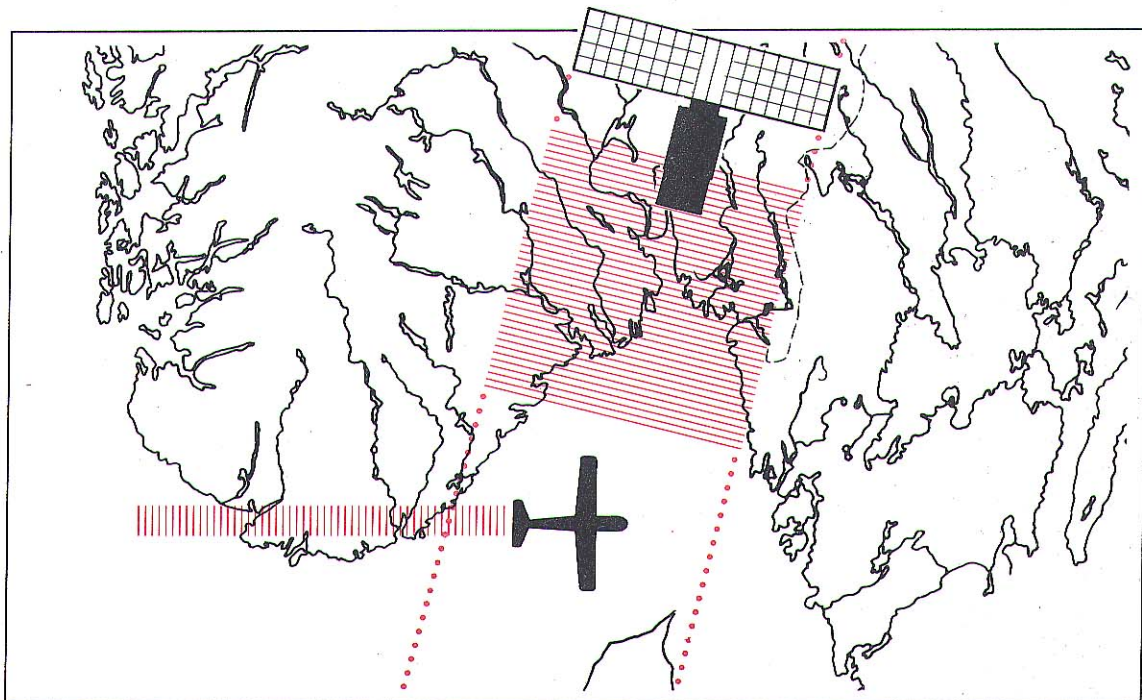


O-87108 E-86609

Fjernmåling av vannkvalitet

Evaluering av anvendelsesområder for satellitt-
og flybårne sensordata for overvåking
av vannkvalitet



NIVA - RAPPORT

Norsk institutt for vannforskning  NIVA

Hovedkontor
Postboks 69, Korsvoll
0808 Oslo 8
Telefon (02) 23 52 80
Telefax (02) 39 41 89

Sørlandsavdelingen
Televeien 1
4890 Grimstad
Telefon (041) 43 033
Telefax (041) 43 033

Østlandsavdelingen
Rute 866
2312 Ottestad
Telefon (065) 76 752
Telefax (065) 78 402

Vestlandsavdelingen
Breiviken 5
5035 Bergen-Sandviken
Telefon (05) 95 17 00
Telefax (05) 25 78 90

Prosjektnr.: 0-87108 E-86609
Undernummer:
Løpenummer: 2567
Begrenset distribusjon: Fri

Rapportens tittel: Fjernmåling av vannkvalitet.- Evaluering av anvendelsesområder for satellitt og flybårne sensordata for over- våking av vannkvalitet.	Dato: 15. mai 1991
	Prosjektnummer: 0-87108 E-86609
Forfatter (e): Kai Sørensen Bjørn Faafeng Svein Rune Erga	Faggruppe: Fjernmåling
	Geografisk område: Generelt
	Antall sider (inkl. bilag): 78

Oppdragsgiver: Norges Teknisk Naturvitenskapelige Forskningsråd	Oppdragsg. ref. (evt. NTNf-nr.): MK.31.22343
---	---

Ekstrakt: Evalueringen understreker at passive satellitt- og flybårne sensordata vil gi bedre kunnskap om vannkvaliteten i våre vassdrag, kyst- og havområder. Ut fra dagens erfaringer er det anvendelsesområder knyttet til studier av erosjon, eutrofi, gjengroing, sirkulasjon, spredning og oppblomstring av skadelige alger som er de viktigste. Utredningen påpeker at det er behov for å ta i bruk fjernmålingsmetoder ut fra de begrensninger man har ved dagens tradisjonelle metoder. Utvikling av nye fjernmålingsprodukter og operative overvåkings-tjenester for optiske satellitt- og flybårne data kan økes ved bredere tverrfaglig og tverrinstitusjonell innsats på sensorevalueringer og kompetanseoppbygging. Korrekt informasjon om nytteverdien og hvordan slike data ska brukes er nødvendig til de fleste brukermiljøene. Det er få miljøer som idag benytter slike data, men en riktig og målrettet satsing fremover vil øke bruken.

4 emneord, norske:

1. Fjernmåling
2. Satellittsensorer
3. Flybårne spektrometere
4. Evaluering
5. Vannkvalitet

4 emneord, engelske:

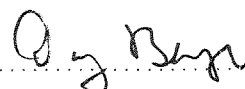
1. Remote Sensing
2. Satellite sensors
3. Airborne spectrometers
4. Evaluation
5. Water quality

Prosjektleder:



Kai Sørensen

For administrasjonen:



Dag Berge

ISBN 82-577-1886-6

NORSK INSTITUTT FOR VANNFORSKNING

FJERNMÅLING AV VANNKVALITET

**EVALUERING AV ANVENDELSESOMRÅDER FOR SATELLITT- OG FLYBÅRNE
SENSORDATA FOR OVERVÅKING AV VANNKVALITET.**

Oslo, 15. mai 1991

Prosjektleder: Kai Sørensen

Forfattere: Kai Sørensen
Bjørn Faafeng
Svein Rune Erga

FORORD

Norsk institutt for vannforskning (NIVA), er av Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Forskningsråd (NTNF) blitt bedt om å utføre en undersøkelse av hvilket brukerpotensiale som finnes, og hvilke erfaringer man har for bruk av fjernmålingsdata fra satellitt og flybårne spektrometere til vannkvalitetsformål. Undersøkelsen er forøvrig blitt støttet av et internt forskningsprosjekt ved NIVA.

Rapporten er en oppfølging av tidligere prosjekter ved NIVA relatert til satellittfjernmåling, men i denne undersøkelsen er også flybårne spektrometerdata vurdert. Undersøkelsen er begrenset til anvendelser innen vannrelatert forurensningsovervåking, og tar ikke opp fjernmåling benyttet til overvåking av oljeforurensninger.

Undersøkelsen er blitt utført ved NIVA og er basert på egne erfaringer med slike data samt erfaringer fra andre miljøer som arbeider med akvatisk fjernmåling. Man har forsøkt å belyse de viktigste anvendelsesområdene, gi en status for erfaringer og kompetanse, samt identifisere de viktigste norske brukere av slike data.

Det har vært kontakt med flere kategorier av brukere og produsenter av slike data, og vi vil takke alle som har bidratt med opplysninger til rapporten. Spesiell takk til Lasse Pettersson ved Nansen Senter for Miljø og Fjernmåling, Bergen og Tommy Lindell ved Centrum för bildanalys, Uppsala for bl.a. å ha stilt upubliserte data til disposisjon. Takk også til Gary Borstad og Randy Kerr ved Borstad Associates Ltd., Sidney, B.C. og Jim Gower ved Institute of Ocean Sciences, Sidney B.C. som har bidratt både med opplysninger og upubliserte data. NIVA-medarbeiderne Bjørn Olav Rosseland, Olav Skulberg og Jan Magnusson takkes for verdifulle kommentarer og bidrag til rapporten.

Kai Sørensen
Prosjektleder

INNHALDSFORTEGNELSE

	Side:
Forord	1
Sammendrag	4
1. Innledning	9
1.1 Bakgrunn	9
1.2 Formål	12
1.3 Gjennomføring og avgrensning	12
2. Fjernmålt spektrometri i vannkvalitetssammenheng	13
2.1 Passive satellittsensorer	14
2.2 Passive flybårne spektrometere og scannere	18
3. Anvendelsesområder innen vannkvalitetsovervåking	21
3.1 Hav-, kyst og fjordområder	21
3.2 Elver og innsjøer	23
4. Erfaring med passiv fjernmåling av vannkvalitet	28
4.1 Erfaringer med passive satellittbårne sensorer	29
4.1.1 Bestemmelse av optiske parametere og temperatur	29
4.1.2 Bestemmelse av plantep plankton og klorofyll	34
4.1.3 Væravhengighet, relative kartlegginger og datakombinasjoner	37
4.2 Erfaringer med passive flybårne spektrometere.....	47
4.2.1 Bestemmelser av klorofyll- <u>a</u> og suspendert materiale .	47
4.2.2 Spektral og romlig informasjon fra spektrometerene ..	51
4.3 Hvordan anvende fjernmålte data for vannkvalitetsformål ...	53
4.3.1 Operativ bruk av fjernmålingsdata.....	53
4.3.2 De viktigste anvendelsesområder for fjernmålingsdata	55
5. Brukermiljøer og kompetanse innen feltet	57
5.1 Brukermiljøer av fjernmålte spektrometerdata	57
5.2 Kompetansenivå og -behov hos brukerne.....	62
6. Mulige produkter og tjenester	63
7. Referanser.....	67

Forklaringer på forkortelser

- ADCP - Acoustic Doppler Current Profiler - strømmåler
- ATM - Airborne Thematic Mapper - flybåren scanner
- AVHRR - Advanced Very High Resolution Radiometer - sensor i NOAA
- BGR - Blue-green ratio - forholdstall for beregning av klorofyll
- CASI - Compact Airborne Spectrographic Imager - canadisk flybårent spektrometer
- CAESAR - CCD Airborne Experimental Scanner for Application in Remote Sensing - nederlandsk spektrometer
- CCD - Charged coupled device - diodearray
- CZCS - Coastal Zone Colour Scanner - sensor på Nimbus-7 satell.
- EISAC'89- Europeisk kampanje for utprøving av flybårne spektrometere
- ERS-1 - Den første europeiske satellitten - skytes opp i 1991
- ERTS-1 - Earth Resource Technology Satellite -gml. navn på Landsat-1
- ESA - Den europeiske romfartorganisasjonen
- FLH - Fluorescence Line Hight - Beregning av klorofyllfluores.
- FLI - Fluorescence Line Imager - flybårent spektrometer
- GER(IS) - Geophysical Environmental Research - Imaging Spectrometer
- GRID - Global Resource Information Database
- HOV - Havmiljøovervåking- og varsling - 3 års prosjekt, 1990-92
- HRV - Haute Resolution Visible - Sensor på SPOT-satellitten
- INMARSAT- International Maritime Satellite Organization
- IOS - Institute of Ocean Science - (IOS-spektrometer)
- LANDSAT - Amerikanske jordressurssatellitter (1-5)
- MEIS-II - Multiple-Detector-Electro-Optical-Imaging Sensor - flybårent spektrometer
- MESSR - Multispectral Electronic Self-scanning Radiometer - sensor på MOS-satellitten
- MOS - Marine Observation Satellite - japansk satellitt
- MSS - Multispectral scanner - sensor i Landsat 1-5
- NOAA - National Oceanographic and Atmospheric Administration
- NORSAT-B- Kommunikasjonssystem for data mellom to jordstasjoner
- NORSMAP'89-Norsk kampanje for utprøving av flybårne spektrometere
- NPOC - National point of contact - kontaktperson for bestilling av satellittdata
- Pankromatisk - Enfarget kanal (sort/hvitt) i SPOT-satellitten
- ROSIS - Reflective Optics System Imaging Spectrometer
- SLAR - Side Looking Airborne Radar - Radar i SFT's overvåkingsfly
- SPOT - Fransk/Svensk/Belgisk jordressurssatellitt (1 og 2)
- TEOC - Tromsø Earth Observation Centre
- TM - Thematic Mapper - sensor i Landsat 4 og 5
- UV/IR - Ultrafiolett og infrarød scanner i SFT's overvåkingsfly
- VTIR - Visible and Thermal Infrared Radiometer - Sensor på MOS
- Quick-look-Enkelt foto av data fra satellitter for kvalitetsbedømm.

SAMMENDRAG

Formål

Målsettingen med denne utredningen er å angi aktuelle anvendelsesområder for fjernmåling av vannkvalitet fra passive fly- og satellittbårne spektrometere, samt gi en status for erfaringene på feltet. Prosjektet skal også identifisere norske brukermiljøer og deres behov for, og kompetanse innen fjernmåling relatert til vannkvalitet. Det legges vekt på å klarlegge hvilke brukere som er interessert i slike overvåkingstjenester.

Gjennomføring

Prosjektet er gjennomført ved NIVA og er basert på egne erfaringer og annen FoU-virksomhet i Norge og de nordiske land, med størst vekt på de siste års erfaringer. Det har vært kontakt og samtaler med ulike brukermiljøer som benytter denne type fjernmålingsdata. De fleste sentrale brukere har gjennomgått rapporten og gitt kommentarer.

Utredningen er avgrenset til optiske, passive sensorer benyttet til vannkvalitetsstudier, men behandler ikke fjernmåling i forbindelse med oljeforurensning. Vannkvalitetsstudier i forbindelse med optiske fjernmåling er begrenset til de øvre vannmasser. Anvendelser for både marine og limniske systemer blir gjennomgått.

Konklusjon

Utredningen understreker at på en rekke områder vil bruk av passive satellitt- og flybårne spektrometerdata gi bedre kunnskap om vannkvaliteten i våre vassdrag, kyst- og havområder. De siste års oppblomstring av toksiske alger og stadig økende eutrofi-problemer, har understreket behovet for å ta i bruk nyere overvåkingsmetoder, som bl.a. kan gi rask og samtidig informasjon over store områder. Denne rapporten bør kunne tjene som grunnlag for utredninger av denne type fjernmålingsdata brukt innen andre forskningsprogrammer.

For vassdragene er det overvåking foreløpig knyttet til erosjon, gjengroing og eutrofi, og synoptiske undersøkelser av algeoppblomstringer som er av interesse. I kystområdene er det overvåking av alger og partikler mhp. spredning og influensområder, oppstrømningsområder, samt utveksling mellom fjord- og kystvann som er aktuelle. I fjordsystemene og de nære kystområdene kommer i tillegg eutrofi-problemene, samt egnethetsvurdering knyttet til oppdrettsnæringen og rekreasjon som viktige anvendelsesområder. I havområdene er slike data

spesielt interessante for overvåkings- og kartleggingsoppgaver knyttet til front- og blandingsområder, sirkulasjonsprosesser og fremvekst av skadelige alger.

Informasjonsinnholdet fra fjernmålte passive, optiske spektrometerdata er relativt lite spesifikke med hensyn til hvilke forurensningskomponenter som kan måles direkte, men i kombinasjon med andre data og miljøkunnskap har slike data stor nytteverdi. Fjernmåling vil derfor være et viktig supplement til eksisterende overvåkingsmetoder. Fjernmålte data gir lavere målenøyaktighet enn tradisjonelle analyser, men ved at de samtidig dekker store områder og kan bidra til større kontinuitet i måleserier i tid og rom, kan dette aksepteres. Ny teknologi vil med riktig bruk styrke både kvalitative og kvantitative sider av vannkvalitetsovervåkingen.

Av de høyoppløselige satellittdatene er det Landsat's "Thematic Mapper" (TM) som har størst anvendbarhet i fjorder og de nære kystområdene pga. rimelig bra geometrisk (romlig) oppløselighet og muligheten for termisk kartlegging. Data fra Landsat's "Multispectral Scanner" (MSS)- og SPOT's "Haute Resolution Visible" (HRV)-sensorer har omtrent samme informasjonsinnhold som TM-sensoren når det gjelder kvantitativ bestemmelse av suspendert materiale. Alle disse sensorene kan benyttes til kartlegging av suspendert materiale både i fjorder og vassdrag. MSS-sensoren har noe dårligere geometrisk oppløselighet som begrenser bruken i mindre vassdrag. For de spektralt bredbandede sensorene i den japanske "Marine Observation Satellite - MOS" og SPOT-satellitten er det foreløpig ikke mulig å foreta noen bedømmelse av datakvaliteten. Ved kombinasjon av feltdata og høyoppløselige satellittdata ligger usikkerhetene på 5-20 % i å bedømme vannparametere som: totalt suspendert materiale, turbiditet, siktedyp og transmisjon (lyssvekning). For temperatur ligger nøyaktigheten på 0.5-1°C.

Data fra den lavoppløselige "Advanced Very High Resolution Radiometer" i værsatellittene (NOAA) kan benyttes til termisk kartlegging i kyst og havområder med en relativ nøyaktighet på $\pm 0.2-0.5$ °C. Den absolutte nøyaktigheten er omkring 0.5-1 °C avhengig av de atmosfæriske forholdene og hvilken av sensorene som benyttes. AVHRR-data kan benyttes til en grov relativ kartlegging av suspendert materiale ved større elveutløp. Den dårligere geometriske oppløselighet til denne sensoren gjør at dataene ikke kan benyttes i trange fjorder. AVHRR-dataene har større "operativitet" enn de høyoppløselige pga. høyere målefrekvens, og ved at de kan overføres brukeren i nær sann tid.

Bestemmelse av vannparametere med automatiske metoder uten bruk av feltdata er vanskelig pga. usikkerhetene omkring absoluttkalibreringene for endel av sensorene, og mangel på gode modeller for atmosfærekorreksjon. Dette er foreløpig kun mulig fra MSS-sensoren på Landsat-satellittene for enkelte vannparametere, og for temperatur med AVHRR-sensoren. Bruk av automatiske metoder med korreksjon for atmosfære osv. vil gi noe dårligere resultat enn ved kombinasjon med feltdata. Begrensningen ved de optiske satellittdataene med hensyn på værforholdene gjør at man må tilstrebe utnyttelse av alle tilgjengelige data både fra jordressurssatellittene (Landsat, SPOT) og fra vær-satellittene (NOAA). Ved slik kombinert bruk kan man teoretisk oppnå flere satellittregistreringer pr. uke, som gjør at de operative aspektene blir ivaretatt bedre enn om man bare skulle benytte en enkelt satellitt.

Når det gjelder de flybårne spektrometerdata så er disse mer operative, har større fleksibilitet og er mindre væravhengige enn satellittdata. Slike spektrometerdata kan mer spesifikt gi informasjon om planktonalger kontra andre partikler. De flybårne spektrometerdataene som "Compact Airborne Spectrometer Imager - CASI" har omtrent samme informasjonsinnhold som satellittdata når det gjelder kvantitativ bestemmelse av suspendert materiale, men er altså bedre for bestemmelse av klorofyll-a. Dataene fra dette systemet gir rimelig bra storskalavariasjon, men pga. et foreløpig for dårlig feltmateriale fra våre egne vanntyper kan man ikke si noe om de statistiske sammenhengene. Selv om spektrometerets følsomhet for deteksjon av klorofyllholdige partikler ved bruk av fluorescenssignalet er tilfredstillende for overvåkingsformål ($<1 \mu\text{g/l}$), kan man ikke bestemme klorofyll-a mengden kvantitativ uten bruk av feltdata.

Naturlige variasjoner i klorofyllfluorescens i algene kompliserer bestemmelsene ytterligere og gjør at fluorescensen ikke har et gitt kvantitativt forhold til konsentrasjonen av klorofyll-a. Variasjoner i bølgelengden for maksimal klorofyllfluorescens ved høye klorofyllkonsentrasjoner gjør at automatiske beregningsmetoder i en operativ sammenheng kan bli vanskelig å håndtere. De billeddannende flybårne spektrometerne har foreløpig for dårlig følsomhet i den blå delen av spekteret som kan være viktig for å studere områder med mye organisk stoff. Dessuten mangler disse systemene termiske sensorer.

Slike data er ikke helt vær-avhengige og må gjennomgå omfattende korreksjoner som gjør at brukerterskelen ligger høyere enn for satellittdataene. Det gjenstår fortsatt mye arbeid på tolkning av denne type spektralinformasjon for at man skal kunne forstå godt nok de optiske sammenhenger og derigjennom forbedre og eventuelt utarbeide

tilfredstillende beregningsalgoritmer. Hvis gode korreksjoner kan etableres bør nøyaktigheten komme ned mot 30-40 %.

Arbeidet med fjernmålingsdata krever omfattende erfaring både fra felt og bildebearbeiding, og man må skaffe seg grunnleggende kunnskaper om sensorenes oppbygging, virkemåte, kalibrering osv. Gode kunnskaper om den overvåkingsoppgave man skal utføre er også nødvendig. Utfordringen idag består i å kunne nyttiggjøre seg denne "nye" informasjonskilden på den beste måten. Man må i større grad forsøke å utnytte styrken i hva de fjernmålte data kan gjøre enn å forsøke å få en høy grad av "nøyaktighet" sammenlignet med enkelte vannparametere. Nytteverdien og anvendelsesområdene hvor fjernmålte satellitt- og flybårne spektrometerdata kan bidra til en bedre vannkvalitetsovervåking kan oppsummeres i følgende punkter:

- * Planlegging av overvåking i områder som mangler annen informasjon
- * Kartlegging av små-, mellom- og storskalafenomener
- * Horisontal kartlegging av enkelte vannparametere
- * Optimalisering av konvensjonell prøvetagning
- * Vurdering av stasjoners representativitet
- * Bedømmelse av sprednings- og influensområder av forurensninger
- * Identifisering av kaldtvannsfronter mhp. skader for fiskeoppdrett
- * Bedømmelse av relativ vannkvalitet i områder som mangler feltdata
- * Kvantitativ bestemmelse av suspendert materiale og planktonalger
- * Bedømmelse av klorofyllkonsentrasjoner
- * Overvåking av langsiktige forandringer av vannkvalitet
- * Tilleggsinformasjon ved tidserieanalyser av ulike prosesser
- * Tilleggsinformasjon ved bestemmelse av produksjonspotensialet
- * Verifikasjon og oppdatering av sprednings- og varslingsmodeller
- * Kartlegging av punktutslipp/forurensning

Fjernmålingsdata fra både fly- og satellitt har ikke fått den anvendelse til vannkvalitetsformål den burde ha ut fra potensialet pga. liten datatilgjengelighet, lav datakvalitet, tilgang på bildebehandlingsverktøy, høye datakostnader og et for lite produktspekter. Det gjenstår mye arbeid med å utvikle operasjonelle brukersystemer, samt bedre produkter og tjenester som har forvaltningsrettet relevans. De data, resultater, tjenester og produkter som produseres må sikres en god kvalitet gjennom kvalitetssikringsystemer. Det må arbeides med forbedringer av bestillingsrutiner, nye dataprodukt, elektronisk dataoverføring, videreutvikling av brukerprodukter og kanskje det viktigste: informasjon om muligheter og begrensninger med metodene. Det må foreligge klare målsettinger med de produkter og tjenester som skal lages, og man må unngå at teknologien styrer utviklingen.

Erfaringene som er høstet i Norge de senere år har gitt oss en god innsikt i hva som er mulig å gjøre med denne type data, og hvordan vi bør gå frem for å utnytte dataene og heve kunnskapsnivået ytterligere. For at fjernmålingsdata skal kunne anvendes operativt må data kunne benyttes på en noenlunde standardisert måte, og man må arbeide frem rutiner som gjør dette mulig. Data fra både satellitt og fly kan nå behandles tilfredstillende med PC-baserte systemer som muliggjør betydelig mer brukervennlige, enklere og raskere behandling enn tidligere. Systemer for rask overføring av lavoppløselige satellitt-data (AVHRR) er laget, men for de høyoppløselige (TM, MSS, HRV) er det behov for utvikling av nye systemer og tjenester.

Et fåtall fagmiljøer i Norge har idag ambisjoner om å bygge opp operative tjenester for bruk av fjernmålingsdata til vannkvalitetsformål. For at slike tjenester skal kunne opprettes må man få aksept for metodene ved at de bl.a. kan inngå i offentlige overvåkingsprogrammer. De norske miljøene har samlet sett god kompetanse for å få etablert slike tjenester, men man bør tilstrebe bedre tverrfaglig og tverrinstitusjonelt samarbeid for å få fortgang i arbeidet. Det er behov for å bygge opp større kompetanse omkring kalibrering av sensorer og tolkning av spektralinformasjon for ulike vannkvaliteter (forurensninger). Det er nødvendig med flere tverrfaglige kalibreringsprosjekter og sensorevalueringer.

Den viktigste brukeren på kort sikt er Statens forurensningstilsyn (SFT) som er positive til bruk av fjernmålingsdata i kombinasjon med tradisjonelle metoder. SFT har begynt å bruke satellittdata i forbindelse med det "Statlige program for forurensningsovervåking", som er en av de viktigste langsiktige programmer hvor denne type data kan tenkes benyttet. Miljøverndepartementets nye program for "Havmiljøovervåking- og varsling" - HOV, kan bli en viktig enkeltbruker av fjernmålingsdata. Slike data kan tenkes benyttet i forbindelse med f.eks. varslingsmodeller. På noe lenger sikt vil andre brukere som oppdrettsnæringen, lokale forurensningsmyndigheter og kommuner, samt forsikringsbransjen ha nytte av slike data.

De fleste brukerne har et stort behov for generell informasjon hva slike data kan brukes til, og hvordan de skal gå frem for å ta slike data i bruk. Erfaringene har dessuten vist at det danner seg lett feilaktige forestillinger om hva metodene kan bestemme, og det er derfor ønskelig å øke innsatsen på informasjon og kunnskapsformidling om nytteverdien ved metodene til de fleste av brukerkategoriene. Det er viktig at man ved presentasjon av metodene utad til de ulike brukermiljøer får frem en så korrekt bilde av metodenes anvendbarhet som mulig.

1. INNLEDNING

1.1 Bakgrunn

Fjernmåling (fjernanalyse) defineres som en teknikk som på avstand registrerer data om jord, vann og luft. Teknikken innbefatter observasjoner med sensorer eller spektrometere som kan være montert på bakken, i ballonger, helikoptere, fly eller satellitter.

Observasjoner av jordoverflaten med vanlig flyfotografering har pågått i mange tiår. Gjennom de forskjellige romfartsprogrammene fikk man tilsvarende fotografiske observasjoner fra satellitter, og senere kom mer avanserte sensorer. Idag kan man ved bruk av satellittsensorer få dekket store områder i løpet av minutter, og slike teknikker brukes nå operativt innen meteorologien. Metodene har potensielle muligheter for anvendelser innen flere fagområder som; geologi, hydrologi, botanikk, kartografi, limnologi, oceanografi, glasiologi og til vannkvalitetsformål. Det knytter seg forøvrig militære interesser til denne type teknologi.

Nyere elektronisk teknologi har gjort det mulig å lage avanserte bildedannende spektrometere som gir stor spektral og romlig oppløselighet i dataene. Flybårne spektrometere er i de siste 8-10 årene vært tilgjengelige, spesielt gjennom FoU-virksomhet i Canada og USA, og flere systemer er idag under utprøving rundt om i verden. Bruk av spektrometere og sensorer som måler optiske størrelser i den synlige delen av det elektromagnetiske spektrum har vist å gi nyttig informasjon om jordmiljøet på land og om vannmiljøet, herunder overflatevannmassers kvalitet.

Fjernmålings-sensorene kan være passive eller aktive systemer. I det aktive systemet "bestråles" objektet kunstig vha. en monokromatisk elektromagnetisk stråle. Deretter studeres egenskapene ved den returnerte strålingen, enten ved den samme eller en annen bølgelengde. Eksempler på dette er ulike radarsystemer eller laserfluorosensorer. I et passivt system måler "sensoren" den naturlige elektromagnetiske energien som er reflektert eller utstrålt fra objektet. Eksempler på dette er flyfoto, data fra fly- eller satellittbårne multispektrale sensorer eller de nyere generasjons flybårne spektrometere.

Bruk av satellittbilder for kartlegging av vannkvalitet startet allerede i 1973 fra Landsat-1 satellitten (tidligere ERTS-1), relativt raskt etter at den ble skutt opp (1972). Dette er presentert i arbeider av Klemas, Bowker og Ruggles fra 1973. Carpenter (1982) foretok i 1978-79 en utprøving av multispektrale data (MSS) fra

Landsat for ferskvann, og i Sverige har man hatt en viss aktivitet på dette feltet i flere år (se flere arbeider av Lindell). Slater (1985) har gitt en fyldige oversikt over ulike fly- og satellittbårne spektrometere, både passive og aktive, mens Hilton (1984) og Gillot (1987) har vurdert potensialet for ferskvann og marine områder for noen slike systemer. Foreliggende utredning skal særlig ta for seg passive optiske sensorsystemer, men innledningsvis gis her en kort omtale av sentrale aktive systemer og begreper.

