



Rapport 414|90

Oppdragsgiver

Statens forurensningstilsyn

Deltakende institusjoner

NIVA
VERITEC
Centrum för bildanalys

Eutrofi- situasjonen i YTRE OSLOFJORD 1989

DELPROSJEKT 4.6b

Verifikasjon av
modellresultater mot
satellittdata



NIVA



Statlig program for forurensningsovervåking

Det statlige programmet omfatter overvåking av forurensningsforholdene i

**luft og nedbør
grunnvann
vassdrag og fjorder
havområder**

Overvåkingen består i langsiktige undersøkelser av de fysiske, kjemiske og biologiske forhold.

Hovedmålsettingen med overvåkingsprogrammet er å dekke myndighetenes behov for informasjon om forurensningsforholdene med sikte på best mulig forvaltning av naturressursene.

Hovedmålet spenner over en rekke delmål der overvåkingen bl.a. skal:

gi informasjon om tilstand og utvikling av forurensningssituasjonen på kort og lang sikt.

registrere virkningen av iverksatte tiltak og danne grunnlag for vurdering av nye forurensningsbegrensende tiltak.

påvise eventuell uheldig utvikling i resipienten på et tidlig tidspunkt.

over tid gi bedre kunnskaper om de enkelte vannforekomsters naturlige forhold.

Sammen med overvåkingen vil det føres kontroll med forurensende utslipp og andre aktiviteter.

Overvåkingsprogrammet finansieres i hovedsak over statsbudsjettet. Statens forurensningstilsyn er ansvarlig for gjennomføring av programmet.

Resultater fra de enkelte overvåkingsprosjekter publiseres i årlige rapporter.

Henvendelser vedrørende programmet kan i tillegg til de aktuelle institutter rettes til Statens forurensningstilsyn, Postboks 8100 Dep, 0032 Oslo 1, tlf. 02 - 65 98 10.

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.: 0-89075
Undernummer:
Løpenummer: 2462
Begrenset distribusjon: Fri

Rapportens tittel: Eutrofisituasjonen i Ytre Oslofjord 1989. Delprosjekt 4.6 b. Verifikasjon av modellresultater mot satellittdata. (Overvåkingsrapport nr. 414/90)	Dato: 30/7-90
Forfatter (e): Kai Sørensen Lars Petter Rød Jan Magnusson Tine B. Irmann-Jacobsen Tommy Lindell	Rapportnr. 0-89075
	Faggruppe: Analyse/ Marin eutrofi
	Geografisk område: Oslofjorden
	Antall sider (inkl. bilag): 52

Oppdragsgiver: Statens forurensningstilsyn (SFT) (Statlig program for forurensningsovervåking)	Oppdragsg. ref. (evt. NTNf-nr.):
--	----------------------------------

Ekstrakt: En numerisk modell for overflatestrømmer, som inkluderer en enkel simulering av spredning av nitrogen med ferskvann fra Glomma og Drammenselva, er sammenlignet med fjernmålingsdata fra satellitt (7 situasjoner). Modellen simulerer hovedtrekkene i strøm- og transportforholdene i Ytre Oslofjord tilfredsstillende og spesielt bra i området Breidangen til Bolærne. I modellens sørlige grenseflate mot Skagerrak var det imidlertid avvik mellom modellresultater og tolking av satellittbilder som viser innflytelsen av sirkulasjonen i Skagerrak i dette området.

4 emneord, norske:

1. Oslofjorden
2. Numerisk modell
3. Satellittobservasjoner
4. Verifikasjon

4 emneord, engelske:

1. Oslofjord
2. Numerical model
3. Satellite observations
4. Verification

Prosjektleder:

Kjell Baalsrud

For administrasjonen:

Jarle Molvær

ISBN 82-577-1773-8

Programleder, overvåking



Statlig program for forurensningsovervåking

EUTROFISITUASJONEN I YTRE OSLOFJORD 1989

Delprosjekt 4.6b

Verifikasjon av modellresultater mot satellittdata

Oslo, 30. juli 1990.

Prosjektleder: Kjell Baalsrud, NIVA

Forfattere: Kai Sørensen, NIVA

Lars Petter Røed, VERITEC

Jan Magnusson, NIVA

Tine B. Irmann-Jacobsen, VERITEC

Tommy Lindell, Centrum för bildanalys

Medarbeid.: Jacob Nisell, Centrum för bildanalys

Helge Skåtun, VERITEC

Gunnar Severinsen, NIVA

FORORD

Dette er en delrapport i en større undersøkelse av Eutrofisituasjonen i Ytre Oslofjord.

Prosjektet utføres for Statens forurensningstilsyn av Norsk Institutt for Vannforskning (NIVA) i samarbeid med Universitetet i Oslo (UIO) og VERITEC, Oslo. Prosjektet er inndelt i flere delundersøkelser og dette delprosjektet utføres i tillegg i samarbeid med Centrum för bildanalys, Uppsala.

Resultatene fra første undersøkelsesår, 1988, er presentert i en Fremdriftsrapport, nr. 376/89 i det Statlige program for forurensningsovervåking (SFT). Resultatene av samtlige delundersøkelser i 1988 og 1989 vil bli sammenstilt i en sluttrapport i 1990. De enkelte delrapportene vil bare i mindre grad kunne trekke inn resultater fra de andre delundersøkelsene.

Denne rapporten tar for seg en verifikasjon av modellresultater fra delprosjektet 4.8 "Transportmodell" ved bruk av satellittdata fra delprosjektet 4.6 "Optiske målinger", og fra delprosjekt 3.7 "Optiske observasjoner - overflatevannets kvalitet sett ut fra observasjoner i overflatelaget og fjernmåling" fra 1988. Denne delundersøkelsen baseres på data fra 1988 og 1989.

Arbeidet er utført av NIVA, VERITEC og Centrum för bildanalys. Jacob Nisell (Centrum för bildanalys) og Gunnar Severinsen (NIVA) har foretatt bildebehandling, og Helge Skåtun (VERITEC) har tilrettelagt data fra den numeriske modellen. Prosjektet er takk skyldig til disse.

Kjell Baalsrud
prosjektleder

INNHOLDSFORTEGNELSE

	Side
Forord	1
Sammendrag	5
1. Innledning	7
1.1 Bakgrunn	7
1.2 Formål	8
2. Transportmodell og satellittdata	9
2.1 Beskrivelse av transportmodellen	9
2.1.1 Den numeriske modellen for strøm og sporstoff ...	9
2.1.2 Resultater fra modellen	11
2.2 Beskrivelse av satellittdataene.....	12
2.2.1 Høyoppløselige satellittdata.....	12
2.2.2 Lavoppløselige satellittdata.....	13
2.2.3 Presentasjon av satellittbildene.....	13
2.3 Beskrivelse av verifikasjonen.....	13
3. Sammenligning av modellresultater og satellittdata	16
3.1 Verifikasjon for den 13. mai 1988.....	16
3.1.1. Tolkning av satellittbildet.....	16
3.1.2. Sporstoffsimuleringen.....	17
3.1.3. Diskusjon av avvik mellom modell og observasjon.	17
3.2 Verifikasjon for den 15. mai 1988.....	23
3.2.1. Tolkning av satellittbildet.....	23
3.2.2. Sporstoffsimuleringen.....	23
3.2.3. Diskusjon av avvik mellom modell og observasjon.	24
3.3 Verifikasjon for den 28. mai 1988.....	28
3.3.1. Tolkning av satellittbildet.....	28
3.3.2. Sporstoffsimuleringen.....	28
3.3.3. Diskusjon av avvik mellom modell og observasjon.	28
3.4 Verifikasjon for den 14. juni 1988.....	32
3.4.1. Tolkning av satellittbildet.....	32
3.4.2. Sporstoffsimuleringen.....	32
3.4.3. Diskusjon av avvik mellom modell og observasjon.	32

3.5	Verifikasjon for den 1. august 1988.....	36
3.5.1.	Tolkning av satellittbildet.....	36
3.5.2.	Sporstoffsimuleringen.....	36
3.5.3.	Diskusjon av avvik mellom modell og observasjon.	36
3.6	Verifikasjon for den 10. juni 1989.....	40
3.6.1.	Tolkning av satellittbildet.....	40
3.6.2.	Sporstoffsimuleringen.....	40
3.6.3.	Diskusjon av avvik mellom modell og observasjon.	41
3.7	Verifikasjon for den 22. juni 1989.....	45
3.7.1.	Tolkning av satellittbildet.....	45
3.7.2.	Sporstoffsimuleringen.....	45
3.7.3.	Diskusjon av avvik mellom modell og observasjon.	45
4.	Diskusjon.....	49
5.	Litteratur.....	51

FIGURER

	Side:
1. Kart over Ytre Oslofjord med stedsnavn benyttet i rapporten...	15
2. Relativ temperaturfordeling i Ytre Oslofjord den 13. mai 1988.	18
3. Relativ temperaturfordeling i Breidangenområdet kl. 1056 og kl. 0954, og relativ turbiditet i Hvalerområdet kl. 1056 den 13. mai 1988.....	19
4. Simulert fordeling av sporstoff den 13. mai 1988 kl. 1200.....	20
5. Simulert hastighets- og konturplott for 13. mai 1988 kl. 1200.	21
6. Simulert fordeling av sporstoff den 11. mai 1988 kl. 1200.....	22
7. Relativ temperaturfordeling i Ytre Oslofjord og Skagerrak den 15. mai 1988 kl. 1415.....	25
8. Simulert fordeling av sporstoff den 15. mai 1988 kl. 1200.....	26
9. Simulert hastighets- og konturplott for 15. mai 1988 kl. 1200.	27
10. Relativ temperaturfordeling i Ytre Oslofjord/Skagerrak den 28. mai 1988 kl. 1513.....	29
11. Simulert fordeling av sporstoff den 28. mai 1988 kl. 1200.....	30
12. Simulert hastighets- og konturplott for 28. mai 1988 kl. 1200.	31
13. Relativ turbiditetsfordeling i Ytre Oslofjord den 14. juni 1988 kl. 1056.....	33
14. Simulert fordeling av sporstoff den 14. juni 1988 kl. 1200....	34
15. Simulert hastighets- og konturplott for 14.juni 1988 kl. 1200.	35
16. Relativ temperatur- og turbiditetsfordeling i Ytre Oslofjord den 1. august 1988 kl. 1056.....	38
17. Simulert hastighets- og konturplott for 1. aug. 1988 kl. 1200.	39
18. Relativ temperaturfordeling i Ytre oslofjord kl. 1230 og kl. 1047 den 10. juni 1989.....	42
19. Simulert hastighets- og konturplott for 10.juni 1989 kl.0000..	43
20. Simulert fordeling av sporstoff den 10. juni 1989 kl.1200.....	44
21. Relativ temperaturfordeling i Ytre Oslofjord den 22. juni 1989 kl. 1347.....	46
22. Simulert fordeling av sporstoff den 22.juni 1989 kl.1200.....	47
23. Simulert hastighets- og konturplott for 22.juni 1989 kl.1200..	48

SAMMENDRAG

Formål

Målsettingen med dette delprosjektet er å foreta en verifikasjon av resultater fra transportmodellen for Ytre Oslofjord ved bruk av fjernmålingsdata fra satellitt. Verifikasjonen skal bygge på et utvalg av både termiske og optiske satellittdata.

Konklusjoner

Modellen synes å simulere hovedtrekkene i strømforholdene i Ytre Oslofjord tilfredsstillende. Spesielt synes modellen å simulere forholdene i Breidangenområdet og ned til Slagentangen og Bolærne meget bra. Av og til får man avvik i modellområdets sørlige grense mot Skagerrak og spesielt den sørøstlige delen. Modellen synes her å gi for mye sydlig spredning og noe for sterke strømmer. Dette understreker betydningen av å simulere sirkulasjonen i Skagerrak korrekt.

Resultatene fra denne sammenligningen er oppløftende. Den har vist at satellittbilder og modellresultater gjensidig kan utnyttes til å øke forståelsen av dynamikken i enkeltsituasjoner. Denne kombinasjonen ga mer informasjon hva hver metode ville ha gitt enkeltvis. Modellens ikke-linearitet, som gir mulighet for å beskrive virveldannelse, har også gjort det mulig å tolke spesielle forhold i satellittbildene. Bruk av optiske og termiske satellittdata i en slik verifikasjon var meget nyttig.

Gjennomføring

Konklusjonene ovenfor er basert på en detaljert sammenligning av satellittbilder og modellresultater fra syv situasjoner, fem fra 1988 og to fra 1989. Det ble tatt sikte på å anskaffe to nye høyoppløselige satellittscener for 1989, og det skulle benyttes inntil fem scener med lavoppløselige termiske vær-satellittdata. Disse data ville også bidra til å gi en mer fullstendig kartlegging av de forskjellige vanntypenes utbredelse i området.

Satellittdataene som er benyttet er dels fra de høyoppløselige multi-spektrale sensorene MSS og TM ("Thematic Mapper") ombord i jordressurssatellitten Landsat-5, og dels fra sensoren AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) ombord i vær-satellittene NOAA-9, 10

og 11. AVHRR-sensorene har en dårligere geometrisk oppløselighet sammenlignet med TM og MSS. Det benyttes data både fra optiske og termiske sensorer og bildene er her laget relative, etter en kontraststrekking, for å få frem flest detaljer.

Modellresultatene som er benyttet er fremskaffet ved å simulere strømforholdene med en tyngderedusert modell spesielt utviklet for bruk i prosjektet. Resultatene som sammenlignes med satellittbildene er fra tre forskjellige simuleringer: (i) 1.5.88 - 15.7.88, (ii) 14.7.88 - 4.8.88 og (iii) 1.6.89 - 17.7.89.

Flere satellittscener fra både 1988 og 1989 ble vurdert brukt, men på grunn av at bare fire situasjoner med AVHRR-data og en ny situasjon med TM-data (1989) hadde god nok kvalitet, ble det i stedet benyttet ytterligere to høyoppløselige scener fra 1988-prosjektet. Med disse fire scenene med lavoppløselige og totalt tre scener med høyoppløselige data anses materiale som tilfredstillende. Fra den første simuleringen ble to høyoppløselige satellittscener benyttet (13. mai og 14. juni) og to værsatellittscener (15. mai og 28. mai). Fra den andre ble et høyoppløselig bilde fra den 1. august benyttet og fra den siste simuleringen ble dels en kombinasjon av høyoppløselig- og lavoppløselige data (10. juni) og bare værsatellittdata (22. juni) benyttet.

Disse situasjonene er dels valgt ut fra hensyn til satellittbildenes kvalitet og dels fra periodene med interessante værsituasjoner. For enkelte av disse perioder har førsituasjonen vært vekslende, tildels med meget kraftige vinder.

Satellittbildene er først tolket med vekt på spredning (fordeling) av kalde vannmasser (termiske bilder) og fordeling av turbide vannmasser (optiske bilder). Man har forsøkt å ta hensyn til forhold som kan føre til mistolkning, såsom soloppvarming av overflatevann, skyer, landskygger og begrensinger ved den geometriske oppløseligheten. Resultatet er så sammenlignet med simulerte fordelinger av sporstoff fra modellen, samt strømforhold. Bildene fra satellitt og modellresultater avviker noe i tid, men sjelden mer enn fire timer.

