kaart gebracht. Daarbij is gewerkt met zomerhalfjaar-gemiddelden voor chlorofyl, totaal-fosfaat, totaal-stikstof en zichtdiepte. De gehanteerde normen voor deze vier parameters zijn resp. 100 µg/l, 0,15 mg/l, 2,2 mg/l en 0,5 m. Voor zwevende stof zijn geen normen beschikbaar. Het chlorofylbeeld voor 1987 (zie omslag) kleurt alle meren geel (100-200 µg/l) met slechts enkele tussenliggende kanaaltrajecten met de kleur groen (50-100 µg/l). In 1989

(afb. 2) zijn voor chlorofyl het Tjeukemeer, Sneekermeer en Bergumermeer groen, de andere meren geel gekleurd. Deze verschuiving correspondeert met een algehele tendens tot een afname van de eutrofiëring in het boezemwater.

4. Waterkwaliteit en remote sensing in Friesland

4.1. Doelstellingen

Er zijn Landsat TM satellietbeelden uit 1986 [DHV, 1988; Claassen, 1990] en uit 1987 en 1989 [Roeters & Buiteveld, 1993] bewerkt. Het project in 1988 richtte zich op het bruikbaar maken van remote sensing satelliet-opnamen voor het waterkwaliteitsbeheer van oppervlaktewateren in het algemeen en voor de Friese meren in het bijzonder. Hiervoor zijn twee 1986-beelden gebruikt. In ons land was dit het eerste project bij een regionale waterbeheerder. De Beleids-Commissie Remote Sensing (BCRS) subsidieerde het project, juist ook om de toepassing van remote sensing te bevorderen. Doelstellingen van het project waren:

- het verkrijgen van een momentaan gebiedsdekkend beeld over grote (water)-oppervlakten, in dit geval het merengebied. Op één punt bemonsterde, maar ook niet bemonsterde meren komen zo geheel in beeld;
- het leggen van kwantitatieve relaties naar chlorofyl, zichtdiepte en zwevende stofgehalten. Digitale satelliet-informatie - verdeeld over diverse spectrale banden - maakt dat mogelijk;
- het registreren en interpreteren van waargenomen patronen en processen, bijvoorbeeld de invloed van inlaat- en lozingspunten, wind en morfometrie van meren;
- het nagaan van de representativiteit (ligging) van de bestaande 16 meetpunten in de meren.

In 1992 is een vergelijkbaar remote sensing project uitgevoerd [Roeters & Buiteveld, 1993]. Hierbij is voortgebouwd op de eerdere ervaringen en is aangesloten bij de ideeën om de bruikbaarheid van remote sensing te onderzoeken voor landelijke kartering van de waterkwaliteit, mogelijk bruikbaar voor watersysteemverkenningen.

4.2. Materiaal en methode

Met passieve optische remote sensing wordt de kleur van oppervlaktewater waargenomen. De kleur van het water wordt bepaald door de in het water opgeloste stoffen, humuszuren en deeltjes, algen en andere zwevende stof. Kwantitatieve informatie over die componenten, chlorofyl en zwevende stof, kan worden

verkregen door de intensiteit van het gereflecteerde licht te meten bij een aantal goed gekozen golflengtes [Stokkom & Donze, 1988; Dekker, 1990; Dekker, 1993; Krijgsman, 1994]. Daarnaast kan ook het doorzicht in kaart worden gebracht.

De uit 1986 bewerkte beelden (van 16 juni en 3 augustus) gaven invulling aan een multi-temporele analyse van waterkwaliteitsparameters, die de kleur van het water bepalen. Naast de kleuren (true-colour) en infrarood (false-colour) beelden zijn themakaarten [Beck & Van den Brink, 1986] vervaardigd voor chlorofyl, temperatuur, zichtdiepte en zwevende stof [DHV, 1988]. Voor het vervaardigen van een themakaart zijn grondwaarnemingen nodig om het satellietbeeld te ijken. Voor de satellietopname van 16 juni waren grondwaarnemingen beschikbaar van 2 dagen later (zuidelijke meren) en 9 dagen later (noordelijke meren); van 3 augustus van 18 en 10 dagen ervoor, en 19 en 24 dagen erna voor resp. de zuidelijke en noordelijke meren. Voor de themakaarten zijn de berekende waarden ingedeeld in relatief kleine klassen, ieder met een eigen legenda-kleur. Tabel I geeft de gebruikte kleurenklassen weer voor de

TABEL I - Gekozen klasse-indeling en kleurcodering voor de presentatie van de kwantitatieve themakaarten uit 1986 (A) en 1987-1989 (B). Voor 23-5-1989 is de verdeling (n) aangegeven van de op dat moment gemeten waarden op de 16 merenpunten.