Bruk av aktive flybårne systemer som laserfluorosensorer til vannkvalitetsformål ble beskrevet allerede i begynnelsen av 1970-årene (Mumola, 1973), og har senere vært brukt for studier av klorofyll og andre pigmenter (Brown og medarb., 1981), og oceanografiske parametere (Houghton og medarb., 1983). Systemene er benyttet for kartlegging av både pigmenter, løst organisk stoff og optiske størrelser i vann (Bristow og medarb., 1981, 1985, 1987, og Albers og medarb., 1987). Disse systemene er kanskje spesielt interessante for deteksjon av forurensninger av kjemikalier (Marin Fjærranalys, 1985).

For overvåking av olje benyttes aktive radarsystemer som f.eks. den flybårne radaren "Side Looking Airborne Radar" - SLAR. Dette systemet er kommersielt tilgjengelig fra bl.a. det Svenska Rymdaktiebolaget, og benyttes idag operativt i SFT's oljeovervåking. Her foretaes det flypatruljer i Skagerrak og langs norskekysten 1-3 gang pr. uke (O.A. Follum, SFT pers. med.). Hvis det er mistanke om oljesøl detekteres dette med radaren og en ytterligere verifisering kan gjøres med en passiv sensor ("UV/IR-sensor") som måler havoverflatens utstråling i den ultrafiolette (UV) og termisk infrarøde (IR) delen av spekteret. UV-sensoren vil bekrefte om det er olje og IR-sensoren kan gi et grovt tykkelseestimat. Det foretaes også visuelle observasjoner og videoopptak for dokumentasjon av utslipp og forurensninger. SLAR-instrumentet kan benyttes til frontdeteksjon (strømskjær), oppstrømning av dypvann langs kysten, samt indre bølger (Pettersson og medarb., 1987). En kort beskrivelse av dette flyets utrustning er gitt i Hjermsstad, 1989.

I løpet av dette 10-året vil det komme flere nye satellitter med både aktive og passive sensorer som det knytter seg store forhåpninger til for havovervåking. Nye mikrobølgesensorer vil være viktige for forurensninger som olje og for andre overflaterelaterte fenomener som vind, bølger etc. Den europeiske satellitten (ERS-1) vil også bli utstyrt med et bildedannende radiometer som bl.a. gir overflate-temperatur. Utover dette har ERS-1 ikke sensorer som dekker den delen av spekteret (synlig) som er viktig for kvantitative målinger av vannkvalitet. Det er videre planlagt avanserte optiske satellittsensorer

mot slutten av dette 10-året, og man må forvente at utviklingen av mer avanserte flybårne sensorsystemer blir videreført. Det vil derfor være store utfordringer fremover i å få tatt slik ny overvåkingsteknologi i praktisk bruk.

For bruk av passive satellittfjernmåling ble det i Norge allerede i 1973 nedsatt en arbeidsgruppe - "Norwegian ERTS Ecology Group" - som skulle vurdere bruken av satellittdata i økologiske sammenhenger (Skulberg, 1974), og det ble relativt tidlig beskrevet mulighetene for bruk av slike data (Haugen og Rørslett, 1976). Men bl.a. på grunn av for lav innsats på metodeutvikling kom det ikke til noen større praktisk anvendelse på dette tidspunktet. I de senere år er det derimot blitt gjennomført flere pilotprosjekter for å vise mulighetene til denne teknologien innen vannkvalitetsstudier (se flere referanser i Sørensen og medarb., 1990c). Særlig i løpet av de 3-4 siste årene etter at forurensningsmyndigheter og forskningsråd har gitt dette noe høyere prioritet enn tidligere. Dette har ført til at man etter endel utprøving, har tatt satellittdata i bruk i noen prosjekter bl.a. i det "Statlige program for forurensningsovervåking". Flere forskjellige systemer av den siste generasjons flybårne spektrometere har vært gjenstand for vurdering i Europa i de siste årene, og ett av systemene har dessuten fått en nærmere praktisk utprøving og evaluering i Norge.

De siste års hendelser med storskala algeoppblomstringer i våre kystfarvann har bidratt til en generell fokusering på miljøet og har understreket behovet for bedre overvåkingmetoder. Ut fra de nyeste erfaringene med fjernmålingsdata knytter det seg derfor forhåpninger til at denne teknologien skal bidra til en bedre overvåking av våre vannressurser. I tilknytning til vannkvalitetsovervåking, hvis man ser bort fra olje, så er det passive optiske sensorer som foreløpig har vist best anvendbarhet, og det er dette som vil bli behandlet i denne utredningen.

1.2 Formål

Målsettingen med denne utredningen er å angi aktuelle anvendelsesområder for fjernmåling av vannkvalitet fra passive fly- og satellittbårne spektrometere, samt gi en status for erfaringene på feltet. Prosjektet skal også identifisere norske brukermiljøer og deres behov for, og kompetanse innen fjernmåling relatert til vannkvalitet. Det legges vekt på å klarlegge hvilke brukere som er interessert i slike overvåkingstjenester.

1.3 Gjennomføring og avgrensning

For å få mest mulige relevans for norske forhold, har vurderingen av anvendelsesområdene i hovedsak blitt basert på erfaringer fra FoU-virksomhet i Norge og de nordiske land. Relevante internasjonale undersøkelser har også blitt benyttet og forsøkt omsatt til norske forhold, og man har lagt størst vekt på de siste års erfaringer.

Oppgaven er avgrenset til optiske (synlig og infrarødt) og passive sensorer/spektrometere som frem til idag har vist mulig anvendelse til vannkvalitetsstudier. Utredningen går altså ikke inn på anvendelsen av hverken aktive optiske fjernmålingssystemer eller mikrobølgedata (aktive og passive). Begrepet sensorer benyttes her i hovedsak for satellittdata og på de flydata hvor den spektrale oppløselighet er begrenset, mens spektrometerbetegnelsen benyttes på de nyere bilde-dannende flybårne spektrometerne med stor romlig oppløselighet.

Rapporten behandler heller ikke fjernmåling i forbindelse med oljeforurensning da man til dette i første rekke benytter aktive sensorer, og da det allerede finnes en operativ oljeovervåking i Norge (SFT). I sammenheng med slike fjernmålingssystemer begrenses vannkvalitetsstudiene til de øvre vannmasser. Utredningen vil se både på marine og limniske anvendelser av slike data.

Utredningen er også begrenset til å behandle sensordata som kan skaffes "kommersielt" eller data fra systemer som har blitt testet i de nordiske land. Det er derfor lagt mindre vekt på fremtidige systemer og sensorer, da det erfaringsmessig tar lang tid å få slike operative.

Det er foretatt samtaler og innhentet opplysninger fra et 30 talls brukermiljøer av denne type fjernmålingsdata. De fleste av disse har også hatt rapporten til gjennomsyn, og gitt kommentarer.

2. FJERNMÅLT SPEKTROMETRI I VANNKVALITETSSAMMENHENG

Spektrometri defineres som; registrering, bearbeiding og tolking av ikke monokromatisk elektromagnetisk stråling fra forskjellige typer objekter. Stråling fra faste stoffer og væsker inneholder informasjon om den kjemiske sammensetning (molekylstrukturer og molekylbevegelser). Ut fra de kontinuerlige elektromagnetiske spektra kan man trekke ut kvalitativ og kvantitativ informasjon. Før slike data kan anvendes må informasjonen kalibreres og bearbeides slik at den kan presenteres på en kvalitativ eller kvantitativ skala. Generelt har passive fjernmålingssensorer/spektrometere følgende oppgaver:

- * Registrere elektromagnetisk energi utstrålt fra jordoverflaten.
- * Dele opp spekteret og måle energien i utvalgte spektralbånd.
- * Gjøre denne informasjonen tilgjengelig; fotografisk eller digitalt.

Passive multispektrale sensorene måler jordoverflatens energiutstråling i den synlige og infrarøde delen av spekteret. Dette kan enten være termisk infrarød stråling, reflektert stråling (sollys) som er blitt forandret av kontakten med jordoverflaten eller stråling stimulert av sol- eller himmellys, som f.eks. klorofyllets fluorescens i den røde delen av spekteret.

Innholdet i en vannforekomst av oppløste og partikulære organiske og uorganiske forbindelser vil påvirke den reflekterte "stråling" tilbake til fjernmålingssensoren. Stoffene vil i større eller mindre grad gi vannets sin "karakteristiske" optiske egenskap, og i fjernmålingssammenheng kalles dette ofte vannets "reflektansspekter" eller "spektralsignatur". Vannmassenes absorpsjon og spredningsegenskaper bestemmer altså hva som stråles tilbake mot atmosfæren fra vannmassene. De relative optiske forskjellene mellom ulike vannmasser blir derfor avgjørende for hvor godt de kan skilles med en fjernmålingssensor. En kort beskrivelse av optisk teori i vann relatert til fjernmåling og referanse til artikler for passiv satellittfjernmåling er sammenstilt i Sørensen og medarb., 1990c. Se også Dahle og Kögeler, (1990) for en oversikt over optiske fjernmålingssystemer.

Planktonalger har pga. absorpsjon fra klorofyll og andre hjelpepigmenter en stor variasjon i reflektansen i den blågrønne delen av spekteret, avhengig av pigmentkonsentrasjonen. Denne egenskapen ble benyttet i en eldre sensor til kvantitativ bestemmelse av klorofyll-a og suspendert materiale i havvann (Jfr. kap. 2.1.). Man benyttet her en såkalte BGR-metode ("blue-green-ratio") ved å måle forholdstall i den blågrønne delen av spekteret, hvor den største spektralinformasjonen finnes, og relatere dette til mengden av klorofyll-a.

Bruk av klorofyllfluorescens er interessant for kystvann og innsjøer, hvor innholdet av løst organisk stoff og andre partikler til tider sterkt reduserer mulighetene for å bruke reflektansen i den blågrønne delen av spekteret. Mulighetene for å bruke naturlig in vivo klorofyllfluorescens ble beskrevet for flere år siden (Neville og Gower, 1977, Gower 1980, Gower og Borstad, 1981, Gower og medarb., 1984), men har først i de senere år fått praktisk nytte ved at nyere fjernmålingsteknologi med bedre spektral oppløselighet og følsomhet har blitt introdusert. Tanken er at klorofyllfluorescens-signalet bedre kan relateres til innholdet av klorofyll-a i planteplankton, enn bruk av annen spektralinformasjon. Kiefer og medarb. (1989) har gitt en nærmere diskusjon av naturlig fluorescens og dens relasjon til klorofyll-a og fotosyntese.

Det er viktig å være klar over at visse deler av spekteret ikke er egnet for registrering fra fjernmålingssystemer pga. atmosfærens transmisjonsegenskaper (absorpsjon) og egenutstråling (refleksjon). Som regel er det små kontraster i det svake signalet fra vann og store bidrag fra atmosfæren. Det som "når frem til" sensorene blir altså sterkt påvirket av atmosfæriske forhold, og dette er en av hovedproblemene i akvatisk fjernmåling. Noen av sensorene måler også i deler av spekteret hvor jordas egenutstråling dominerer (termisk infrarød), og disse benyttes for måling av overflatetemperatur.

De vannparametere man teoretisk kan måle "direkte" ved passive optiske sensorer må være knyttet til disse reflektansspekterne, og kunne gjen-speiles i vannets optiske egenskaper. Det man i første rekke bør kunne måle i innsjøer eller kystnære områder er overflatetemperatur, suspendert materiale og konsentrasjonen av planktonalger. Det bør også finnes muligheter for å gjøre indirekte vurderinger av andre vannparametere ved at de har en høy korrelasjon med vannmassenes optiske egenskaper.

2.1 Passive satellittsensorer

Det finnes idag en rekke jordobservasjonssatellitter med ulike anvendelsesområder, som f.eks. de meteorologiske NOAA-satellittene som benyttes daglig innen værvarslingen. Disse kan også benyttes for kartlegging av bl.a. vanntemperatur i hav og kystområder. Det finnes idag to operative NOAA-satellitter (NOAA-10 og 11). En annen type satellitter som egentlig er beregnet for bruk på land (Landsat og SPOT), har vist seg anvendbare også for visse vannformål. Landsat-seriens første satellitt ble skutt opp i 1972 og for tiden er det Landsat-5 som er operativ. Spesielt har TM-instrumentet ombord i

Landsat vist seg godt egnet også til vannanvendelser. For SPOT-serien ble SPOT-1 satt i bane i 1986 og SPOT-2 i 1990, men SPOT-1 er tatt ut av drift, og vil sannsynligvis ikke komme i operativ bruk igjen.

Den spektrale følsomheten er dårligere for sensorene i jordressurs-satellittene, som er beregnet for land, enn de som er spesielt tilpasset den lave radiansen fra vann. Signalet tilbake til en fjernmålingsensor fra vann kan være en tiendedel av tilbakestålingen fra et landområde og stiller derfor store krav til den spektrale følsomheten. Nimbus-7 satellitten som var operativ i 8 år fra 1978-86, hadde en følsomhet og sammensetning av sensorer som var spesielt tilpasset målinger i havområder. Denne sensoren "Coastal Zone Colour Scanner" (CZCS) kunne benyttes for målinger av klorofyll-a i oceanisk vann (Clark, 1981, Gordon og medarb., 1983, Robinson, 1985). Denne er ikke operativ og vil ikke bli omtalt spesielt her. En annen satellitt som også skal være tilpasset havanvendelser er den japanske "Marine Observation Satellite" som ble satt i bane i 1987 (MOS-1) og som ble fulgt opp av MOS-2 i 1990. Det er nylig prøvedlest data fra en Kinesisk meteorologisk satellitt ved Tromsø Satellittstasjon (Enoksen, R.T., pers. med.). Den har omtrent de samme sensorer som NOAA satellittene, men har i tillegg 2 interessante kanaler i den synlige delen av spekteret.

Det er planlagt nye forbedrede sensorer av tilsvarende type som CZCS senere i 90-årene. Det vil da komme satellittsystemer med ulike sensortyper som bør muliggjøre bruk av data fra flere sensorer samtidig. På de nye europeiske, amerikanske og japanske "polare plattformer" er det planlagt høyoppløselige optiske spektrometere, med betydelig bedring i den spektrale oppløselighet (5-10 nm) og dekningsfrekvens. Den romlige oppløselighet vil bli omkring 250 m. Disse er planlagt for midten og slutten av dette tiåret.

I tabell 1 er det sammenstilt noen data om dagens operative satellitter med multispektrale sensorer, som har potensiale for studier av vannkvalitet. Disse opererer i såkalte solsynkrone polnære baner i en høyde av 700-900 km. På grunn av at disse satellittene passerer over polområdene, blir det på våre nordlige breddegrader stor overlapping mellom de ulike banene. Jordressurssatellittene følger bestemte baner og kan enten ha en fast repetisjonssyklus fra 16-26 dager eller kan forandre dekningsområdet ved bruk av svingbare og styrbare speil (SPOT). Dette gjør at man kan øke repetisjonsfrekvensen over et område hvis det er spesielle fenomener man ønsker å følge. De meteorologiske satellittene har flere passeringer pr. dag.

SPOT-satellittens muligheter for å styre sensorene er beregnet for stereoskopiske opptak, men dette har ingen praktisk anvendelse for vannformål utover at det gir en mulighet for øket repetisjonsfrekvens. For vann kan man dog ikke benytte for skrå vinkelopptak pga. belyningsforhold og den svake tilbakestrålingen fra vann. Hvis man antar å få tilfredstillende data fra SPOT med et skråvinkelopptak opp mot ca. 10 grader skulle dette øke den teoretiske dekningsfrekvensen til ca. 5 ganger pr. uke pr. satellitt. I praksis vil man sannsynligvis ikke få høy nok prioritering ved bestilling av data for å oppnå dette. Dette har forøvrig vært et stort problem ved forhåndsbestilling av data fra SPOT-satellitten.

De høyoppløselige sensorene i dagens operative satellitter har fra 3-7 spektralbånd. Det er "Thematic Mapper" - TM sensoren som har den beste spektrale oppløseligheten. Denne kom først på Landsat-4 i 1982 og senere på Landsat-5 som ble skutt opp i 1984 og Landsat-5 er fortsatt operativ. På Landsat-satellittene finnes en "Multispectral scanner" - MSS med en noe dårligere spektral og romlig oppløselighet enn TM. Landsat-6 er planlagt for oppskyting i 1992, men den får ikke nye eller forbedrede sensorer som først var tenkt. Nye optiske sensorer kommer først om 2-3 år. For vannkvalitetsformål er det bortsett fra for temperaturmålinger, spektralbåndene i den synlige delen av spekteret som til nå har vist seg å gi mest informasjon. Andre operative multispektrale sensorer er : "Haute Resolution Visible" - HRV og "Multispectral Electronic Self-Scanning Radiometer" - MESSR, i henholdsvis SPOT- og MOS-satellittene. MESSR-sensoren og de spektralt brede pankromatiske kanalen i SPOT (P) og MOS ("Visible and Thermal Infrared Radiometer" - VTIR) er foreløpig lite testet for vannformål.

Den sensoren i NOAA-satellittene som kan benyttes for målinger i vann er "Advanced Very High Resolution Radiometer" - AVHRR. Den har kanaler i det synlige og infrarøde delen av spekteret. Det er i hovedsak de termiske kanalene 4 og 5 som benyttes, mens den synlige og nære infrarøde er lite testet for vannformål. NOAA-satellittene har en omløpstid på 102 minutter og vil i løpet av et døgn ha dekket et hvert område minst 2 ganger hvorav minst en i dagslys. Ved Tromsø Satellittstasjon leses det ned 5 passeringer regelmessig pr. døgn for de to satellittene, men dette kan økes ved behov. Dekningsfrekvensen vil være større i nordområdene enn i Sør-Norge, slik at sør i Norge vil dekningen ligge omkring 3 pr døgn hvorav 1 om natten. AVHRR-sensoren har en noe begrenset anvendelse nær land og i trange fjorder pga. den beskjedne romlig oppløseligheten, og pga. dette kan en kun regne med ca. 10 brukbare opptak på dagtid pr. uke for bruk i slike områder. AVHRR-sensoren har en romlig oppløselighet rett under satellitten på 1.1 km, som avtar til mer enn 5 km ved banespolets ytterkant.

Et problem ved fjernmåling har vært den store datamengden som skal behandles. En Landsat TM kvart-scene gir f.eks. ialt 63 Mbytes. Med nyere datateknologi er dette i de senere år blitt enklere å håndtere. Behandlingen av data kan idag utføres med PC-baserte bildebehandlings-system, som gjør at bruken bare av denne grunn kan bli større.

Tabell 1. Oversikt over dagens operative satellitter med multi-spektralesensorer med potensiale for anvendelse til vannkvalitetsformål.

Satellitt og sensorer	Spektrale data:		Romlige data:			Målefrekvens:		
	Område µm	Oppløsn. nm	Bredde km	Areal km ²	Oppl. m	Fast bane	Overlappende/ just. bane	
SPOT	S1	0.50-0.59	90	2x60**	3600	20x20	26.dag	ca.10.dag***
	S2	0.61-0.68	70		(60x60)			
	S3	0.79-0.89	100	"	"	10x10		
	P	0.51-0.76	250					
LANDSAT TM1		0.45-0.52	70	2x92**	8400	30x30	16.dag	7./9.dag
	2	0.52-0.60	80		(92x92)			
	3	0.63-0.69	60					
	4	0.76-0.90	140					
	5	1.55-1.75	1200					
	7	2.08-2.35	2700					
MSS1		10.4-12.5	2100			120x120		
	2	0.50-0.60	100	185	34000	80x80	16.dag	7./9.dag
	3	0.60-0.70	100		(185x185)			
	4	0.70-0.80	100					
MOS	MESSR1	0.51-0.59	80	2x100**	10000	50x50	17.dag	1./16.dag
	2	0.61-0.69	80		(100x100)			(forutsetter at begge instrumenter er operative)
	3	0.72-0.80	80					
	4	0.80-1.10	300					
	VTIR	0.50-0.70	200	1500	-	900x900	17.dag	1./16.dag
NOAA AVHRR1		0.58-0.68	100	2700	-	1100x1100*	0.5dag****	-
	2	0.72-1.10	380					
	3	3.55-3.93	380					
	4	10.3-11.3	1000					
	5	11.5-12.5	1000					

*) 5x5 km ved scenens kant

***) Total banebredde for 2 instrumenter (SPOT, MOS) eller delscener (Landsat)

****) Med skråvinkelopptak opp mot 10 grader kan teoretisk oppnås 5 passeringer pr.uke

*****) Basert på tilnærmet vertikalopptak og dagslyspasseringer

Data fra jordressurssatellittene oversendes idag med post eller kurer som vil ta flere dager, mens et system for overføring av AVHRR-data over telenettet er utviklet (Hamnes og medarb., 1989). Det er ikke så store forskjeller mellom datamengden hos NOAA og Landsat/SPOT at ikke

det samme kan gjøres for disse, men foreløpig er det vanskelig, tidkrevende og kostbart å overføre høyoppløselige data via telenettet. Overføring av større datamengder over satellitt-link (NORSAT-B) er teknisk mulig (W.Jensen, SPACETEC, pers. med.), men dette vil kreve endel tekniske installasjoner hos avsender og mottakeren. Flere nye systemer for datakommunikasjon er under utvikling så man må regne med at dette vil kunne løses bedre i en ikke for fjern fremtid.

De høyoppløselige data fra Landsat, SPOT og MOS leses ned i Kiruna, Esrange, og de lavoppløselige NOAA- (AVHRR) og MOS-data (VTIR) ved Tromsø Satellittstasjon. Både NOAA, Landsat- og MOS-data bestilles via "National Point of Contact" - NPOC ved Tromsø Satellittstasjon/-SPACETEC, mens SPOT-data skaffes fra Fjellanger Widerøe A/S, Oslo. Presisjonskorrigerte SPOT-data skaffes fra Satellittbild A/B i Kiruna.

2.2 Passive flybårne spektrometere og scannere

De første flybårne spektrometere som ble testet for ulike vann-anvendelser er av typen "Airborne Thematic Mapper" - ATM, produsert av Daedalus Enterprises, Inc., Michigan. Spektrometeret har en mekanisk scanner av omtrent samme type som den satellittbårne TM-sensoren. Den har 6 kanaler i området 0.42-0.75 μm , og 4 i området 0.76-2.35 μm . Den har en romlig oppløselighet på 2-3 m, men har ikke god nok spektral-oppløselighet til å måle klorofyllfluorescenssignalet. I motsetning til de fleste nyere flybårne spektrometere har denne en termisk sensor (8.5-13.0 μm). Den første versjonen av ATM ble levert i 1982 og har senere blitt benyttet bl.a. under utprøvingen av SPOT-satellitten. Samme firma produserer den passive "UV/IR-scanner" som er spesialtilpasset for måling av olje, og som benyttes i SFT's overvåkingsfly. Den ultraviolette sensoren i denne scanneren måler i bølgelengdeområdet 0.32-0.38 μm og i det termisk infrarøde ved 8.5-14 μm .

"Multiple-Detector-Electro-Optical-Imaging-Sensor" - MEIS-II er et canadisk spektrometer som benytter 8 lineære CCD-elementer ("Charge Coupled Device"), hvert med spektralseparering med ulike transmisjonsfiltere. Disse CCD-elementene består av mange lysfølsomme dioder bygd opp i et såkalt "diodearray". Et nederlandskt spektrometer med tilsvarende lineære CCD-elementer er "CCD-Airborne Experimental Scanner for Applications in Remote Sensing" - CEASAR utviklet av National Aerospace Laboratory. Denne scanneren har 6 kanaler i området 0.40-0.695 μm med en spektral oppløselighet på 20 nm. Dette er antagelig noe for dårlig for måling av klorofyllfluorescens. I det infrarøde område har den 2 kanaler mellom 0.77-1.050 μm med hhv. 30 og 60 nm oppløselighet. Den romlig oppløselighet er fra < 1 - 4 meter.

I 1989 ble det gjennom den felles institusjonelle NORSMAP'89-kampanjen testet en nyere generasjons canadisk CCD-basert spektrometer "Compact Airborne Spectrographic Imager" - CASI (Pettersson og medarb., 1990a-f). Samtidig ble det gjennom en EF/ESA-kampanje (EISAC'89) testet to andre systemer; det canadiske systemet "Fluorescence Line Imager" - FLI, og det amerikanske "GER-Imaging Spectrometer" - GERIS. Av disse ble FLI-sensoren først lansert og var etterkommeren av MEIS-II og tok i bruk to-dimensjonale CCD-elementer (Borstad og medarb., 1986). De flybårne systemene som idag er kommersielt tilgjengelige er blitt drevet frem spesielt gjennom forskjellige FoU-prosjekter i Canada og USA, og senere også i Europa.

GER-spektrometret er utviklet av firmaet "Geophysical Environmental Reserach", Ltd, New York. Dette dekker et større spektralområde fordelt på tre spektrometere. Spektraloppløseligheten varierer for de forskjellige deler av spekteret, men for vannformål er den synlige delen av spekteret mest interessant. FLI-systemet ble laget av det canadiske selskapet Moniteq Ltd., Ontario og en detaljert beskrivelse er gjengitt i Borstad og medarb., 1985. Systemet benytter et to-dimensjonalt-CCD, men med et prismesystem som sprer lyset inn på diodene istedet for filtere. Med denne teknologien kan man få frem meget stor spektral og romlig oppløselighet.

CASI-instrumentet er en videreutvikling av FLI-systemet og er laget av det canadiske firmaet Itres Research Ltd, Calgary. Dette er neste generasjon av FLI og er et mye mer kompakt system, og i motsetning til FLI er CASI meget fleksibelt når det gjelder kravet til fly. Her benyttes PC-baserte systemer for håndtering og lagring av data. En nærmere beskrivelse er gjengitt i Borstad og Hill, 1989 og Pettersson og medarb., 1990a. De store datamengdene som disse systemene produserer gjør at det er mest vanlig å operere de i såkalt "spatial mode" hvor man velger opp til 15 spektralbånd. Her oppnår man stor romlig oppløselighet og noe begrenset spektral oppløselighet (15 kanaler). I "spektral mode" derimot kan man oppnå 288 kanaler med en spektral oppløselighet på ca. 2 nm, men den romlige oppløseligheten må begrenses til f.eks. 1 kanal. I CASI-systemet lagres dataene direkte på en 8 mm Video-tape, og hver tape kan ta opptil 1.1 Gbyte som tilsvarer ca. 1 time med data (Borstad og medarb., 1989). Med spesiell programvare kan dette konverteres til 8 eller 16 bits MS-DOS filer.

Disse nyere bildedannende flybårne spektrometre kan til forskjell fra de eksisterende satellitt-sensorene og de flybårne scannerne, måle nesten kontinuerlige spektra i den synlige/nære-infrarøde området. Med så stor spektral fleksibilitet og følsomhet åpner det seg nye muligheter til bedre å kunne skille ulike optiske egenskaper ved vann-

masser. Blant annet er det mulig å måle klorofyllfluorescens induisert av sol- og himmellys. Dette kan gjøres med dataene fra CASI- og FLI-instrumentene, mens GER-instrumentet har for dårlig spektral oppløselighet. Tre av spektralbåndene benyttes for beregning av den såkalte "Fluorescence Line Hight" - FLH. Dette signalet antas å kunne benyttes for å beregne mengden av klorofyll-a. Andre metoder er å benytte kanalforhold som f. eks. "blue/green - ratio" som for den tidligere satellittbårne CZCS-sensoren. Direkte korrelasjon med absolutte radians/reflektans-verdier benyttes for bestemmelse av andre vannkvalitetsparametere som f.eks. suspendert materiale. Se Pettersson og medarb., (1990a) for nærmere presentasjon av beregninger og flere data om disse spektrometerene.

Noen data om disse spektrometerne er sammenstilt i tabell 2, men det finnes flere på markedet bygget opp omkring mye av den samme teknologien. For eksempel har Smith (1988) beskrevet et 11 kanals spektrometer med en spektraloppløselighet i den synlige delen av spekteret på 40-50 nm. Et annet japansk- og amerikansk-utviklet flybårent system har spektraloppløselighet på omkring 10 nm i et område på 0.41-2.45 μm , med 20 m romlig oppløselighet og en sporbredde på 11 km. Et tyskt system som har vært under planlegging er "Reflective Optics System Imaging Spectrometer" - ROSIS, (Kunkel og medarb., 1987) med spektraloppløselighet på 5 nm, og typiske romlig dekning på 2-5 km og oppløselighet på 2-4 m. Planene er at instrumentet skal testflyves i slutten av 1991 og være operasjonelt i 1992. Ut fra tidligere erfaringer kan dette være noe optimistisk.