1. INNLEDNING

1.1 Bakgrunn

Gjennom prosjektet "Eutrofisituasjonen i Ytre Oslofjord" er det blitt utviklet en transportmodell for fjorden basert på relativt enkle dynamiske, fysiske prosesser. Denne transportmodellen gir resultater i form av simulerte verdier for horisontal strøm i de øvre vannmassene og av tetthet (saltholdighet). I tillegg gir modellen informasjon i form av konsentrasjoner av materiale oppblandet i de øvre vannmassene (sporstoff). Modellen er nærmere beskrevet i rapporten fra delprosjektet 3.3 (Skåtun og Røed, 1990). En kort oppsummering er gitt nedenfor:

Ingen modeller er "perfekte", idet en rekke fysiske prosesser vanligvis utelates. Så også for transportmodellen. Det vesentlige å merke seg i denne forbindelse, er at transportmodellen for Ytre Oslofjord er utviklet for å ivareta de viktigste fysiske prosessene som påvirker og gir strøm i Ytre Oslofjord's øvre vannmasser. Modeller må alltid kontrolleres mot observasjoner innen de kan tas i bruk. Det er derfor nødvendig og ønskelig å utføre en rekke verifikasjonsstudier av modellen.

Vanligvis gjøres dette ved å sammenligne data samlet inn i felten med modellresultater. Som oftest er dataene bearbeidet i form av tidserier fra enkeltpunkter. Noe mer sjelden foreligger bearbeidede data som gjengir forholdene over større områder, dvs. som kart. I begge tilfellene er dataene imidlertid inkonsistente med modellresultatene. Mens modellresultatene gir et øyeblikksbilde over hele området, vil tilsvarende bilder basert på feltdata nødvendigvis være samlet inn over en lengre periode. Data i enkeltpunkter (tidserier) er kontinuerlige i tid, men er til gjengjeld uttrykk for f.eks. strømmen (eller tettheten) nøyaktig i det punktet hvor det er samlet inn, hvilket som oftest ikke sammenfaller med modellens gitterpunkter.

Satellittbilder derimot er konsistente med modellresultater, idet de for det første samler inn øyeblikksbilder over store områder, dvs. sikrer samtidighet i datainnsamlingen. For det andre er dataene i hvert enkelt punkt uttrykk for verdier over et noe større område, på samme måte som modellen er det. Imidlertid samler satellittsensorene inn informasjon som kan tolkes som fordeling av temperatur og optiske egenskaper (turbiditet) i vannmassene, mens modellresultatene er i form av strøm og tetthet. Informasjon fra satellittbildene må derfor omtolkes til strøm og tetthet før en sammenligning kan foretaes. Noen av simuleringene som er foretatt med transportmodellen inkluderer

også fordelingen av ett sporstoff (forsøksvis nitrogen) som med en viss forsiktighet kan sammenlignes direkte med turbiditetsfordelinger. Også temperaturbildene gir uttrykk for fordelinger og derigjennom spredning, men temperaturen i overflaten er svært avhengig av lokal soloppvarming og andre faktorer. F.eks. vil vann i bakevjer og virvler lett bli oppvarmet om dagen. Til tross for disse innvendingene gir satellittdataene en mulighet for sammenligning og verifikasjon, som for det første er forskjellig og uavhengig av feltdata og som for det andre er konsistente med modellresultatene.

En ad hoc sammenligning av det strømmønsteret som kunne tolkes ut fra satellittbildene i 1988-projektet stemte bra overens med resultatene fra den numeriske transportmodellen. Det ble derfor besluttet i 1989 prosjektet å sammenligne flere situasjoner for å få en bedre verifikasjon av modellen. Det ble tatt sikte på å anskaffe to nye høyoppløselige satellittscener for 1989, og det skulle benyttes inntil fem scener med termiske værsatellittdata med en lavere oppløselighet. Disse data ville også bidra til å gi en mer fullstendig kartlegging av de forskjellige vanntypenes utbredelse i området.

1.2 Formål

Målsettingen med dette delprosjektet er å foreta en verifikasjon av transportmodellen for Ytre Oslofjord ved bruk av fjernmålingsdata fra satellitt. Verifikasjonen skal bygge på et utvalg av både termiske og optiske satellittdata.

2. TRANSPORTMODELL OG SATELLITTDATA

2.1 Beskrivelse av transportmodellen

Resultatene fra transportmodellen med sporstoffordelinger som presenteres i denne rapporten består av øyeblikksbilder av felter for strøm, tetthet og sporstoffkonsentrasjon (her nitrogen). Det er lagt vekt på å fremstille bildene mest mulig egnet for sammenligning med satellittbilder, og så oversiktlige og beskrivende som mulig. Nedenfor følger en kort presentasjon av den anvendte numeriske modellen og en beskrivelse av hvordan resultatene er fremkommet og presentert. En nærmere beskrivelse av modellen og resultatene er gitt i Røed m.fl., (1990).

2.1.1 Den numeriske modellen for strøm og sporstoff

Den numeriske strømmodellen er en ikke-linær tyngderedusert modell beskrevet i kulekoordinater. Den er konstruert over samme lest som en modell tidligere utviklet for det Indiske hav av Luther og O'Brien (1985). Effekten av fjordens lagdeling er tatt hensyn til ved innføringen av en redusert tyngdeakselerasjon, slik at bevegelsen knyttet til de øvre vannmasser betraktes.

De matematiske ligningene som styrer bevegelsen er ikke-lineære, noe som er nødvendig for å kunne simulere virvler. Ligningene er videre basert på to vesentlige antakelser om fjordens fysikk. For det første antas trykket til enhver tid å være hydrostatisk fordelt i vertikalen. For det andre antas tykkelsen av det øvre laget å være lite i forhold til den totale dybden av fjorden.

De resultater modellen gir i form av strøm og hydrografi er derfor vesentlig knyttet til egenskapene i de øvre vannmassene. Strømmen er representert ved en dybdeintegrert eller midlere strøm over det øvre laget. Tettheten i det øvre laget er representert ved en parameter kalt "øvre lags tykkelse". Jo tykkere øvre lag, jo lettere vann og vice versa (Røed, 1990). Modellen tar ikke hensyn til bevegelsen i de nedre vannmassene, men massefluksen (eller massetransporten) i de øvre vannmassene kompenseres av en tilsvarende massetransport i de nedre vannmassene. Strømmodellen er en ren baroklin modell og har derfor ikke i seg strømmer som skapes på grunn av overflatens helning (barotrope strømmer). Det er ikke lagt inn tidevann i modellen.

Vinden, som er det viktigste pådraget, parametriseres ved hjelp av en vindspenning på overflaten. I tillegg settes det opp strømmer på grunn av vannføringen i de to store vassdragene Glomma og Drammenselva.

Bevegelsen som på denne måten settes opp i de øvre vannmassene er derfor drevet av både vindkrefter og trykkrefter skapt av horisontale tetthetsforskjeller.

Grenseflaten mot Skagerrak i sør er en åpen grenseflate. Ved denne grenseflaten har vi benyttet et "Flow Relaxation Scheme". Ved bruk av et slikt skjema tilpasses (relakseres) den indre løsningen til den ytre påtrykte løsningen gjennom en relaksasjonssone. Den spesifiserte ytre løsningen ved grenseflaten består av tre komponenter. Den første er en ren Ekman-balanse som simulerer virkninger av en vindsirkulasjon i Skagerrak. Denne er spesifisert slik at den gir en balanse mellom Coriolis-kraften, trykkgradienten og vindkreftene tangentialt på grenseflaten, og en balanse mellom Coriolis-kraften og vindkreftene normalt på grenseflaten.

I noen tilfeller vil det være et misforhold mellom den ytre, spesifiserte grenseflatebetingelsen og den indre dynamiske løsningen for modellen. For at modellen skal kunne håndtere slike situasjoner, er en metode kalt "Ekstern Transient"-tilpasning implementert. I modellen er denne implementert for øvre lags tykkelse og kun ved utstrømning over grenseflaten.

Det er også tatt hensyn til at innstrømning fra fjorder og elver vil øke massen innenfor modellområdet. Massen er bevart ved at en tilsvarende utstrømning av masse er pålagt ved grenseflaten mot Skagerrak.

Grenseflatene som tar seg av innstrømning fra fjorder og elver behandles også ved et "Flow Relaxation Scheme". Den indre løsningen tilpasses (relakseres) til den ytre påtrykte løsningen gjennom en relaksasjonssone.

Modellen for spredning av sporstoff er en ren adveksjons-/diffusjonsligning med pålagte kilder og sluk. Stort sett simuleres spredning av sporstoff (nitrogen) vesentlig ved forflytning (adveksjon) i det horisontale strømfeltet. I tillegg inneholder modellen et sluk ved at det tas hensyn til at partikulært materiale har en synkehastighet og derved at nitrogen felles ut av de øvre vannmassene. Det er brukt en synkehastighet på 3 meter pr. døgn (Syvitski m.fl., 1987). Simuleringene starter med en bakgrunns-konsentrasjon på 180 µg/l. Sporstoffet blir tilført i Drammenselva og Glomma som en lineær funksjon av vannføringen, og det er spredningen av denne tilførselen som simuleres.

Det er ikke tatt hensyn til horisontal blanding og heller ikke en

eventuell tilførsel av nitrogen fra de dypere vannmassene annet enn det som strømodellen gir som inngangsdata.

Man kan velge å beregne spredning av sporstoff enten i ettetid basert på de lagrete strømdata, eller samtidig med at transportmodellen kjøres. Det er valgt å gjøre det i ettetid fordi det gir en vesentlig raskere og mer effektiv kjøring (både av transportmodellen og av sporstoffmodellen) og gir derfor mulighet til langt flere eksperimenter. Ulempen er at data bare foreligger hver 4. time, hvilket kan gi for dårlig oppløselighet i tid. Dette er tatt hensyn til ved at strømdataene fra transportmodellen interpoleres i tid før de brukes i sporstoffmodellen.

Det bør påpekes at sporstoffmodellen bygger på antakelser som ikke er kontrollert, og må derfor ses på som en første tilnærming for å undersøke spredning av nitrogen i området (f.eks. er sedimentasjons-hastigheten sannsynligvis for lav). Imidlertid gir spredningsbildene kvalitative resultater som er lettere å sammenligne med satellittbilder, idet de er av samme type (dvs. konsistente).

2.1.2 Resultater fra modellen

Resultatene fra modellen presenteres i form av felter for i) strøm og tetthet (øvre lags tykkelse) i de øvre vannmassene og ii) konsentrasjon av sporstoff (her totalnitrogen).

Landkonturene er lagt på i ettetid for å gi et riktig visuelt bilde. Tidspunktet som er angitt på figurtekstene er norsk normalt tid (vintertid). Antall simuleringstimer blir regnet fra 1. mai 1988 kl.00 og for 1989-simuleringen fra 1. juni kl 00.

Fra modellen hentes volumflukser og tykkelsen av det øvre laget. Ved hjelp av disse to størrelsene beregnes den midlere strøm for de øvre vannmassene. Fordi det er benyttet et forskjøvet ("staggered") gitter er strømmen interpolert og presentert i gitterpunkter der øvre lags tykkelse er gitt. Strømmen er fremstilt som piler i øyeblikksbildene. Pilens lengde er proporsjonal med hastigheten og pilens retning er lik strømmens retning. Det er satt en terskelverdi, slik at strømhastigheten under denne terskelen ikke blir plottet. Tettheten (øvre lags tykkelse) er presentert i samme bilde og er konturplottet med 1 m konturintervaller. Lagringsintervallene for feltene er 4 timer. Strømfeltene brukes som inngangsdata til sporstoffmodulen, (se Skåtun og Røed, 1990.)

På samme måte som for strøm og tetthet kan øyeblikksbilder av felter

for konsentrasjon av sporstoff konstrueres. Bildene fra feltene for nitrogenkonsentrasjoner er gitt for hver 12. time. Alle konsentrasjoner er gitt i $\mu\text{g}/\text{l}$. Konsentrasjonene presenteres i bildene som konturplott med konturintervall $50 \mu\text{g}/\text{l}$.

De lagrete feltene av i) strøm og tetthet og ii) konsentrasjon av sporstoff, brukes til å konstruere grafiske produkter så som papirkopier av øyeblikksbilder av feltene. Papirkopier av samtlige felter fra simuleringene er samlet i Røed m.fl., 1990 (Appendix B). Øyeblikksbildene konstrueres ved hjelp av en plottepakke kalt XTASY, en PC-basert versjon av en plottepakke utviklet ved NCAR (National Center for Atmospheric Research), USA. Øyeblikksbildene, som lagres elektronisk, kan fremvises på skjerm, plottes på papir eller eksporteres elektronisk for videre produksjon, f. eks. i et "Screen Show".

2.2 Beskrivelse av satellittdataene

Satellittdataene som er benyttet i verifikasjonen er dels fra de høyoppløselige multispektrale sensorene ombord i jordressurssatellitten Landsat-5, og fra sensorer i vær-satellittene NOAA-9, 10 og 11. Sensorene i vær-satellittene har en dårligere geometrisk oppløselighet enn de i jordressurssatellitten. Det benyttes både optiske og termiske sensordata, og bildene presenteres som relative verdier for å få frem mest informasjon.

2.2.1 Høyoppløselige satellittdata

De høyoppløselige satellittdataene som er benyttet i denne undersøkelsen er fra de multispektrale sensorene MSS og TM ("Thematic Mapper") ombord i Landsat-5 satellitten. Den geometriske oppløseligheten til disse er 80 m for den optiske MSS-sensoren, og hhv. 30 m for de optiske og 120 m for den termiske kanalen hos TM-sensoren. Det benyttes systemkorrigerede data fra nedlesningsstasjonen Esrange, Kiruna. Satellittdataene for de optiske sensorer presenteres som relative "turbiditets"-bilder, og er basert på enkeltkanaler eller kombinasjoner av kanaler fra den synlige delen av spekteret. De termiske dataene presenteres som sterkt kontraststrekte data i relative verdier. Det er benyttet satellittdata også fra 1988 prosjektet, hvor en nærmere presentasjon av grunnlaget for bildene er gitt i Sørensen og Lindell (1990). En beskrivelse av satellittsystemet og sensorer er forøvrig gitt i Sørensen m. fl., (1990b).

2.2.2 Lavoppløselige satellittdata

De lavoppløselige værstatellittdataene som benyttes er fra AVHRR-sensoren ("Advanced Very High Resolution Radiometer") i NOAA-9, 10 og 11. Fra disse satellittene benyttes bare data fra de termiske sensorene som presenteres som relative verdier. Disse har en nominell geometrisk oppløselighet på 1.1 km, slik at når man benytter data fra satellittscenens kanter (ved skrå-opptak), vil den geometriske oppløseligheten kunne bli 2-3 km. Enkelte av bildene som er benyttet har derfor en noe dårlig geometrisk oppløselighet. Dataene er fra nedlesningsstasjonen ved Universitetet i Dundee, og er prosessert videre med et program utviklet av Bert Karlson ved Statens Naturvårdsverk, Sverige.