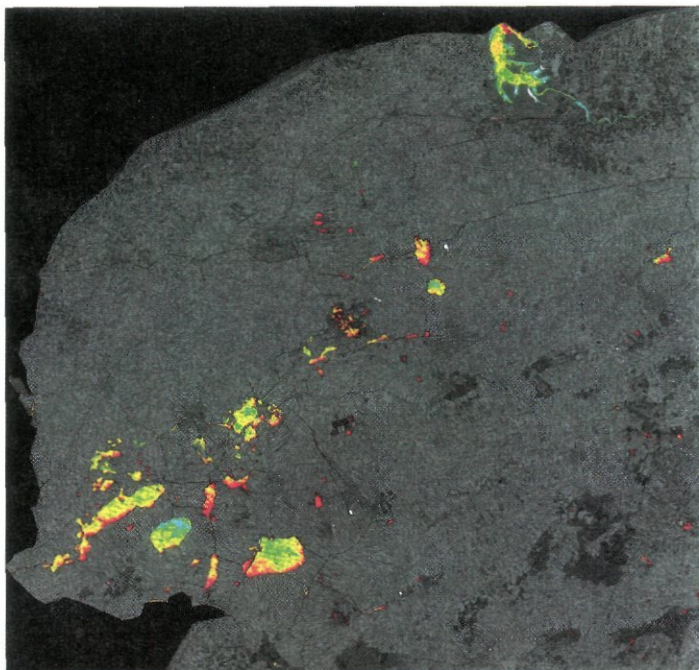
A	Chlorofyl ($\mu\text{g/l}$)	Zwevende stof (mg/l)	Doorzicht (m)	Temperatuur ($^{\circ}\text{C}$)				
stappen vanaf 0 van	20	5	0,05	0,4				
B	klasse	n	klasse	n	klasse	n	klasse	n
blauw	< 50	1	< 20	-	> 0,5	-	< 19	16
groen	50-100	5	21-30	-	0,41-0,50	-	19-21	-
geel	101-150	6	31-40	4	0,31-0,40	2	21-23	-
oranje	151-200	3	41-50	10	0,21-0,30	1	23-25	-
rood	< 200	1	> 50	2	≤ 20	13	> 25	-

vier parameters. Recentere beelden die bewerkt en geïnterpreteerd zijn, dateren van 5 juli 1987 en van 23 mei 1989. Rond 5 juli waren grondwaarnemingen beschikbaar van 10 dagen ervoor en 16 dagen erna; van 23 mei van die dag zelf. De voorbewerkingen waren analoog aan het eerdere project. Echter voor de legenda van de themakaarten zijn bredere klassen gekozen (tabel I). Voor de recente themakaarten is geprobeerd klasse- (en kleur-) overgangen aan te laten sluiten bij de geldende normwaarden, zodat zichtbaar wordt welk water (oppervlak) beneden dan wel boven de norm uitkomt. Opgemerkt moet echter worden dat deze kaarten

momentopnamen zijn, terwijl de normering veelal is gebaseerd op (zomerhalfjaar) gemiddelden.

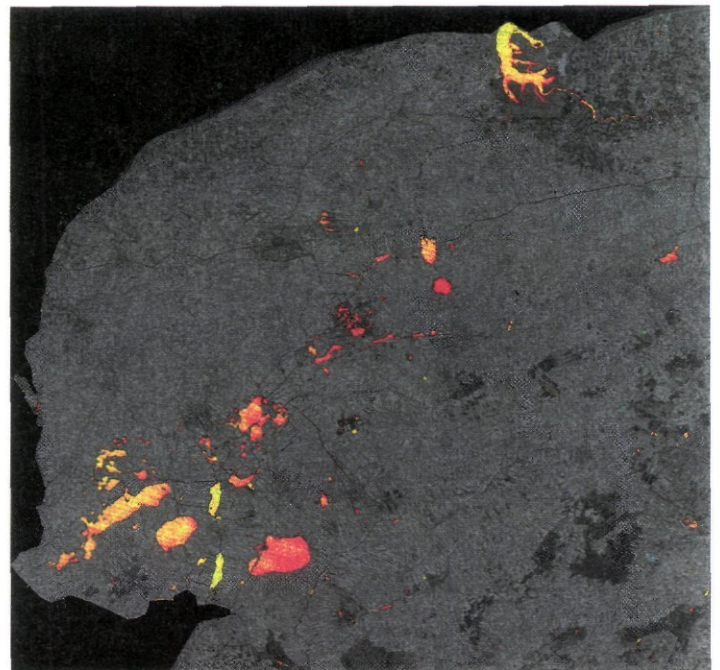
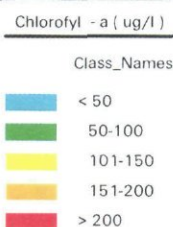
4.3 Resultaten