Tabell 2. Oversikt over spektraldata for noen flybårne spektrometer og typiske verdier for flyhøyde og romlig oppløselighet og dekning.

Spektrometer type	Spektrale data:			Typiske verdier for:		
	Område μm	Antall bånd	Oppløsn. nm	Flyhøyde km	Romlig dekn. km	oppl. m
FLI	0.43-0.80	8	2.5**	2	4.8	2.5
				1	1.4	1.3
CASI*	0.45-0.95	15	2.9**	2	1.2	2.5
				8	5.2	10
GERIS	0.46-0.84	31	12	6	12	20
	1.44-1.84	4	120	3		10
	2.00-2.45	28	16			

*) Forskjellige linser og integrasjonstider kan benyttes
 **) I "spectral mode" 1.4-1.8 nm oppløselighet

3. ANVENDELSESOMRÅDER INNEN VANNKVALITETSOVERVÅKING

Overvåking av våre vannressurser er hovedsakelig organisert gjennom det "Statlige program for forurensningsovervåking", som omfatter overvåking av forurensningsforholdene i luft og nedbør, grunnvann, vassdrag og fjorder, samt havområder. Statens forurensningstilsyn (SFT) er av Miljøverndepartementet blitt tillagt det administrative og koordinerende ansvaret for programmet. Dette programmet skal overvåke langsiktige forandringer av de fysiske, kjemiske og biologiske forhold. Man skal videre dekke myndighetenes behov for informasjon om forurensningssituasjonen, og gi grunnlag for best mulig forvaltning av naturressursene (SFT-rapport 433/90).

SFT har opprettet rammeavtaler og samarbeid med flere nasjonale organer og institusjoner (DN, NGU, NVE, HI, NILU, NIVA), og i den lokale og regionale overvåkingen spiller Fylkesmennenes miljøvern-avdelinger en viktig rolle. I tillegg utfører Havforskningsinstituttet - HI ressurskartlegging og overvåking av våre nære havområder. Innen forskningsprogrammene "Skadelige alger" og "Nord-Norsk Kystøkologi", som begge startet opp i 1990, er man i ferd med å utrede/vurdere behovet for igangsettelse av fjernmålingsprosjekter. Det er å håpe at denne rapporten kan tjene som grunnlag for dette. Andre program eller prosjekter hvor slike teknikker bør vurderes brukt er "Marin forurensning", og det nystartede prøveprosjektet for å etablere et "Havmiljøovervåkings- og varslingsystem" - HOV. Her kan fjernmålingsdata bli en viktig informasjonskilde brukt sammen med modeller.

3.1 Hav-, kyst- og fjordområder

Mangel på rutinemessig overvåking av viktige miljøparametere (næringssalter, algekonsentrasjoner) i våre havområder har ved de siste års algeoppblomstringer (sørlige Nordsjøen), gjort det vanskelig å forutse den utvikling som har funnet sted. Det som kanskje er mest alvorlig er at man mangler grunnlag for å kunne si noe om årsaken til fremvekst av de skadelige algene. Siden den utløsende faktor vil være å finne i det området der oppblomstringen startet, er det av særdeles stor betydning at disse blir lokalisert og overvåket. Det er hevdet at dagens overvåkingsmetoder for kystvannmassene i Nordsjøen (Doerffer og medarb., 1989) gir utilstrekkelig informasjon.

Det betyr at nye metoder må utvikles og taes i bruk, og at man i fremtidig overvåking i større grad må kombinere automatiske metoder med dagens feltbaserte metoder. Fjernmåling vil være et viktig redskap både med tanke på å avdekke typiske oppvekstområder for eventuelle skadelige alger, samt å følge den videre utvikling/spredning over tid.

Det faktum at slike algeoppblomstringer som regel oppstår og utvikler seg under lengre "godvørs"-perioder er spesielt interessant da sannsynligheten for å få gode fjernmålingsdata er større. I forbindelse med de siste års oppblomstringer som forårsaket store skader for bl.a. havbruksnæringen, har behovet for direkte varsling av slike fenomener blitt aktualisert, slik at skader kan reduseres.

Oppblomstring av skadelige alger kan forekomme på vidt forskjellig skala. Som eksempel kan nevnes "storskala" oppblomstringen av Chrysochromulina polylepis i Skagerrak mai 1988, og "småskala" oppblomstringen av Prymnesium parvum i Ryfylkefjordene sommerene 1989 og -90. Interessant er her påvisning av områder med kraftige gradienter i fysiske egenskaper som f.eks. brakkvannsfordeling, fronter og virvler samt oppstrømningsområder. Fjernmåling kan detektere slike gradienter ved temperatur og turbiditetsregistreringer.

Områder med høy biologisk aktivitet indikeres av mye plankton og opptrer ofte i frontområder. Planteplanktonet kan også ha stor flekkvis fordeling (patchiness). Økende planktonmengder indikerer mulige eutrofi-effekter, og kartlegging av planteplanktonets fordeling og vekst er viktig både for fiskerivirksomhet, såvel som studier av oceanografiske fenomener. Nå må man ikke glemme at algeoppblomstringer ikke bare er skadelige, men dessverre har de siste års mediadekning gjort at algeoppblomstringer blir satt i sammenheng med noe negativt. De fleste oppblomstringer er faktisk harmløse og nødvendige for livet til andre organismer langs kysten.

I kystområdene har man ofte en kompleks vannsirkulasjon og normalt vil man i våre kystområder kunne skille mellom flere ulike vannmasser. Disse har ulik karakter på temperatur, saltholdighet, og ulike konsentrasjoner av oppløste stoffer, uorganiske partikler og plankton. Overvåking av fordeling og transport av disse vannmassene blir derfor viktig. Enten for en direkte kartlegging av eventuelle forurensninger assosiert med disse vannmassene, eller fordi de kan initiere oppblomstringer av alger. Suspendert stoff må betraktes som hovedbærer av ulike uorganiske og organiske stoffer inkludert forurensninger og blir derfor et hovedsubstrat for biokjemiske prosesser. En god kartlegging av dette er derfor nødvendig. Selv om forurensninger som f.eks. miljøgifter ikke kan bestemmes direkte ved slike metoder er det vesentlig å kunne kartlegge ulike vannmasser, for derved indirekte å spore transportveier. Kartlegging av temperatur er dessuten viktig for havbruksnæringen.

Fjordene skiller seg fra ytre kyststrøk ved mer stratifiserte vannmasser, og mens en algeoppblomstring i en fjord har en begrenset ut-

bredelse er oppblomstringer i ytre områder gjerne mer omfattende. De og kan spre seg over store områder via kyststrømmen. I fjordene kan en ofte observere et dypmaksimumlag av alger av kystvannsopprinnelse under spranqlaget. Fjernmålingsteknikker vil kun kunne brukes til overvåking av overflatefenomener ned til ca. 5-10 m avhengig av konsentrasjoner og hvilke deler av spekteret (sensorkanaler) som benyttes.

Økende tilførsler av næringsalter til våre fjord/kystområder har i de senere år vært satt i sammenheng med oppblomstringer av skadelige alger. Problemet synes å være tiltagende og en regner med muligheten for at flere spesielle arter vil kunne blomstre opp og føre til problemer for oppdrettsnæringen, fiske og rekreasjonsmulighetene langs kysten. Det har etterhvert blitt klart at disse skadevoldende oppblomstringene har sammenheng med økt eutrofiering i den sørlige del av Nordsjøen og Kattegat (Erga og medarb., 1990). Norske kystfarvann kan således ikke betraktes isolert fra Nordsjøen forøvrig, og dette betyr at store kyst/havområder må overvåkes. For å gjøre dette tilfredsstillende må nye overvåkingsmetoder som bl.a. fjernmåling taes i bruk.

I estuarområdene der det marine systemet møter ferskvannet får man dynamiske systemer hvor ulike langtids- (sesong) og korttids- (timer og dager) forandringer er viktige. Variasjoner i topografien (batymetri), blanding (vind/strøm), tidevann, næringsforhold og ferskvanntilførsel fører til komplekse fordelinger av vannmasser. Partikkelbelastningen er ofte stor i nærområdene til elver og tilførsel av næringsalter fører ofte til lokale algeoppblomstringer. På grunn av de dynamiske prosessene er overvåking av overflatevannmasser i slike områder vanskelig, og må baseres på interpoleringer mellom prøvetagningsserier og stasjoner. Hvis man skal gjøre undersøkelser over store geografiske områder blir dette kostbart, tidsforbrukende og ofte ufullstendig. Synoptiske målinger over større områder med tradisjonelle målinger fra båt er en umulig oppgave, og dette gjelder ikke spesielt estuarområdene. Ved å kombinere feltmålinger med fjernmålingsdata vil man få en bedre forståelse av representativiteten av feltobservasjonen, fordelingen av vannmasser og hvilke mekanismer som kontrollerer de fysiske og biologiske prosesser i ulike estuarer (Chesire og medarb., 1985).

3.2 Elver og innsjøer

Overvåking av elver og innsjøer er en omfattende oppgave i et land som Norge. Undersøkelser av vannkvalitet har derfor måttet konsentreres til et lite antall vassdrag der problemene er åpenbare. Med begrensede midler til slik virksomhet sier det seg selv at vi

bare kan få spredt og ufullstendig oversikt over situasjonen. For å bøte på dette er det gjennomført flere landsomfattende undersøkelser av innsjøer innen visse problemområder som forsurening, eutrofiering og metallforurensning. Disse har gitt verdifull informasjon både om forurensningssituasjonen på landsbasis, geografisk fordeling og om bakgrunnsnivåer i upåvirkede områder. Imidlertid er slike undersøkelser kostbare og kan bare gjentas med relativt lange tidsintervaller. Undersøkelsene gir heller ikke informasjon om år-til-år variasjoner i de mellomliggende perioder. Her vil fjernmåling kunne gi nyttig tillegginformasjon.

For en rekke formål er det behov for mer kontinuerlige informasjoner, og ofte er det først i ettertid at man ser når og hvor målinger burde ha vært foretatt. For å få oversikt over visse problemers omfang på lands- eller regionbasis kan det også være ønskelig med et tett, og samtidig, observasjonsnett, såkalte "febermålinger". I slike tilfeller vil en kunne akseptere lavere målenøyaktighet, dersom de relative verdiene er korrekte, og antall observasjoner er stort. I allefall vil slike undersøkelser måtte kalibreres mot utvalgte feltdata.

Satellittdataenes arealmessige oppløsning vil kunne begrense hvor små lokaliteter som kan overvåkes, og dette får betydning både for små innsjøer og elver. Videreutvikling av registreringsutstyret vil etterhvert redusere dette problemet, og de flybårne spektrometere med bedre romlig oppløsning vil her bli viktige. For innsjøer synes det foreløpig å være tre anvendelser for fjernmålingsdata som er særlig aktuelle: temperatur og is, partikler og planteplankton (klorofyll-a).

Satellittsensorene kan gi data for sammenligning av overflate-temperatur over et stort antall innsjøer. Dette kan være nyttig for regionale studier av produksjonspotensiale ol., men kan også i sammenheng med tidfesting av isløsning og islegging, indikere langsiktige trender i klimautviklingen. Temperaturdata kan også anvendes for studier av vannutskiftning og er ikke bare interessante ut fra en rent termisk synsvinkel. Høyere temperatur vil gjerne stimulere vekst av alger og bakterier. Temperaturen viser dessuten ofte spredningsmønster til utslipp fra industrier, varmekraftverk og elver, og kan derfor indirekte gi et bilde av andre forurensningers fordeling og influensområder. For større innsjøer og reguleringsmagasiner er temperaturmønsteret i overflaten en god indikator for storskala strømforhold som både er av interesse i forbindelse med inntak av drikkevann og spredning av utslipp.

Partikkelinnholdet i innsjøer bør kunne tolkes ganske godt med fjernmålingsdata. Her er det særlig kvantifisering av erosjon fra land-

bruksområder som er viktig. Erosjon av åpen åker er ansett som et betydelig problem, både mhp. jordvern og forurensning av vassdrag. Forskjellige typer anleggsarbeid kan også produsere betydelige mengder partikler, f.eks. tunnellsprengning og veibygging. De små partiklene kan føres over lange avstander, og utenfor elvemunninger kan vannkvaliteten være preget av partiklene langt ut i fjordsystemene. Partikkelstrømmene er i seg selv indikasjon på strømretning og hastigheter. Erosjon finner også sted i enkelte reguleringsmagasiner med store mektigheter med løsmasser, og det er konstatert skade på turbiner pga. slipevirkningen. Et annet område er gruveforurensning hvor man kan ha betydelig partikkelavrenning fra avgangsdeponier først og fremst til ulike ferskvannsresipienter, mens man til de marine resipientene kan ha direkte utslipp av finfordelte partikler.

Algekonsentrasjonen er et viktig utslag av overgjødning (eutrofiering) av vassdrag. Uønsket eutrofiering kan registreres i et stort antall sjøer nær befolkningssentra og i landbruksområder. Bare innsjøer av en viss størrelse, samt innsjøer av spesiell bruksmessig betydning, blir gjenstand for konvensjonell overvåking med prøvetagning og analyse av vannprøver. Som et supplement til dagens feltundersøkelser vil fjernmålingsdata kunne gi store mengder tilleggsdata. Her vil en også dra nytte av informasjonen om relative forskjeller mellom de innsjøer som er målt i felt, og de som måles gjennom f.eks. satellitt- eller flyobservasjonene. Med satellittdata har man muligheter til å følge utviklingen i et stort antall innsjøer over lang tid med en relativ begrenset datainvestering.

Alle de nevnte "parameterene" vil samtidig kunne gi opplysninger om horisontale variasjoner i overflaten av en innsjø, noe det sjelden eller aldri er mulig å få fra feltundersøkelser. Her kan vi lære mer om bl. a. representativiteten av de prøver som samles inn. I endel innsjøer fører eutrofiering også til masseoppblomstring av planktonalger ("vannblomst") og spesielt blågrønnalger kan gi massive overflatekonsentrasjoner. I slike områder vil det være restriksjoner for bading og begrensninger for inntak av drikkevann. Visse typer blågrønnalger er toksinproduserende og har bl.a. forårsaket dødsfall hos dyr på beite (Skulberg, 1988a). Også i brakkvannsområder som i f.eks. Østersjøen finnes tilsvarende toksinproduserende alger. Slike oppblomstringer er heterogent fordelt og det er umulig å håndtere prøvetagning på vanlig måte. Dynamikken i en slik vannblomst kan følges med fjernmålingsteknikker, i første rekke med flybårne spektrometere.

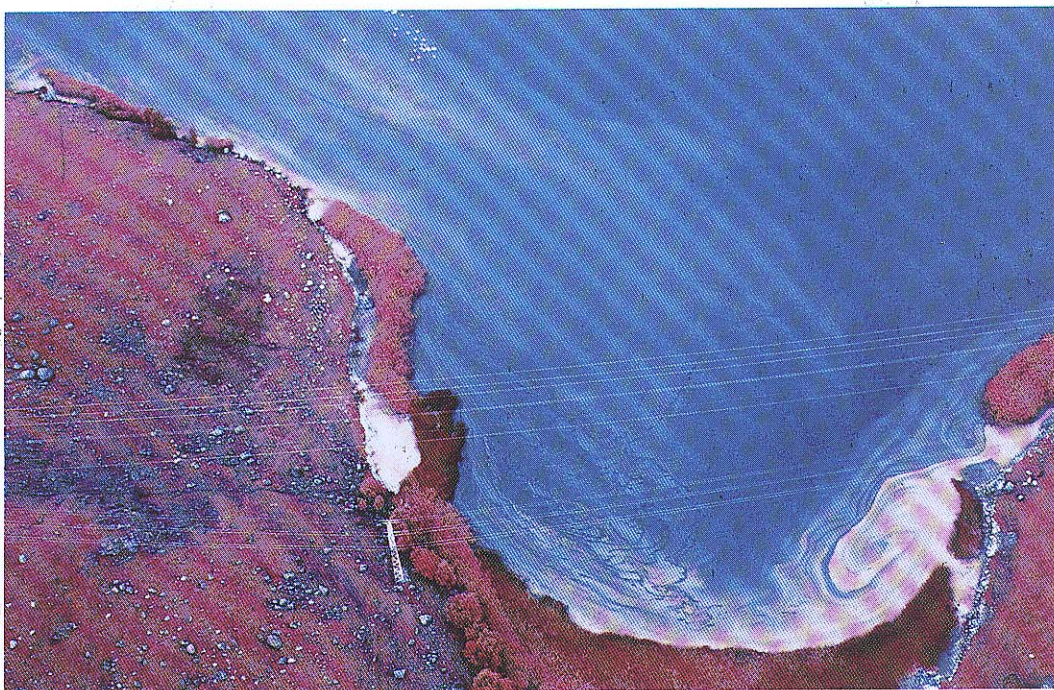
Figur 1 viser et infrarødt fargebilde av en slik vannblomst med Microcystis aeruginosa i Frøylandsvannet (Skulberg, 1988b). Med slike data kan man få regionale oversikter og man kan sortere ut de mest

interessante områder. Slike intensivundersøkelser kan begrenses til kortere perioder hvor fenomenene oftest opptrer og i de mest utsatte områdene. En annen effekt av overgjødslinger er tilgroing med makrovegetasjon som f.eks. vasspest og takrør (helofytter). Kartlegging av slike områder gjøres idag med flyfotografering med IR-fargefilm, og det bør vurderes om spektrometerdata kan gi noe bedre informasjon. I figur 2 er det vist et infrarødt fargebilde av slik "helofytt"-vegetasjon fra Ims-vassdraget i Rogaland (Skulberg, unpubl.).

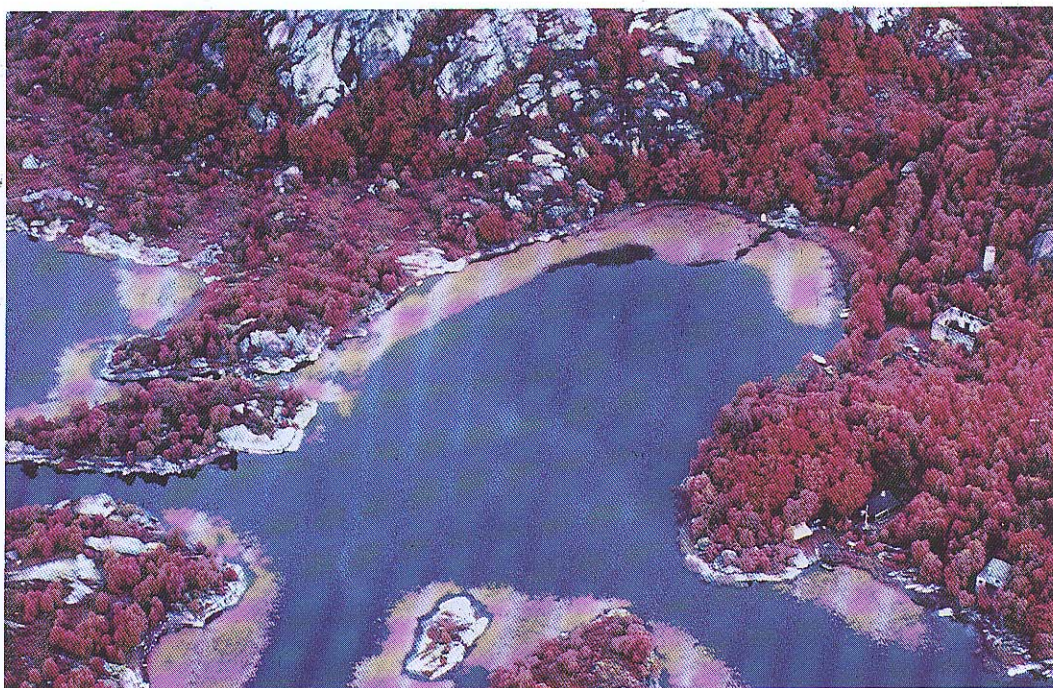
I tabell 3 er sammenstilt de vanligste "deteksjonsmulighetene" ved bruk av optiske, passive fjernmålingssensorer for anvendelser i ulike resipienttyper.

Tabell 3. De viktigste anvendelsesområder for satellitt- og flybårne spektrometerdata for overvåking av vannkvalitet. Den mest vanlige deteksjonsmulighet ved bruk av passive, optiske (synlig/infrarød) sensorer er angitt.

Resipient-typer	Anvendelsesområde/ overvåkingsoppgave.	Mest vanlig deteksjonsmåte
Hav/ kystvann	Front og blandings- områder	Termisk og optisk
	Sirkulasjon	Termisk og optisk
	Planteplankton	Optisk (partikler/ fluorescens)
Fjord/ estuarer	Organisk stoff/ "gulstoff"	Optisk
	Utveksling mellom fjord og kystvann	Termisk (og optisk)
	Spredning av vann- masser/forurensninger	Termisk og optisk (partikler)
	Erosjon	Optisk (partikler)
Elver/ innsjøer	Eutrofiering	Optisk (partikler/ fluorescens)
	Erosjon	Optisk (partikler)
	Eutrofiering/masseopp- blomstring av alger	Optisk (partikler/ fluorescens)
	Makrovegetasjon	Optisk



Figur 1. Vannblomst av Microcystis aeruginosa i Frøylandsvannet, Rogaland, den 8. august 1984. Fotografert med infrarød fargefilm (Skulberg, 1988b).



Figur 2. Utvikling av vannplanter ("helofytter") i Ims-vassdraget, Rogaland, den 10. august 1984. Fotografert med infrarød fargefilm. Kilde: O. Skulberg, NIVA.

4. ERFARING MED PASSIV FJERNMÅLING AV VANNKVALITET

Internasjonalt benyttes en god del fjernmålingsdata fra satellitt og fly til vannformål, med det er likevel fortsatt ganske få systemer for operativ automatisk bruk av slike data. I Norge er erfaringene med satellittdata til vannformål begrenset selv om slike data har vært tilgjengelige i mange år. Det er flere årsaker, og henger bl.a. sammen med forståelsen av nytteverdien og manglende datatilgjengelighet. Det har også vært en viss konservatisme mot å ta i bruk ny teknologi, og det har vært lav prioritering av FoU-aktiviteter for å arbeide med tilrettelegging av metoder til praktisk bruk.

En annen årsak til den skepsis man har hatt omkring denne teknologien og som har gjort at den ikke har fått større anvendelse tidligere, har å gjøre med de urealistiske "løfter" og forhåpninger som ble gitt i satellittfjernmålingens barndom. Det er først i de siste årene det er utført reelle tester i Norge som har vist nytteverdien av digitale fjernmålingsdata i vannkvalitetssammenheng, utenom da for oljeovervåkingen. For de flybårne spektrometerene er det bare helt nylig blitt gjennomført utprøvinger i Norge som kan gi erfaringsgrunnlag for å vurdere om denne type data egner seg for norske forhold.

Det er grunnleggende forskjeller mellom den informasjon man vanligvis ønsker å få fra et vannområde enn fra et landområde. For landmiljøer ønsker man ofte å klassifisere dataene, dvs. man ønsker å bestemme om et objekt er av en viss kategori og om det har spesielle egenskaper, som f.eks. ved vegetasjonskartlegging. I vannmiljøet derimot ønsker man ofte å bestemme utbredelsen og konsentrasjonen av et materiale i vannet. Man må da benytte en modell som beskriver sammenhengen mellom fjernmålingsdataene og konsentrasjonen til stoffet man ønsker å kartlegge. Det er derfor viktig å kunne kvantifisere dataene, og digitale data blir derfor viktigere enn fotografiske gjengivelser.

Behovet for kvantifisering blir enda større hvis man skal bedømme om vannet har endret karakter mellom to tidspunkter. Prosessene på landjorda er langt fra så dynamiske som i havet, og for overvåking av havområder vil det derfor være et sterkt krav til rask datatilgang. Kravene øker ytterligere hvis data skal brukes operasjonelt og tilgangen på kontrolldata fra feltmålinger er liten eller mangler. Derimot skal man studere akvatisk makrovegetasjon har vanlig IR-fotografering vist seg å være en tilfredstillende metode. Flyfotografering ved bruk av infrarød fargefilm har bl.a. av NIVA blitt benyttet til kartlegging av vannvegetasjon i sammenheng med vassdragsreguleringer og eutrofiundersøkelser. Eksempler på bruk for tilgroing finnes i Rørslett og medarb., 1990.

4.1 Erfaring med passive satellittbårne sensorer

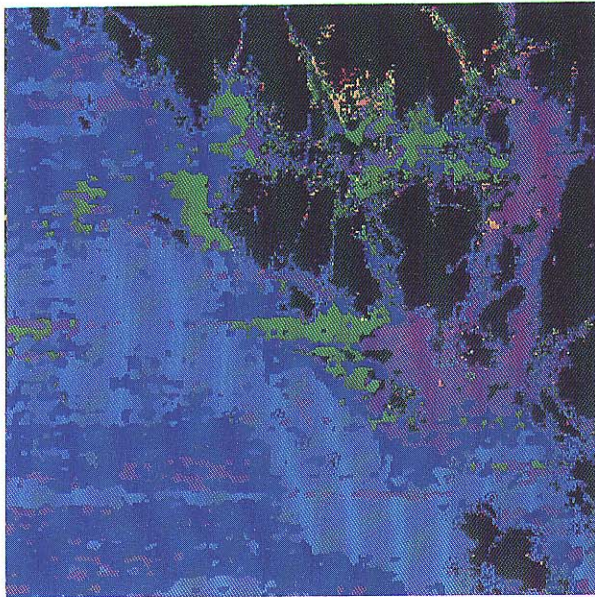
Ingen av de eksisterende høyoppløselige satellittsensorene (Landsat og SPOT) er spesielt egnet for bruk i vannmiljø og sensorenes oppbygging gir teoretisk sett begrensede muligheter for utnyttelse til dette formål. Satellittdataene må sammenlignes med et stort antall feltdata for at man skal få etablert de nødvendige modeller og sammenhenger. Foreløpig kan bare et fåtall relevante forurensningsparametere måles med satellittsensorer med tilfredstillende oppløsning og nøyaktighet. På tross av dette er det vist at de kan ha nytteverdi og gir opplysninger som ikke kan skaffes på annen måte.

Utprøving og praktisk bruk i norske fjorder og estuarine områder har vist at høyoppløselige satellittdata kan benyttes til visse kartleggings- og overvåkingsoppgaver av vannkvalitet direkte og indirekte (Sørensen og medarb., 1990c). Karakterisering av vannkvalitet basert på satellittdata blir dårligere enn hva man får ved vanlige felt- og laboratorieanalyser, men tatt i betraktning alle de faktorer som påvirker denne type målinger må nøyaktigheten sies å være akseptabel. Styrken i å kombinere feltdata og satellittdata er at man får mulighet til å bestemme ulike parametre med en rimelig god nøyaktighet over store områder, som det er umulig å skaffe tilveie med feltmålinger. Man kan også være sikrere i tolkningen av feltdata når man skal interpolere mellom stasjoner.