2.2.3 Presentasjon av satellittbildene

Både høy- og lavoppløselige data er bearbeidet på PC-baserte bildebehandlingssystemer (EBBA-GIS eller ERDAS), og plottet på en Tektronix "ink-jet" plotter. I denne bearbeidingen maskes land vekk og plottes enten sort eller hvit. Informasjonen i vannet kontraststrekkes og presenteres som relative verdier. Endel av bildene er dessuten blitt geometrisk korrigert. For å redusere trykningskostnadene benyttes sort/hvitt plott av dataene. Fargebilder gir ofte en bedre fremstilling av detaljer i dataene og endel av bildene finnes som fargeplott i Sørensen og Lindell, (1990). I denne rapporten presenteres satellittdata fra mai, juni og august 1988 og juni 1989. Tidspunktene for satellittbildene som benyttes er oppgitt i lokal norsk vintertid for å være sammenlignbare med modellresultatene.

2.3 Beskrivelse av verifikasjonen

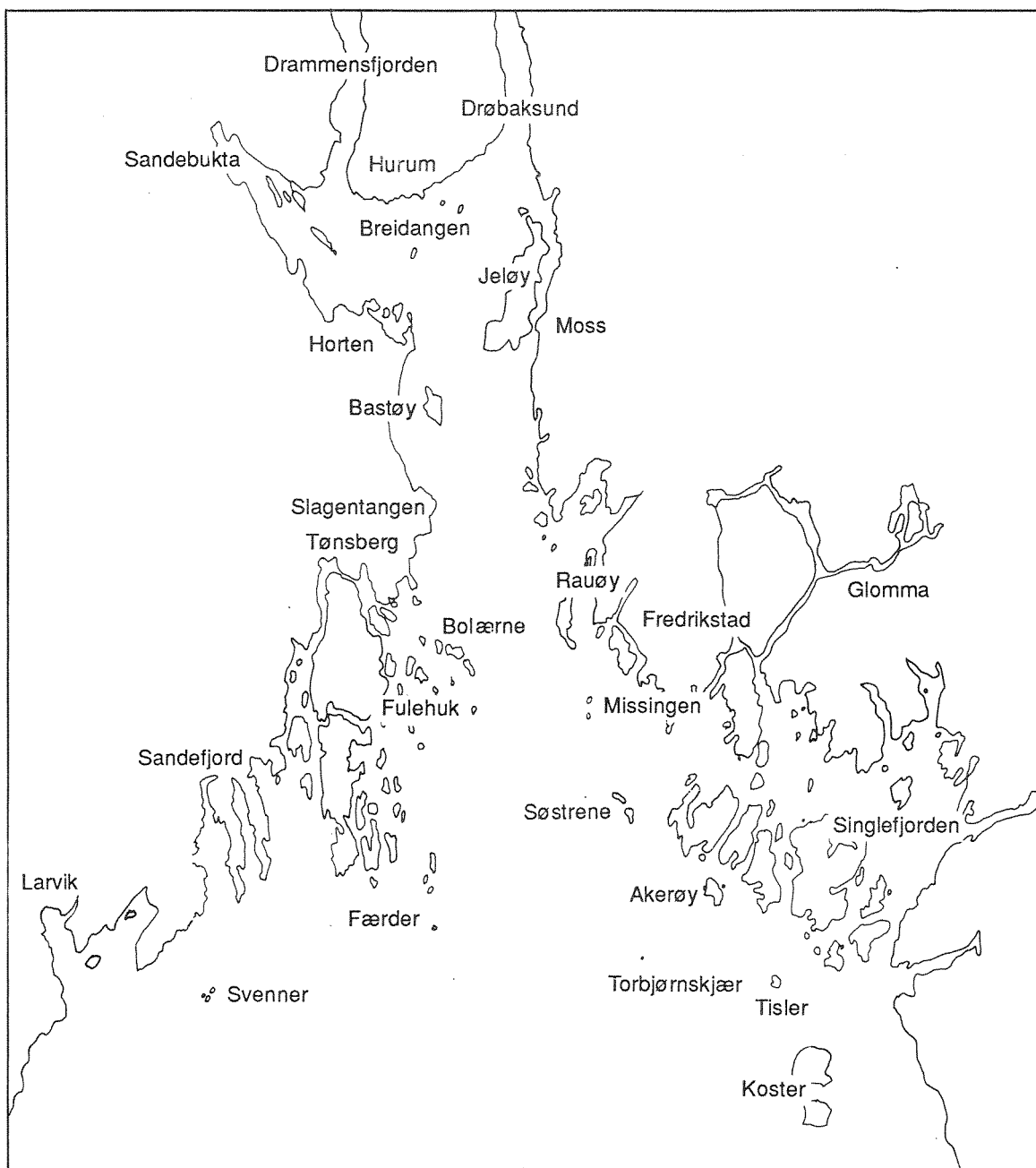
Verifikasjonen er utført ved å danne seg et bilde av strøm- og spredningsforholdene i fjorden ut fra en tolkning av satellittbildet for hver enkelt dato. For temperaturbildene har en gått ut fra at de gjennomgående kaldere vannmassene tilføres området fra Drammensfjorden (Drammenselva) og Hvalerområdet (Glomma), og sett på de "signalene" dette vannet gir i nærområdet. Etersom overflatevannets temperatur varierer forholdsvis raskt, er sammenligningen med sporstoffdelen av modellkjøringene begrenset til en kortere forhistorie, f.eks høyere overkonsentrasjoner av sporstoff. De lavere overkonsentrasjonene er det derfor tatt mindre hensyn til. I tillegg er temperaturen i overflaten svært avhengig av lokal soloppvarming og andre faktorer som f.eks. "upwelling". Bakevjer og virvler vil derfor lett bli oppvarmet om dagen, spesielt ved rolige vindforhold.

For de satellittbildene som også gir turbiditeten i overflatevannet er det tatt hensyn til en lengre forhistorie, dvs. i praksis et spredningsbilde som representerer en mindre overkonsentrasjon i modellen.

Det er lagt større vekt på resultatet av sporstoffsimuleringene enn strømsimuleringene. Strømsimuleringene er gransket fra ca. 2 døgn før satellittbildet ble tatt, og bl.a. brukt til å forklare uoverensstemmelser mellom satellittbildet og modellresultatet. I arbeidet er det også lagt større vekt på strukturer enn detaljer. Dette fordi en sann tid ("realtime") simulering nødvendigvis ikke trenger å gi eksakt det samme bildet som satellittbildet, men kan likevel gi et godt bilde av de storstilte strømforholdene i fjorden.

I enkelte tilfeller er også satellittbildene forstyrret av atmosfæriske forhold og sensorstriper, som vanskeliggjør tolkningen. Videre er tolkningen av satellittbildene, som uttrykk for transporter, usikker når de inneholder informasjon om stoffer eller egenskaper som ikke er konservative.

Figur 1 viser et oversiktskart over Ytre Oslofjord med de stedsnavn som er benyttet i rapporten.



Figur 1. Kart over Ytre Oslofjord med stedsnavn benyttet i rapporten.

3. SAMMENLIGNING AV MODELLRESULTATER OG SATELLITTDATA

Nedenfor følger en sammenligning av satellittdata med modellresultater for fem situasjoner i 1988 og to situasjoner for 1989. En nærmere beskrivelse av vannføring og vindforholdene under disse situasjonene finnes i Sørensen og Lindell, (1990) og Røed m.fl., (1990).

3.1 Verifikasjon for den 13. mai 1988

3.1.1 Tolkning av satellittbildet

Den 13. mai kl. 1056 foreligger et høyoppløselig satellittbilde med god optisk og termisk informasjon for hele fjorden. Denne situasjonen er forøvrig nærmere presentert som fargeplott av Sørensen og Lindell (1990), hvor detaljer og strukturer fremkommer bedre. Satellittbildene (figur 2 og 3) viser at vannmassene fra Drammensfjorden har blitt spredt mot sør på vestsiden av Breidangen og over mot Jeløy. I dette området synes vannet dels å ha blitt spredt mot nord i en bakevje i Breidangen, dels ut fjorden mot Bastøy og videre ut på vestsiden ved Slagentangen. Denne tolkningen synes også i store trekk å være reflektert i turbiditetsbildet presentert i Sørensen og Lindell (1990). Figur 3 viser et utsnitt av Breidangen målt med termiske AVHRR- og TM-data, hvor man får et inntrykk av den bedre geometriske oppløseligheten til TM og de begrensninger AVHRR-datene har nær land.

Utenfor Hvalerområdet viser temperaturfordelingen (figur 2) en kaldere vannmasse fra Vestereelva mot Missingen og videre tvers fjorden over til Bolærene. Samme mønster viser også det relative turbiditetsbildet (figur 3) med MSS-sensoren. Dette kan tolkes som en spredning i samme retning.

Figur 2 og 3 viser at kaldt og turbid Glommavann strømmer ut mot Tisler med en utløper mot nordvest forbi Søstrene. Lenger ut ligger det varmere vann som synes å komme ut fra Singlefjorden og også spres videre mot nordvest. Turbiditetsbildet (figur 3) viser spredning av Glommavann sør for Tisler, noe som kan tyde på en tiltagende spredning av vann fra Hvaler mot syd. Se også fargebilder i Sørensen og Lindell (1990) som bedre får frem en sydlig spredning av Glommavannet.

Videre viser det termiske bildet (figur 2) kaldere vann fra Larviksfjorden og sørover. Dette indikerer en sørovergående transport langs norskekysten i noe tid før bildet ble tatt.

Satellitbildene synes således å indikere en svak utstrømning av overflatevann fra Breidangen mot Slagentangen, samt tendenser til en

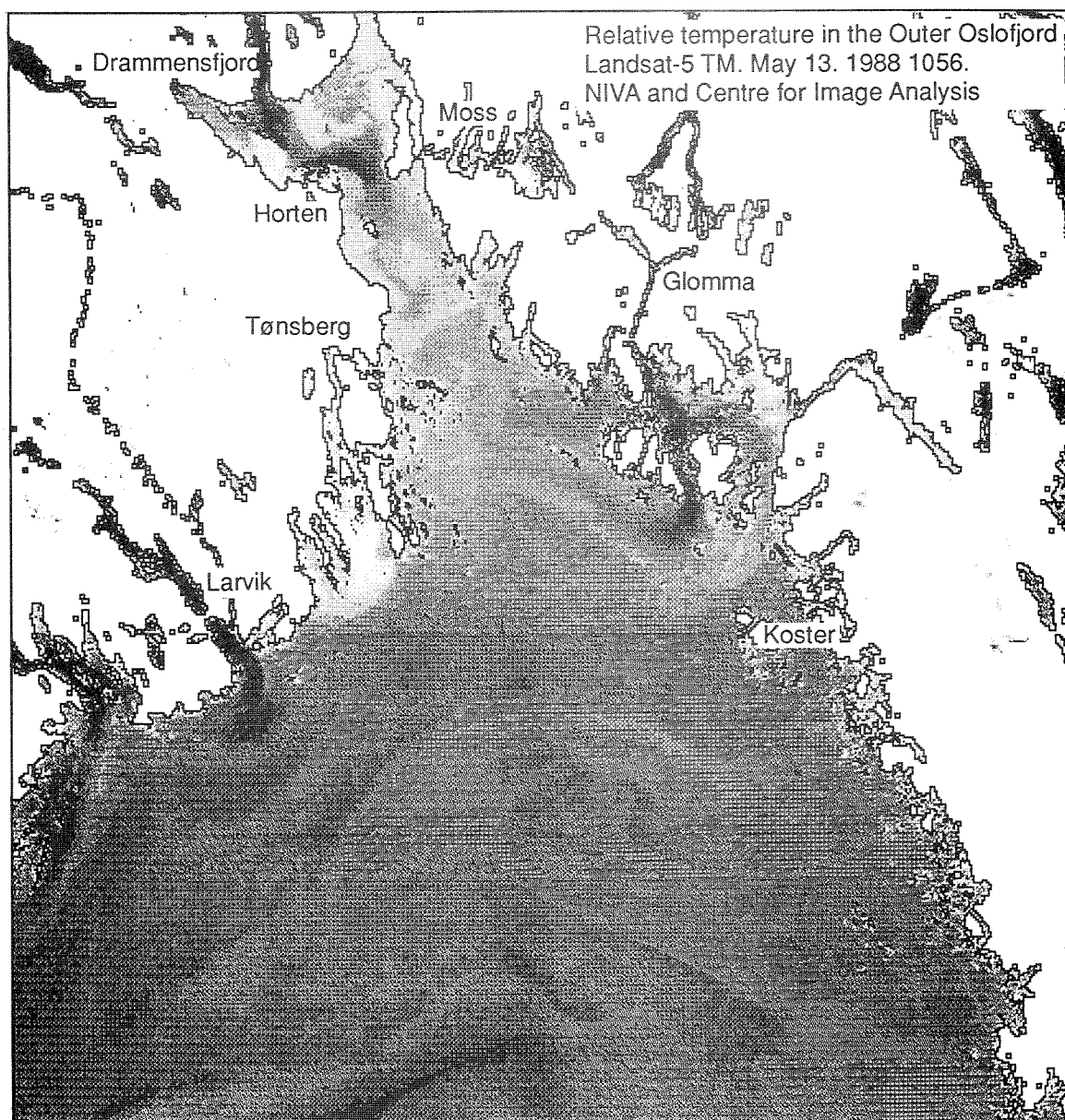
syklonal strømvirvel i Breidangen. Glommavannet synes i hovedsak å ha blitt spredt innover i fjorden, med en tiltagende spredning mot sør.