Steeds zijn zowel reële beelden (true en false colour) als thematische kaarten gemaakt. Vooral de true colour beelden leveren mooie plaatjes op. Voor het vervaardigen van de themakaarten wordt gewerkt met een herleid algoritme, waarin de relatie tussen satelliet- en grondwaarnemingen is beschreven. Voor iedere kaart wordt deze vergelijking afzonderlijk vastgesteld. Enkele opmerkelijke resultaten [DHV, 1988; Claassen, 1990] - overigens



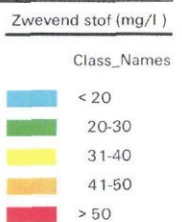
Landsat TM. Chlorofyl - a beeld.
Opn. datum 23 mei 1989.

Afb. 2 - Themakaart van de Friese meren voor chlorofyl, verkregen met het Landsat-beeld van 23 mei 1989. Voor de kleur-codering zie ook tabel I.



Landsat TM. Zwevend stof beeld.
Opn. datum 23 mei 1989.

Afb. 3 - Themakaart van de Friese meren voor zwevende stof, verkregen met het Landsat-beeld van 23 mei 1989. Voor de kleur-codering zie ook tabel I.



niet gelijk voor de bekeken parameters – betroffen:

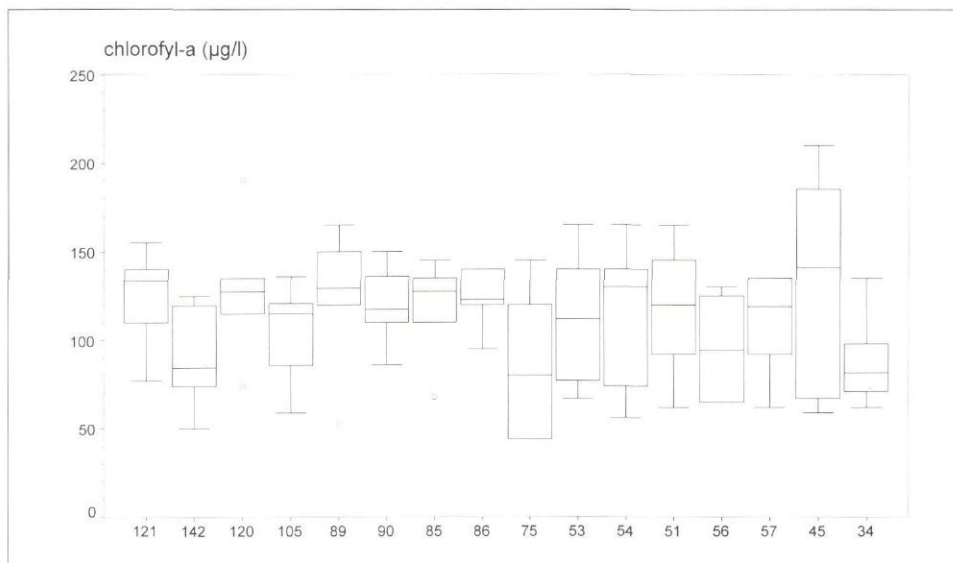
- een soms grote heterogeniteit binnen meren;
- een soms grote heterogeniteit tussen meren;
- randeffecten en waaierspatronen;
- onzekere betrouwbaarheid van de kwantitatieve themakaarten.

Vanaf 1988 is getracht de bemonstering van de meren af te stemmen op de satelliet-overkomstdata. Deze satelliet komt iedere 16 dagen over; de maandelijkse merentochten vallen dan om de andere keer samen met een overkomst. Ook voor de kwantitatieve themakaarten uit 1987 en 1989 zijn de hiervoor genoemde overall-resultaten van toepassing [Roeters & Buiteveld, 1993; Buiteveld *et al.*, 1993].

Ter illustratie worden twee themakaarten afgebeeld voor 23 mei 1989, resp. voor chlorofyl (afb. 2) en zwevende stof (afb. 3). Voor chlorofyl valt de heterogeniteit binnen de meren op met aan de zuidkant veelal hogere waarden dan aan de noordkant van de meren. In het Lauwersmeer is dit juist andersom. De spreiding over meerdere klassen is voor het zwevende stof geringer dan voor chlorofyl. Ook de gradiënten binnen de meren zijn minder uitgesproken.