4.1.1 Bestemmelse av optiske parametere og temperatur

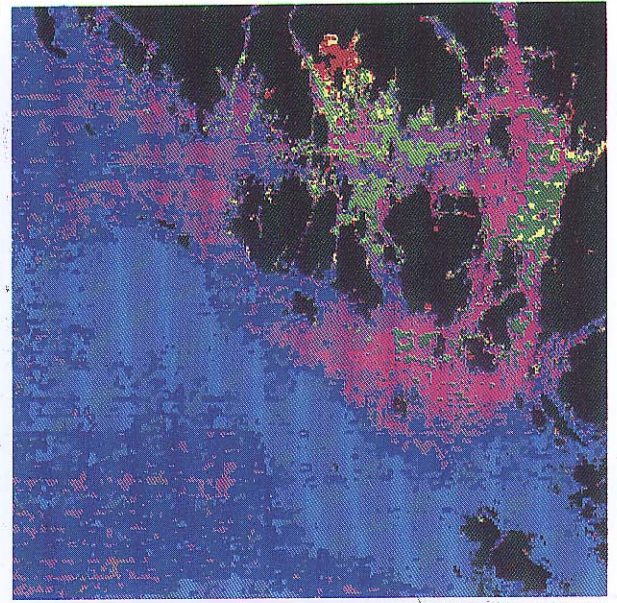
De høyoppløselige multispektrale TM-data fra Landsat-5 satellitten har gitt gode sammenhenger med feltobservasjoner av turbiditet, suspendert materiale, temperatur, siktedyp, og svekningskoeffisienter med ulike bølgelengder (Sørensen og medarb. 1990c, Kögeler og Dahle, 1990). Kvantifisering av partikler, målt som suspendert materiale eller turbiditet ga i kombinasjon med feltdata en nøyaktighet på 5-10 % med konsentrasjoner opptil ca. 10 mg/l suspendert materiale. For bestemmelse av parametere som uttrykker både partikler og løste stoffer får man for svekningskoeffisientene en nøyaktighet på ca. 10 %, og for siktedyp 10-20 %. For siktedyp større enn ca. 5 meter blir usikkerhetene større på grunn av den svake tilbakestrålingen fra slike "klare" vannmasser. Kartlegging av temperatur med TM-data i kombinasjon med noe feltdata kan gjøres med en nøyaktighet på $\pm 0.5-1^{\circ}\text{C}$. Figur 3 viser eksempler på 4 ulike parametere utledet fra TM-data og feltdata i Hvalerområdet og deler av Ytre Oslofjord. Dette er eksempel på en tematisk fremstilling av ulike vannkvalitetsparametere basert på feltdata og fjernmålingsdata.

Figur 3. Kartlegging av vannkvalitetsparametere basert på feltdata og fjernmålingsdata.



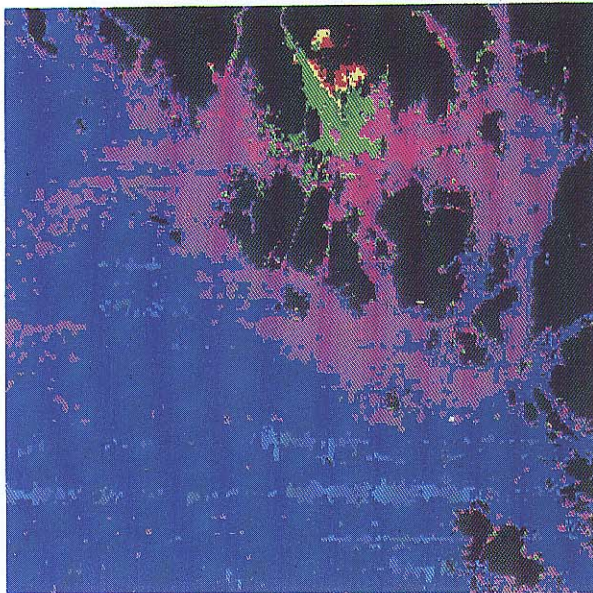
<0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 3.5

Attenuation coeff. 470 nm (m^{-1}) July 23 1987



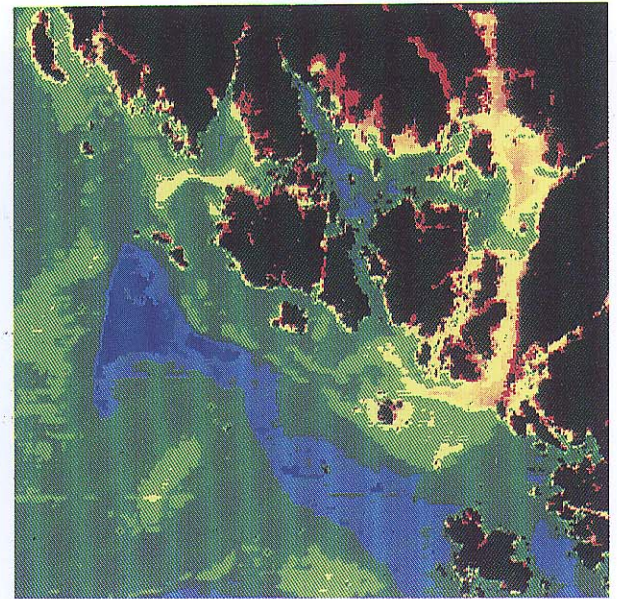
<0.4 0.6 0.8 0.9 1.0 1.1 1.2

Inverse secchidepth 470 nm (m^{-1}) July 23 1987



<0.5 1.5 2.5 3.5 4.5 5.5 6.5

Suspended sediments (mg/l) July 23 1987



<17.5 18.0 18.5 19.0 19.5 20.0

Temperature ($^{\circ}C$) July 23 1987

Figur 3. Satellittbilder over fire vannparametere fra Hvalerområdet den 23. juli 1987. Fremstilt på basis av Landsat-5 TM-data og samtidige feltdata fra området (Sørensen og medarb., 1990c). Bildebehandling ved NIVA og Norsk Regnesentral.

Man ser av figur 3 at de optiske parameterene (svekningskoeffisient og inverst siktedyp) viser både Glomma's spredning og en "klar" vannmasse på utsiden av Hvalerøyene, mens bildet for suspendert materiale viser i hovedtrekk Glommaelvens influensområde. Den "klare" vannmassen utenfor Hvalerøyene sammenfaller med en kaldere vannmasse som man ser av temperaturbildet. Modellene for de optiske parameterne bestod av TM-kanaler fra den blågrønne delen av spekteret, mens for suspendert materiale fra den røde delen. I frontområdet på utsiden av Hvalerøyene fant man en større planktonmengden sannsynligvis pga. gunstige forhold med næringsrikt vann fra Glomma og sjøvannet fra Ytre Oslofjord.

SPOT's HRV- og Landsat's MSS-data har på tross av noe dårligere spektral oppløselighet omtrent samme informasjonsinnhold som TM for suspendert materiale (Sørensen og medarb., 1989). Eksempler på disse sensorene finnes i figur 9 og 10. Sensorene mangler derimot termiske kanaler som er viktig for kartlegging av transporter og spredning i de marine systemer. For MOS-data foreligger ingen gode felt-sammenligninger for å foreta en tilfredstillende evaluering.

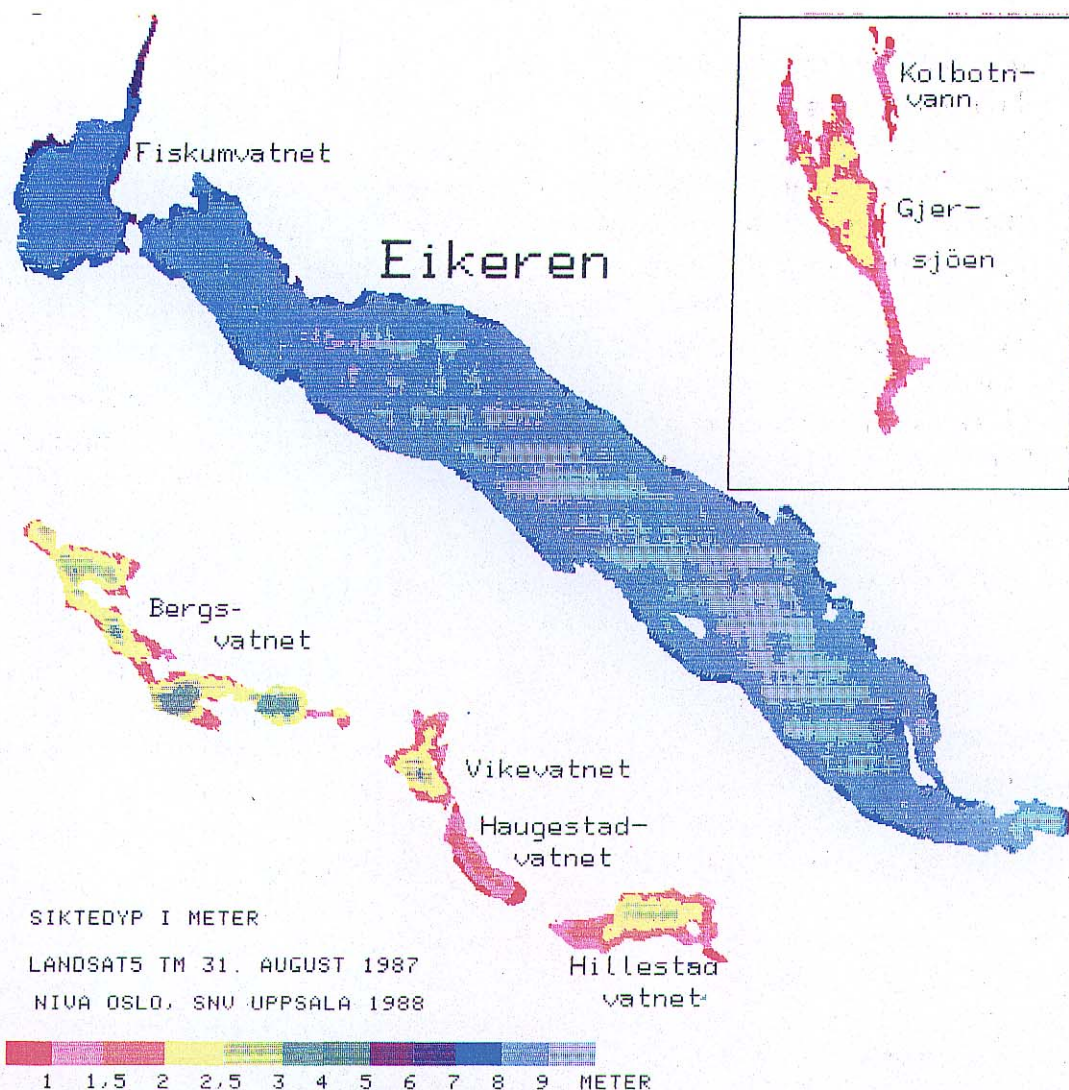
For de lavoppløselige AVHRR-data (NOAA-satellittene) ligger den absolutte nøyaktighet for temperaturen på 0.5-1°C avhengig av atmosfærepåvirkningen. Den relative nøyaktigheten er $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$. Foreløpige kontroller av modellberegnete temperaturdata viser avvik på mindre enn 1°C (T. Lindell, pers. medd.). Pedersen (1982) oppgir den samlede feilen ved korreksjon av AVHRR-data til mellom ± 0.5 - $\pm 1.3^{\circ}\text{C}$, og Kloster K., (NERSC, pers. med.) angir også feilen til å ligge på dette nivået. Se figur 6 og 11 for eksempler på AVHRR-data kalibrert til absolutt temperatur. Det er foreløpig usikkert hvordan AVHRR-data kan anvendes kvantitativ for andre formål enn overflatetemperatur pga. brede og uhensiktsmessige spektralbånd (Jfr. kap. 4.1.3).

De ovenfor nevnte optiske vannkvalitetsparameterene er relativt uspesifikke og beskriver enkeltvis eller i kombinasjon konsentrasjonen av partikler og løste stoffer i vannmassene. Andre mer spesifikke forurensningskomponenter som samvarierer med disse, bør derimot indirekte kunne kartlegges fra satellitt. Det er egentlig ikke noen god teoretisk sammenheng mellom satellittdata og noen av de parametre vi idag bruker til å beskrive vannkvalitet. Vannkvalitetsparametre som f.eks. turbiditet og suspendert materiale uttrykker egentlig bare den partikulære delen, mens tilbakestrålingen som fjernmålingssensoren registrerer er fremkommet ved en kombinasjon av spredning og absorpsjon til både partikler, løste stoffer og vannet selv. I utgangspunktet er det derfor vanskelig å sammenligne fjernmålingsdata direkte med de enkelte vannkvalitetsparametre, og samtidig forvente en høy grad av nøyaktighet.

Når man skal foreta kvantitative sammenligninger av satellittdata for ulike tidspunkter må man ta hensyn til flere forhold. Reflektert sollys fra overflaten - som måles av satellittsensoren - vil i noen grad være avhengig av havoverflatens beskaffenhet, solvinklen og vindhastigheten, men den viktigste enkeltfaktor er atmosfærens bidrag av reflektert lys. Flere forhold kommer altså inn når man skal lage modeller eller sammenligne data fra ulike tidspunkter. Tross dette er det blitt laget tilfredsstillende modeller for automatisk bestemmelse av suspendert materiale, basert utelukkende på satellittdata fra MSS-sensoren (Lindell, 1986, Munday og Alföldi, 1975 og Lindell og medarb. 1986). For å kunne lage slike modeller er riktig absoluttkalibrering av sensordataene til korrekte fysiske størrelser nødvendig. Problemene med absoluttkalibrering er fortsatt store for endel av sensorene, og gode modeller for atmosfærekorrekasjoner må utvikles. Når man har kontroll med dette kan man etablere modeller, som gjør det mulig å forutsi vannkvalitetsparametere ut fra satellittdataene enten med et beskjedent bruk av feltdata, eller aller helst bare basert på satellittdata.

Det kan allikevel være vanskelig å lage en god generell modell basert på en gitt kombinasjon av kanaler, fordi spektralegenskapene til vannmasser kan forandres både mhp. sammensetning og konsentrasjon av de ulike komponenter, så som uorganiske partikler, løst organisk stoff (lignin, humus, gulstoff) og plantepigmenter. Det er mulig man må operere med regionale og sesongmessige modeller. Problemer med modellering vil oppstå hvis man har meget ulike spektralsignaturer i det området ("bildet") som bearbeides som f.eks. høyt humusinnhold eller algepopulasjoner med stor absorpsjon. Økende konsentrasjon av suspendert materiale er vist å kunne forflytte det optiske tyngdepunktet i modellene fra blått mot rødt (Collins og Pattiarachi, 1984, Sørensen og Lindell, 1990, Sørensen og medarb., 1990c).

For bruk i ferskvannsmiljøer oppstår også andre krav til dataene, og det viktigste er god geometri (romlig). Dette fører til at f.eks. de lavopløselige AVHRR-data bare kan anvendes på store innsjøer. SPOT-satellitten har sensorer med bedre romlig oppløsning enn Landsat og er derfor av interesse i mindre innsjøer. Det burde være gode muligheter for bruk av fjernmålingsdata i ferskvannssystemer blant annet pga. store forskjeller i "spektralsignatur" (stor variasjon i partikkelmengder og optiske egenskaper). Dette betyr at det er vel så store anvendelsesmuligheter for ferskvannslokaliteter som for fjorder og havområder. Det er foretatt noen få utprøvinger av satellittdata for ferskvann i Norge (Sæbø og medarb., 1988), men i Sverige er dette blitt testet gjennom flere år. Det er laget en oppsummering av endel erfaringer for limniske forhold i Lindell og Sørensen, 1990.



Figur 4. Siktedypsforholdene bestemt ut fra feltdata og TM-data fra Landsat-5 satellitten fra den 31. august 1987. Bildet er laget som en mosaikk over innsjøer i Eikernvassdraget og fra Gjersjøen og Kolbotnvann, (Lindell og Sørensen, 1990).

Figur 4 (over) viser eksempler fra Østlandet hvor man ut fra feltdata og Landsat TM-data har bestemt siktedyp i endel innsjøer. Årsakene til de horisontale variasjonene i de mindre innsjøene er usikkert. Dette kan skyldes flekkvis fordeling av plankton, men det kan også være forhold som bunnrefleksjon eller overflatevegetasjon som gir slike tilsynelatende variasjoner i siktedypet. For de minste innsjøene kan også interferenser ved tilbakestråling fra omkringliggende vegetasjon på land påvirke signalet som satellittsensoren registrerer. Dette er forhold som må undersøkes nærmere, og vil bli undersøkt i et SFT-prosjekt ved NIVA for bruk av satellittdata for ferskvann.

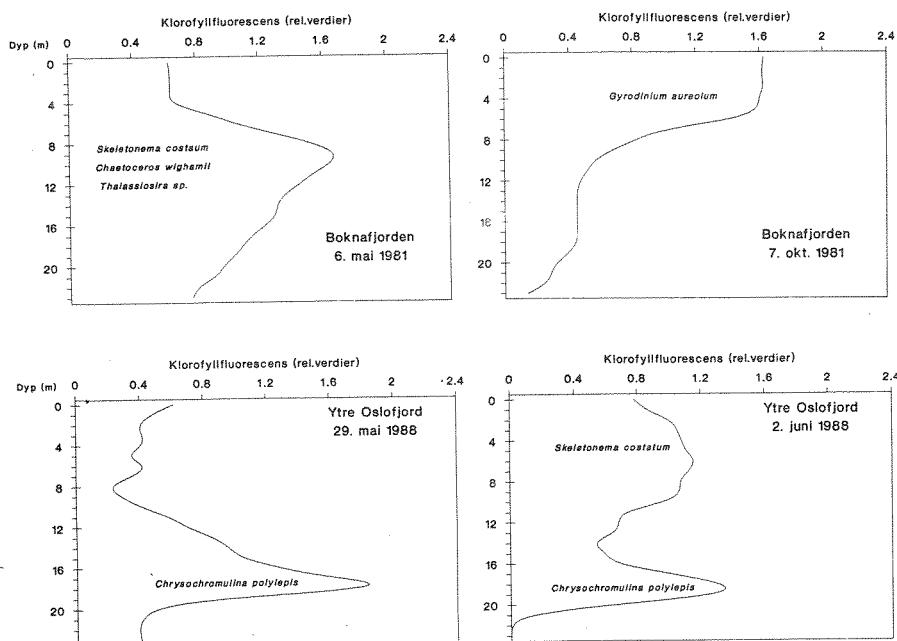
Den enkleste formen for å detektere forandringer er f.eks. sammenligninger av en innsjø's areal. Skal man studere arealutbredelser og kvalitetsforandringer av en innsjø over tid stilles det spesielt store krav til dataenes geometri og bildeelementenes oppløsning. Jo mindre innsjøen er dess høyere krav må stilles til den romlige (geometriske) nøyaktighet. Det er ved undersøkelser i regulerte svenske innsjøer med store gruntvannsområder kommet frem at variasjonene i arealutbredelse gjennom året kan være store pga. vannstandsvariasjoner. Dette er selvfølgelig ut fra en limnologisk synsvinkel viktig ettersom det påvirker hele innsjøens stoffomsetning. Satellittdata burde følgelig egne seg for beregninger av innsjøers areal.

4.1.2 Bestemmelse av planteplankton og klorofyll

Dagens satellittsensorer er ikke spesielt tilpasset måling av algespesifikke parametere som klorofyll-a. I kystområder og innsjøer er det ofte ikke store nok spektralforskjeller mellom planktonalger og andre stoffer til at disse sensorene kan måle klorofyll-a. Man blir avhengig av å benytte de samme modeller som for suspendert materiale og man må i større grad kjenne systemet og bedømme det ut fra andre kunnskaper om et område. For ferskvannslokaliteter kan det ofte være en god samkorrelasjon mellom algevolumen (algevolum) og klorofyll-a, slik at det er mulig å fremstille tematiske kart også for denne parameteren (Sørensen, 1991). På grunn av mindre tilbakespredning (stor absorpsjon) fra planteplankton vil usikkerhetene i vannkvalitetsparameterne bli større enn for områder hvor det f.eks. er suspendert materiale av mer uorganisk natur.

Når forekomsten av en type alger i en innsjø eller i et marint system varierer med dypet over tid medfører det at den spektrale egenskapen ved overflaten kan endres selv om ikke algesammensetning og konsentrasjonen endres. Noen enkel modell for å håndtere disse problemene på finnes ikke. Man må vanligvis nøye seg med en interaktiv metode for en kvalitativ bedømmelse. En slik bedømmelse kan basere seg på at ulike spektralbånd har ulike dybdenedtrengning i vannmassen og på den måten kan man bedømme på hvilket nivå en alge-masse befinner seg. Figur 3 (side 30) viste en slik situasjon hvor det var ulik spektralinformasjon fra TM-kanalene. Her var det mer planktonalger i vannmassene på utsiden av Glommavannet og sannsynligvis under ferskvannslaget som kunne skilles ut med den delen av spektret som trenger dypest ned i vannmassen (blågrønt). Den blå delen av spekteret har også størst absorpsjon pga. klorofyll og dette vil også påvirke tilbakespredningen, som vil bli mindre.

Figur 5 viser eksempler på forskjellige planktonfordelinger i de øvre vannmassene fra Boknafjorden i Rogaland og i Ytre Oslofjord. Man forstår her at signalet tilbake til fjernmålingsensorene ofte kan være vanskelig å relatere til klorofyll-a konsentrasjonen i overflaten.



Figur 5. Eksempler på forskjellige vertikalfordeling av planktonalger målt som klorofyll-a-fluorescens med et profilerende in situ Variosens fluorimeter (Sørensen, unpubl., Erga og Sørensen, 1982). (Fluorescens som relative log. verdier i volt).

Figuren viser en dypfordeling av ulike diatomeer og en overflateoppblomstring av dinoflagellaten Gyrodinium aureolum fra Boknafjorden 1981. Fra Ytre Oslofjord er vist eksempler fra oppblomstringen av Chrysochromulina polylepis i 1988. Denne algen kunne være tilstede dels som dominerende art på 15-18 meters og dels under den harmløse diatomeen Skeletonema costatum. Dinoflagellater som Gyrodinium aureolum, eller Ceratium sp. og Noctiluca sp. kan gi massive overflateoppblomstringer og kan være relativt enkle å detektere med fjernmålingsmetoder, forutsatt brukbare værforhold. En annen algegruppe som er optisk meget karakteristisk er coccolithophoridene som gir en kraftig tilbakespredning av lys (Sørensen og medarb., 1990a).

For innsjøer og kystvannmasser er det en blanding av organiske og uorganiske partikler, samt løste stoffer som gjør spektralinformasjonen ganske uspesifikk. For oceanisk vann kan man se bort fra slike påvirkninger, og her vil klorofyllmolekylet og andre pigmenter

i planktonet dominere spektralsignaturen. Forandringen i reflektansspekteret i slike områder vil derfor i større grad avhenge av klorofyllkonsentrasjonen. Dette ble utnyttet i den tidligere CZCS-sensoren for bestemmelse av klorofyll-a i havområder. Det er nylig publisert endel CZCS-data fra våre havområder (Aiken, 1989), som viser de komplekse fordelinger av vannmasser i våre nærmeste havområder som understreker behovet for fjernmålingsdata. Selv om den kvantitative informasjonen for klorofyll-a ikke er riktig for kystområdene vil de relative fordelingene allikevel gi nyttig informasjon. Slike data har også inngått i vurderinger og beregninger av primærproduksjon i de store havområdene (Kuring og medarb., 1990).

På bakgrunn av erfaringene med CZCS-sensoren gjorde Tassan (1987) en evaluering av TM-sensoren for marine anvendelser. Konklusjonen var at den hadde potensiale for å gi kvantitativ informasjon om fundamentale parametere som klorofyll og suspendert materiale. Det har likevel vist seg at klorofyllbestemmelser basert på prinsippet om forholdet mellom en grønn og blå kanal er vanskelig i kystvannmasser i nærområdene til større ferskvannstilførsler pga. de høye konsentrasjoner av ikke-planktoniske løste og partikulære stoffer. Dette ble bl.a. vist for de flybårne spektrometerdata testet i Skagerrak i mai 1989 (Pettersson og medarb., 1990a). Vann som domineres av gulstoff eller humusstoffer vil påvirke reflektansen i den blå delen av spekteret (Carder og medarb., 1989). Ved innhold av mye uorganiske partikler sammen med organiske stoffer blir reflektansspekteret mindre spesifikt, og vanskeliggjør tolkning og bruk i kvantitative sammenhenger. Et slikt måleprinsipp er derfor vanskelig å benytte i innsjøer og kystvannmassene til bestemmelser av klorofyll-a.

Collins (1983) benyttet satellittdata sammen med feltdata for å beskrive tilførsel, fordeling og transport av suspenderte sedimenter i Bristol Channel. Ahlnäs og Royer, (1989a,b) har evaluert forskjellige satellittsensorer for kartlegging av suspendert materiale i Alaska Gulfen, og fant at både TM- og MSS-data detekterte detaljer i virvler som hadde lave konsentrasjoner av suspendert materiale. En annen viktig anvendelse kan være å benytte arkiverte satellittdata for å foreta tidsserieanalyser av ulike oceanografiske prosesser (Dean og medarb., 1989). For slike anvendelser kan nevnes at store datamengder finnes tilbake til 1972 fra MSS-sensoren i Landsat. Under perioden med Landsat-3 og 4 (1978-84) var det endel problemer med denne sensoren (Lindell, T., pers. med.), så her er datamengden og kvaliteten noe dårligere. Hortsmann (1988) har dokumentert nytteverdien av både AVHRR-, CZCS- og Landsat-data i studier av kystvannsprosesser i Østersjøen. Slike studier kan være viktig i f.eks. et område som Skagerrak for bedre å forstå de sirkulasjonsprosesser som pågår her.

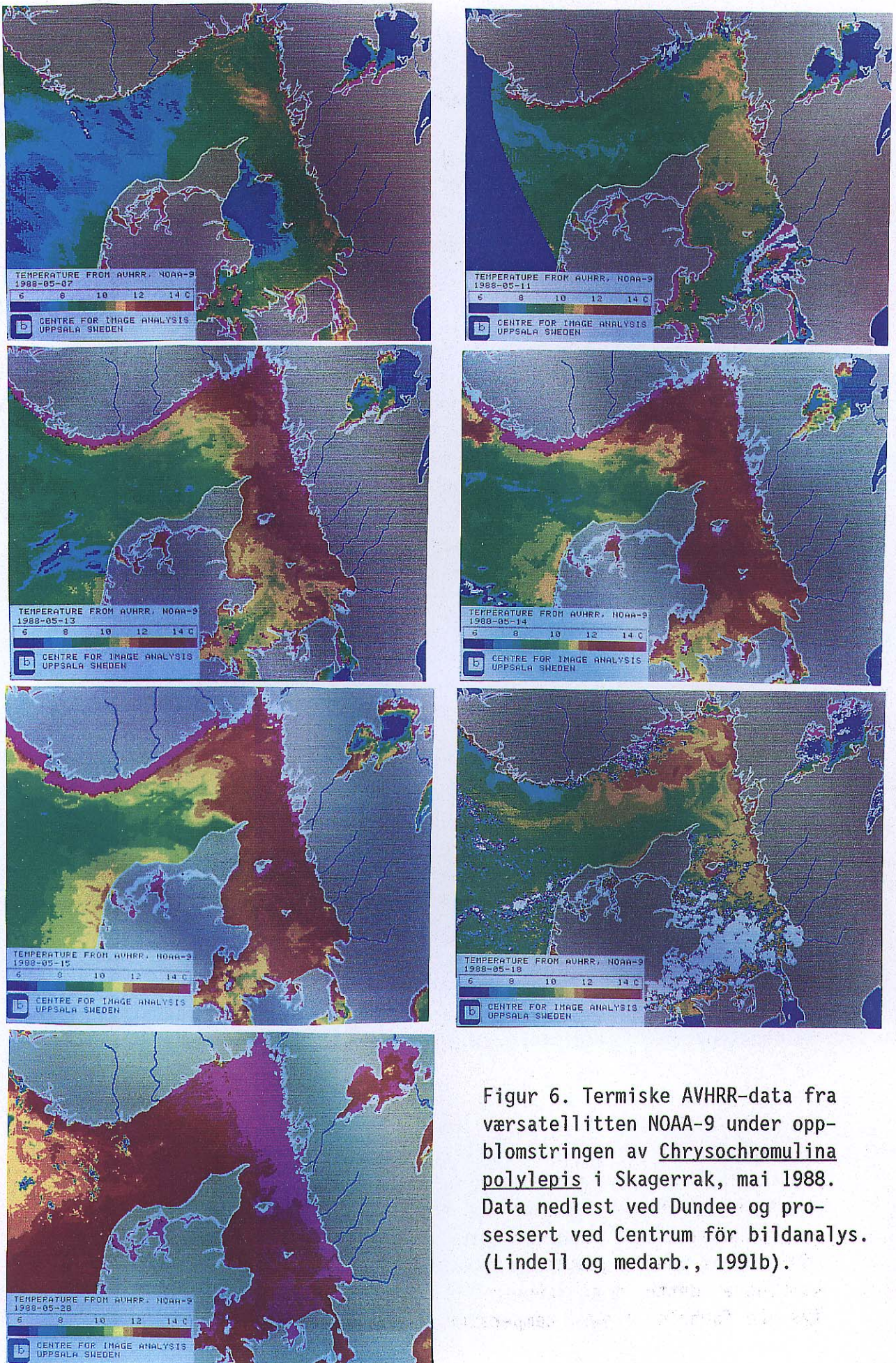
4.1.3 Væravhengighet, relative kartlegginger og datakombinasjon

Oppblomstringen av C. polylepis i Skagerrak i 1988, som fikk store konsekvenser for havbruksnæringen, var meget vanskelig å detektere med sensorer for synlig lys (Lindell og medarb., 1991b). De optiske forskjellene i vannmasser som skulle inneholde denne algen kontra om-liggende vannmasser var svake. C. polylepis hadde liten biomasse og oppblomstringen utviklet seg slik at algen ble adaptert til større dyp (Jfr. fig. 5). Dessverre foreligger det ikke et godt nok feltmateriale fra denne situasjonen for å gjøre en god kvantitativ evaluering.