3.1.2 Sporstoffsimuleringen

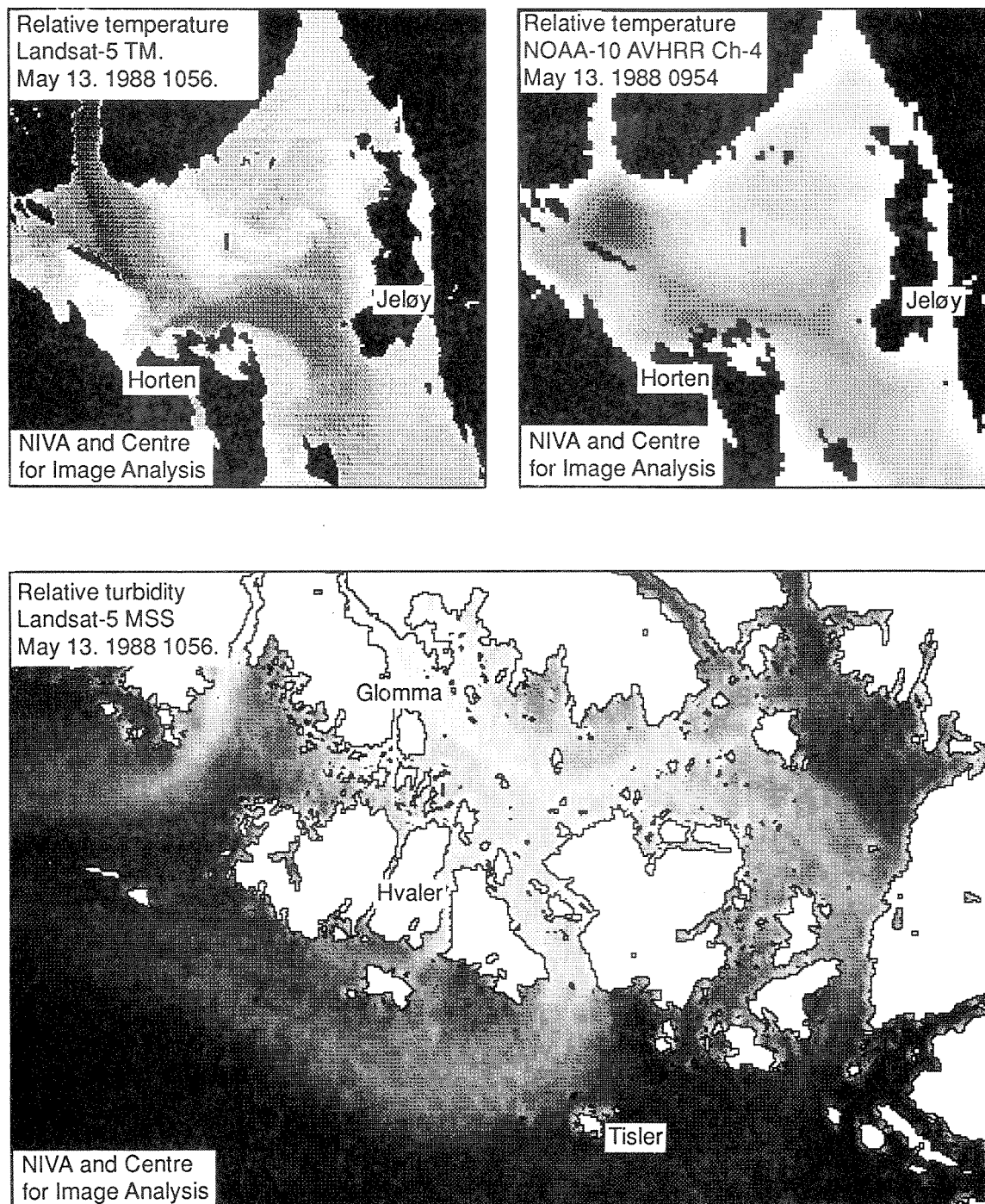
Sporstoffsimuleringen (figur 4) den 13. mai kl 1200 viser i hovedtrekk samme spredningsbilde som satellittbildene i området Breidangen til Slagentangen. Imidlertid savnes utløperen ved Jeløy. I munningen av fjorden viser modellen omtrent samme spredningsforhold som satellittbildet med generelt lavere konsentrasjon av "partikler" på vestsiden av fjorden, og en viss tendens til sørligere spredning av Glommavann. De simulerte strømforholdene er vist i figur 5.

3.1.3 Diskusjon av avvik mellom modell og observasjon

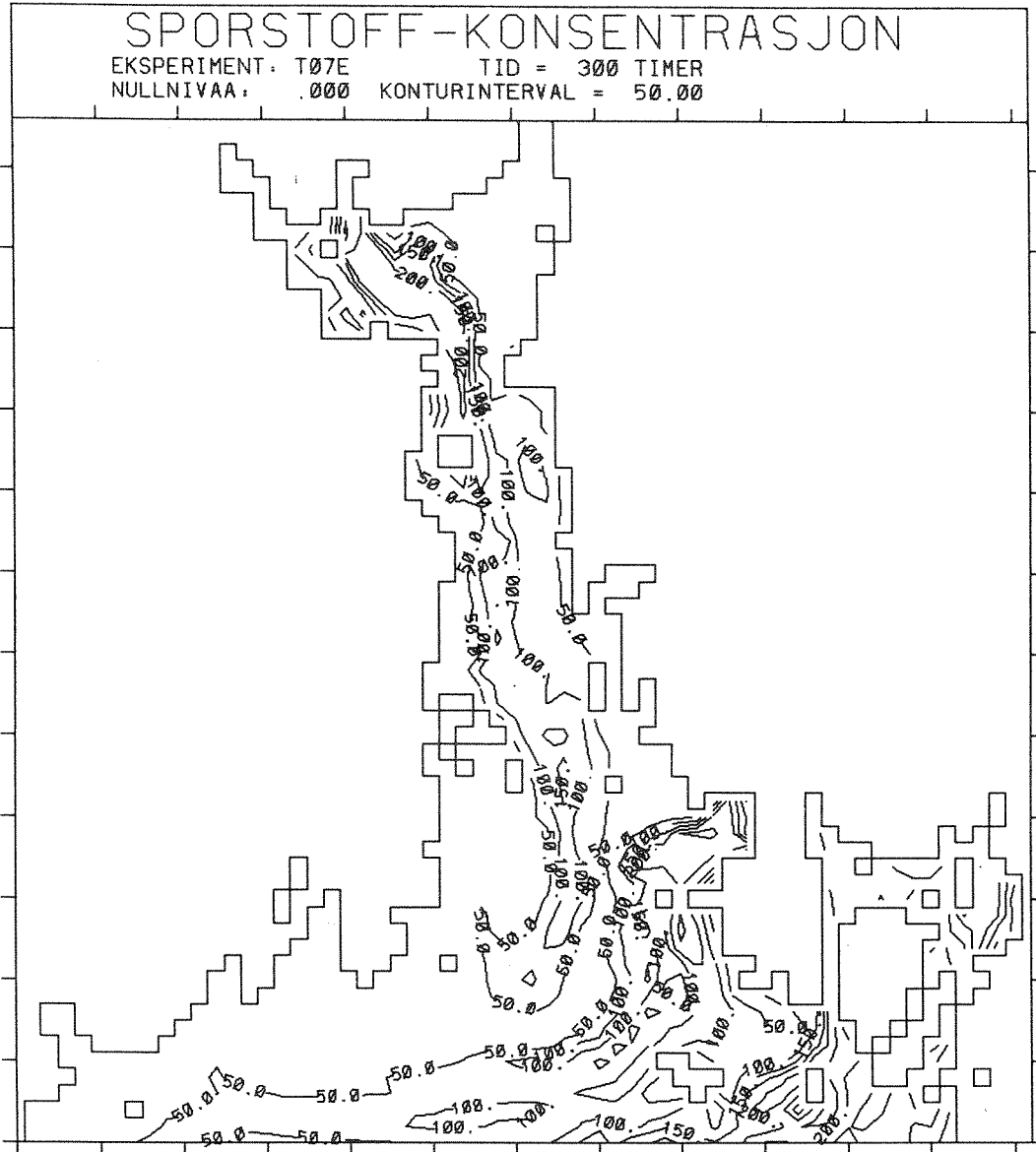
I store trekk simulerer modellen forholdene som beskrevet ut fra satellittbildene. Imidlertid viser den simulerte fordeling av sporstoff fra den 11. mai 1988 kl. 1200 (figur 6) en bedre overensstemmelse med satellittbildene, hvor både utløperen i Breidangen ved Jeløy og den mer nordlige spredningen av Glommavann i fjordens munningsområde er med. Forklaringen på forskjellen kan ligge i randbetingelsene dvs. en velutviklet Baltisk strøm som holder overflatevannet tilbake i Ytre Oslofjord. Modellen vil således i et slikt tilfelle overdimensjonere den sørlige transporten. Dette har effekter på resultatene inne i Ytre Oslofjord. Muligens ville en noe lavere sørlig strømhastighet gi bedre overensstemmelse. En kobling av Ytre Oslofjordmodellen til en Skagerrakmodell ville derfor sannsynligvis kunne gi bedre resultater.



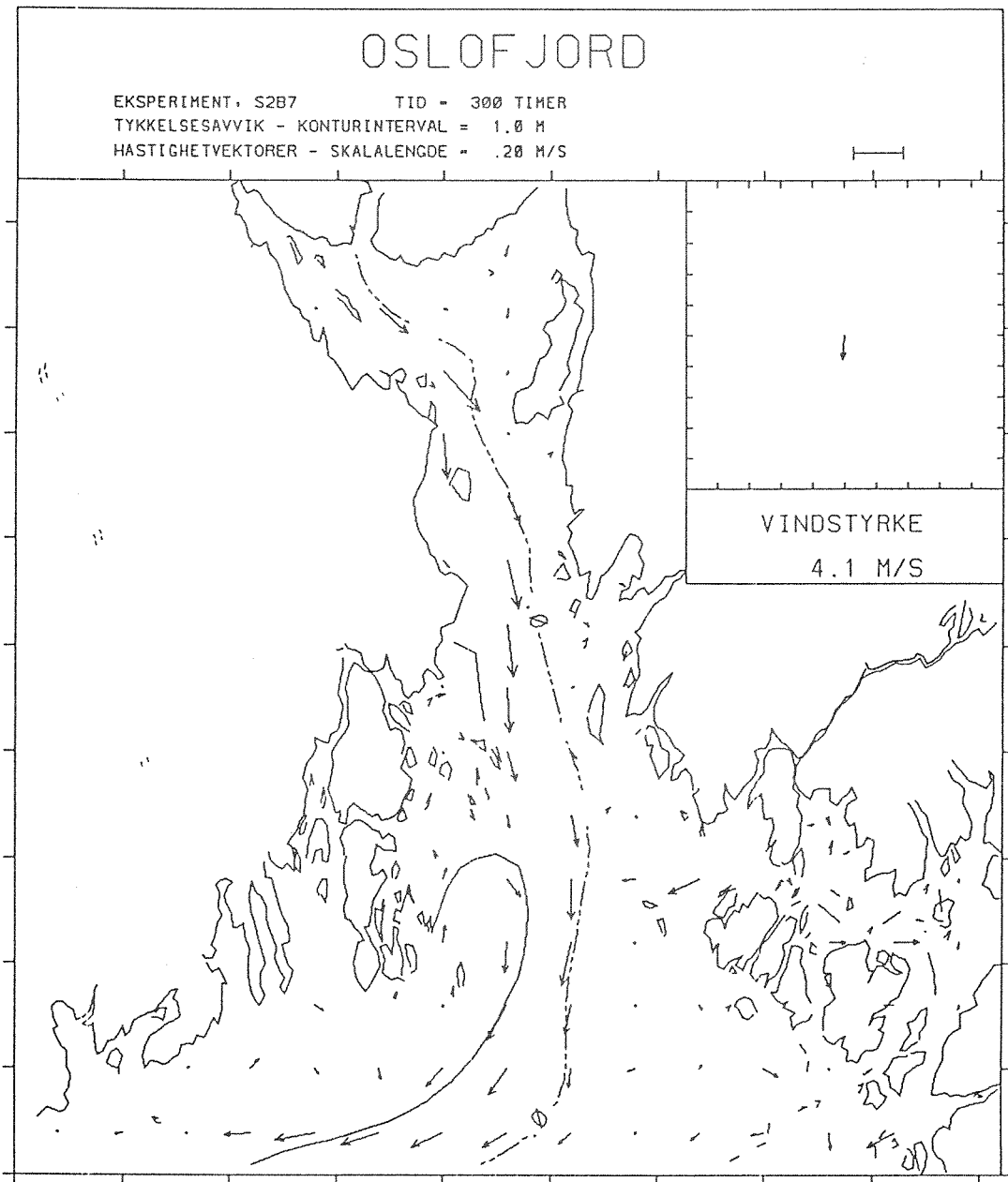
Figur 2. Relativ temperaturfordeling i Ytre Oslofjord den 13. mai 1988 kl. 1056. Mørkt er lav og lyst er høy temperatur. Bildebehandling ved NIVA og Centrum för bildanalys.



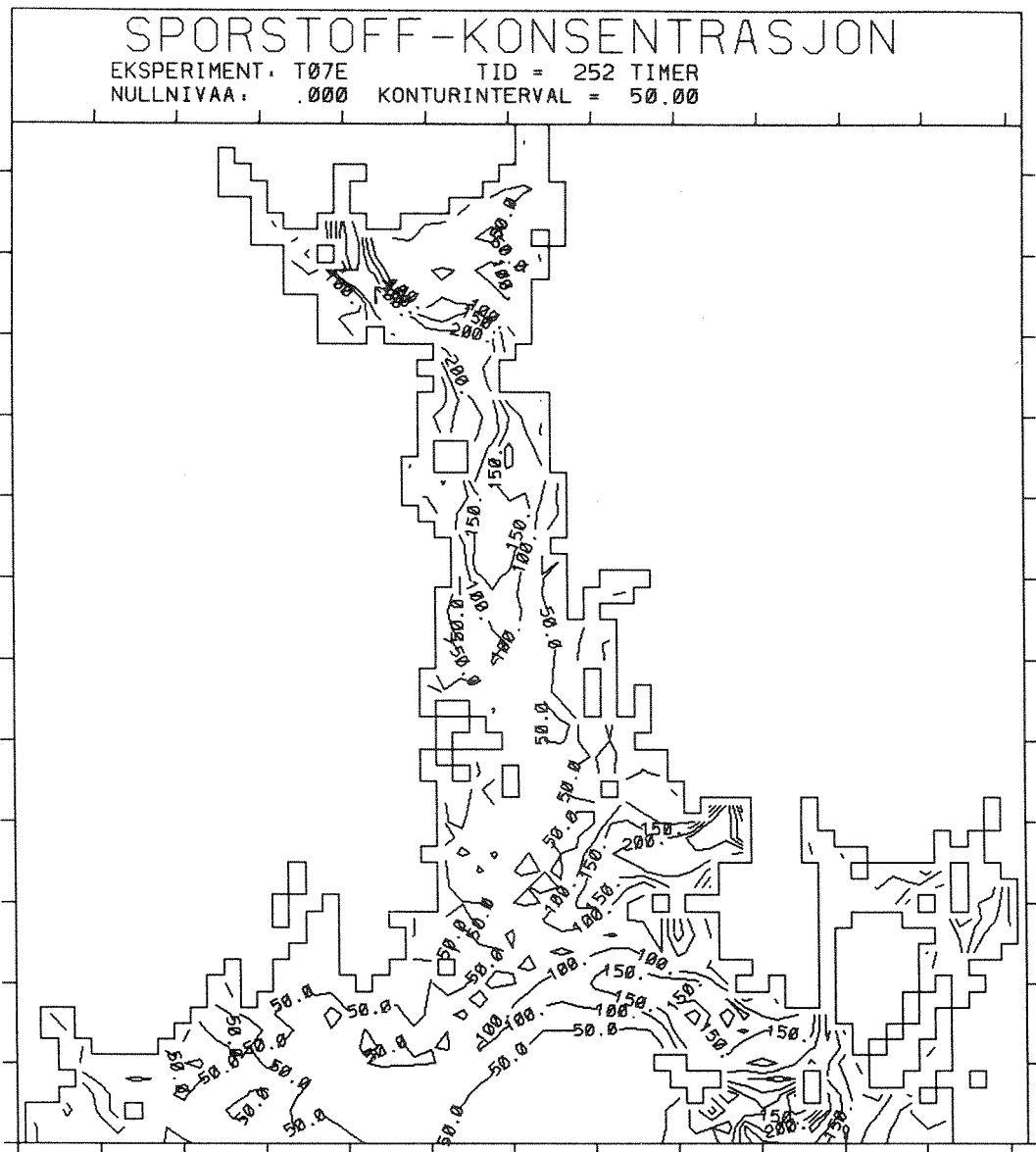
Figur 3. Relativ temperaturfordeling i Breidangenområdet kl. 1056 (øvre venstre) og kl. 0954 (øvre høyre), og relativ turbiditet i Hvalerområdet kl. 1056 (nederst) den 13. mai 1988. For temperatur er mørkt lav og lyst høy verdi, mens for turbiditet er lyst høy og mørkt lav konsentrasjon. Bildebehandling ved NIVA og Centrum för bildanalys.