5. Bruikbaarheid en beperkingen van satelliet remote sensing

Enkele voor- en nadelen van Landsat TM remote sensing zoals toegepast in Friesland zijn opgenomen in tabel II [Claassen, 1990], aangevuld met recente ervaringen. De meeste items spreken voor zich. Aan de optimalisatie van het meetnet wordt momenteel gewerkt. Het inzicht in het watersysteem wordt vergroot door zowel de reële beelden als de themakaarten. Satelliet remote sensing levert onder de Nederlandse klimatologische omstandigheden gemiddeld drie geschikte beelden per jaar op. Wateren smaller dan circa 90 m komen met de Landsat TM niet betrouwbaar in beeld. Met remote sensing zijn slechts enkele parameters, bijvoorbeeld uit het scala dat is opgenomen in de lijst van MILBOWA grens- en streefwaarden, te beschrijven. De verkregen momentopnamen zijn niet geschikt voor



Afb. 4 - Centrale tendentie en spreiding van het gemeten chlorofyl-gehalte per meer gedurende de maandelijkse merentochten in 1989. Voor de nummering van de meren zie afb. 1.

normtoetsingen, die zijn gebaseerd op zomerhalfjaar-gemiddelden. Ter illustratie zijn in afbeelding 4 de chlorofylwaarden voor de merenpunten in het zomerhalfjaar 1989 gepresenteerd. De gevonden spreiding in de reeks van zes waarnemingen wordt voor de toetsing gemiddeld. De gevonden waarden variëren van 44 tot 270 µg/l, met een overall-gemiddelde van 120 µg/l. Een momentopname, bijvoorbeeld van 23 mei 1989, betreft aldus een (toevals)treffer binnen deze ranges. Voor deze voor- en nadelen wordt achtereenvolgens wat dieper ingegaan op extrapolatie in tijd en ruimte en op de betrouwbaarheid van de themakaarten. Een remote sensing beeld legt – evenals veldwaarnemingen – een momentopname vast. Verschil met veldwaarnemingen is dat het remote sensing beeld een gebiedsdekkend overzicht geeft van het studiegebied. Het remote sensing beeld levert ten opzichte van veldwaarnemingen automatisch een extrapolatie in de ruimte.

Ook niet bemonsterde meren worden ingekleurd bij het maken van de themakaarten. Patronen (gradiënten) worden zichtbaar, die mogelijk gerelateerd kunnen worden aan bijvoorbeeld stroming, wind, inlaat- en lozingsregiems. Bij opeen-

volgende beelden kunnen vaste patronen worden opgespoord.

De betrouwbaarheid van een themakaart wordt bepaald door een aantal zaken: van de betrouwbaarheid van de sensoren van de satelliet zelf, de atmosferische omstandigheden tot een aantal elementen waar men zelf iets aan kan doen of waarmee rekening gehouden kan worden. De aspecten 'veldgegevens', 'verschillen tussen watersystemen' en 'laboratoriumanalyses' vallen in deze laatste categorie. Bij van nature verschillende watersystemen moet goede afstemming plaatsvinden van te gebruiken veldwaarnemingen voor de te maken themakaarten. Voor één systeem afgeleide algoritmen gelden niet vanzelfsprekend voor andere watersystemen. De nauwkeurigheid van laboratoriumgegevens is vooral van belang wanneer gegevens van meerdere laboratoria worden gebruikt.

Om een themakaart uit een satellietbeeld te vervaardigen zijn veldgegevens nodig. Omdat ten opzichte van het terrestrische milieu watersystemen dynamischer zijn, moeten aan het gebruik van veldgegevens om een waterkwaliteitsbeeld te maken eisen gesteld worden. Door een verandering in weersomstandigheden of veranderingen in doorstroming, aan- of afvoer, is water in beweging. Daarnaast spelen ecosysteem-processen, zoals groei/productie en sterfte/afbraak. Dit heeft effect op de verdeling van stoffen in het water; zowel in de verticaal (bezinking of opwerveling van deeltjes), als in de horizontaal (veranderingen in verspreidingspatronen). Derhalve is het van groot belang dat de veldgegevens, die gebruikt worden om het satellietbeeld om te zetten in themakaarten, zijn verzameld zo dicht

TABEL II – Overzicht van voor- en nadelen van satelliet (Landsat-TM) remote sensing voor waterkwaliteitsonderzoek op regionale schaal.