Under denne oppblomstringen ble termiske AVHRR-data benyttet for å kartlegge spredning av vannmasser som man antok å "inneholde" alger eller "toksinholdig" vann. Det oppgis (Dundas og medarb., 1989) at det var god sammenheng mellom den termiske fronten og de høyeste alge-konsentrasjonene. Man kunne ut fra fjernmålingsdata og in situ observasjoner lage prognoser for spredningen av disse vannmassene på Skagerrakkysten (Johannessen og medarb., 1989). På grunnlag av dette kunne det igangsettes tiltak for evakuering av anlegg eller starte nedslakting. Figur 6 viser en sekvens med termiske AVHRR-data fra Skagerrak i mai 1988 som beskriver transporten og spredningen av vannmassene under oppblomstringen. Dette var en typisk situasjon hvor fjernmålingsdata viste sin nytte i kombinasjon med andre data.

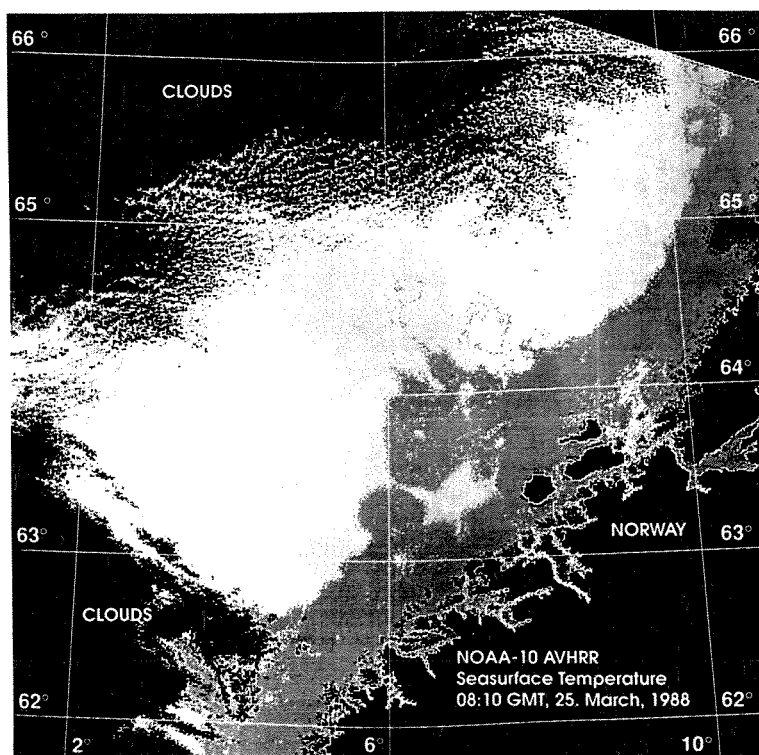
I Norge har man forøvrig innen havbruksnæringen demonstrert anvendelser for både AVHRR- og TM-data for kartlegging av temperaturforhold, både i egnethetsstudier for akvakulturanlegg (Kögeler og Dahle, 1990), eller for å verifisere andre data og finne årsakene til akutt fiskedød (Rosseland, 1990). Temperaturforholdene har betydning for underkjøling/ising, og områder med raske temperaturskiftninger kan få konsekvenser for visse fiskeslag (laks), mens andre tåler mer (regnbueørret). Slike skiftninger nedsetter forsvarsevnen og øker faren for utbrudd av sykdommer. Lokale strømforhold innen en region med mange oppdrettsanlegg er viktig å få kartlagt bl.a. for å redusere mulighetene for overføring av sykdommer mellom anlegg. Fjernmålingsdata kan bidra med data for slike kartlegginger.

Innen fiskerier benytter mange land satellittdata for å skaffe ekstra informasjon relatert til fiskeressursene (Pettersson og medarb., 1989). Fjernmåling benyttes her indirekte for å observere fysiske og biologiske overflatefenomener og relatere disse til tilstedeværelsen av fiskebestander. Her må man altså benytte kunnskaper om visse fiskearters vandringsmønster, lek, fødevaner og oppvekstområder og kombinere dette med havoverflatens biologiske (f.eks. plankton) og fysiske forhold (f.eks. temperatur og optiske forhold).



Figur 6. Termiske AVHRR-data fra værsatellitten NOAA-9 under oppblomstringen av *Chrysochromulina polylepis* i Skagerrak, mai 1988. Data nedlest ved Dundee og prosessert ved Centrum för bildanalys. (Lindell og medarb., 1991b).

Bruk av termiske AVHRR-data som dekker store områder krever stor påpasselighet ved kontroll av data for skyer og dis, som vil kunne interferere og fremtre som kaldere områder. Man må her benytte synlige og nære infrarøde kanaler for å "oppdage" og deretter maske vekk slike områder. Kvalitetssikring av slike data blir meget viktig, og hvis man ikke er påpasselige med dette er det lett å få frem strukturer som ikke skyldes fenomener i vannmassene. Figur 7 viser et termisk AVHRR-bilde fra Møre-kysten hvor skydekket ligger ute i havet, mens det er klarvær nær kysten. Se også skyinterferenser på noen av bildene i figur 6. De skyklassifikasjonsalgoritmer som forøvrig benyttes til å lage "Quick-look" for vurdering av datakvaliteten (inkl. skydekke) til AVHRR-sensorene, synes å være for dårlig for våre breddegrader og bør forbedres.

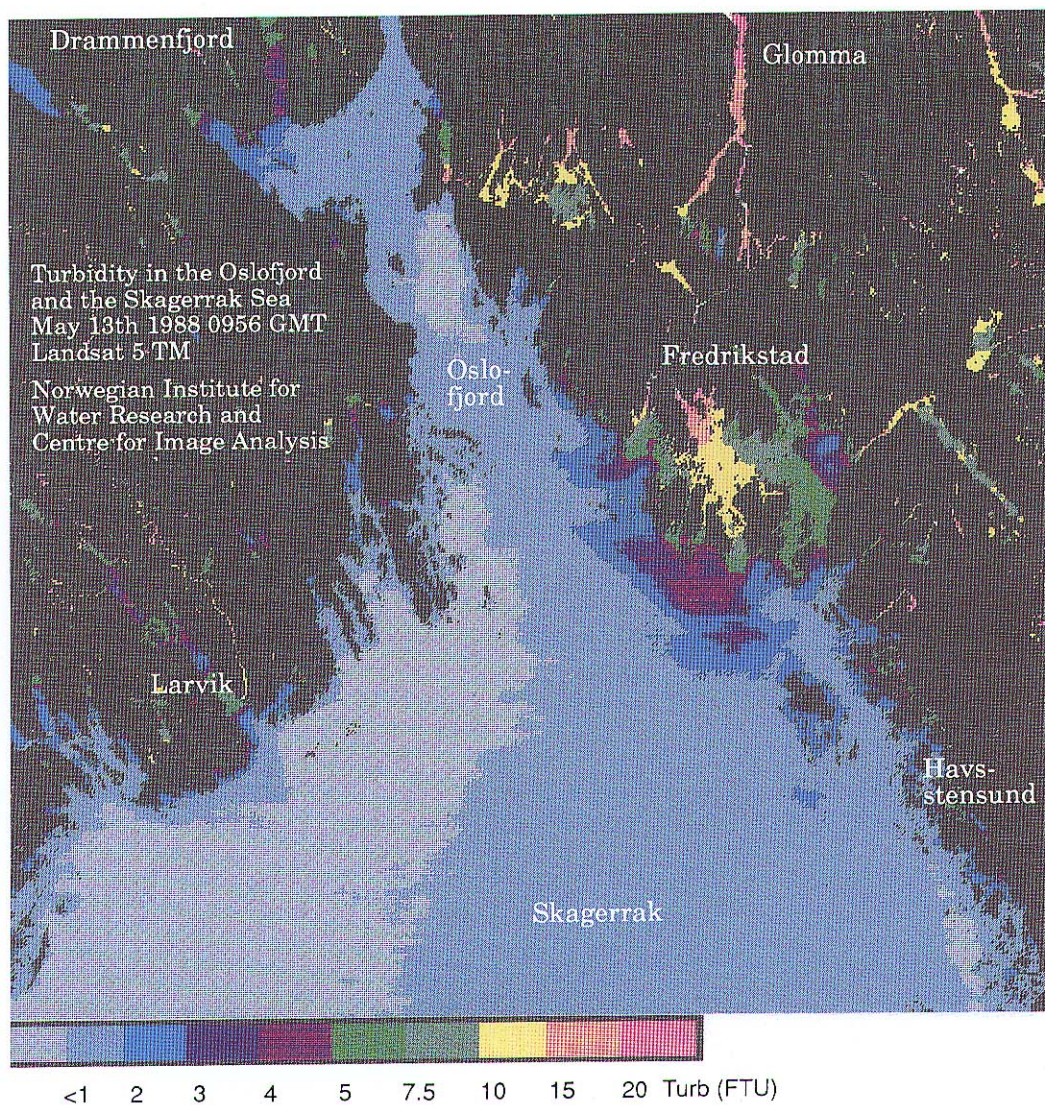


Figur 7. Termisk AVHRR-bilde fra Mørekysten med de ytre deler av Trondheimsfjorden, basert på NOAA-data fra Tromsø Satellittstasjon og prosessert ved Nansen Senteret for Miljø og Fjernmåling (Haugan og medarb., 1991). Lys gråtone angir varmt Atlanterhavsvann (7°C) og grått kaldt kystvann (4°C).

Gode kartlegginger kan gjøres av relative fordelinger av f.eks. turbiditet med data fra Landsat og SPOT og temperatur med Landsat. For studier av erosjonsproblematikken og ved f.eks. langvarige mudrings-, dumping eller anleggssarbeide i et vassdrag kan satellittbilder bidra til kunnskap om spredningens utstrekning og potensielle kontamineringsområder. Studier av mengden erodert materiale i vassdragene kan kobles mot aktiviteter på land som f.eks. høstpløying. Det er nylig gjennomført en studie for bruk av satellittdata i en slik sammenheng (Grønnlund og Solberg, 1991). Slike informasjoner bør man forsøke å koble til observasjoner fra vannforekomsten, for derved å sette aktiviteter på land i bedre samband med vannforurensninger. Figur 8 viser et turbiditetsbilde over hele Ytre Oslofjord og deler av nordlige Skagerrak, samt vassdragene i området. Dette er meget informative oversiktsbilder hvor man kan se land, ferskvannsforkomster og de marine systemene i sammenheng.

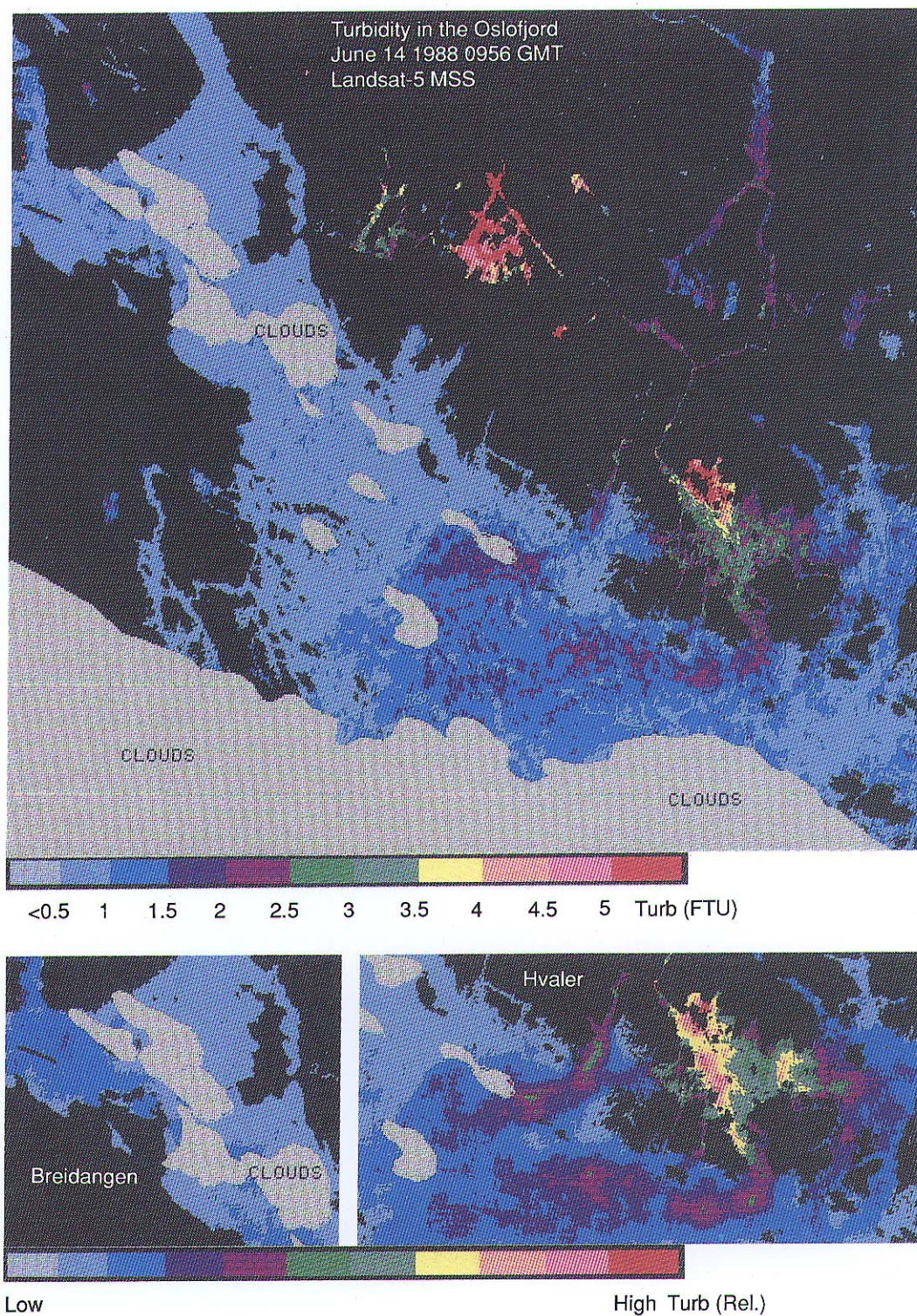
Bestemmelse av forandringer i vannkvalitet mellom to tidspunkter er betydelig mer komplisert (Jfr. kap 4.1.1) og mange ganger må man her nøye seg med en kvalitativ sammenligning, der kunnskapen fra feltdata ligger til grunn for bedømmelsen. Det kan imidlertid påpekes at man kan få mye interessant kunnskap om kvalitetsforandringer hvis bildene normeres (Lindell og Sørensen, 1990). Innen en gitt område har innsjøer ofte relativt til hverandre en stabil kvalitet over tid. Man kan derfor praktisk talt uavhengig av sesong og den hydro-meteorologisk situasjon legge basisnivået i et bilde på samme nivå som et annet bilde ved et senere tilfelle (f.eks. innsjøenes medianverdi for en variabel settes like). På denne måten vil eventuelle innsjøer som har forandret seg avvike fra et normalt mønster i et digitalt differansebilde mellom to situasjoner. Kunnskap om hvilke innsjøer eller hvilket område i en innsjø som er spesielt utsatt kan derved fremskaffes.

Satellittdata gir også mulighet for kartlegging av bunn-dyp og bunnforhold, men i våre kyst- og innlandsvann finns det en rekke begrensninger. For det første gjør de komplekse bunnforholdene med morenebunn (småtopografisk) og varierende mengder av begroingsalger at det blir vanskelig uten betydelige feltkunnskaper. Videre vil mye partikler og løste stoffer i vannet vanskeliggjøre slike kartlegginger under vann. I klare vann og med jevn bunn f.eks. langs sandstrender i subtropiske områder kan man oppnå bra resultater for kartlegging av dyp (Lindell og medarb., 1991a, Østerlund, 1988), og for identifikasjon av begroingsalger (Lindell og medarb., 1991a). Man savner en vurdering av mulighetene for dette i Norge, men teoretisk sett er det veldig begrensede områder som kan komme i betraktning for en slik kartlegging.



Figur 8. Turbiditetsfordelingen i Ytre Oslofjord og omliggende vassdrag den 13.mai 1988. Basert på feltdata og Landsat 5 TM-data (Sørensen og Lindell, 1990).

Den største svakheten med optiske satellittdata er væravhengigheten. De høyoppløselige data har også en "lav" repetisjonsfrekvens for den enkelte sensor. På grunn av dette kan det gå flere uker uten at man får gode data. På våre breddegrader er det mye skyer, tåke og dis som gjør at man får betydelig mindre data enn i mer sky-frie områder som f.eks. Middelhavet og Floridakysten. Nå betyr ikke dette at man ikke til tider kan få frem nyttig informasjon. Dette avhenger av hvor hyppig man trenger å registrere et område, og hvordan skydekket fordeler seg. I figur 9 er vist et eksempel på en situasjon med endel skyer, der det fortsatt finnes mye informasjonen i dataene (bildet).



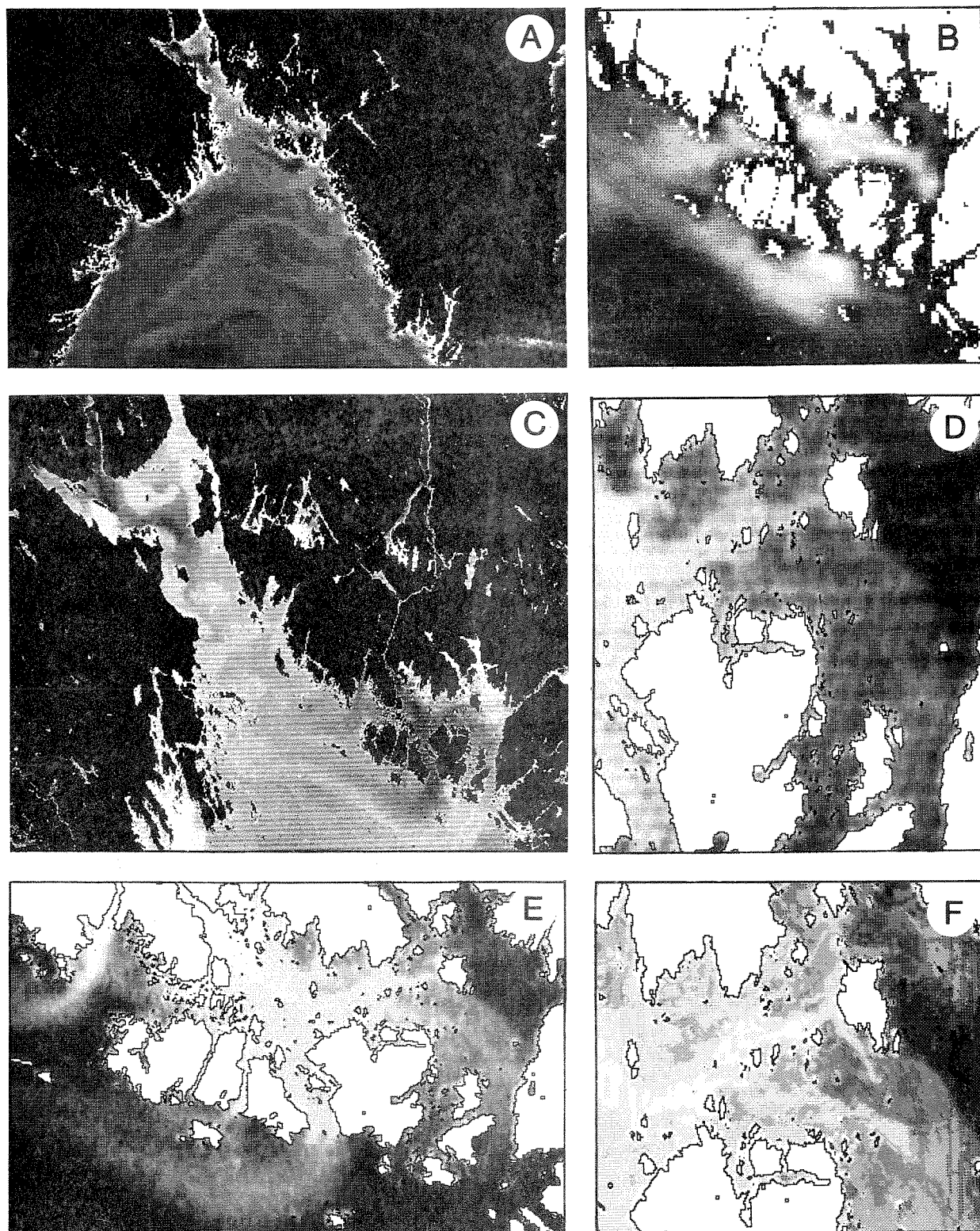
Figur 9. Satellittbilde med MSS-sensoren fra den 14. juni 1988 i Ytre Oslofjord fra en situasjon med endel skyer. Øvre bilde er kalibrert i turbiditetsverdier (FTU), mens de nedre er i relative verdier (Sørensen og Lindell, 1990). Bildebehandling ved NIVA og Centrum för bildanalys.

I de kalibreringsprosjekter som hittil er blitt utført, har man tatt for seg en og en sensor. Når man får erfaring og har kalibrert flere typer sensorer bør man i en operativ sammenheng benytte alle tilgjengelige satellittdata. Helst bør man ha muligheter for å kjøpe alle brukbare og skyfrie data. Man bør altså ha en så hyppig observasjonfrekvens som mulig, og kombinasjon av data fra jordressurssatellitter og værsatellittdata er ofte en mulighet.

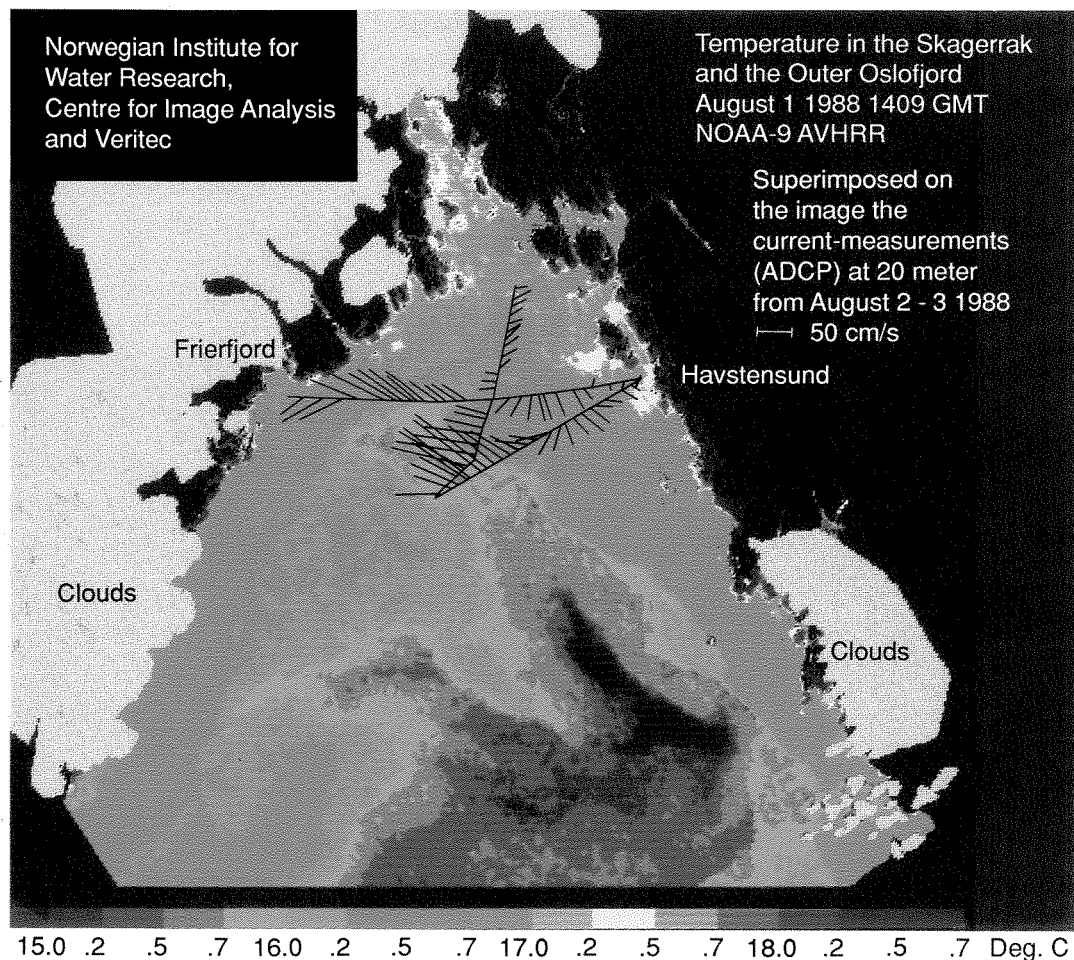
AVHRR-data (NOAA) kan benyttes til relative fordelingsbilder i områder med mye suspendert materiale (Sørensen og medarb., 1989). Prangsmå og Roozkrans (1989) har også brukt AVHRR-data for en mer kvantitativ bestemmelse og opererte med 4 konsentrasjonsintervaller i området 1-100 mg/l. Dette er forholdsvis høye konsentrasjoner sammenlignet med norske forhold, så dette må testes nærmere for våre vannforekomster. Forløpig må man begrense bruken av optiske AVHRR-data til relative fordelingsbilder. Et annet forhold som kommer inn er at disse dataene ofte interfereres av reflektert sollys ("sunlint").

Ved bruk av AVHRR-data vil vertikalopptak gi den beste geometriske oppløseligheten noe som er nødvendig i de nære kystområdene (Sørensen og medarb., 1989). Dette begrenser de geometrisk gode scenene til ca. 10 per uke for to satellitter for Sør-Norge og noen flere lenger nord. Med nattpasseringer (kun temperatur) blir det noen flere. En sammenligning av geometriske og radiometriske muligheter og begrensninger med sensorene hos NOAA, Landsat og SPOT er beskrevet av Sørensen og medarb., 1989. Lavoppløselige data er ikke anvendbare for trange fjorder og kun for de største innsjøer (Mjøsa, Vänern, Vättern). De høyoppløselige data er derimot godt egnet for å studere småskalaspredning som er meget vanskelig og ressurskrevende å studere med konvensjonelle metoder.

I figur 10 er sammenstilt noen termiske fordelings- og detaljbilder (småskalaspredning) av suspendert materiale basert på flere typer sensorer. Kombinasjoner med de mer lavoppløselige AVHRR-data som leses ned fast 5 ganger pr. døgn kan i enkelte sammenhenger være nyttig. Slike data vil f.eks. utfylle den mer storskala spredningen når høyoppløselige satellittdata ikke er tilgjengelige (Sørensen og medarb., 1989, Håkansson, 1989). Håkansson (1990) fant at under en periode på ca. 6 måneder kunne man ca. hver 4 døgn få delvis skyfrie AVHRR-scener i den nordlige delen av Skagerrak for bruk til kartleggingformål.