Figur 4. Simulert fordeling av sporstoff den 13. mai 1988 kl. 1200.



Figur 5. Simulert hastighets- og konturplott for 13. mai 1988 kl.1200.



Figur 6. Simulert fordeling av sporstoff den 11. mai 1988 kl. 1200.

3.2 Verifikasjon for den 15. mai 1988.

3.2.1 Tolkning av satellittbildet

Den 15. mai 1988 viser temperaturbildet (figur 7) en utstrømming av kaldere vann fra Drammensfjorden mot Horten på vestsiden av Breidangen, og deretter en utløper mot østsiden av fjorden ut mot Bolærne. En kaldere vannmasse finnes også fra Glomma's vestre løp mot vest nord for Søstrene og fra det østre løp (Løperen) nord for Tisler mot NV (omtrent som den 13. mai). I Skagerrak viser temperaturfordelingen kaldere vann fra Larviksfjorden og Frierfjorden mot SV.

To varmere vannmasser ligger i en gaffelform fra Ytre Oslofjord og ut i Skagerrak. I tiden fra forrige bilde til dette bildet har det stort sett blåst fra nord og nord-nordøst (se Røed m.fl., 1990), og det er derfor nærliggende å tolke dette satellittbildet som strøm ut fjorden. Videre trekker det kalde vannet fra Larviksfjorden seg godt ut fra kysten, noe som indikerer at den Baltiske strømmen og den norske kyststrømmen er presset ut fra Oslofjordområdet av f.eks. vind. Med denne vindretningen løftes også de nedre vannmassene opp mot overflaten langs fjordens østside og langs svenskekysten, noe som kan forklare de noe kaldere vannmassene på østsiden av fjorden.

Ellers preges grensefarvannet Norge/Sverige og farvannet mellom Skagerrak og Ytre Oslofjord av virvelaktivitet, hvor en gren av kaldere vann fra den Baltiske strømmen mot NO splitter opp det utstrømmende varme Oslofjordvannet.

3.2.2 Sporstoffsimuleringen

Med de forbehold man må ta med hensyn til tolkning av et temperaturbilde, viser sporstofffordelingen som er simulert (figur 8) fra den 15. mai kl 1200 omtrent det samme bildet. Simuleringen gir kanskje en noe vestligere spredning enn satellittbildet, men tolkningen av satellittbildet vanskeliggjøres noe av den dårlige geometrisk oppløselighet. Utenfor Hvalerøyene synes simuleringen å gi en noe sørligere spredning av overkonsentrasjoner av Glommavann enn satellittbildet. Strømmene simulert i modellen viser i tiden før satellittbildet ble tatt, utstrøm på vestsiden av fjorden samt sydlig strøm øst for Tisler (se også figur 9).

En alternativ forklaring, sett ut fra strømforholdene som de er simulert i modellen, er at vann fra Hvalerområdet virkelig strømmet sørover dagen før den 15. mai og at en forandring i den Baltiske

strømmen presser varmere vann inn mot området mellom Tisler og Nordkoster. Det kaldere vannet utenfor Kosterøyene skulle da være gammelt Glommavann, som er blitt isolert.

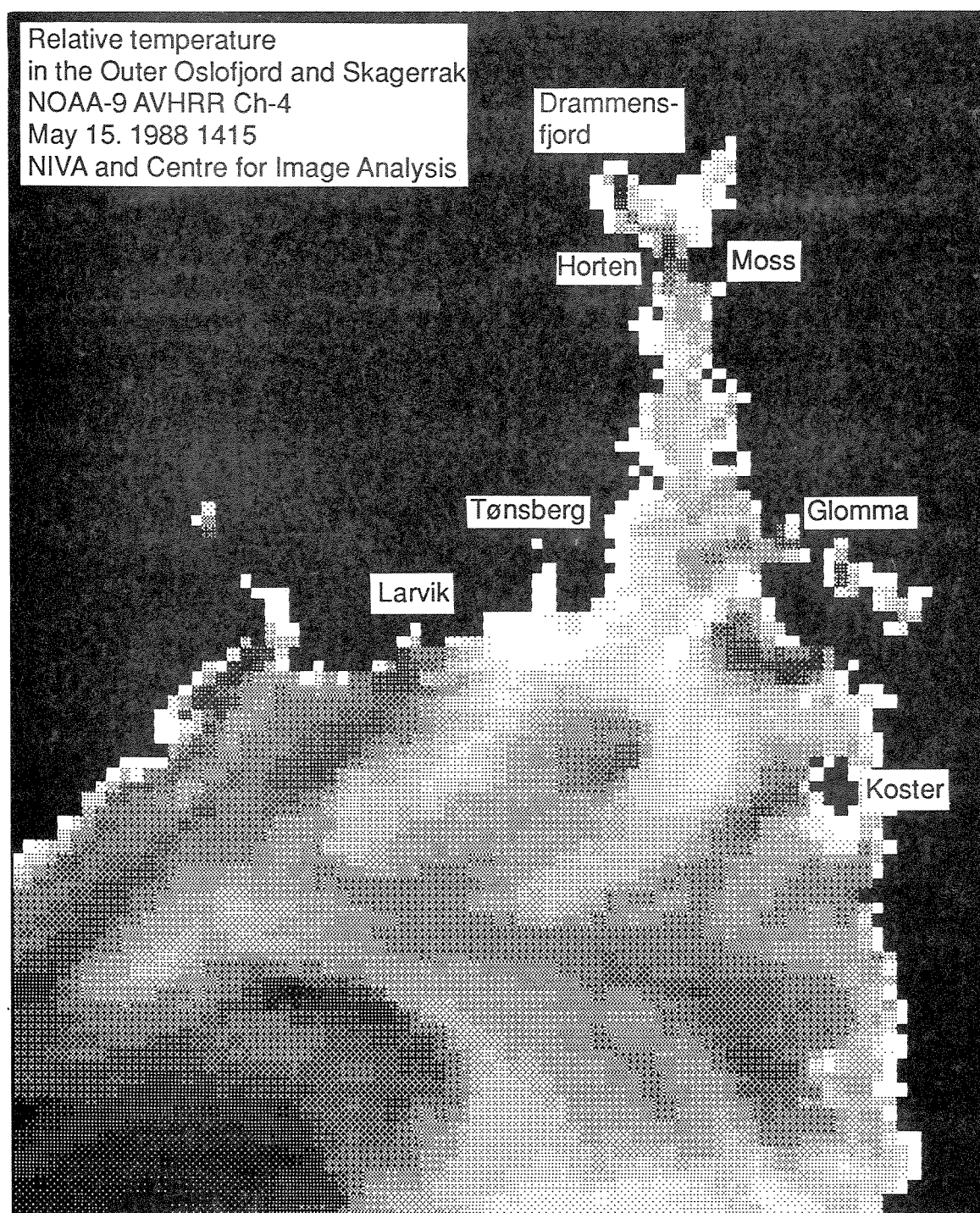
3.2.3 Diskusjon av avvik mellom modell og observasjon

Det mest markerte avviket mellom satellittbildet og sporstoffsimuleringen er, som for den foregående situasjon, spredning av Glommavann. I modellen skjer denne spredning mer mot sør. Fremherskende nordlige vinder vil resultere i en sørligere spredning av vannmassene i fjorden. Også her vil den Baltiske strømmen kunne gi effekter på modellens rand som forklarer avviket. En annen forklaring kan være stigende vannstand (tidevann) ved satellittopptak (høyvann inntraff kl 1600), som ikke er simulert i modellen.

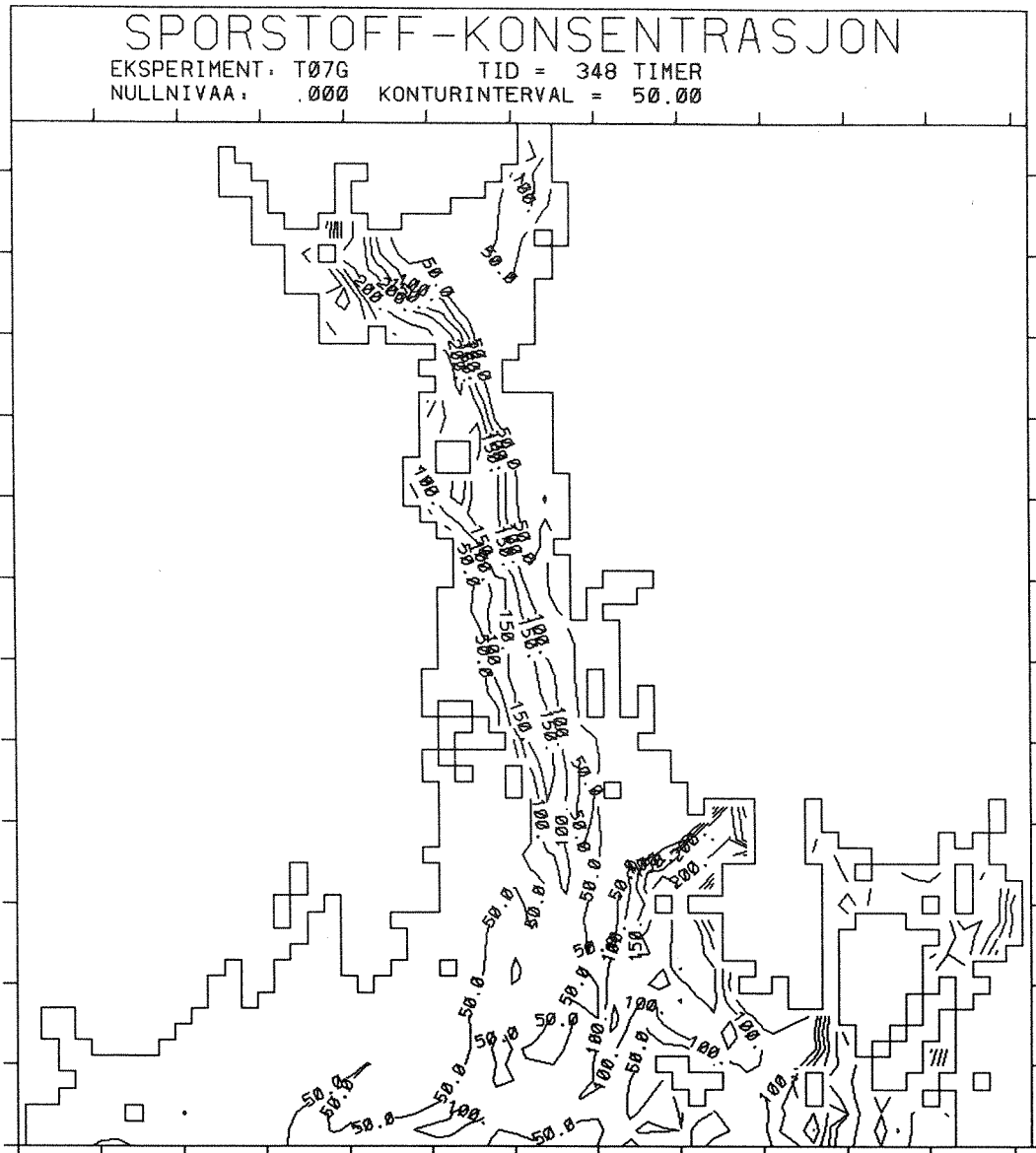
Den alternative forklaringen med isoleringen av tidligere utstrømmende Glommavann mot sør ville gi en bedre verifikasjon av modellens interne løsning. Turbiditetsbildet fra 13. mai i Sørensen og Lindell (1990), kan bekrefte denne tidligere sydlige transporten av Glommavann.

Strømbildet (figur 9) viser også at strømmen i ytterste deler av Ytre Oslofjord splittes i to, i godt samsvar med temperaturbildet (figur 7). Dette indikerer høy aktivitet med store virvler i randsonen mellom Skagerrak og Ytre Oslofjord. For å kunne simulere virvler i dette området korrekt, må en bruke et større modellområde. Eksperimenter med en Skagerrakmodell (Røed, pers. medd.) har vist at ved nordlige vinder er det større virvelaktivitet nettopp i dette området.