Voordelen	Nadelen
gebiedsdekkende beelden	toepasbaar voor enkele parameters
patronen worden zichtbaar	beperkt aantal beelden beschikbaar
optimalisering meetnet	beperkte resolutie
inzicht in watersyste(em)en	afhankelijk van specialisten
database oude situaties	(meer) veldwaarnemingen nodig
	geen actuele beelden
	niet bruikbaar voor normtoetsing
	onzekere betrouwbaarheid

mogelijk bij doch liefst op het tijdstip waarop de satellietopname gemaakt is. Om tot het geclassificeerde beeld te komen wordt met een statistische bewerking de relatie tussen de waarnemingen in het veld en het satellietbeeld bepaald. Naarmate er meer (goede) veldgegevens zijn om deze relatie op te stellen, is – uitgaande van een watersysteem – de betrouwbaarheid van de herleide themakaart groter. Daarnaast speelt de nauwkeurigheid van de plaatsbepaling in het veld en het detailniveau van het satellietbeeld een rol. Bij een homogene ruimtelijke verspreiding van stoffen is de fout die geïntroduceerd wordt door een foute lokatiebepaling lager dan bij een heterogeen verspreidingspatroon. Dat geldt ook bij een beeld met relatief weinig ruimtelijk detail. Aanvullend kan nog opgemerkt worden dat ook de grootte en vorm van het oppervlaktewater een rol speelt. Bij het detailniveau van 30 bij 30 m van de Landsat TM kan een water dat een breedte van minder dan circa 90 m heeft, niet betrouwbaar door de satelliet waargenomen worden.

6. Discussie en conclusies

6.1. Interpretatie van satellietbeelden

De true colour beelden vormen de meest realistische weergave van de kleur van het water tijdens de opname (zie omslag) en geven daarom direct bruikbare informatie over een watersysteem. Interpretatie van dergelijke beelden vereist bij de eindgebruiker enig inzicht in de manier waarop deze beelden tot stand komen. Kennis van de lokale situatie stelt een waterbeheerder echter al snel in staat een dergelijke interpretatie, onafhankelijk van specialisten, uit te voeren. Remote sensing specialisten blijven echter wel nodig voor het maken van themakaarten: het omzetten van satellietinformatie naar concentraties (chlorofyl en zwevende stof) of waarden (doorzicht) op basis van veldwaarnemingen. De interpretatie van themakaarten is vervolgens weer een zaak voor de waterbeheerder.

6.2. Informatiebehoefte

De doelstellingen van het waterkwaliteitsonderzoek (zie inleiding) en van remote sensing onderzoek (zie doelstellingen) zijn indicatief voor de informatiebehoefte van een waterbeheerder. Twee aspecten zijn van belang bij het voorzien in die informatiebehoefte: de beantwoording van die doelstellingen en het onderzoek door de beheerder. Voor de doelstellingen heeft het gebruik van satellietbeelden natuurlijk als voordeel dat een momentaan gebiedsdekkend beeld beschikbaar komt. De toegevoegde waarde van de themakaarten

TABEL III – Overzicht van diverse voor chlorofyl gebruikte klasse-indelingen voor het weergeven van resultaten op kaart. Kolom 1: zie tabel I; kolommen 2 en 3: de Friese waterkwaliteitsrapporten; kolom 4: de jaarlijkse landelijke CUWVO-rapportage (links volgens de tekst, rechts volgens de kaart).

Klasse	Chlorofyl ($\mu\text{g/l}$)				
	remote sensing	1979-1991	1992/notove	cuwvo	
donkerblauw	-	< 25	-	-	(≤ 25)
lichtblauw	< 50	25-50	< 50	≤ 50	≤ 50
groen	50-100	50-100	-	-	≤ 100
geel	101-150	100-200	50-100	≤ 100	≤ 200
oranje	151-200	-	150-150	≤ 200	-
rood	> 200	≤ 200	> 150	> 200	> 200

ligt vooral in de weergave van de ruimtelijke verdeling van diverse parameterwaarden. Hierbij is het gebruik van de themakaart bepalend voor de details die worden weergegeven. Bovendien speelt ook de betrouwbaarheid van de methode een rol. Specifieke interesse van een gebruiker kan leiden tot een gedetailleerd beeld met vele klassen. Hierbij speelt wel het gevaar van schijn-nauwkeurigheid. Het schaalniveau speelt hierbij geen rol. De informatie is immers gebonden aan het (grond)vlakje van 30 bij 30 m, evenals de presentatie op een themakaart. Een schatting van de beperkingen van de methode is daarom wel van belang voor gebruik van remote sensing voor waterkwaliteitsonderzoek. Een indeling in klassen (zie tabel I) wordt bepaald door het doel waarvoor de kaart wordt gemaakt. Voor normvergelijking zullen grenzen van waterkwaliteitsnormering (zie tabel III) worden gebruikt, hoewel deze niet altijd eenduidig zijn. De onderzoeker wil meer detail zien.