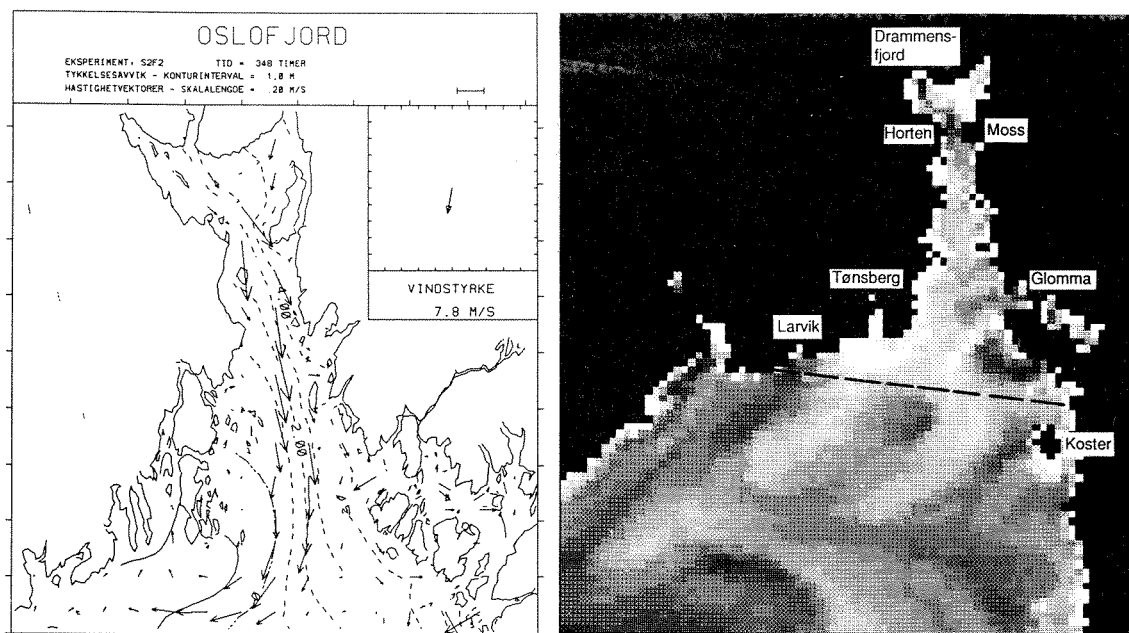
Figur 10. Relative fordelingsbilder fra Skagerrak, Ytre Oslofjord og detaljbilder fra Hvalerområdet den 13. mai 1988. Data fra den termiske AVHRR- (A) og TM-kanalen (C), samt de synlige kanalene (Ch1-Ch2) hos AVHRR-sensoren (B) og kromatisitetsbilder fra TM- (D), MSS- (E) og HRV-sensoren (F), (Sørensen og medarb., 1989).



Figur 11. Termisk AVHRR-bilde sammenstilt med strømmålinger (ADCP) fra Skagerrak den 1. august 1988 (Sørensen og medarb., 1990b, og Hackett og Dahl, 1989). Kaldtvannsutbredelsen inn mot Ytre Oslofjord verifiseres av ADCP-målingene.

AVHRR-data gir informasjon om de mer storskala prosessene som ofte er viktig for de mekanismer som igjen styrer spredning og transport i fjordene, og kombinasjon av slike data med strømmålinger gir nyttig tilleggsinformasjon. Figur 11 (over) viser et temperaturbilde fra Ytre Oslofjord og Skagerrak kombinert med strømmålinger (ADCP) fra to snitt i den nordlige delen av Skagerrak. Man ser at den termiske signaturen i overflaten verifiseres av ADCP-målingene. Denne datakombinasjonen viser at man ved denne situasjonen hadde en antisyklonisk virvel i Kosterområdet mot Havstensund. Man får her en god gjensidig bekreftelse av dette "fenomenet", samtidig som satellittdataene gir informasjon om storskalafenomenet i hele nordlige delen av Skagerrak.

Satellittdata vil også være et viktig verktøy for verifikasjon av spredningsmodeller og både lavoppløselige og høyoppløselige data er blitt benyttet til dette i Ytre Oslofjord (Sørensen og medarb., 1990b). Det ble også vist at satellittbilder og modellresultater gjensidig kan utnyttes til å forstå dynamikken i den enkelte situasjon. Figur 12 viser et eksempel på hvordan satellittdata kan benyttes til verifikasjon av en numerisk transportmodell.



Figur 12. Modellresultater (strømretning) verifisert med termiske AVHRR-data fra Ytre Oslofjord den 15. mai 1988. Modellresultater produsert ved VERITEC og satellittbilder ved NIVA og Centrum för bildanalys (Sørensen og medarb., 1990b).

For ferdigutviklede operasjonelle modeller vil fjernmålingsdata være viktige for oppdatering (assimilering). Nødvendig hyppighet av slike oppdateringer avhenger av området og transportprosessene. Skagerrak har f.eks. en "hukommelse" på ca. 3 uker hvilket gjør at man kan greie seg med ett satellittbilde pr. uke (L.P. Røed, NERSC, pers.med.). Med hukommelse menes at man f.eks. kan spore en spesiell hendelse som f.eks. innstrømming av Atlanterhavsvann til Skagerrak i inntil ca. 3 uker. Ytre Oslofjord har derimot en "hukommelse" på ca. 1 uke og her trengs fjernmålingsdata ca. 2 ganger pr. uke. Biologisk styrte prosesser vil derimot kunne forandre seg hyppigere. Ved slike oppdateringer er det ikke nødvendig å dekke hele modellområdet med data. Hvorvidt fjernmålingsdata kan benyttes som inngangsdata i en spredningsmodell (randbetingelser) er foreløpig lite undersøkt.

4.2 Erfaringer med passive flybårne spektrometere og scannere

Erfaringene med flybårne spektrometre strekker seg mange år tilbake, og av de tidligere systemene kan nevnes ATM-spektrometeret, som ble brukt for vannkvalitetskartlegging i bl.a. Swansey Bay, England med gode resultater (Collins og Pattiaratchi, 1984, Rimmer og medarb. 1987). Rene flyfototeknikker vil bare egne seg for arealmessige kartlegginger, da digitale data er viktigere i denne sammenheng. De første erfaringer med de nyere "diodearray"-spektrometere strekker seg ca. 8 år tilbake, og de seneste er fra utprøvingen i EF/ESA (EISAC'89 - European Imaging Spectrometry Airborne Campaign) og fra Norge (NORSMAP'89 - Norwegian Spectroscopy for Mapping and Monitoring of Algal Blooms and Pollution). I disse evalueringskampanjene ble både FLI-, CASI- og GER-spektrometere testet, hvorav CASI fikk en spesiell testing i Ytre Oslofjord og Skagerrak (Se flere arbeider av Pettersson og medarb., 1990). GER- og FLI-instrumentene fikk en endags utprøving i Ytre Oslofjord.

4.2.1 Bestemmelser av klorofyll-a og suspendert materiale

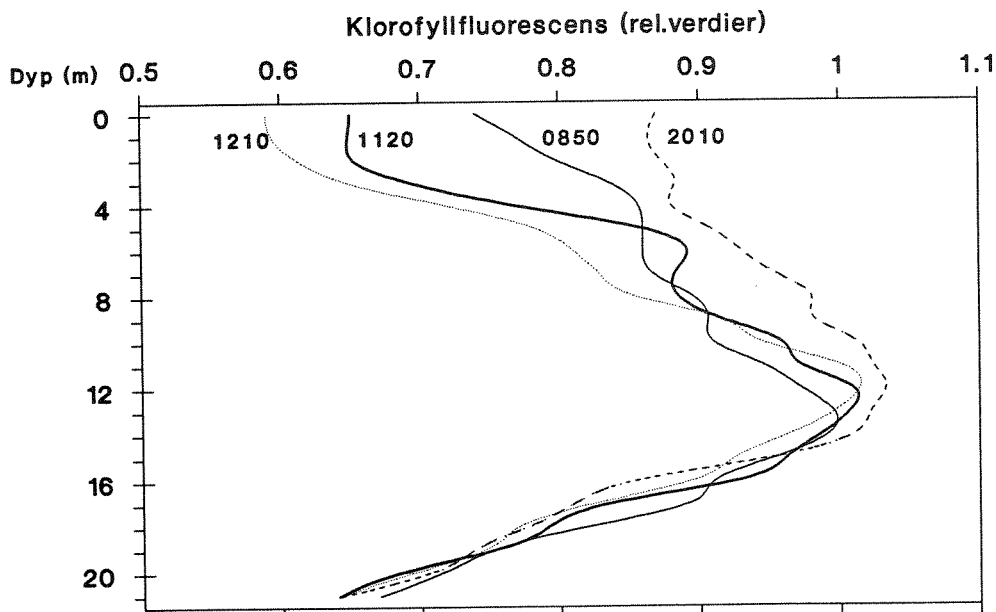
For utprøvingen under EISAC'89 fikk man for FLI- og GER-instrumentene ikke den forventede datakvalitet spesielt over vann pga. bl.a. dårlige prekalibreringer av instrumenter (Bodechtel, 1990). FLI ble testet utenfor Helgoland for klorofyll-a og andre vannparametere, og for spektrometerdataene i denne testingen fant man kalibreringsfeil på FLI-spektrometeret på 5 nm og spektraldata lavere enn 480 nm syntes å være gale (Moore og Aiken, 1990). Dette har vært beskrevet tidligere av Borstad og medarb. (1985), men er altså fortsatt et problem.

Sammenhengen mellom fluorescens-signalet (FLH) og in situ bestemt klorofyll-a ble her testet i et konsentrasjonsintervall på ca. 8-18 $\mu\text{g/l}$. FLH-signalet synes for visse deler av materialet å følge klorofyllverdiene med en oppløselighet på 2-3 $\mu\text{g/l}$, men enkeltavvik opp mot 6-8 $\mu\text{g/l}$ ble registrert. Dette er for store avvik for at man skal si at metoden gir tilfredstillende kvantitative bestemmelser. Feil i prøvetagning pga. flekkvis fordeling av plankton kan også forårsake disse avvikene så man skal ikke legge for stor vekt på enkeltavvik. Et større materiale må legges til grunn for bedømmelsen. Følsomheten for bestemmelse av klorofyll-a ligger omkring 1 $\mu\text{g/l}$, som er tilfredsstillende lavt for overvåkingsformål. Gower (pers. med.) antyder en deteksjonsgrense på ca. 0.2 $\mu\text{g/l}$ for FLI-spektrometeret.

Under CASI-testingen i Norge (NORSMAP'89) var konsentrasjonen av klorofyll-a i testområdet lave (< 5 $\mu\text{g/l}$), og man fant svake statistiske sammenhenger. For visse deler av overflyvningen i

Skagerrak og Ytre Oslofjord viste FLH-signalet en rimelig storskala samvariasjon med klorofyllverdiene (Pettersson og medarb., 1990a). I selve Hvalerområdet hvor Glomma påvirker sterkt, bryter samvariasjonen sammen (sannsynligvis pga. effekter fra andre partikler). Bruk av forholdstall mellom blått og grønt lys (BGR-metoder) på CASI-dataene fungerte bra for deler av dataene i Skagerrak (Arendal-Hirtshals), men ikke i nærrområdene til Glomma hvor påvirkningen av løste stoffer og partikler er stor.

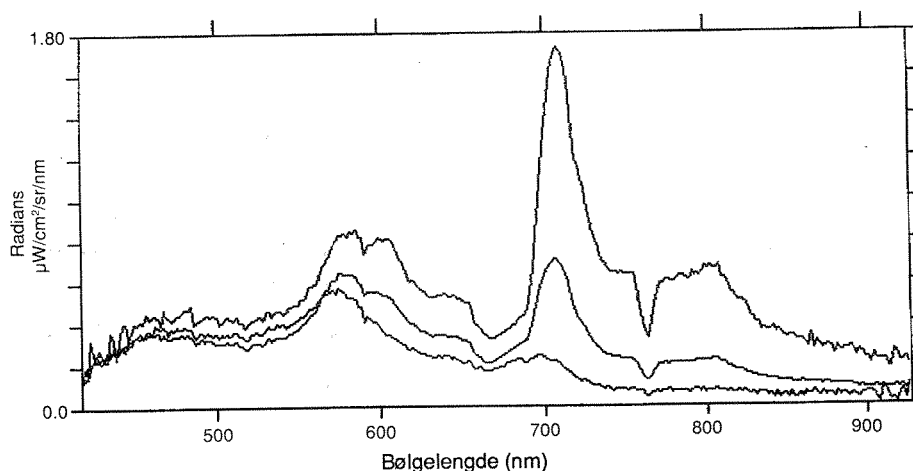
Klorofyll-fluorescensen (FLH-signalet) fra vannmassene kommer fra dyp maksimalt ned til 1-2 meter, mens blått og grønt lys vil i "rent" vann komme fra dyp helt ned til 5-20 meter, slik at informasjon om eventuelle planktonmengder vil kunne bli noe forskjellig fra disse to metodene (Jfr. figur 5). Klorofyllfluorescensen er meget følsom for planktonsammensetning, fysiologiske forhold, lyshistorie osv. Dette signalet har derfor ikke et gitt og veldefinert kvantitativt forhold til konsentrasjonen av klorofyll-a. Det er vel kjent at man får store variasjonene i klorofyllfluorescens-signalet relativt til klorofyll-a, indusert med kunstig lys (blått). Figur 13 viser vertikalfordeling av kunstig stimulert klorofyllfluorescens målt in situ, og hvordan fluorescensen ved overflaten kan variere på samme stasjon over en periode på 12 timer, med tilnærmet konstant klorofyllmengde. Hvis man ikke tar hensyn til slike faktorer kan man få feil i klorofyllbestemmelsen ved overflaten med en faktor 2 (K. Sørensen, upubl.).



Figur 13. Vertikalfordeling av in situ klorofyllfluorescens i Boknafjorden i Rogaland juli 1981 over en periode på ca. 12 timer (Sørensen, upubl.). Klorofyllmengden var tilnærmet konstant.

De største variasjonene i fluorescensen kan unngås ved å fly midt på dagen og i et kortere tidsintervall. Det er mulig man kan kompenseres for variasjonen med matematiske modeller. Hvorvidt naturlig stimulert klorofyllfluorescens varier mindre er lite undersøkt.

Et annet forhold som kommer inn er variasjon i fluorescensstoppens spektrale plassering. Forbes og medarb. (1990) fant at under en oppblomstring av Gonyaulax spinifera lå fluorescensmaksimum ved 705-710 nm (figur 14). Dette er en forskyvning på 20-25 nm fra den "teoretiske" verdien (680-685 nm). Hvis slike fenomener er vanlige får dette stor betydning for de metoder man må benytte for å beregne klorofyll-a mengden, og det blir vanskeligere å håndtere slike data automatisk. Tilsvarende variasjoner i fluorescensmaksimum ved høye klorofyllkonsentrasjoner er beskrevet av Lin og medarb., 1984, Vos og medarb., 1986 og nylig av Dekker og medarb., 1991. Gower (unpubl.) har også vist at spektralsignaturen, målt med et IOS-spektrometer (Walker og medarb., 1974), på ulike algekulturer ga spesielle avvik i spekterene for blågrønnalger kontra diatomeer og grønnalger. Her er det derfor behov for å skaffe mer basiskunnskap om spektralsignaturer til dominerende planktongrupper i kultur og under naturlige forhold.



Figur 14. Radiansspekter for en oppblomstring av Gonyaulax spinifera på vestkysten av Vancouver Island, på den Canadiske vestkyst. Den karakteristiske klorofyllfluorescensstoppen ligger ved 705-710 nm (Forbes og medarb., 1990).

Figur 15 viser dynamikken i denne algeoppblomstringen i områdene omkring akvakulturanlegget "Vernon Bay" fremstilt som et falskfargebilde (RGB) basert på tre kanaler og et klorofyllfluorescensbilde (FLH) hvor man har benyttet fluorescensstoppen ved ca. 710 nm. Denne algeoppblomstringen er også beskrevet i Gower og Borstad, 1991.



Falskfargebilde (RGB)
sammensatt av tre
bølgelengder:

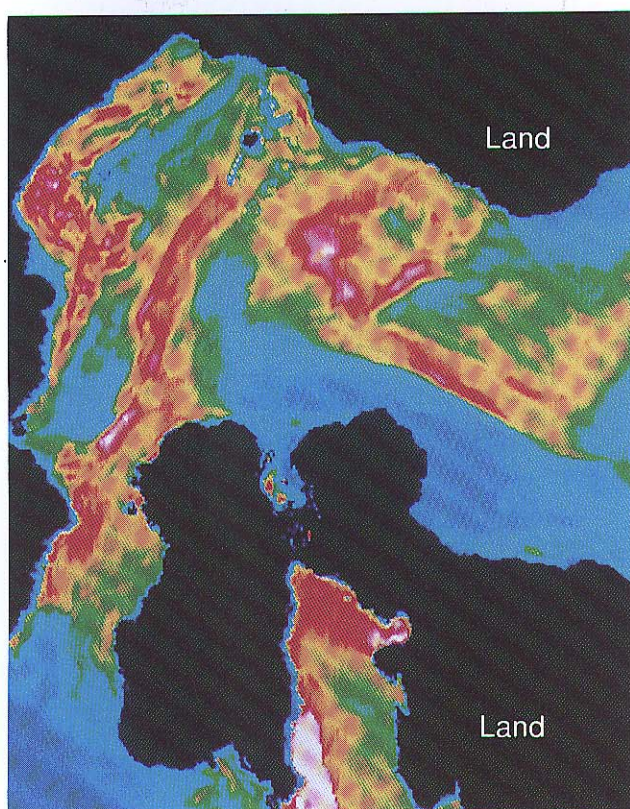
Rød: 701.4–713.9 nm

Grønn: 746.1–756.8 nm

Blå: 688.9–697.7 nm

Akvakulturanlegget
"Vernon Bay" kan sees
i øvre venstre kant
av bildet.

Målestokk: ca. 1:10000



Samme område bearbeidet som
et pseudo-farget bilde av
klorofyll-a-fluorescens-
signalet (FLH) ved ca. 710 nm.

Gult og rødt er høye FLH-
verdier, og indikerer
områder med mye plankton-
alger. De høyeste verdiene
(røde) sammenfaller med
maksimum intensitet i RGB-
bildet.

Målestokk: ca. 1:10000

Figur 15. Flybårne spektrometerdata fra en oppblomstring av dino-
flagellaten Gonyaulax spinifera i Barkley Sound på vest-
kysten av Vancouver Island, Canada den 4. september 1990,
(Forbes og medarb., 1990). Tatt med Borstad Associates
Compact Airborne Spectrographic Imager - CASI.

Informasjonsinnholdet fra CASI-dataene for å beskrive mengden av suspendert materiale ble også studert under NORSMAP'89, men feltmaterialet er for lite og dekker for små konsentrasjonsintervaller for å kunne bedømme dette tilfredsstillende. Refleksjonspekterene ga maksimum omkring 585 nm og benytter man denne toppen relativt til 790 nm fikk man en usikkerhet i bestemmelsen i størrelsesorden ± 1 mg/l. Spektralsignaturen målt med et ikke billedannende spektrometer (IOS) viste at f.eks. vann fra Iddefjorden avviker spektralt, i den forstand at de ikke passer inn i en slik enkel algoritme. Man må sannsynligvis konstruere algoritmer som i større grad ivaretar spektralinformasjonen fra flere deler av spektret når spektralsignaturene fra vannmassene i et område blir meget forskjellige.

På samme måte som for satellittdataene må man for å kunne kvantifisere mengder direkte fra flydata med hjelp av ulike modeller benytte absolutte radiansverdier. Dette krever nøye kalibrering av sensorene og måling av bl.a. innstråling (irradians). De foreløpige erfaringer viser at absoluttkalibrering fortsatt kan være et problem. Når man får kontroll med dette og får laget rutiner og modeller for de nødvendige korreksjoner bør det være mulig uten bruk av feltdata å predikere klorofyll-a verdier med en nøyaktighet på 30-40 % (Borstad, pers. med.). Dette er basert på de foreløpige erfaringer, og er ikke testet på noe større materiale. Status pr. idag er at man fortsatt må benytte noen kalibreringspunkter (feltdata) for å få absolutte konsentrasjoner av klorofyll-a (Pettersson og medarb., 1990a).

Automatisk bearbeiding av spektrometerdata vil bl.a. involvere atmosfærekorreksjon, og etter NORSMAP'89 kampanjen har man arbeidet med en slik metode (Frette og Pettersson, 1991). I dette arbeidet presenteres også noen testflyvninger i Norge fra mai 1990 med et tyskeid CASI-system. Bildemodusdataene ble betydelig bedre enn fra utprøvingene i 1989, men testen viste også at endel av dataene ble sterkt forringet av lavt og uregelmessig skydekke, turbulens og tildels solglitter. Dette bekrefter det som ble funnet i 1989 at også flybårne data til tider blir sterkt påvirket av værforholdene.

4.2.2 Spektral og romlig informasjon fra spektrometerene

De flybårne sensorene har ikke den samme geografiske dekningsområde som satellitt, men de har en mye større fleksibilitet mhp. dekning til rett tid og under gode (skyfrie) forhold. Den geometriske (romlige) oppløseligheten og dekningen avhenger av flyhøyde og hastighet. På CASI-systemet har man muligheter for å skifte linsene i systemet og operere med ulike integrasjonstider, og dette vil også påvirke oppløselighet og dekning. Typiske verdier for oppløselighet og dekning

man kan oppnå er hhv. 2-3 meter og 1-5 km (Jfr. tabell 2). CASI-systemet kan enkelt monteres på fly med kameraluke for vertikal-fotografering (Pettersson og medarb., 1990h).

En ulempe med bildedannende spektrometerdata er de store datamengdene som produseres, og som helst skal behandles så fort som mulig ("sann tid") for god operativ bruk. I praktisk bruk må man derfor benytte f.eks. bare 15 kanaler som er tilpasset de deler av spekteret som har størst informasjonsinnhold i forhold til det fenomen som skal undersøkes. Nå mister man sannsynligvis ikke så mye informasjon pga. av dette, hvis man allerede kjenner spektralegenskapene og skal foreta kvantitative bestemmelser. Sathyendranath og medarb., (1989) foretok en teoretisk betraktning omkring dette og fant at ved bruk av fem velvalgte bølgelengder mistet man ikke "nøyaktigheten" i mulighetene å skille ulike stoffer mot å bruke informasjonen fra et kontinuerlig spekter. De studerte mulighetene for å bestemme klorofyll-a i kystvann med en trekomponent modell som tar hensyn til planteplankton, ikke-klorofyllholdige partikler og oppløst organisk stoff. Oppløst organisk stoff var vanskeligst å bestemme, og dernest planteplankton.

De fant derimot at det var meget viktig å ha bølgelengder ned mot 400 nm for å kunne skille planteplankton fra løst organisk stoff. Betydningen av oppløst organisk materiale i de biokjemiske prosesser i havet synes stadig å bli viktigere, og det er påkrevet å få forbedret registreringsutstyret for målinger i denne delen av spekteret. For å studere områder med stor belastning av organisk stoff er det viktig å ha systemer som måler ned mot det dyp blå og ultraviolette området.

En annen viktig mangel med de fleste flyspektrometere idag er muligheten til å registrere i termisk infrarødt som er en viktig parameter i de marine systemene for å skille vannmasser og detektere frontområder. Dette kan man eventuelt gjøre med en egen termisk sensor som f.eks. Barnes PRT-5 radiometeret som registrerer termisk infrarød emisjon i området 9.5-11.5 μm (Borstad og medarb., 1980).

Det stilles større krav til operasjon av flyet for denne type sensorer enn for de instrumentene som idag benyttes i forbindelse med f.eks. SFT's oljeovervåking. I en operativ sammenheng må det være et nært samarbeid mellom flypersonell og personell for databearbeiding og tolkning. Bruk av dagens instrumentering i SFT's overvåkingsfly egner seg lite til direkte deteksjon (identifikasjon) av annen forurensning enn olje og kjemikalier som befinner seg på overflaten. På SFT's fly har disse scannerene heller ingen digitale datautganger som gjør det mulig å foreta kvantifiseringer ut fra automatisk bearbeiding.

UV/IR-scanneren ble benyttet under C. polylepis-oppblomstringen i mai 1988 for deteksjon av temperaturfronter (Johannessen og medarb., 1988), og dermed indirekte spore forflytning av vannmasser. En overflyvning med dette systemet av en Noctiluca-oppblomstring i 1990 kunne f.eks. ikke "detekteres" i dataene (O.A.Follum, SFT, pers.med.). IR-scanneren som måler i det termiske delen av spekteret bør dog kunne skille termisk ulike vannmasser som f.eks. elveutløp på visse tider av året.

Den gode romlige og spektrale oppløselighet gjør at bruken av de flybårne data er vel så interessante for limniske forhold som de marine. Den romlige oppløseligheten ned til 1-2 m gjør den egnet til å overvåke mindre vassdrag og studere f.eks. punktutslipp, erosjon, eutrofi, utvikling av skadelige organismer (blågrønnalger, vasspest). Dette er foreløpig ikke blitt testet i Norge og det er behov for ytterligere evalueringskampanjer spesielt for ferskvann.

4.3 Hvordan anvende fjernmålte data for vannkvalitetsformål

4.3.1 Operativ bruk av fjernmålingsdata

De operative aspektene er viktige i den fremtidige overvåking, kanskje spesielt for de marine anvendelser. Med de ressurser som idag benyttes på overvåkingsprosjekter er målefrekvensen ved bruk av tradisjonelle metoder f.eks. for langtidsovervåking i kystområdene 1-2 ganger pr. måned. For ferskvann hadde man til sammenligning 4 innsamlinger per år i en eutrofiundersøkelsen i 1989 av 350 norske innsjøer. Avhengig av formålet med overvåkingen og resipienttyper er det altså forskjellig strategi mhp. målehyppighet.

Bruk av fly som sensorplattform er mer operativt og fleksibelt enn satellitt, men det operative dekningsområdet blir mindre. Sammenligner man "overvåkingskapasiteten" for et fartøy i ca. 20 knop så kan det dekke ca. 1000 km²/time, mens et fly i 500 km/time dekker ca 35.000 km²/time og en satellitt ca 4000.000 km²/time (Marin Fjärranalys, 1985). Målinger fra fly er ikke helt uproblematisk, og dette ble tydelig demonstrert under utprøvinger i Ytre Oslofjord 1989 (Pettersson og medarb., 1990a). Flyet er en mye mer ustabil plattform og man får store variasjoner i belysningsforholdene med forskjellige flyretninger osv. Det pågår arbeid for å forsøke å "interface" CASI-instrumentet med en annen ekstern datamaskin som skal ta vare på data om flyets bevegelser og sollysets innstråling for at dette senere kan benyttes i beregningene (R. Kerr, pers. med.). Når slike data må benyttes betyr det at man må foreta mange typer korreksjoner som kan redusere datakvaliteten og gjøre etablering av beregningsmodeller

vanskeligere. Ut fra dette synes det som om korreksjon av flydata kan bli mer omfattende enn f.eks. for satellittdata.

Et annet problem med bruken av slik systemer er mangel på navigasjonsdata, som gjør det vanskelig å finne ut eksakt hvor registreringene er foretatt. Slike data må man også forsøke og "interface" med spektrometerdataene. Bruk av helikopter som plattform for slike systemer hadde vært å foretrekke fordi man da kan foreta en enkel prøveinn-samling av det man observerer. Sannsynligvis vil man få for store vibrasjonsproblemer på instrumentene. Helikopter er derimot benyttet for aktive systemer, så man bør foreta en nærmere undersøkelse om en slik plattform kan benyttes.

For å få størst mulig nytte av fjernmålingsdata i slike sammenhenger må maksimal datakombinasjon tilstrebes, f.eks. vil en kombinasjon av termiske (lavoppløselige) værsatellittdata og de høyoppløselige termiske og optiske data være verdifullt. Hvis man greier å nyttegjøre alle de høyoppløselige satellittdata (Landsat, SPOT, MOS) som er tilgjengelige idag vil man teoretisk i gjennomsnitt få ca. 2 passeringer pr. uke. De lavoppløselige NOAA-dataene har en begrenset datamengde som gjør det mulig med overføring over telenettet. Det gjør dem mer operative enn de høyoppløselige dataene. Et slik system er nylig blitt utprøvd (Hamnes, og medarb., 1989) til enkelte brukere.

Operative anvendelser av flybårne spektrometerdata for havanvendelser oppnås sannsynligvis best ved å foreta en form for "oceanografiske" snitt, dvs. man følger faste ruter. Man bør f.eks. også oppsøke områder som kan være potensielle oppvekstområder for alger. Ved en mer intensiv overvåking kan man benytte f.eks. et gridsystem og i åpne havstrekninger må man benytte geokodede data. Slike flyvninger bør foretaes midt på dagen av hensyn til belyningsforhold, planktonets døgnrytme (fotokjemi) osv. Et tokt på ca. 4 timer er tilstrekkelig til å "dekke" et område tilsvarende Kattegat/Skagerrak. Slike tokt bør koordineres med fartøyer og oceanografiske bøyer med sensorer som muliggjør bedre tolkning av fjernmålingsdataene. Ingen av dagens bøyesensorer er godt nok egnet for dette formålet, og bare et fåtall feltinstrumenter finnes som måler f.eks. radians. Her gjenstår mye arbeid på utvikling av egnede sensorer. Høyoppløselige optiske spektrometerdata fra fly vil også være viktig i arbeidet for tolkning av satellittbårne sensordata.

C. polylepis-oppblomstringen i mai 1988 har fått en sterk fokusering i mediene blant annet på grunn av fjernmålingsdata. Utover en termisk sporing av de vannmasser hvor algene ble registrert med tradisjonelle metoder, er det usikkert hvordan algene ville la seg detektere

direkte, pga. de svake spektralsignaturene og lave algebiomassene. Man hadde også toksinholdig vann til stede etter at algeoppblomstringen hadde kulminert (Lindell og medarb., 1991), slik at tradisjonell innsamling av vannprøver under slike situasjoner er ikke til å unngå.