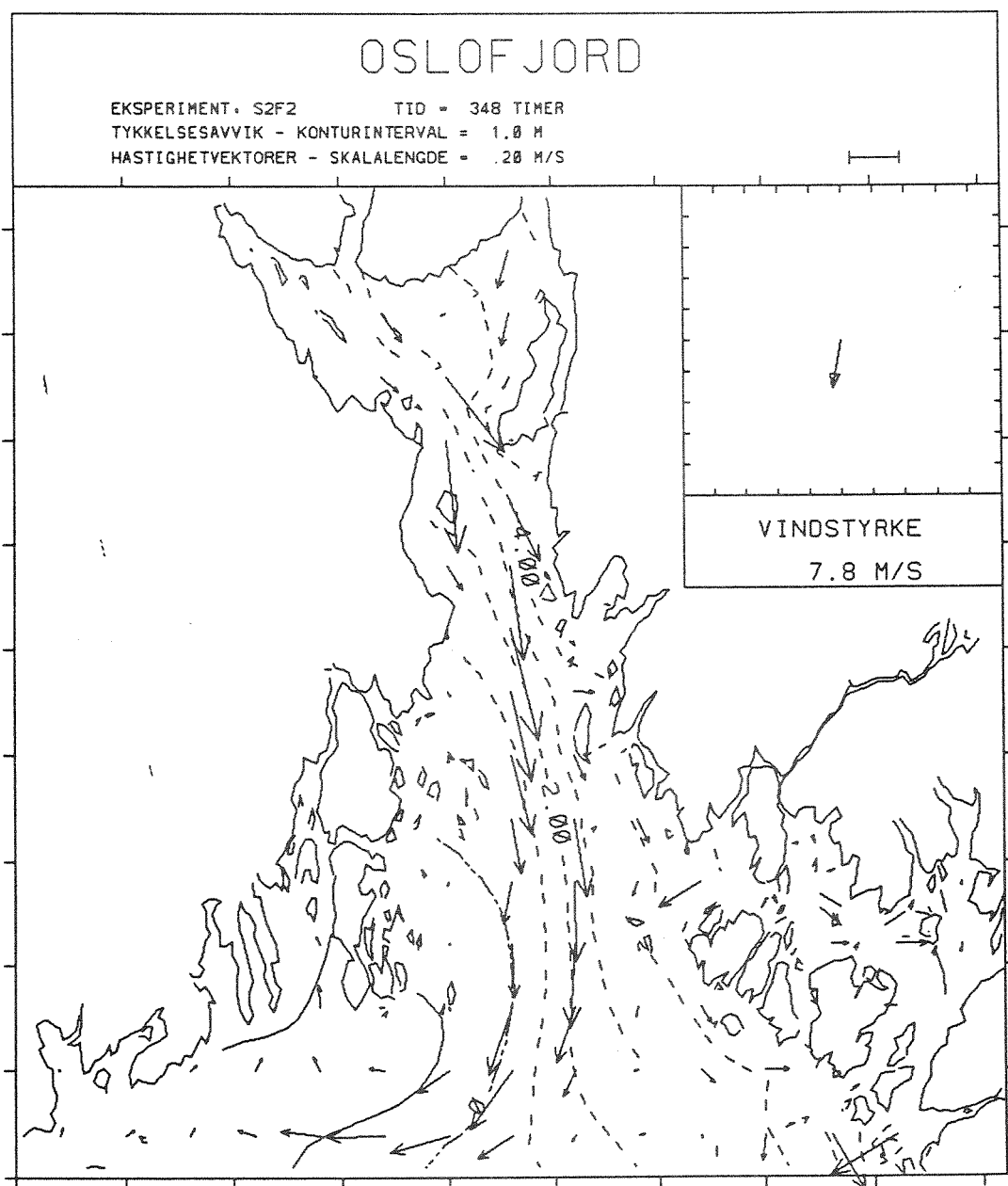
Konklusjonen i dette tilfellet er at modellen synes å gi et realistisk bilde av forholdene slik de tolkes ut fra satelittbildet. Dette gjelder både i en større skala og for en del av finstrukturen.



Figur 7. Relativ temperaturfordeling i Ytre Oslofjord og Skagerrak fra den 15. mai 1988 kl. 1415. Mørkt er lav og lyst er høy temperatur. Bildebehandling ved NIVA og Centrum för bildanalys.



Figur 8. Simulert fordeling av sporstoff den 15. mai 1988 kl. 1200.



Figur 9. Simulert hastighets- og konturplott for 15. mai 1988 kl.1200.

3.3 Verifikasjon for den 28. mai 1988

3.3.1 Tolkning av satellittbildet

Fra forrige verifikasjon er det nå gått 13 døgn. I denne perioden har vinden vært skiftende med vekselvis vinder fra sydlig og nordlig kant (se Røed m.fl., 1990). Den 28. mai kl. 1513 foreligger det et meget bra satellittbilde med AVHRR-sensoren (figur 10). Dette viser spredning av kaldt Drammensfjordvann ned mot Bastøy på vestsiden av fjorden og videre mot syd ved Slagentangen. Bildet viser også en utløper av Drammensfjordvann mot Jeløy og nordover, noe som tyder på en syklonal virvel. Fra Vesterelva strømmer kaldt Glommavann nordover mot Rauøy med en viss vestlig spredning. Fra Løperen ligger Glommavannet som vanlig på utsiden av Hvalerøyene med en svak vestlig spredning. Varmere vann synes å ligge på utsiden av Glommavannet og fra Tisler til Bolærne.

3.3.2 Sporstoffsimuleringen

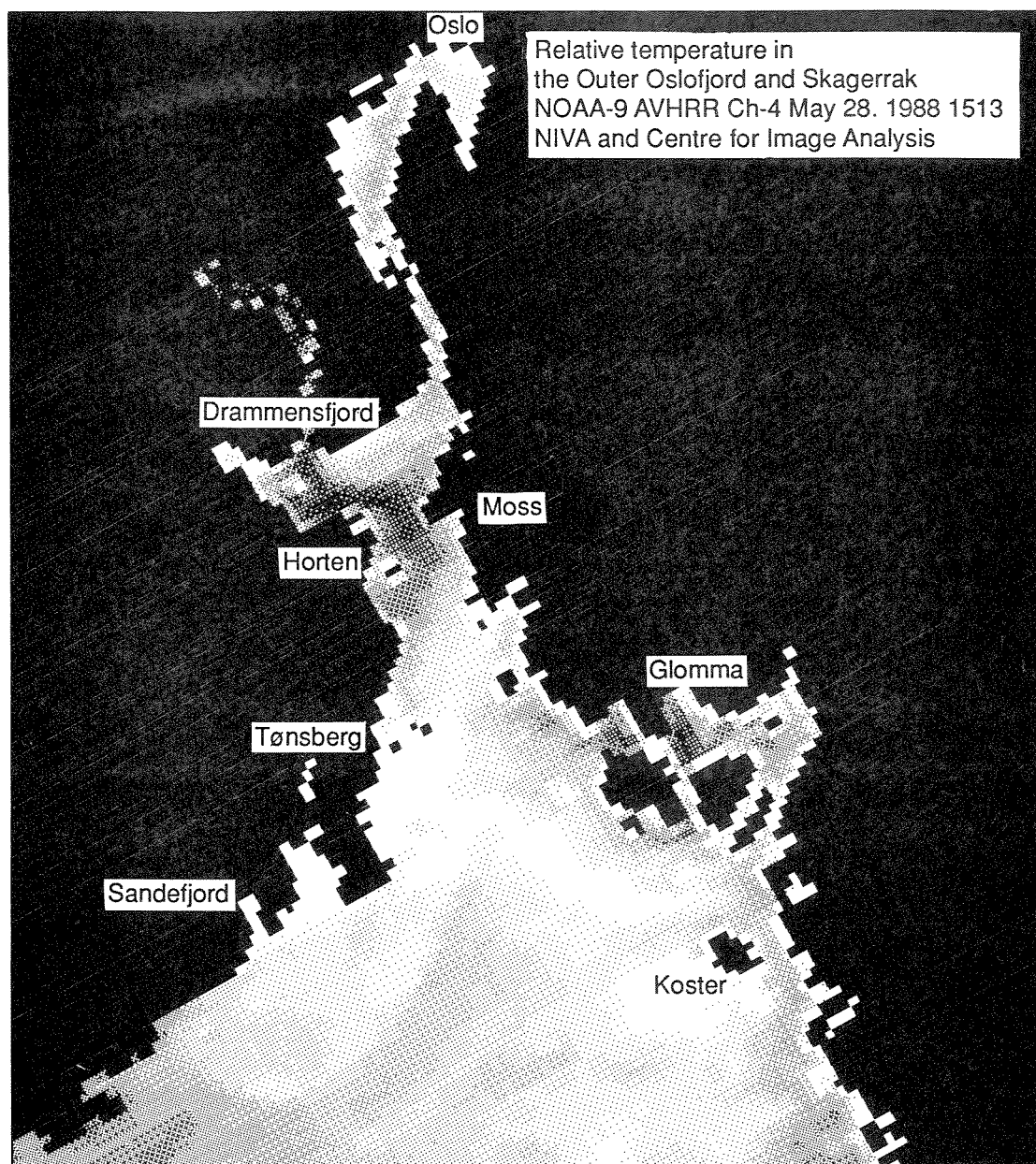
Modellsimuleringen (figur 11 og 12) viser utstrømmende vann fra Drammensfjorden på vestsiden av Breidangen, og også en tilbakestrøm mot nord på østsiden ved Jeløy. Videre strømmer Drammensfjordvann forbi Bastøy og ut mot Bolærne, med de største overkonsentrasjonene litt over mot vestsiden av fjorden. Dette stemmer med tolkingen av satellittbildet.

Vesterelva spres mot vest mellom Struten og Missingen med en liten nordkomponent, men blokkeres av utstrømmende vann fra å spres videre vestover. Glommavann fra Løperen spres mot vest tvers over munningen på Ytre Oslofjord samt en begynnende spredning mot syd.

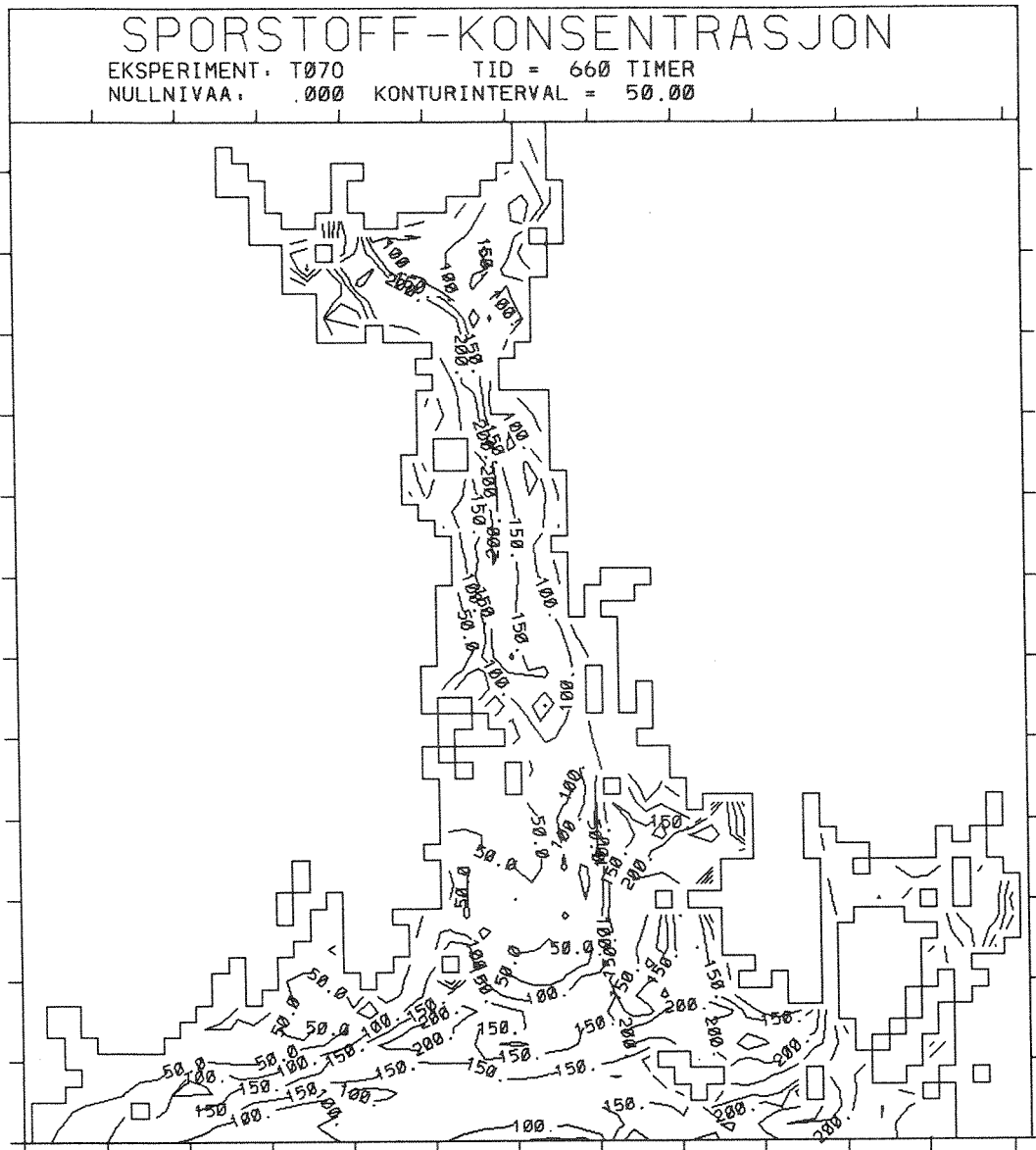
3.3.3 Diskusjon av avvik mellom modell og observasjon

I store trekk er det god overensstemmelse mellom satellittdataene og resultatene fra sporstoffmodellen. På randen mot Skagerrak gir modellen derimot større vestlig transport av Glommavann. Uoverensstemmelsen mellom modell og tolkingen av satellittbildet viser igjen følsomheten i randområdet. Det varmere vannet som ligger sør for Tisler og nordvestover munningen av fjorden tyder også på en nordvestlig strøm i området og viser at en meget liten endring i randstrømmen i modellen ville kunne gi et slikt transportbilde.

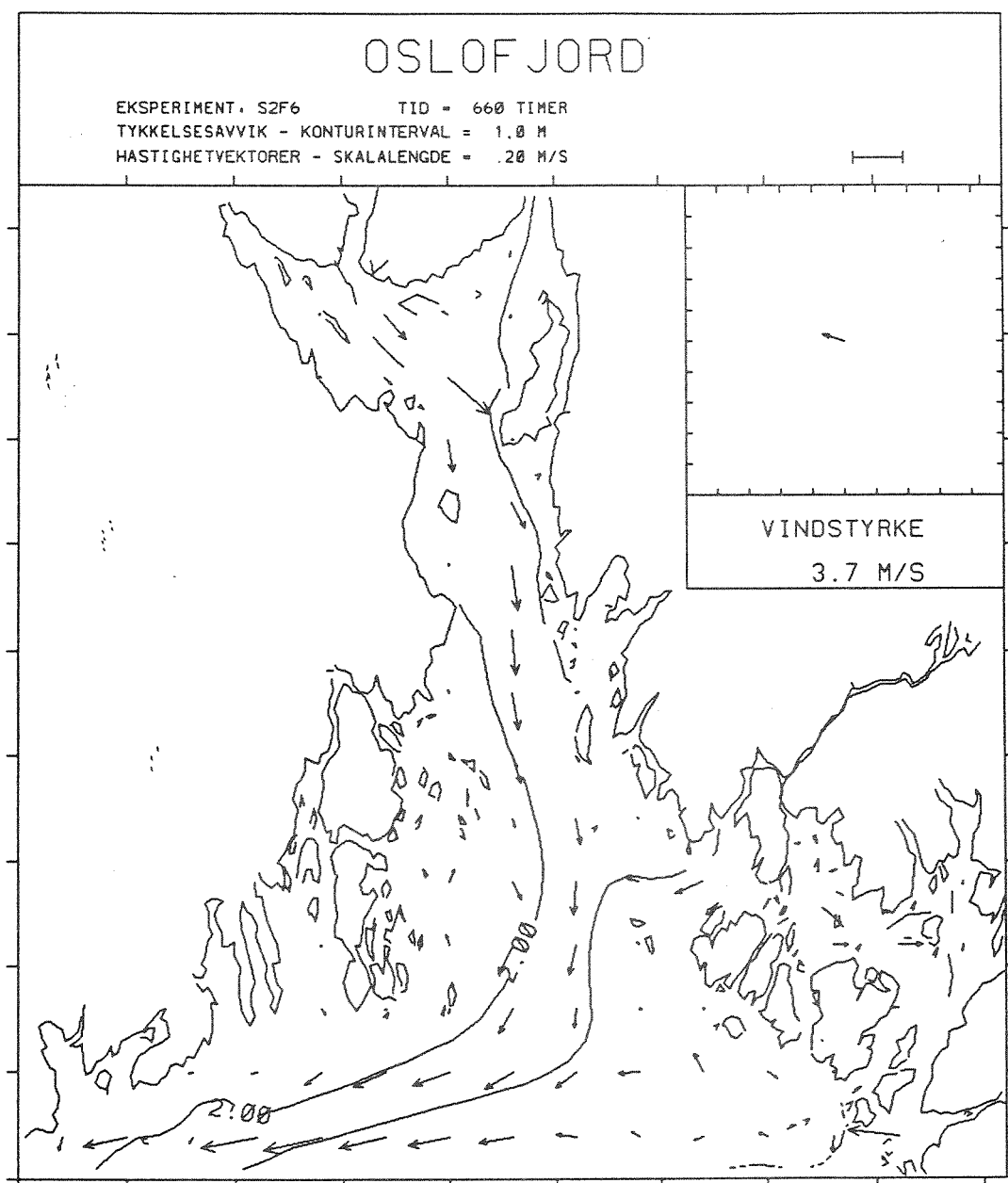
Konklusjonen er at modellen i løpet av disse 13 døgn med svært skiftende vindforhold, har fanget opp de vesentlige dynamiske prosessene bak strømsystemet.