6.3. Verdere toepassing remote sensing

Om de toepassing van remote sensing voor het (regionale) waterbeheer te bevorderen moet de gebruiker zich bewust zijn van de voor- en nadelen (zie tabel II). Belangrijk pluspunt is vermeerdering van inzicht in en kennis van het (regionale) watersysteem in de zin van beïnvloeding door in- en uitlaten, heterogeniteit binnen het systeem en invloed van weer en wind. Deze kennisvermeerdering is vooral van belang voor de (regionale) beheerder zelf. Incorporatie in een GIS kan leiden tot een meer directe bruikbaarheid en toegankelijkheid, bijvoorbeeld bij waterkwaliteitsmodellering en bij integratie van informatie. Ook moet de gebruiker af van het idee dat remote sensing leidt tot een beperking van de meetinspanning in het veld. Vooralsnog is eerder het tegendeel waar. De volgende stappen kunnen stimuleren dat remote sensing een zinvol en bruikbaar instrument wordt voor het (regionale) waterbeheer:

– De meerwaarde ten opzichte van veldwaarnemingen wordt vergroot wanneer

meerdere watersystemen (gelijktijdig) in beeld komen. Daarbij kan gedacht worden aan beheersgebied-overschrijdende wateren, maar ook aan verschillende watersystemen binnen een beheersgebied. Als voorbeeld voor de Friese situatie betreft dit resp. de relatie naar het IJsselmeer en de Groningse en noord-west Overijsselse meren, en de relatie tussen boezemmeren, polderplassen en diepe plassen.

– Het 'aanvullende' in plaats van het 'vervangende' van het meetnet moet inhoud krijgen. In Friesland wordt nu gewerkt aan een optimalisering van het boezemmeetnet, waarbij remote sensing-beelden betrokken worden. Ook het opnemen van remote sensing gegevens in een GIS past op deze plaats.

– Reële beelden (true en false colour) kunnen snel en relatief goedkoop vervaardigd worden. Zij vormen een gemakkelijke stap tot implementatie van remote sensing bij het (regionale) waterbeheer.

– Naast satelliet remote sensing (in ons geval met de Landsat TM) moeten andere vormen van remote sensing, zoals digitale opnamen vanuit vliegtuigen, aandacht krijgen [Dekker, 1993; Dekker *et al.*, 1990]. Afhankelijk van het gebied en de vraagstelling moet het meest geëigende middel gekozen worden. Vooral voor monitoring en evaluatie van gebiedsgerichte projecten lijkt vliegtuig remote sensing perspectiefvol.

– Samenwerking in een landelijk kader, bijvoorbeeld in STOWA- of Unie-verband, biedt voordelen bij de aanschaf van de beelden, in de voorbereidingen en het opstellen van de relaties tussen grondwaarnemingen en het satellietbeeld. Het landelijk platform REWANET (REmote sensing of Water quality in the NETHERlands) biedt hiervoor ook mogelijkheden.

6.4. Tot slot

Uit de hier besproken projecten blijkt dat remote sensing beelden voor het kwaliteitsbeheer een aanvulling leveren bij het onderzoek naar ruimtelijke verspreidingspatronen en de betekenis hiervan voor het waterkwaliteitsbeheer, vooral op het gebied van eutrofiëring. Een belangrijk

knelpunt bij het toepassen van Landsat TM beelden is het beschikbaar zijn van gemiddeld slechts drie goede beelden per jaar. Daarnaast geldt dat de beelden voor een klein aantal waterkwaliteitsparameters gebruikt kunnen worden. Voor parameters die de kleur van het water bepalen kunnen themakaarten worden vervaardigd, mits de spectrale resolutie van de apparatuur daarvoor geschikt is.

Uit onderzoek van Dekker [1993] blijkt dat digitale vliegtuig remote sensing voor kleinere oppervlaktewateren goede perspectieven biedt. Naast de hogere geometrische resolutie die hiermee bereikt kan worden, zijn er mogelijkheden voor het instellen van apparatuur, gericht op het waarnemen van bepaalde delen van het electro-magnetisch spectrum. Met dit laatste wordt bereikt dat meer gericht op bepaalde waterkwaliteitsparameters [Burger-Wiersma, 1993; Gitelson *et al.*, 1993; Lathrop & Lillesand, 1986], alsmede gefocust op bepaalde aandachtsgebieden [Dekker *et al.*, 1990] remote sensing opnamen gemaakt kunnen worden.