Ved en operativ bruk av passive, optiske fly- og satellittdata må man være oppmerksom på at en rekke faktorer kan påvirke sluttresultatet.

- * Sensorenes kalibreringskontanter (absolutt og mellom sensorer).
- * Solvinkel og sensorvinkel under opptaket.
- * Ulike belyningsforhold.
- * Atmosfærens egenskaper under opptaket.
- * Hvilke substanser som er i vannet.
- * Hvilke konsentrasjoner stoffene har.
- * På hvilket dyp disse stoffene befinner seg.
- * Bunn-dyp og vegetasjon i strandlinjen.
- * Sammensetning/valg av spektralband for formålet.
- * For klorofyllfluorescens - planktonets fotokjemi/døgnrytme.
- * Variable forhold mellom klorofyll-a og celledtall i tid og rom.
- * For emitterende bølgelengder - vannets overflatetemperatur.

Tross de operative begrensningene er anbefalingen at fjernmålingsdata bør kunne tas i bruk i tilknytning til relevante overvåkingsprogrammer. Metoden kan enkelt koordineres med dagens overvåkingsprosjekter og egner seg for kombinasjon med lokal manuell innsamling av felldata, eller med automatiske feltmålinger. Satellittdataene gir informasjon om overflatevannmasser som det vil være meget kostbart, om ikke umulig, å få frem med tradisjonelle metoder.

4.3.2 De viktigste anvendelsesområdene for fjernmålingsdata.

Mange av de samme fordelene med fjernmålingsdata finner man for overvåking av både limniske og marine systemer, og for satellitt- og flybårne data. Det kan være fordeler å anvende fjernmålingsdata for utvelgelse av stasjonsnett, optimalisert prøvetaking og plassering av faste stasjoner, slik at de på best mulig måte avspeiler de virkelige forhold. Slike data vil bidra til både å ta mest mulig representative prøver og vil muliggjøre meningsfulle interpoleringer mellom faste prøvestasjoner. Satellittdata kan f.eks. bidra til at det ikke tas flere prøver enn nødvendig av samme type innsjø i en regional studie, men heller konsentrere ressursene på innsjøer av ulik karakter. Tradisjonelle vannprøver (punktprøver over største dyp i innsjøer og faste stasjoner i marint miljø) har den svakhet at vurderinger av totalmengder og konsentrasjonsfordelinger kan bli misvisende. Spesielt i større vannforekomster kan man gjøre grove feilbedømmelser, pga.

horisontale gradienter, fronter eller såkalt "patchiness" (flekknvis fordeling). De viktigste nytteverdiene med en grov vurdering av de forskjellige systemene er oppsummert i tabell 4.

Tabell 4. Oppsummering av de viktigste anvendelsesområder hvor satellitt og flybårne spektrometerdata gir ny eller bedre informasjon enn dagens metoder for overvåking av vannkvalitet (- olje) i innsjøer, fjorder og nære havområder. Vurderingen er foretatt ut fra en grov bedømmelse av spektral følsomhet og romlig oppløselighet (angitt) til de omtalte spektrometere og sensorer i tabell 1 og 2.

Overvåkingsoppgaver/problemområder knyttet til vannkvalitet hvor fjernmålte data kan benyttes.	Satel. data (oppløsel. 1-2 km)	Satel. data (oppløsel. 20-120 m)	Flydata (oppl. <10 m)
Studier av mellom- og storskala fenomener	++	++	+
Studier av småskalafenomener	0	+	++
Bedre horisontal kartlegging/synoptisk info	++	++	+
Optimalisering av prøvetagning	+	++	+
Vurdere feltstasjoners representativitet/samtolkning med tradisjonelle data/relativ vannkvalitet i områder uten data	+	++	++
Overvåking av langsiktige forandringer av vannkvaliteten*	0	+	+
Kvantitativ bestemmelse av susp. matr.	0	++	++
Bedømmelse av planktonmengder/klorofyll-a	0	+	++
Bestemmelse av temperatur	++	++	0**
Verifikasjon av sprednings-modeller			
- i fjorder	+	++	++
- i havområder	++	+	+
Oppdatering av varslingsmodeller	+	+	++
Kartlegging av punktutslipp/forurensninger	0	+	++
Varsling av kaldtvannsfronter	++	+	0**

++ God informasjonskilde,

+ Kan benyttes/gir noe informasjon

0 Egner seg ikke/ikke kjent eller godt nok utprøvd

*) Gjelder ikke trendanalyser

***) Mulig med egne sensorer

5. BRUKERMILJØER OG KOMPETANSE INNEN FELTET

Brukermiljøer som kan nyttegjøre seg denne type informasjon kan grovt deles inn i to kategorier. Man har de "preoperasjonelle" brukerne som selv er produsenter av "foredlede" fjernmålingsdata (bilder/kart), og som idag stort sett er de eneste som bruker slike data. En annen kategori er "sluttbrukeren" som mottar det endelige resultat f.eks. i form av et fotografisk produkt i en rapport eller bare en konklusjon, varsel eller prognose i en overvåkingssammenheng. Det er få miljøer i Norge som foreløpig bruker slike data i vannkvalitetssammenheng og som satser på å bygge opp slik kompetanse.

5.1 Brukermiljøer av fjernmålte spektrometerdata

I forbindelse med "The Norwegian Polar Orbiting Satellites Utilisation Study" - POSUS (NRS-rapport, 1989) ble det laget en oversikt over norske fjernmålingsmiljøer, samt hvilke aktiviteter og planer som fantes på dette feltet frem mot år 2000. Det er også laget en oversikt over norske fagmiljøer og anvendelser innen bildebehandling og mønstergjenkjenning (NOBIM, 1990), som er relevant i denne sammenheng. De viktigste "preoperasjonelle brukere" av akvatisk passiv, optiske fjernmålingsdata i Norge idag er:

Nansen Senter for Miljø og Fjernmåling - NERSC, Bergen arbeider på flere felter innen fjernmåling fra satellitt og fly. Aktiviteten er i første rekke knyttet til de marine områder, med hovedtyngden av arbeidet på mikrobølgedata. NERSC har foretatt evaluering av spektrometerdata (NORSMAP'89) og har nylig arbeidet med forbedring av beregningsalgoritmer for flybårne spektrometerdata i et prosjekt for SFT. Arbeider forøvrig med utvikling av numeriske transportmodeller hvor fjernmålingsdata tenkes benyttet.

Norsk Institutt for Vannforskning - NIVA, Oslo arbeider i hovedsak med satellittdata, men har også deltatt i evaluering av flybårne spektrometerdata gjennom samarbeid med NERSC. Har spesielt gjennomført utprøvinger av høyoppløselige satellittdata for marine områder, men har nå igangsatt en nærmere studie for bruk i ferskvannslokaliteter i et prosjekt for SFT. Gjennomfører egenfinansierte forskningsprosjekter for utprøving og videreutvikling av fjernmålingsteknologien. Bruker idag satellittdata som endel av det Statlige program for forurensningsovervåking i Hvaler/Singlefjorden. Bruker også IR-fotografering for akvatisk vegetasjonskartlegging rutinemessig.

AKVAPLAN - NIVA A/S, Tromsø arbeider spesielt med høyoppløselige data for temperaturkartlegging i tilknytning til egnethetsvurderinger og

risikoanalyser for lokalisering av oppdrettsanlegg. Er i ferd med å avslutte et prosjekt for å kartlegge vintertemperaturen i sjøen for hele den nord-norske kystsonen. Deltok i NORSMAP'89 sammen med NERSC, NIVA m.fl., og er iferd med å starte et prosjekt for å evaluere instrumentering i Orion-fly for bruk i overvåkingssammenheng.

OCEANOR A/S, Trondheim benytter termiske AVHRR-data i tilknytning til et utviklingsprosjekt (Industrifondet/NTNF/SFT) for "algevarsling", hvor temperaturkart blir distribuert ukentlig sammen med andre bøyedata. Kartene er basert på termiske AVHRR-data overført fra Tromsø Satellittstasjon. Arbeider forøvrig med mikrobølgedata fra den nye europeiske satellitten (ERS-1).

Andre miljøer er indirekte involvert i bruk eller tolkning av denne type akvatiske fjernmålingsdata, eller som "rådata"-leverandør. I denne kategori kommer flere forskningsmiljøer som har kompetanse som det er viktig å få trukket inn i arbeidet frem mot operative tjenester. Det er også en rekke miljøer som arbeider i grenseområdet mot akvatisk fjernmåling, men som ikke er direkte involvert i studier av vannkvalitet og forurensninger.

Norges Hydrodynamiske Laboratorium - NHL, Trondheim anvender AVHRR-data og noe høyoppløselige TM-data til studier av hydrodynamiske prosesser. Prosjektene er mest av forskningskarakter, og har liten direkte aktivitet på vannkvalitetsstudier i overvåkingssammeng. Har tidligere deltatt i utprøving av Landsat TM-data for vannkvalitetsformål med NIVA og Norsk Regnesentral.

Havforskningsinstituttet - HI, Bergen har også deltatt i ulike fjernmålingsprosjekter bl.a. NORSMAP'89, men har ikke som mål å etablere noe eget operativt system og bruk av slike data. De betrakter seg selv som en sluttbruker av slike data (side 61). HI er forøvrig en viktige leverandører av data som skal benyttes i tilknytning til fjernmålings.

FORUT (Forskningssiftelsen ved Universitetet i Tromsø) arbeider i hovedsak med denne type fjernmålingsdata knyttet til vegetasjonskartlegging, og har for tiden ingen aktiviteter innen optisk akvatisk fjernmåling. FORUT vil bidra til å utvikle bruken av bl.a. spektrometerdata for terrestriske anvendelser. De har utviklet et system for overføring av AVHRR-data over telenettet, og har kompetanse innen atmosfæriske korreksjoner av optiske fjernmålingsdata, samt innen koding av fjernmålingsdata basert på bruk av automatiske metoder.

Tromsø Satellittstasjon - TSS/Norsk Romsenter - NRS er nasjonal nedlesningsstasjon for data fra bl.a. NOAA-AVHRR og MOS-VTIR, og er

leverandør av sanntidstjenester til store brukere. Har ingen aktiviteter selv knyttet opp mot bruk av satellittdata til vannkvalitet. De har nylig inngått et samarbeid med SPACETEC A/S for markedsføring og salg av satellittdataprodukter. NRS skal også koordinere all norsk romvirksomhet.

SPACETEC A/S, Tromsø er etter det nye samarbeidet med TSS distributør av standardprodukter fra ESA/Eurimage som Landsat, NOAA og MOS. De skal ivareta kontakten mot kundene og markedet. De vil levere verdiøkte tjenester spesielt vedrørende vegetasjonsovervåking.

Det norske meteorologiske institutt - DNMI, Oslo leser selv ned NOAA-data som blir prosessert for bruk i værvarslingssammenheng. Arbeider med algoritmeutvikling for atmosfærekorreksjon av AVHRR-data for bestemmelse av sjøtemperatur. DNMI har også sondedata som er viktige i utvikling og bruk av modeller for atmosfærekorreksjon av akvatiske fjernmålingsdata. DNMI, Bergen er tillagt operatøransvaret for det nye senteret for "Havmiljøovervåking- og varsling" - HOV. HOV vil være en sluttbruker av slike data (side 61).

Norsk Polarinstitutt - NP, Oslo arbeider med fjernmålingsdata for havisstudier, glasiologi, vegetasjons- og erosjonstudier, oppdatering av topografiske kart og produksjon av satellittbildekart. NP produserer i samarbeid med Institutt for Naturgeografi, UIO også kystkart basert på fly og helikopterbilder fra breer. Norges Vassdrags og energiverk - NVE, Oslo og Statkraft har aktiviteter på fjernmåling relatert til snøkartlegging, og ikke mot vannkvalitet.

Fjellanger Widerøe - FW, Oslo er distributør av SPOT-data i Norge. De startet for flere år siden med ulike anvendelsesområder for fjernmålingsdata, men har idag ingen aktiviteter eller prosjekter på vannkvalitet. De deltok i utprøvingen av flybårne spektrometerdata (NORSMAP'89) som operatør av SFT-flyet. Fotonor A/S har også foretatt testflyvinger med CASI-instrumentet i Norge i 1990, for å vurdere mulighetene for anskaffelse av et instrument. I første rekke for bruk på vegetasjonsiden hvor man vurderer de største markedsmulighetene.

Norsk Regnesentral - NR, Oslo har tidligere deltatt i utprøvningsprosjekter for bruk av satellittdata til vann og is, men har pr. idag ingen prosjekter knyttet til vannkvalitet. Har deltatt i utprøvningsprosjekter med TM-data for vannkvalitet i samarbeid med NIVA. De har for tiden prosjekter for SFT som går på kartlegging av høstpløying og erosjon på landsiden i samarbeid med Norsk institutt for jord og skogkartlegging, NIJOS.

Geodatasenteret A/S, Arendal med tilhørende miljøer arbeider på vegetasjonsiden både med satellittdata og flydata (IR-foto). På vannsiden har de liten aktivitet, men noe prosjektsamarbeid med NIVA. De har bygget opp spesiell kompetanse på å utnytte GIS - Geografiske Informasjons Systemer i tilknytning til fjernmålingsdata.

Global Resource Information Database - GRID, Arendal har også kompetanse på bruk av satellittdata og har nært samarbeid med Geodatasenteret. De vil være potensielle brukere av slike data, men det er ennå usikkert om de vil bearbeide fjernmålingsdata selv eller om dette blir ivare tatt av andre instanser gjennom samarbeidprosjekter.

Forsvarets forsknings institutt - FFI arbeider noe med optiske data (SPOT) for terrestriske forhold, men lite mot vannkvalitet. Kan bli aktuelt med fjernmålte temperaturdata for sammenligning med mikrobølgedata fra ERS-1.

I tillegg arbeider flere av våre universitetsmiljøene (NLH, UNIT, UIO, UiTØ) med grunnforskning knyttet til f.eks. digital bildebehandling, optiske målinger og algoritmeutvikling for bestemmelser av plankton basert på optiske data etc.

Når det gjelder sluttbrukerene av slike data i Norge så er det få virkelig store enkeltbrukere. En av de viktigste brukerene er SFT gjennom bl.a det "Statlig program for forurensningsovervåking". I dette programmet benyttes allerede noe satellittdata i et prosjekt i Hvaler/Singlefjorden, og SFT er positive til bruk av fjernmålingsdata i kombinasjon med tradisjonelle metoder. I en markedsundersøkelse (NCG, 1990) konkluderte man med at det var en "avventende" holdning til bruk av satellittdata til vannkvalitetsstudier. Dette stemmer ikke med det faktum at SFT bruker slike data idag og finansierer nye metodeprosjekter på feltet. Ved Direktoratet for Naturforvaltning (DN) er det foreløpig liten interesse og forståelse for behovet for fjernmåling. Statens kartverk eller de lokale fylkeskartkontorene er andre potensielle brukere, f.eks. for utarbeidelse av ulike tematiske kart i kystsoner-, verne- og vannbruksplaner.

I 1989 ble det igangsatt et 3 års prøveprosjekt for å vurdere mulighetene for få opprette et "Havmiljøovervåking- og varslingsystem"-HOV. Systemet er tiltenkt det nasjonale koordinasjonsansvar for havmiljøovervåking og er opprettet av Miljøverndepartementet (MD). MD har forøvrig bidratt økonomisk og faglig i ulike sider av norsk romvirksomhet, og er sammen med Samferdsels-, Forsvars-, Fiskeri-, samt Olje- og energidepartementet et sentralt brukerdepartement.

HOV kom istand som et resultat av bl.a. oppblomstringen av C. polylepis i mai 1988 og de store ødeleggelsene under flommen i oktober 1987. HOV kan bli en viktig bruker av fjernmålingsdata dels for verifikasjon av transportmodeller og dels som hjelpemiddel i operativ varslings. Hvordan fjernmålingsdata skal inngå og tas i bruk er foreløpig ikke blitt vurdert og satt i system, men her kan de "preoperasjonelle" brukerne være viktige bidragsytere både med data og tolkning. De operative enhetene som skal arbeide mot HOV som f.eks. HI vil i en akutt overvåkingssammenheng være en bruker av fjernmålingsdata for f.eks. styring av toktvirksomheten.

På det lokale nivå gjennomfører også Fylkesmennesenes miljøvern-avdelinger overvåking hvor denne type data bør kunne anvendes. Spesielt gjelder dette i fylker som har problemer med eutrofi, erosjon og i områder med mye akvakulturanlegg. Slike data bør f.eks. kunne benyttes i planlegging ved plassering av akvakulturanlegg innen en region. Behovet for slike overvåkingsdata varierer mellom de ulike fylkene ut fra hvilken type forurensningsproblemer som er mest dominerende i regionen. Det var et generelt inntrykk under samtalene med disse potensielle brukerne at informasjonen om hva denne type teknologi kunne utrette, og hvordan de skulle forholde seg for å frem-skaffe slike data var meget liten.

Enkelte kommuner med relevante forurensningsproblemer kan på samme måte være sluttbrukere av ulike kartprodukter hvor fjernmålingsdata inngår. Kommuner med oppdrettsanlegg representerer en viktig bruker-gruppe, og i de nordligste fylkene har man benyttet "kuldsonekart" basert på Landsat-data. En markedsundersøkelse foretatt i Nord-Norge og Trøndelag viste at mange kommuner kan ha behov for kuldsonekart i planleggingssammenheng (Polarkonsult, 1989). Både på fylkes- og kommunenivå består mye av arbeidet i å tilrettelegge miljødata for forvaltningen, ("forvaltningsrettet miljøinformasjon"). Her bør fjern-målingsdata sammen med annen digital miljøinformasjon (GIS) bli viktige, men det gjenstår mye arbeid med å få dokumentert anvendelsene bedre og tilrettelagt denne type data for slike formål.

Akvakulturnæringen og fiskerivirksomhet er aktuelle brukere og har også selv kjøpt temperaturkart basert på satellittdata. Temperatur-kartlegging kan benyttes ved egnethetsvurdering, konsesjonsgivning og forsikringsforhold, slik at også forsikringsbransjen kan benytte seg av disse data i risikovurderinger og direkte i forsikringssaker. Almenheten vil også i siste instans ha behov for denne informasjonen for f.eks. rekreasjonsformål og turisme. Informasjonene til slike brukergrupper må sansynligvis være på en sterkt bearbeidet form som er forståelig og som ikke fører til mistolkninger.

5.2 Kompetansenivå og -behov hos brukerne

Det er åpenbart at det i dag er vanskeligheter med å håndtere både satellittdata og flydata for vannmiljø på en enhetlig og standardisert måte. Arbeidet med fjernmålingsdata krever erfaring både fra felt og bildebearbeiding, og man må skaffe seg grunnleggende kunnskaper om sensorenes oppbygning, virkemåte, kalibrering osv. For optimal bruk kreves gode kunnskaper om optiske målinger og vannovervåking generelt. Enkelte miljøer bruker f.eks. bare temperaturdata, mens andre igjen har konsentrert seg på optiske data, mikrobølgedata etc. Det er altså en "fordeling" av kompetansen hos de forskjellige preoperasjonelle brukerne, som et resultat av ulike arbeidfelt og utgangspunkt for å ta slike data i bruk.

Generelt er det manglende kompetanse omkring absoluttkalibrering av sensordata både når det gjelder satellitt og flybårne systemer. Her må det settes inn mer aktivitet slik at man kan få videreutviklet metodene til automatiske systemer. Arbeidet med algoritmeutvikling og atmosfærekorleksjoner av optiske fjernmålingsdata er også forhold som det må arbeides med. Først bør en bedre forståelse og erfaring med tolkning av optiske spektralsignaturer for ulike vannmasser og planktontyper etableres. Det er behov for gjennomføring av flere kalibreringskampanjer, som bør få en bred faglig koordinering på tvers av ulike fagdisipliner (akvatisk, terrestrisk). I Norge finnes ubenyttet kompetanse i flere miljøer, som pga. lav ressursinnsats eller prosjektkonstellasjoner ikke er blitt tilstrekkelig utnyttet.

Informasjonen og kunnskapene om produktene fra leverandøren av "rådata" er også for dårlige. Eksempelvis er man fortsatt "usikre" på kalibreringskonstantene for TM-sensoren på Landsat-5, en satellitt som har vært i bruk i mange år. Det samme synes å gjelde for de flybårne spektrometerdataene. Dette er et problem i første rekke hos produsentene av disse systemene, men det blir et "brukerproblem" når dataene skal anvendes. På dette feltet må det derfor bygges opp mer kompetanse, slik at man kan utvikle operasjonelle modeller.

Sluttbrukerne har et stort behov for generell informasjon om hva slike data kan brukes til, og spesiell informasjon om hvordan man skal gå frem for å få tatt det i bruk. Dette bør i første rekke fremkomme gjennom konkrete anvendelser som viser både nytteverdien, og hvordan denne type informasjon kan integreres med andre data. Dette vil øke forståelsen av slike data og derigjennom etterspørselen. Man må også tilstrebe en bedre undervisning og informasjon om fjernmålingsmetodene i både marine og limniske fag ved våre undervisningsinstitusjoner.

6. MULIGE PRODUKTER OG TJENESTER

Det er dokumentert at fjernmåling vil bidra til en bedre forståelse av de prosesser og mekanismer som pågår i våre vannforekomster. Selv om resultatene er lite spesifikke mhp. vannkvalitet, vil man ved å kombinere med feltdata og annen kunnskap om et område få bedre informasjon om et systems økologiske egenskaper. Det er derimot foreløpig vanskelig å kvantifisere nytteverdien og bedømme hvor mye "bedre" en undersøkelse eller overvåkingsoppgave vil bli ved bruk av slike fremgangsmåter. Det er urealistisk å tro at dagens overvåking blir vesentlig forandret fordi ny teknologi kommer på markedet. For å få optimal utnyttelse av slike data og unngå "over-overvåking", bør bruken forankres til utøvere og brukere med gode generelle kunnskaper om denne type vannovervåking. Dette vil sikre at dataene etterhvert nyttes på flere måter og for ulike problemstillinger, og at metodeutviklingen foregår på brukerens premisser. Man må unngå at teknologien styrer utviklingen av nye overvåkingsmetoder.

Det er nødvendig med en klar målsetting med de produkter og tjenester som skal utvikles. For å få et større produktspekter og flere tjenester, må man tenke i helhetlige løsninger til nytte for brukeren. Brukerens informasjonsbehov må analyseres, hvilke produkter og tjenester trengs, hvilke andre data skal dette kombineres med, eller om de skal benyttes i tilknytning til en modell osv. Man må så finne hvilke type fjernmålingsdata (satellitt- og/eller flydata) som passer, og hvordan og på hvilken form dataene skal komme frem til brukeren.

Fjernmålingsdataene - og kanskje spesielt satellittdata - kan benyttes til rene kartproduksjoner, ved bruk av PC-baserte bildebehandlingsanlegg eller mer avanserte datasystemer. Kartproduksjon er kanskje ikke så egnet for vann som på land, da de vil kreve mye hyppigere oppdateringer, men de er med på belyse og visualisere fordeling/spredning av vannmasser og potensielle kontamineringsområder for forurensninger som omtalt tidligere i denne rapporten. Bedre og enklere bildebehandlingsrutiner og systemer vil gjøre at utviklingen for vannmiljøet blir meget interessant innen en ikke for fjern framtid. Rene PC-baserte bildebehandlingssystemer er nå kommersielt tilgjengelig som gjør at brukerterskelen er forholdsvis lav.

Det kan fremstilles temakart som gir enkle oversiktsbilder av ulike vannparametere for et område. Slike metoder bør ha et stort potensiale innen f.eks. vassdrag- og kystsoneplanlegging jfr. egnethetsvurderinger av akvakulturanlegg ved såkalte kuldesonekart (Kögeler og Dahle, 1990), og for bruk ved fysisk planlegging (Lindell, 1988). Man kan videre kombinere slike bilder med annen kartinformasjon i et

Geografisk-Informasjons-System - GIS. Brukt i slike sammenhenger må man arbeide med geokodede data, og på den måten kan det bli mulig å ekstrahere informasjon både i form av bilder og tabulert statistikk (Lindell og Sørensen, 1990). Foreløpig er det ikke utviklet noe større produktspekter innen dette feltet. Dette er derimot et arbeid som må intensiveres, og det stilles store faglige krav til den som skal utvikle slike produkter.

Satellitt- og flybilder kompletterer hverandre på mange måter. Satellittbilder egner seg for kartlegging i skala 1:50000 - 1:1 million, og flybilder i skala større enn 1:100000. En kostnads-sammenligning for satellitt og flybilder (terrestriske forhold) i skala 1:50000 ga hhv. 4 og 10 kr/km² for et bildeprodukt (SATUT, 1989). For noen anvendelser kan man vise at kostnadene pr. areal for det første er meget lav, og at satellittdata kan være det rimeligste alternativet.

Fjernmålingsdata blir allikevel dyre når man betrakter dem isolert sett og må fordele kostnadene på de enkelte overvåkingsprosjekter slik man gjennomfører disse idag. Kostnadene ved de lavoppløselige AVHRR-datane ligger omkring kr. 1.000 pr. scene som dekker store deler av Skandinavia og våre nære havområder. De høyoppløselige koster fra kr. 10.000 - kr. 40.000 avhengig av sensortype og scenestørrelse. Arealdekning for disse sensorene ligger mellom 3600 km² for SPOT og opp til 34000 km² for Landsat. Ved en bedre utnyttelse av de samme data for ulike formål (land, vann) i en region vil kostnadene kunne fordeles og med et vesentlig større tilbud av satellittdata i fremtiden kan konkurransen forhåpentligvis lede til lavere priser. Fjernmålingsdata vil foreløpig ikke bidra til å redusere kostnadene ved dagens overvåking, da den feltmessige overvåking som utføres idag er på et minimum. Fjernmålingsdata kan ikke erstatte de få observasjoner som gjøres.

Med utvikling av bedre og større produktspekter allerede hos data-distributøren kan datakostnadene forhåpentligvis reduseres. F.eks. trenger man ikke alltid alle kanaler fra TM-sensoren, og man kan redusere databehovet til f.eks. 1-3 kanaler (10-25 Mbyte). Dette kan også muliggjøre enklere overføring via telenettet. Et vesentlig hinder for operativ bruk idag er rask overføring av data til brukerne. Data-overføring kan gjøres med både "jordnettet" (telenettet) og overføring via satellitt-link (NORSAT-B). Det enkleste systemet er oppringt samband med en vanlig modem, mens NORSAT-B systemet krever installasjoner av en "jordstasjon" hos sender og mottager. Kostnadene for dette er idag ca. kr. 50.000 pr. stasjon og ca. kr. 25.000 i leie pr. kvartal. Hvilket system som egner seg vil bl.a. avhenge av hvor

hyppig man trenger data. Bruk av jordnettet har en høyere leiepris pr. kvartal. Slike overføringer blir relativt kostbare for den enkelte bruker, men her bør det etableres noen sentrale mottagningssteder som lokalt kan distribuere data videre. Slike systemer vil øke den operative bruken.

Kostnadene forbundet med et flybårent system er fortsatt vanskelige å bedømme, da man foreløpig har liten erfaring med hva driftskostnader vil være. Pettersson og medarb. (1990h) har gitt et anslag over kostnadene ved leie av et flybårent spektrometer og kommet frem til at dette på årsbasis totalt vil koste 1.5 - 2.0 millioner. FOTONOR A/S har nylig fått oppgitt en leiepris pr. år på ca. kr. 800.000. I tillegg kommer kostnader for leie av flytid, men her er det muligheter med koordinering med f.eks. SFT's egne rutinemessige oljeovervåkingsoppdrag.

Det må altså arbeides med forbedringer av bestillingsrutiner, nye satellittdataprodukter, elektronisk dataoverføring, videreutvikling av brukerprodukter og kanskje det viktigste: informasjon om muligheter og begrensninger med metodene. For at fjernmålingsdata skal kunne anvendes operativt må data kunne benyttes på en nogenlunde standardisert måte, og man må arbeide frem rutiner som gjør dette mulig. Det er nå forøvrig bestemt at "laboratorier" som produserer miljødata skal akkrediteres (godkjennes). Slike ordninger bør også etableres for felt- og fjernmålingsmetoder, slik at de resultater og produkter som lages er sikret en god kvalitet.