Figur 10. Relativ temperaturfordeling i Ytre Oslofjord/Skagerrak den 28. mai 1988 kl. 1513. Mørkt er lav og lyst er høy temperatur. Bildebehandling ved NIVA og Centrum för bildanalys.



Figur 11. Simulert fordeling av sporstoff den 28. mai 1988 kl. 1200.



Figur 12. Simulert hastighets- og konturplott for 28.mai 1988 kl.1200.

3.4. Verifikasjon for den 14. juni 1988

3.4.1 Tolkning av satellittbildet

I denne verifikasjonen benyttes høyoppløselige satellittdata (MSS) fra kl 1056. Satellittbildet (figur 13) viser at Drammensfjordvannet trolig befinner seg på fjordens vestside og kan muligens spores ned til Bastøy. Bildet er dog en del forstyrret av skydekke for å kunne gjøre en nøyere vurdering av situasjonen. Se forøvrig fargebildene som er presentert i delrapporten for 1988 (Sørensen og Lindell, 1990).

Lenger ut i fjorden har Glommavann blitt fordelt over hele ytre del av fjorden i to grener, en fra Vestre løp og et fra Glomma's hovedløp (Løperen). Selv om det var mye skyer som forstyrret bildet i den søndre delen, kan man se at spredningen av vann fra Glomma er klart vestlig. Før bildet ble tatt har man hatt en lengre periode med nordavind (6.-11. juni) avløst av en periode med vestavind ispedd korte nordavindsfremstøt (11.-14. juni, se Røed m.fl., 1990).

3.4.2 Sporstoffsimuleringen

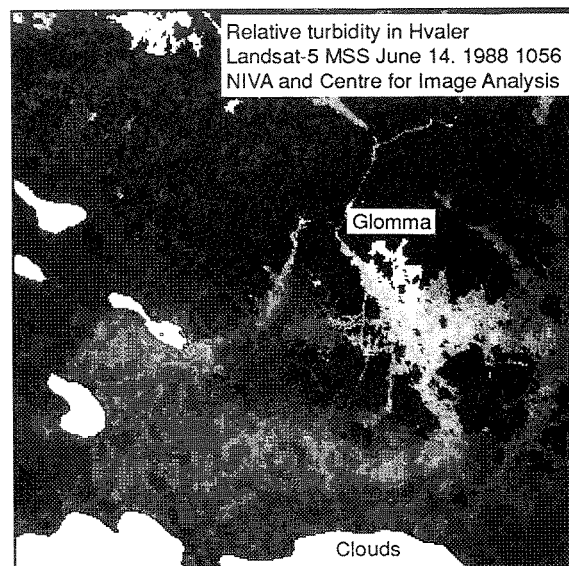
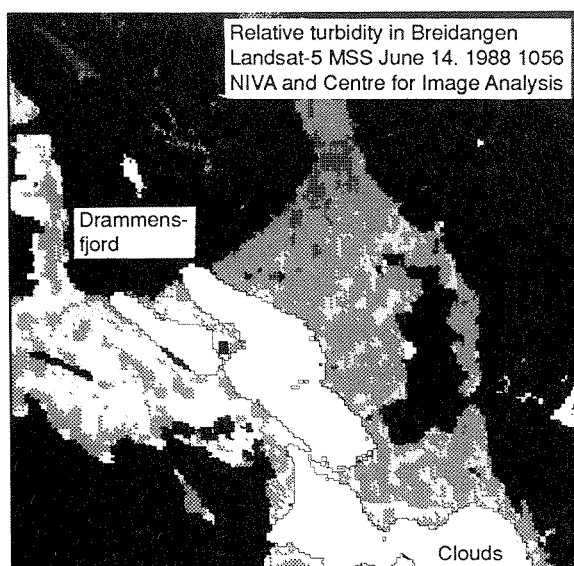
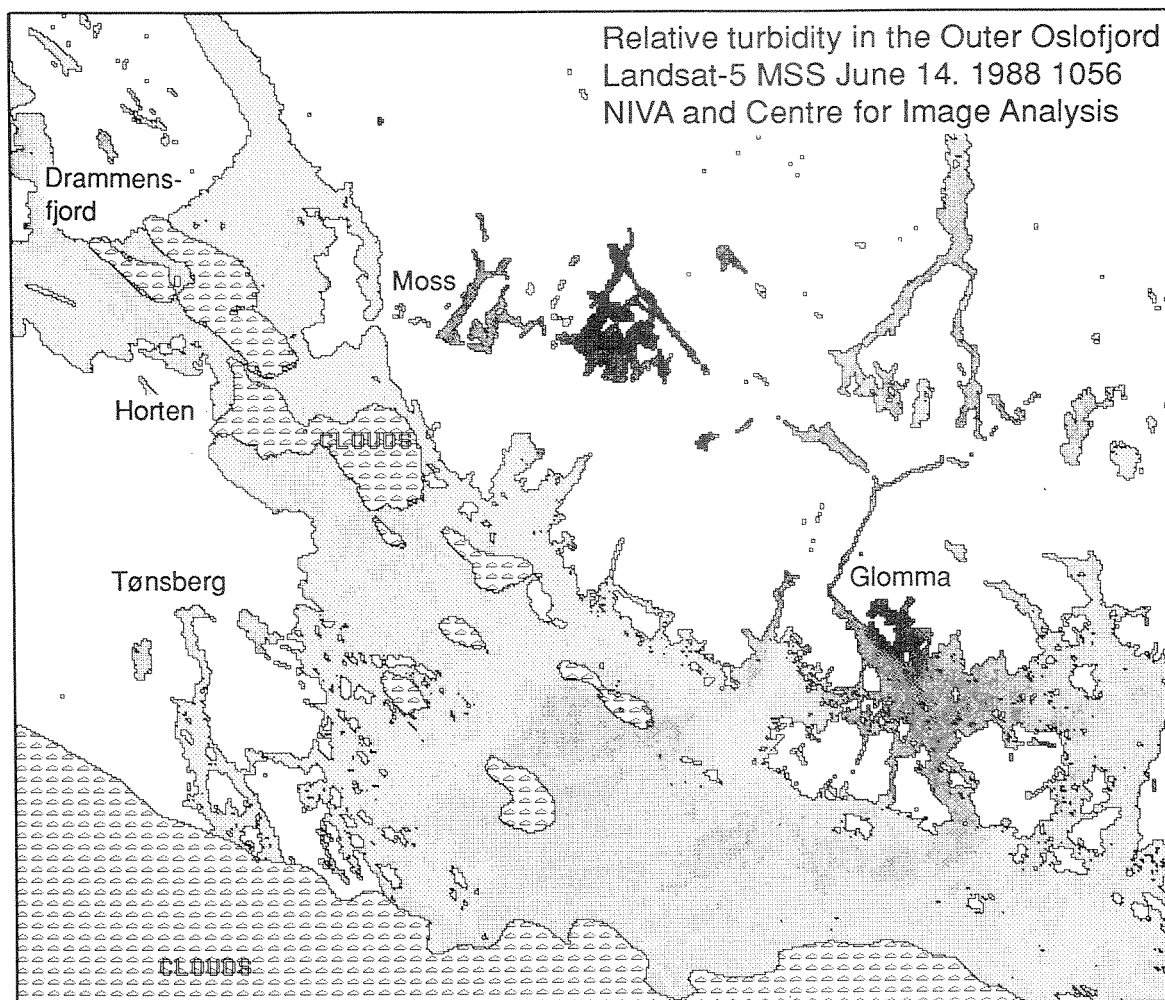
Sporstoffbildet kl 1200 (figur 14) viser høyeste konsentrasjoner på vestsiden ned til Bastøy hvilket stemmer bra med satellittdataene. I Breidangen viser sporstoffmodellen resultatet av en virvel som ikke kan sees på satellittbildet p.g.a. skydekke.

Modellen viser at vann fra Vesterelva spres mot nord og tildels vest tvers fjorden, men i mindre omfang tvers fjorden enn som fremgår av satellittbildet. Modellen gir i hovedsak en sørligere spredning av vann fra Løperen i hele perioden 12.-14. juni, dvs klart avvikende fra satellittbildet.

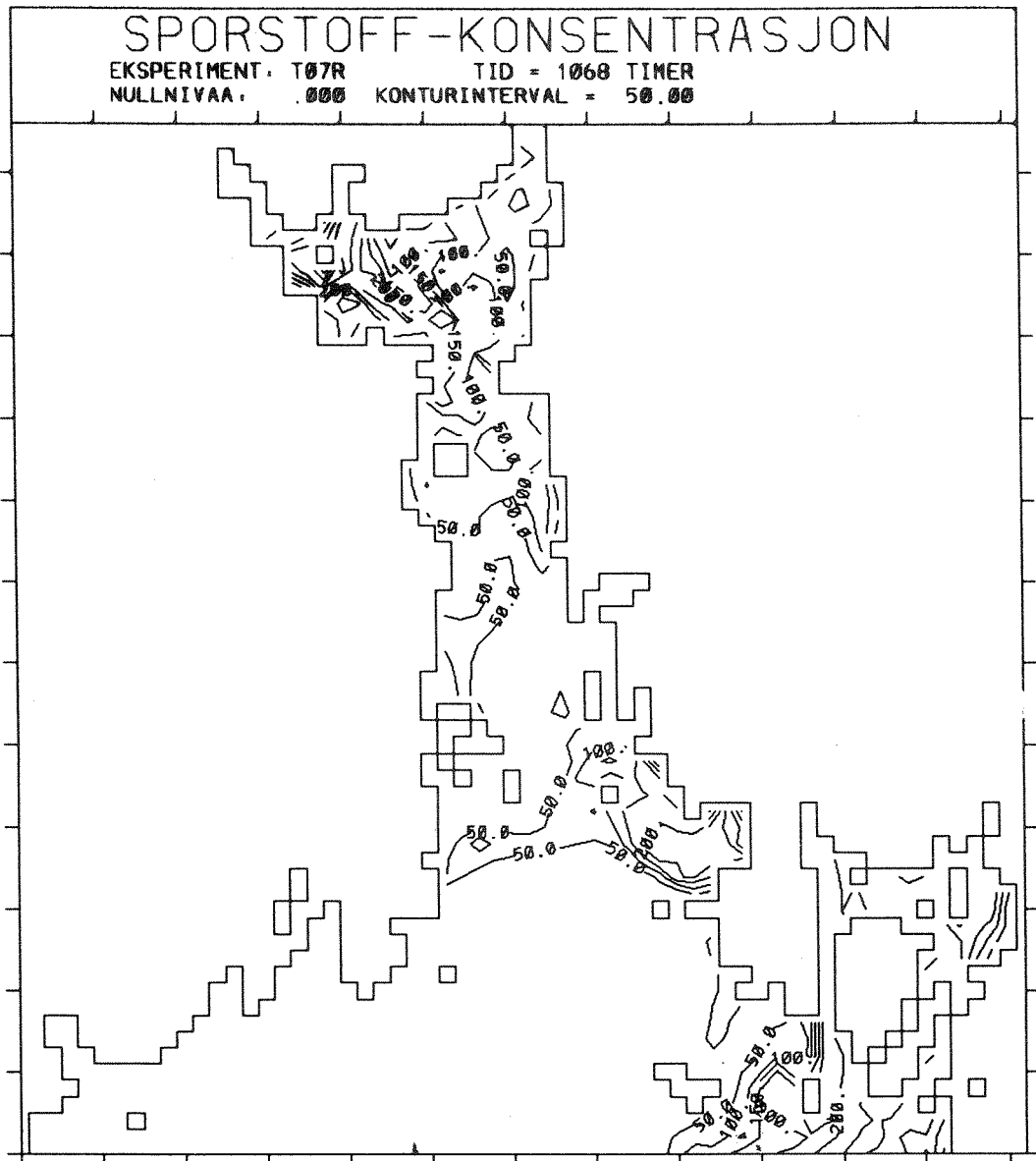
3.4.3 Diskusjon av avvik mellom modell og observasjon

Det er en dårlig overensstemmelse mellom modellresultat og satellittbilde på randen mot Skagerrak i Kosterområdet. Strømkartet (fig. 15) viser en velutviklet syklonal virvel i området mellom Færder, Fulehuk og Hvalerøyene. Denne fores med vann fra norskekysten. Den simulerte virvelen avskjærer muligheten for vann fra Løperen å gå mot nord og inn i denne virvelen, hvilket er klart avvikende fra satellittbildet.