Literatuur

- Beck R. en Brink, J. W. van den (1986). *Satelliet themakaarten, een nieuw hulpmiddel in planning en beheer*. Milieutechniek/Land+Water 26 (4): 59-61.
- Burger-Wiersma, T. (1993). *Overzicht van methoden voor het kwantificeren van blauwvieren*. RIVM rapport nr. 732404001. 34 pp.
- Buiteveld, H., Roeters, P. B., Claassen, T. H. L. en Appelman, K. (1993). *Water quality monitoring and management with remote sensing, from regional scale to national scale*. Presented at the international symposium 'Operationalisation of remote sensing', Enschede, pp. 99-108.
- Claassen, T. H. L. (1990). *Eutrophication observed by remote sensing: a distant point of view*. In: *Water management and remote sensing: technical meeting 47*. CHO-TNO, Wageningen, pp. 39-60.
- Dekker, A. G. (1993). *Detection of optical water quality parameters for eutrophic high resolution remote sensing*. Proefschrift Vrije Universiteit Amsterdam. ISBN 90-9006234-3.
- Dekker, A. G., Liere, L. van, Seyhan, E. en Malthus, T. J. (1990). *Remote sensing en waterkwaliteit: een helder beeld van troebel water*. *Gea* 23 (3): 86-90.
- Dekker, A. G. en Peters, S. W. M. (1993). *The use of the Thematic Mapper for the analysis of eutrophic lakes: a case study in the Netherlands*. *Int. J. Remote Sensing* 14 (5): 799-821.
- DHV Raadgevend ingenieursbureau bv (1988). *De toepassingsmogelijkheden van remote sensing satelliet-opnamen voor het waterkwaliteitsbeheer van de Friese meren*. DHV, Amersfoort. 50 p.
- Gitelson, A., Garbuzov, G., Szilagyi, F., Mittenzwey, K.-H., Karnieli, A. and Kaiser, A. (1996). *Quantitative remote sensing methods for real-time monitoring of inland waters quality*. *Int. J. Remote Sensing* 14 (7): 1269-1295.
- Gitelson, A., Szilagyi, F. and Mittenzwey, K.-H. (1993). *Improving quantitative remote sensing for monitoring of inland water quality*. *Wat. Res.* 27 (7): 1185-1194.
- Krijgsman, J. (1994). *Optical remote sensing of water quality parameters*. Proefschrift Technische Universiteit Delft. ISBN 90-6275-952-1.
- Lathrop, R. G. en Lillesand, T. M. (1986). *Use of thematic mapper data to assess water quality in Green Bay and Central Lake Michigan*. Photogrammetric

- engineering and remote sensing 52 (5): 671-680.
- Roeters, P. B. en Buiteveld, H. (1993). *Gebruik van satellietopnamen voor eutrofiëringsonderzoek van de Friese boezemeren*. RIZA-nota 93.008, Lelystad. 90 p. met bijlagen.
- Stokkom, H. T. C. van en Donze, M. (1988). *Optische remote sensing en oppervlaktewater nu*. H₂O (21) 1988, nr. 2, p. 33-42.



MANS methode

- Slot van pagina 747

tekend beeld kan ontstaan zoals bij de keuze van een specifiek vergelijkingsjaar. Een gemiddeld jaar voor de stikstofbelasting hoeft namelijk nog niet gemiddeld te zijn voor de fosforbelasting.

2. Stikstof

Voor stikstof geldt dat een reductie in mestgiften binnen ongeveer 20 jaar tot een nieuwe lagere evenwichtssituatie leidt.

Bij uitvoering van de Wet Bodembescherming zullen de huidige stikstofbelastingen naar het oppervlaktewater halveren tot rond de 40 kg N/ha/jaar, gemiddeld voor Nederland. Een verdere reductie in mestgiften kan voor stikstof volgens de NITSOL berekeningen nog zorgen voor aanzienlijke daling van de belasting naar het oppervlaktewater (zie afb. 3). In de legenda van afbeelding 3 en 4 wordt per scenario een jaar en een percentage genoemd. Dat is het jaar waarin de mestgift volgens de Wet Bodembescherming wordt veranderd met het genoemde percentage.