For langtids- eller trendovervåking (5-10 års perioder) kreves det stor nøyaktighet og kvalitetssikring av data for at man med sikkerhet skal kunne si om det har skjedd forandringer. Selv om enkelte optiske "fenomener" som f.eks. klorofyllfluorescens er spesifikk for klorofyll-a er den kvantitative informasjonen fra fjernmålingsdata foreløpig for dårlig til å kunne benyttes i slike studier. Man må i større grad forsøke å benytte fjernmålingsdataene på andre måter enn det å estimere direkte punktkonsentrasjoner, f.eks. må den store geografiske dekingen ved fjernmålingsdataene utnyttes bedre. Nye produkter kan komme ut av kombinasjonen stor arealdeking og gode punktmålinger fra tradisjonelle metoder. For operativ bruk i tilknytning til varslingmodeller må fjernmålingsdataene tilrettelegges slik at de kan benyttes (assimileres) i numeriske modeller.

Det bør også etableres en tjeneste slik at man til enhver tid vet hva som er tilgjengelig av gode satellittdata eller andre fjernmålingsdata over et havområde eller en region. Dagens "quick-look"-tjeneste for satellittdata dekker ikke dette formålet tilfredstillende. Digitale

"Quicklook" er nå laget for SPOT-data, men er foreløpig ikke tilgjengelige for brukerne.

Det kan være behov for å utvikle utstyr som gjør det mulig å overføre enkle termiske og optiske fjernmålingsdata i sann tid til f.eks. forskningsfartøyer. Helst digitale data slik at det kan være mulig og foreta enkle kontraststrekkinger og manipuleringer av dataene på stedet. Et enklere system er å produsere temperaturkart som rasterbilder og overføre dette med telefax til forskningsfartøyer eller andre sluttbrukere. NERSC anvender denne type informasjonsformidling under kombinerte fjernmålings- og feltkampanjer. HI er interessert i en slik tjeneste for sine fartøyer både for overvåkingsformål såvel som ressurskartlegging, og AVHRR-data bør idag relativt enkelt kunne benyttes til dette. Overføring av ferdige bearbeidede digitale forurensningskart til enkelte sluttbrukere bør bli vurdert. Overføring av enkle data/produkter over satellitt (INMARSAT) bør være mulig med dagens teknologi. SFT kan være interessert i en slik tjeneste når dette er teknologisk mulig. Det må også utvikles produkter og operative tjenester som kan forsyne f.eks. HOV-senteret med tolkede fjernmålingsdata slik at dataene kan komme til nytte i varslings-sammenheng og for assimilering i havmodeller.

For de nye "allvørsatellittene" som kommer i nær fremtid og som baserer seg på mikrobølgedata, er det foreløpig stor usikkert om, og eventuelt hvordan de vil få noen nytte i vannkvalitetssammenheng. De kan gi nyttig informasjon om fronter og frontområder, som sammen med andre optiske fjernmålingsdata eller feltobservasjoner kan gi en noe større kontinuitet i fjernmålingsobservasjonene. Slike data-kombinasjoner kan bli viktige i fremtidige varslings-tjenester, men for direkte vannkvalitetsovervåking/varsling vil fjernmålte optiske sensordata være viktig i lang tid fremover.

7. REFERANSER

- Ahlnäs, K. and Royer, Th.C., 1989a. Application of Satellite Visible Band Data to High Latitude Oceans. *Remote Sens. Environ.* 28:85-93.
- Ahlnäs, K. and Royer, Th.C., 1989b. Evaluation of the ability of various Remote Sensors to Map distributions of suspended sediments in the Gulf of Alaska. *Adv. Space. Res.*, Vol. 9. No. 1.
- Aiken, J. (Ed.), 1989. The North Sea Satellite colour Atlas. *Continental Shelf Research*. Vol 9, No. 8, 1989. ISSN 0278-4343.
- Albers, W., Brandt, K., Budeus, G., Diebel, D., Dørre, F., Hengstermann, T., Krause, G. and Reuter, R., 1987. River run-off transport and mixing in the German Bight derived from airborne fluorosensor and shipboard measurements. *Proceedings from International Colloquium on Remote Sensing of Pollution of the Sea*, Oldenburg, 1987.
- Bodechtel, J., 1990. The european imaging spectroscopy airborne campaign - EISAC. First results and outlook on future European activities in the field of imaging spectrometry. *Proceedings of a Remote Sensing Society Workshop*. Millbank Tower, London 1990.
- Borstad, G.A., Brown, R.M. and Gower, J.F.R., 1980. Airborne remote sensing of sea surface chlorophyll and temperature along the outer British Columbian coast. *6th Canadian Symposium on Remote Sensing*, Halifax, May, 1980.
- Borstad, G. A., Edel, H.R., Gower, J.F.R. and Hollinger, A.B., 1985. Analysis of test and flight data from the Fluorescence Line Imager. *Canadian Special Publ. Fish Aqat. Sci.* 83:38p.
- Borstad, G.A., Gower, J.F.R. and Truax, D.N., 1986. Analysis of data from the DFO Fluorescence Line Imager. *10th Canadian Symposium of Remote Sensing*, 1986, Edmonton.
- Borstad, G.A. and Hill, D.A. 1989. Using Visible range Imaging Spectrometers to Map Ocean Phenomena. *Conference on Advanced Optical Instrumentation for Remote Sensing of the Earth's Surface from Space*. April 1989, Paris, France.
- Borstad, G.A., Hill, D.A. and Kerr, R.C., 1989. Use of the Compact Airborne/Spectrographic Imager (CASI): Laboratory examples. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'89)* 12th Canadian Symposium on Remote Sensing, July, 1989.

- Bowker, D., 1973. Correlation of ERTS multispectral imagery with suspended matter and chlorophyll in lower Chesapeake Bay. - Symp. Significant Results Obtained from ERTS-1, NASA, pp. 1291-1298.
- Bristow, M.P.F, Nielsen, D., Bundy, D.H. and Furtek, R., 1981. Use of Water Raman emission to correct airborne laser fluorosensor data for effects of Water optical attenuation. *Appl. Optics*, Vol 20,
- Bristow, M.P.F., Bundy, D.H., Edmonds, C.M. and Ponto, P.E., 1985. Airborne laser fluorosensor survey of the Columbia and Snake rivers: Simultaneous measurements of chlorophyll, dissolved organics and optical attenuation. *Int. J. Rem. Sensing*, Vol 6(11).
- Bristow, M.P.F., Bundy, D.H., Edmonds, C.M. and Turner, R., 1987. The Application of Laser Fluorosensing to Monitoring Substances in the Near-surface Water Column. *Proceedings from International Colloquium on Remote Sensing of Pollution of the Sea*, Oldenburg, 1987.
- Brown, C.A., Jarrett, O. and Farmer, H.F., 1981. Laboratory Tank Studies of single Species of Phytoplankton using a Remote Sensing Fluorosensor. NASA. Technical Paper 1821.
- Carpenter, D.J., 1982. An assessment of LANDSAT MSS satellite data for inland water resources application. Australian Water Resources Council. Technical Paper No. 72.
- Carder, K.L., Steward, R.G., Harvey, G.R. and Ortner, P.B., 1989. Marine Humic and Fulvic acids: Their effects on remote sensing of ocean chlorophyll. *Limnol. Oceanogr.* 34 (1), 1989, 68-81.
- Cheshire, H.M., Khorram, S. and Brockhaus, J.A., 1985. Proceedings from advanced technology for monitoring and processing global environmental data. Remote Sensing Society and CERMA, London, Sept.1985.
- Clark, D.K., 1981, Phytoplankton algorithms for the Nimbus-7 CZCS. In *Oceanography from Space*, edited by J.F.R. Gower (New York: Plenum), pp. 227-238.
- Collins, M., 1983. Supply, Distribution, and Transport of Suspended Sediment in a Macrotidal Environment: Bristol Channel, U.K. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* Vol. 40 (Suppl.1).
- Collins, M. and Pattiarachi, C., 1984. Identification of suspended sediment in coastal waters using airborne thematic mapper data. *Int. J. of Remote Sensing*, vol. 5 No. 4, 635-657.

- Dahle, S. og Kögeler, J., 1990. Optisk fjernmåling av marine ressurser. Akvaplan januar 1990.
- Dean, K.G., McRoy, C.P., Ahlnäs, K. and Springer, A., 1989. The Plume of the Yukon River in Relation to the Oceanography of the Bering Sea. *Remote Sens. Environ.* 28:75-84.
- Dekker, A.G., Malthus, T.J. and Seyhan, E., 1991. Quantitativ Modeling of inland Water Quality for High-Resolution MSS Systems. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol 29 (1), 1991 .
- Doerffer, R., Fischer, J. Stussel, M., Brockmann, C. and Grassl, H., 1989. Analysis of Thematic Mapper Data for Studying the Suspended Matter Distribution in the Coastal Area of the German Bight (North Sea). *Remote. Sens. Environ.* 28: 61-73.
- Dundas, I., Johannessen, O.M., Berge, G., and Heimdal, B., 1989. Toxic Algal Bloom in Scandinavian Waters, May-June 1988. *Oceanography* Vol 2(1), april 1989.
- Erga, S.R., Oug, E., Knutsen, J. og Magnusson, J., 1990. Eutrofi-tilstand for norske fjorder og kystfarvann med tilgrensende havområder. Rapport 391/90 i Statlig program for forurensningsovervåking. NIVA-rapport nr. 2370.
- Erga, S.R. og Sørensen, K., 1982. Petrokjemianlegget på Kårstø. Bind 1 og 2. Primærproduksjon februar - november 1981. Planteplanktonets biomasse og produksjon sett i relasjon til beitepress, hydrografi, lys og næringsalter. NIVA-rapport 1389.
- Frette, Ø. og Pettersson, L.H., 1991. Metode for operativ atmosfære-korreksjon av flybåret spektrometer data for beregning av marin algefluorescens - Oppfølging av NORSMAP'89. NERSC teknisk rapport nr. 41. 15. mars 1991.
- Forbes, J.R., Borstad, G.A. and Waters, R., 1990. Massive bloom of Gonyaulax spinifera along the west coast of Vancouver Island. *Redtide Newsletter*, Vol. 3, No. 4. October 1990.
- Gillot, R.H., 1987. A Review of air- and spaceborne remote sensing of sea pollution future orientations. *Proceedings from Colloquium on Remote Sensing of Pollution of the Sea*, Oldenburg, 1987.

- Gordon, H.R., Clark, D.K., Brown, J.W., Brown, O.B., Evans, R.H. and Broenkow, W.W., 1983, Phytoplankton pigment concentrations in the Middle Atlantic Bight: Comparison of ship determinations and CZCS estimates. *Appl. Optics*, 22,20.
- Gower, J.F.R., 1980. Observations of in-situ fluorescence of chlorophyll-a in Saanich Inlet. *Boundary-Layer Met.*, 18, 235.
- Gower, J.F.R. and Borstad, G.A., 1981. Use of the in-vivo fluorescence line at 685 nm for remote sensing surveys of surface chlorophyll-a. In *Oceanography from Space*, edited by J.F. R. Gower (New York:Plenum), pp. 329-338.
- Gower, J.F.R. and Borstad, G.A., 1991. An exceptional red tide event on the west coast of Canada mapped with the AVHRR and imaging spectroscopy. *Proceedings from the Canadian Symp. on Rem. Sens. IGARSS'91*.
- Gower, J.F.R., Lin, S. and Borstad, G.A., 1984. The information content of different optical spectral ranges for remote chlorophyll estimation in coastal waters. *Int. J. Remote Sensing*, Vol 5 No. 5, 349-364.
- Grønnlund, A. og Solberg, R., 1991. Resultatkontroll - satellitt-fjernmåling. Forsøk med kartlegging av høstpløying fra satellitt. NIJOS/NR/JORDFORSK, Ås 1991. (Manus).
- Hackett, B. og Dahl, F.E., 1989. Data-atlas: Strømmålinger med en akustisk doppler strømmåler (ADCP) på F/F "Trygve Braarud", august 1988. Delprosjekt 3.5a. Statlig program for forurensningsovervåking (SFT). VERITEC, 56 s.
- Hannes, H., Solbakk, S.A., Bjørnå, K., Flesche, H., Bern, T.I. and Enoksen, R.T., 1989. Near Real Time Delivery of Satellite Data. A Pilot Experiment. TEOC Report No. 6., FORUT, 1989.
- Haugan, P.M., Evensen, G., Johannessen, J.A., Johannessen, O.M. and Pettersson, L.H., 1991. Modelled and Observed Mesoscale Circulation and Wave-Current Refraction during NORCSEX'88. NORCSEX'88 Special Collection, (Accepted *J. Geoph. Res.* 1991)
- Haugen, I.N. og Rørslett, B., 1976. Fjernanalyse - et hjelpemiddel ved regional miljøovervåking. *Forskningsnytt* nr. 3. Årgang 21.

- Houghton, W.M., Exton, R.J. and Gregory, R.W., 1983. Field Investigation of Techniques for Remote Laser Sensing of Oceanographic Parameters. *Remote Sens. of Environ.* 13:17-32.
- Hilton, J., 1984. Airborne Remote Sensing for Freshwater and Estuarine Monitoring. *Water Res.* Vol. 18 No. 10: 1195-1223.
- Hjermstad, L., 1989. Miljøovervåking fra fly. *Vann* 1b. 1989.
- Horstmann, U., 1988. Satellite remote sensing for estimating coastal offshore transports. *Lecture Notes on coastal and Estuarine Studies.* Vol 22 s. 50-66.
- Håkansson, B., 1989. Kartläggning av totalt suspendert materiale från Glomma älven med satellittdata. *Vatten* 45: 271-277.
- Håkansson, B., 1990. Glomma älvens spridningsområde i NO Skagerrak. Resultata av kontinuerlig övervakning av Skagerrak och Kattegatt med satellittdata under januar - juni, 1989. SMHI-Oceanografi. Rapport nr. 36, 1990
- Johannessen, O.M., Olaussen, T., Pettersson, L., Johannessen, J.A., Haugan, P.M., Kloster, K., Sandven, S., Hansen, L. and Geiger, C., 1988. The Toxic Algal Bloom in May 1988. NRSC Special Report Series No. 1. December 1988.
- Johannessen, J.A., Johannessen, O.M. and Haugan, P.M., 1989. Remote Sensing and model simulation studies at the Norwegian Coastal Current during the algal bloom in May 1988. *Int. J. Remote Sensing*, vol 10. (12), 1989.
- Kiefer, D.A., Chamberlin, W.S. and Booth, C.R., 1989. Natural fluorescence of chlorophyll-a: Relationship to photosynthesis and chlorophyll concentration in the Western South Pacific gyre. *Limnol. Oceanogr.*, 34(5), 868-881.
- Klemas, V., 1973. Applicability of ERTS-1 imagery to the study of suspended sediment and aquatic fronts. - *Symp. Significant Results Obtained from ERTS-1 NASA*, pp. 615-624.
- Kunkel, B., Blechinger, F. and Lutz, R., 1987. "ROSIS - Advanced Imaging Spectrometry and Its Potential Role for Marine Pollution Monitoring". *Proceedings from Colloquium on "Remote Sensing of Pollution of the Sea"*, Oldenburg, 1987.

- Kuring, N., Lewis, M.R., Platt, T. and O'Reilly, J.E., 1990. Satellite-derived estimates of primary production on the northwest Atlantic continental shelf. *Cont. Shelf Res.* Vol 10(5) 1990.
- Kögeler, J. and Dahle, S., 1990. Remote Sensing of sea surface temperatures for coastal zone planning in Northern Norway. Presented at the First circumpolar Symposium on Remote Sensing of the Arctic Environment. Canada, May 1990.
- Lin, S., Borstad, G.A. and Gower, J.F.R., 1984. Remote Sensing of Chlorophyll in the Red Spectral Region. *Remote Sensing of Shelf Sea Hydrodynamics*, J.C. Nihoul (Ed.), Elsevier Oceanography Series 38, Amsterdam, 1984.
- Lindell, T., 1980. Kalibrering av Landsatdata för kartering av vattenkvaliteten i Mälaren, Statens Naturvårdsverk, PM 1266.
- Lindell, T., 1985. Metod för vattenkvalitetsbedömning från satellitdata. Et exempel från Stockholms län, SNV PM 1891.
- Lindell, T., 1986. Operational Water Quality Surveillance in Sweden using Landsat MSS-data. *Proceedings from 10th Canadian Symposium on Remote Sensing*. Edmonton, Alberta 5.-8. May 1986.
- Lindell, T., 1988. Gävle kustvatten. Användning av fjärranalys i fysisk planering. Havresursdelegationen, Planverket, Naturvårdsverket, Uppsala mars 1988.
- Lindell, T., Steinvall, O., Jonsson, M. and Claesson, Th., 1985. Mapping of coastal-water turbidity using LANDSAT imagery. *Int. J. Rem. Sensing*, vol. 6. No. 5: 629-642.
- Lindell, T., Karlsson, B., Rosengren, M. and Alföldi, T., 1986. A Further Development of the Chromaticity Technique for Satellite Mapping of Suspended Sediment Load. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 52. No.9, September 1986: pp. 1521-1529.
- Lindell, T. og Sørensen, K., 1990. Erfaringer med bruk av satellitt-fjernmåling. Fordrag fra seminaret "Sensorer og metoder for automatisk miljøovervåking. Norsk Limnologforening, september 1988. *Limnos* 2/1990.

- Lindell, T., Alexandersson, E.T. and Norrman, J.O., 1991a. Satellite Mapping of Oolitic Ridges in Arabs Gulf, Egypt. Geocarto International no 2:1991.
- Lindell, T., Sørensen, K., Larsen, G. and Nisell, J., 1991b. The bloom of Chrysochromulina polylepis in Skagerrak May 1988. Some aspects on Remote sensing and the vertical distribution of the algae (NIVA-report, in prep.).
- Marin Fjärranalys, 1985. Rapport från delegationen för samordning av havressursverksamheten. 1985:5.
- Mumola, P.B., 1973. Multiwave length laser induced fluorescence of Algae in-vivo: A new remote Sensing technique. Presented at the joint Conference on the sensing of Environmental Pollutants.
- Munday, J.C. and Alföldi, T., 1975. Chromaticity changes from isoluminous techniques used to enhance multispectral remote sensing data. Remote sensing of Environment 4, pp 221-236.
- Moore, G. and Aiken, J., 1990. Aircraft multispectral remote sensing of water colour of Helgoland. Activities in the field of imaging spectrometry. Proceedings of a Remote Sensing Society Workshop. Millbank Tower, London 1990.
- Neville, R.A. and Gower, J.F.R., 1977. Passive remote sensing of phytoplankton via chlorophyll-a fluorescence. J. geophys. Res., 82, 3487-3493.
- NOBIM - rapport, 1990. Oversikt over norske fagmiljøer og anvendelser innen bildebehandling og mønstergjenkjenning, 1990. SI-rapport 88 01 11-2. ISBN 82-411-0136-8.
- NCG - Nordic Consulting Group, 1990. Bruk av landbasert og kystnære satellittdata. En markedsvurdering. SAT 1. November 1990.
- NRS - rapport, 1989. The Norwegian Polar Orbiting Satellites Utilisation Study. Norsk Romsenter - rapport nr. 3, 1989.
- Pedersen, J.P., 1982. Om atmosfærens effekt på infrarød satellittfjernmåling av havets overflatetemperatur. Et studium innen satellittfjernmåling og bildebehandling. Hovedfagsoppgave i fysikk. Univ. i Tromsø, april 1982.

- Pettersson, L.H., Gjevik, B. and Johannessen, O.M., 1987. Sidelooking Airborne Radar Observations during the Eddytracking Experiment west of Norway. Februar 24 to March 6, 1986. NRSC technical report No.5.
- Pettersson, L.H., Johannessen, O.M., Kloster, K., Olausen, T.I. and Samuel, P., 1989. Application of Remote Sensing to Fisheries. Volum 1. Final project Report to JRC, Ispra. 1989.
- Pettersson, L.H., Frette, Ø., Johannessen, O.M., Sørensen, K., Svendsen, E., Dahl, E., Borstad, G., Kerr, R. and Gower, J.F.R., 1990a. Norwegian Remote sensing Spectroscopy for Mapping and Monitoring of Algal blooms and Pollution - NORSMAP'89. NRSC Technical report no. 28. 90/02/05, Bergen.
- Pettersson, L.H., Johannessen, O.M., Sørensen, K., Borstad, G., Gower, J.F.R. and Frette, Ø., 1990b. Norwegian Remote Sensing Spectroscopy for Mapping and Monitoring of Algal Blooms and Pollution. - NORSMAP'89. Presented at the 13th Canadian Symposium on Remote Sensing, 1990.
- Pettersson, L.H., Johannessen, O.M., Sørensen, K., Borstad, G.A., Gower, J.F.R. and Frette, Ø., 1990c. "NORSMAP'89 - Norwegian Remote sensing Spectroscopy for Mapping and Monitoring of Algal Blooms and Pollution". In proceedings from the IGARSS'90 symposium, University of Maryland, 20 - 24 May 1990.
- Pettersson, L.H., Johannessen, O.M., Sørensen, K., Borstad, G.A., Gower, J.F.R. and Frette, Ø., 1990d. "NORSMAP'89 - Norwegian Remote sensing Spectroscopy for Mapping and Monitoring of Algal Blooms and Pollution." Poster presented at "Ocean from Space", Venice, 22 - 26 May, 1990.
- Pettersson, L.H., Johannessen, O.M., Sørensen, K., Borstad, G.A., Gower, J.F.R. and Frette, Ø., 1990e. "Airborne imaging spectroscopy for mapping of the chlorophyll-a and pollution distribution in the Skagerrak region". Presented at the 10th EARSeI symposium, Toulouse, 5.- 8. June, 1990.
- Pettersson, L.H., Johannessen, O.M., Sørensen, K., Borstad, G.A., Gower, J.F.R. and Frette, Ø., 1990f. "NORSMAP'89 - Norwegian Remote sensing Spectroscopy for Mapping and Monitoring of Algal Blooms and Pollution." In Proceedings from "The Arctic: Canada and the Nordic Countries", Soria Moria, Oslo, 9. - 12. August, 1990.

- Pettersson, L.H., Johannessen, O.M., Frette, Ø., Sørensen, K., Svendsen, E. og Dahl, E., 1990g. "Flybåren Spektrometri for overvåking av alger og forurensing i Skagerrak". Nordisk Kollegium for Fysisk Oceanografi, Nordsø Centeret, Hirtshals, 13-15. august, 1990.
- Pettersson, L.H., Kloster, K. og Johannessen, O.M., 1990h. Felles-nordisk overvåkingsprogram. Anvendelser av fjernmåling til overvåking av vannkvalitet. Spesialrapport nr. 8 til Miljøstyrelsen, Danmark.
- Polarkonsult - 1989. Markedsundersøkelse - Kystsat. Polarkonsult Marketing a/s. Rapport 88.529.1
- Prangma, G.J. and Roozkrans, J.N., 1989. Using NOAA AVHRR imagery in assessing water quality parameters. Int. J. Rem. Sens. vol 10(4-5), 1989.
- Rimmer, J.C., Collins, M.B. and Pattiaratchi, C.B., 1987. Mapping of water quality using Airborne Thematic Mapper data. Int. J. Remote Sensing, vol. 8 (1), 85-102, 1987.
- Robinson, I.S., 1985. Satellite Oceanography - An introduction for oceanographers and remote sensing scientists. Ellis Harwood series in Marine Science.
- Rosseland, B.O., 1990. Dødelighet ved Trown Forsøksanlegg i Holmane, juli 1989. NIVA-rapport nr. 2471 (sperret).
- Ruggles, R., 1973. Plume development in Long Island sound observed by remote sensing. - Symp. Significant Results Obtained from ERTS-1 NASA, pp. 1299-1304.
- Rørsløtt, B., Branderud, T.E. og Johansen, S.W., 1990. Tilgroing i terskelbasseng i Otra ved Valle. Problemanalyse og forslag om tiltak. NIVA-rapport 0-88033, nr. 2442.
- SATUT, 1989. Satellittbildene som hjelpemiddel i utveklingsländernas planering. Sluttrapport från prosjektet SATUT. Swedeplan, Swedish Space Corporation and Swedsurvey.
- Sathyendranath, S., Prieur, L. and Morel, A., 1989. A three-component Model of Ocean colour and its application to remote sensing at phytoplankton pigments in coastal waters: Int. J. Remote Sensing, Vol. 10. no. 8 1373-1394.

- SFT-rapport 433/90. Overvåkingsresultater 1989. Statlig program for forurensningsovervåking. ISBN 82-90031-57-2.
- Skulberg, O.M., (Ed.), 1974. Report to the National Aeronautics and Space Administration, April 1974. Prosjekt: Multidisciplinær Approach to the Study of Environmental Quality and Resources Management, NASA Control Nos. INT-NOR-05 and SR-0378. Norwegian Institute for Water Research Report B/72. May, 1974.
- Skulberg, O.M., 1988a. Blågrønnalger - vannkvalitet. Toksiner. Lukt- og smakstoffer. Nitrogenbinding. NIVA-rapport 2116.
- Skulberg, O.M., 1988b. Blågrønnalger - giftprodusenter i vann. Populærvitenskapelig magasin. Nr. 6:52-55.
- Slater, P.N., 1985. Survey of Multispectral Imaging Systems for Earth Observations. Remote Sensing of Environment. 17:85-102.
- Smith, J.M., 1988. The role of Remote Sensing in the Study of Tree Damage caused by Air Pollution. Report for UK. Department at the Environment. Sub-project 2E. 1988.
- Sæbø, H.V., Buer, K.Y. and Sørensen, K., 1988. Remote sensing for mapping and monitoring water quality. Proceedings fra Nordisk konferanse om bildebehandling og mønstergjenkjenning, Oslo, 1988.
- Sørensen, K., 1991. Satellittfjernmåling av vannkvalitet. Sammenstilling av innledende utprøvinger i ferskvann- og sjøvannsresipienter 1986-1987. NIVA-rapport. (Manus).
- Sørensen, K., Lindell, T. and Nisell, J., 1989. The Information Content of AVHRR, MSS, TM and SPOT in the Skagerrak Sea. Proceedings from the 12th Canadian Symp. on Rem. Sens. Vancouver, B.C. Canada, July, 1989.
- Sørensen, K. og Lindell, T., 1990. Eutrofisisituasjonen i Ytre Oslofjord. Delprosjekt 3.7a. Optiske observasjoner - overflatevannets kvalitet sett ut fra observasjoner i overflatelaget og fjernmåling. Rapport 387/90 i Statlig program for forurensningsovervåking. NIVA-rapport nr. 2365.
- Sørensen, K., Aas, E. og Lindell, T., 1990a. Eutrofisisituasjonen i Ytre Oslofjord 1989. Delprosjekt 4.6 a. Optiske målinger. Rapport 405/90 i Statlig program for forurensningsovervåking. NIVA-rapport nr. 2407.

- Sørensen, K., Magnusson, J., Røed, L.P., Irman-Jacobsen, T.B. og Lindell, T., 1990b. Eutrofisisituasjonen i Ytre Oslofjord 1989. Delprosjekt 4.6b. Verifikasjon av modellresultater mot satellitt-data. Rapport nr. 414/90 i Statlig program for forurensningsovervåking. NIVA-rapport nr. 2462.
- Sørensen, K., Nilsen, J., Sæbø, H.V. og Holbæk-Hanssen, E., 1990c. Satellittfjernmåling av vannkvalitet. Testing av Landsat-5 Thematic Mapper data for kartlegging av Glomma- og Iddefjordvannets spredning i Hvaler og Ytre Oslofjord. Rapport 404/90. Statlig program for forurensningsovervåking. NIVA-rapport nr. 2434.
- Tassan, S., 1987. Evaluation of the potential of the Thematic Mapper for Marine application. *Int. J. Remote Sensing*, vol. 8 No. 10.
- Vos, W.L., Donze, M. and Buiteveld, H., 1986. On the reflectance spectrum of algae in water. The nature of the peak at 700 nm and its shift with varying concentration. *Communication San. Eng. and Water Manage.*, Delf, The Netherlands, Tech. Rep. 86-22, 1986.
- Walker, G.A., Buchholz, V.L., Camp, D., Isherwood, B., Glaspey, J., Coutts, R., Condal, A. and Gower, J.F.R., 1974. A compact multi-channel spectrometer for field use. *Review of scientific Instrumentation*. 45: 1349-1352.
- Østerlund, H., 1988. SPOT-data for bathymetric charting. Poster presented at the Twenty-Second International Symposium on Remote Sensing of Environment, Abidjan, Cote d'Ivoire, Oct. 20-26, 1988.

Norsk institutt for vannforskning  NIVA

Postboks 69, 0808 Oslo 8

ISBN 82-577-1886-6