3. Fosfor

Zelfs bij zeer vergaande reductie van de mestgiften mag er nauwelijks reductie van de fosforbelasting vanuit de landbouw worden verwacht; in de periode 1985-2035 is zelfs in alle gevallen op termijn een stijging te constateren en wordt volgens de PHOSOL resultaten nog geen evenwicht bereikt (zie afb. 4). De vracht uit de landbouw is ca. 50% van de totale vracht op het oppervlaktewater in Nederland [Baarse, 1993]. Dit betekent dat het nodig zal zijn om alle andere fosforbronnen volledig te saneren om toch op korte termijn in Nederland 50% reductie van de fosforvrucht te halen.

Voor het effect op de langere termijn bestaat onzekerheid omdat nader onderzoek nodig is voor fosfaatdesorptie. Van belang hierbij is het vaststellen van welk deel van het fosfaat irreversibel gebonden wordt aan de bodem. Hiervoor is experimenteel onderzoek nodig, wat onder meer bij de Landbouw Universiteit te Wageningen wordt uitgevoerd.

4. Methode

De gehanteerde aanpak lijkt zeer goed bruikbaar voor andere studies. Essentieel is het met gedetailleerde modellen vooraf een database vullen met waarden voor de voortschrijdende gemiddelde belasting en de factor voor een droog en nat jaar. Uit de database kan met een interpolatieprogramma door beleidsmakers snel en flexibel het effect van de reductie in de mestgiften worden bepaald. De methode komt goed tot zijn recht wanneer de mogelijke maatregelen te vertalen zijn naar één invoerparameter, de dierlijke mestgift.

Demonstratieprogramma

Van het interpolatieprogramma is een demonstratieversie gemaakt, de MANS landbouw demo. Deze toont een kaartje van Nederland op het scherm met per regio de resultaten van een berekening voor stikstof of fosfor met door de gebruiker gekozen relatieve mestgiften. De demo draait onder Microsoft Windows en is op aanvraag beschikbaar.

Literatuur

- Baan, P. J. A., Waltmans, M. J. P. H., Verstappen, G. G. C. en Pulles, J. W. (1991). *Bronnen van belasting van de Noordzee met stoffen*. H₂O (24) 1991, nr. 21, pag. 582-586.
- Baarse, G. (1993). *Resultaten toepassing MANS Prelude instrumentarium*. Resource Analysis, persoonlijke communicatie.
- Grashoff, P. S., Leeuw, A. M. de, Menke, M. A., Belois, C. H. van en Ruijgh, E. F. W. (1989). *PAWN-vermesting. Verzamelen en berekenen van invoergegevens ten behoeve van waterkwaliteitsberekeningen*. Waterloopkundig Laboratorium Delft, juni 1989, rapport T420.
- Grashoff, P. S., De Leeuw, A. M., Menke, M. A. en Ruijgh, E. F. W. (1993). *MANS PRELUDE Landbouw: Berekenen van de nutriëntenbelasting op het oppervlaktewater uit de landbouw*. Waterloopkundig Laboratorium Delft, maart 1993, rapport T500.14.
- Hopstaken, C. F. en Uunk, E. J. B. (1991). *NITSOL-PHOSOL: modellen voor het gedrag van stikstof en fosfor in de bodem en de effecten op de waterkwaliteit*. H₂O (22) 1989, nr. 7, pag. 255-261 en 271.
- Kroes, J. G., Locht, C. J., Rijntma, P. E. en Roest, C. W. J. *De invloed van enige bemestingsscenario's op de afvoer van stikstof en fosfor naar het oppervlaktewater*. Staring Centrum, rapport 55, Wageningen.
- Kroes, J. G. en Roest, C. W. J. *Evaluatie van effecten van bemestingsmaatregelen op de belasting van grond en oppervlaktewater*. Staring Centrum, Wageningen, 1e concept, 24 januari 1992.
- Menke, M. A. (1992). *Belasting van de Nederlandse bodem met meststoffen ten behoeve van de voor de Commissie Stikstof uitgevoerde landelijke berekeningen van de stikstof uit- en afspoeling vanuit de landbouw*. Waterloopkundig Laboratorium Delft, februari 1992, rapport T1794.
- Pulles, J. W. (1985). *Beleidsanalyse voor de Waterhuishouding in Nederland*. PAWN, Rijkswaterstaat.
- RIZA (1990). *Beleidsanalyse. Af- en uitspoeling meststoffen*. Rijkswaterstaat.
- Ruijgh, E. F. W. (1992). *Gebruikershandleiding NITSOL/PHOSOL*. Waterloopkundig Laboratorium, rapport T904.