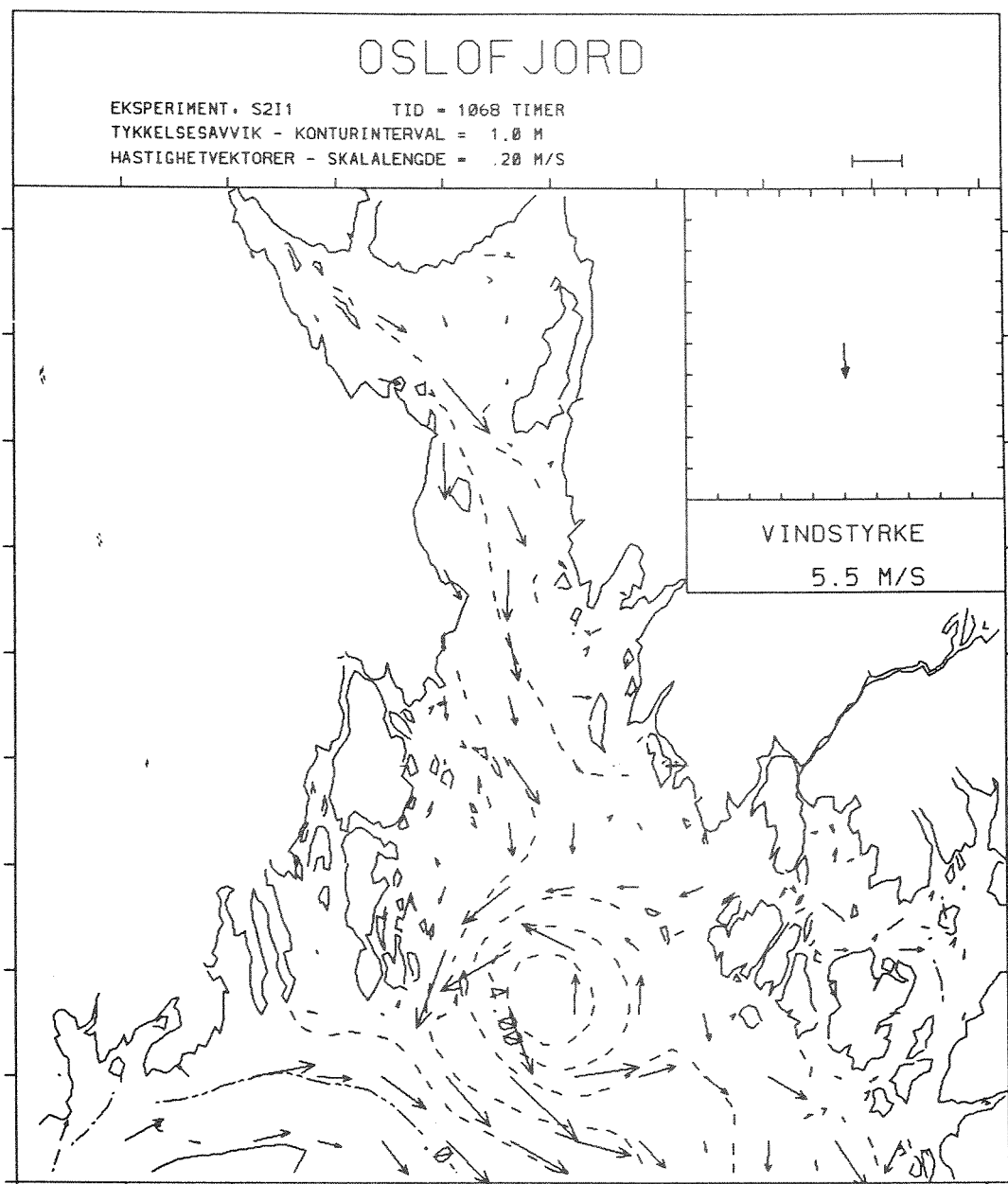
Konklusjonen er at modellen synes å ha problemer nær randen i det sydøstlige hjørnet (Torbjørnskjær-Koster), mens det resterende bildet ser ut til å gjenspeile satellittbildet og dets fordeling av turbiditet.



Figur 13. Relativ turbiditetsfordeling i Ytre Oslofjord den 14. juni 1988, kl. 1056. I øvre bildet er mørkt høy og lys lav konsentrasjon, mens i de to utsnittene er lyst satt som høy verdi og mørkt som lav. Bildebehandling ved NIVA og Centrum för bildanalys.



Figur 14. Simulert fordeling av sporstoff den 14. juni 1988 kl. 1200.



Figur 15. Simulert hastighets- og konturplott for 14.juni 1988 kl.1200

3.5 Verifikasjon for den 1. august 1988

3.5.1 Tolkning av satellittbildet

I denne verifikasjonen benyttes TM-data fra kl 1056. I Breidangen har både det optiske og termiske bildet noe dårlig informasjonsinnhold p.g.a. små gradienter mellom vannmassene (figur 16). Fargebilder er også for denne situasjonen presentert i Sørensen og Lindell (1990).

I Breidangen er det lave konsentrasjoner av partikler som øker inn i Mossesundet og i Sandebukta. Temperaturbildet antyder at Drammensfjordvannet synes å befinne seg på fjordens vestside, men kan spores ned til Bastøy. Ferskvann fra Glommas vestre løp dekker området ut til Søstrene og har ingen sterk vestlig komponent. Det turbide ferskvannet fra hovedløpet i Glomma går sydover med høye konsentrasjoner ned til Tisler. Det er noen sensorstriper i bildet som "forstyrrer" inntrykket av Glomma's spredning. Det termiske satellittbildet viser hovedsakelig sydlig spredning av Glommavannet.

3.5.2 Sporstoffsimuleringen

Det foreligger ingen simulering med sporstoff for denne situasjonen. De simulerte strømhastighetene (figur 17) i Breidangen er svake i perioden og kan derfor tyde på en dårlig spredning av vann fra Drammensfjorden, dvs. den simulerer situasjonen som den er tolket fra satellittbildet tilfredsstillende.

I området utenfor Vesterelva gir modellen nesten strømstille forhold som kan gi det spredningsbilde satellittbildet viser med en oppstuvning av vann fra Vesterelva innenfor Søstrene.

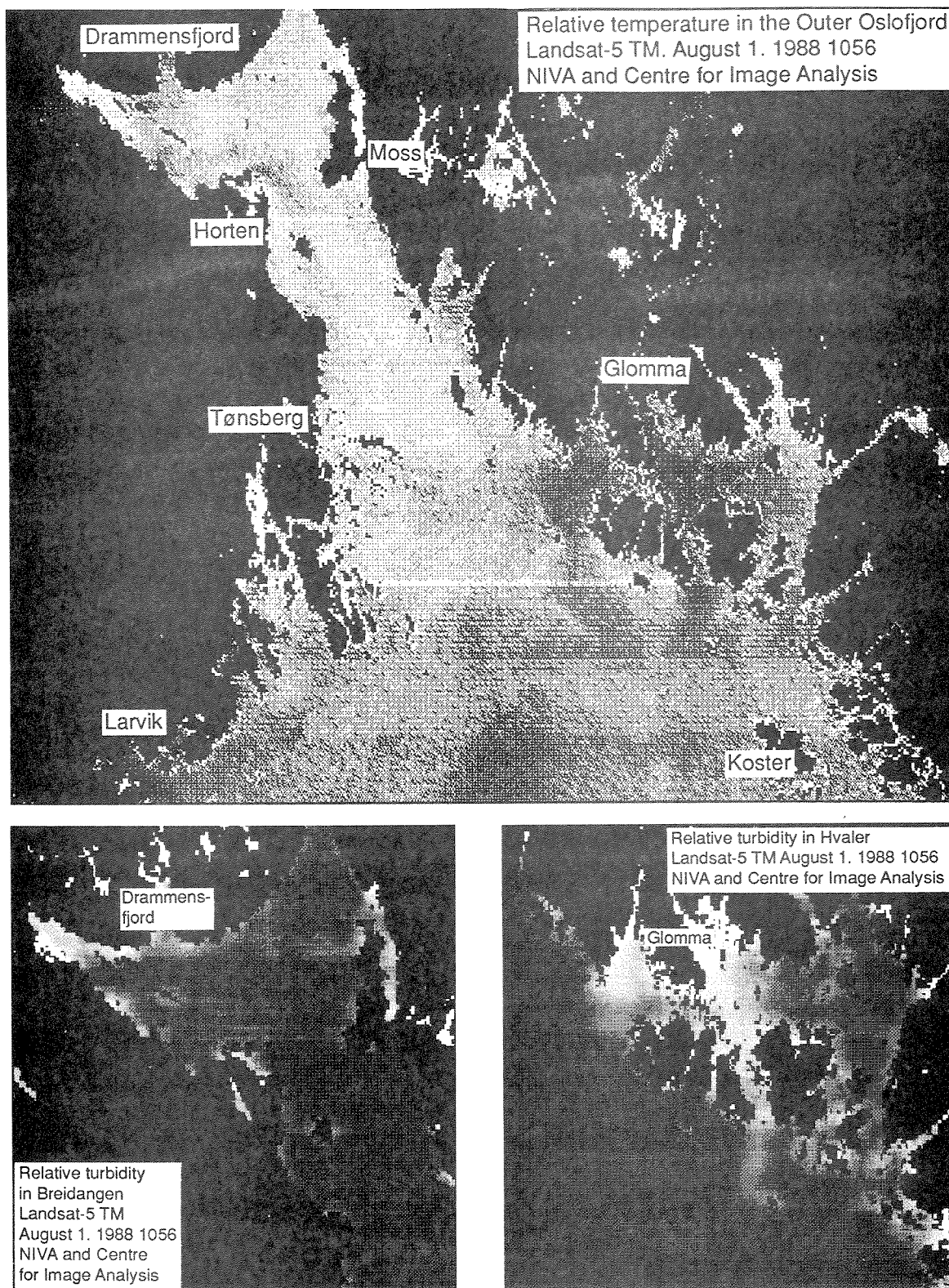
I randen av modellen er det innstrøm fra syd ved Kosterøyene og utstrøm ved Færder/Svenner. Det gis ikke noen mulighet for noen sørlig transport. Modellen stemmer i dette tilfelle dårlig både med satellittbildet og dessuten med feltobservasjonene tatt i området ved samme tidspunkt (Magnusson m.fl., 1990).

3.5.3 Diskusjon av avvik mellom modell og observasjon

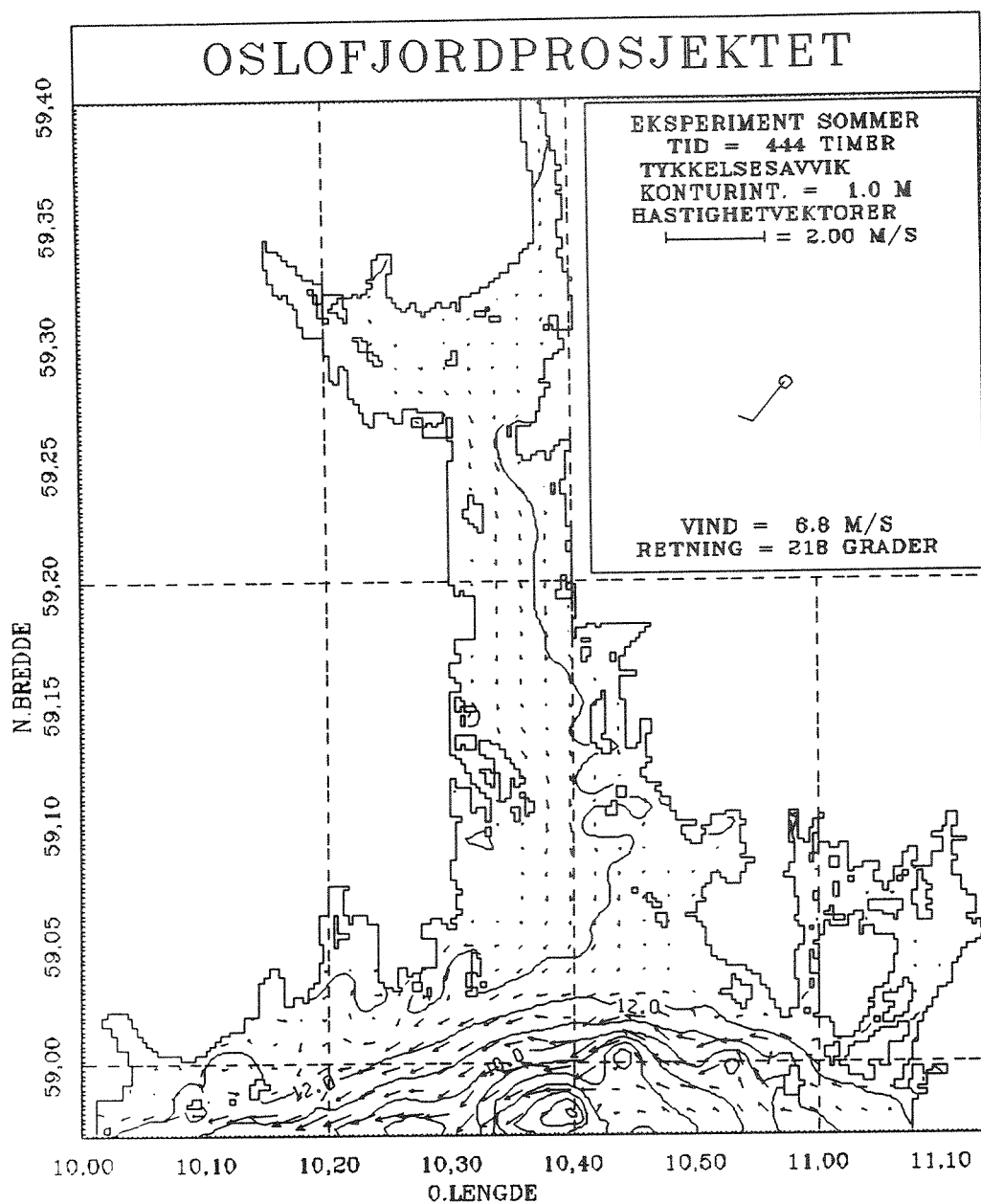
For denne perioden foreligger det ingen simuleringer med Versjon 2 av transportmodellen. Bildet som er vist i figur 17 er fra simuleringen med Versjon 1. Som nevnt i Røed m.fl. (1990) er det nettopp på randen mot Skagerrak at en av de vesentlige endringene er foretatt.

At det opptrer et avvik nettopp her, er derfor ikke uventet og

bekrefter nødvendigheten av endringer fra Versjon 1 og 2. Til tross for denne endringen skal likevel simuleringen for Versjon 2 tolkes med en viss forsiktighet i områdene nær randen mot Skagerrak. Uavhengige eksperimenter har vist, som påpekt tidligere, at styrken av strømmene syd i modellen for Ytre Oslofjord er følsom overfor endringer i simulert Skagerrak-sirkulasjon. Dette peker igjen på hvilken vanskelighet åpne render i havmodellering representerer, og hvor viktig det kan være å knytte en Skagerrak og Ytre Oslofjord modell sammen.



Figur 16. Relativ temperatur- (øvre) og turbiditetsfordeling (nedre) i Ytre Oslofjord den 1. august 1988 kl. 1056. For temperatur er mørkt lav og lys høy verdi, mens for turbiditet er lys satt til høy og mørk lav konsentrasjon. Bildebehandling ved NIVA og Centrum för bildanalys.



Figur 17. Simulert hastighets- og konturplott den 1. aug. 1988 kl.1200

3.6 Verifikasjon for den 10. juni 1989

3.6.1 Tolkning av satellittbildet

For 1989-simuleringen ble det valgt ut data fra den 10. juni hvor det også var foretatt feltobservasjoner. Disse data er nærmere diskutert i den andre delrapporten fra denne delundersøkelsen fra 1989 (Sørensen m.fl. 1990a). Her er benyttet både TM-data fra kl 1047 og AVHRR-data fra kl 1230.

I mai måned hadde det vært moderate sydlige vinder som i første delen av juni øket kraftig og var den 8. juni oppe i 13-14 m/s og forårsaket en oppstuving av store vannmengder i fjorden.

Satellittbildene (figur 18) viser at det kalde vannet fra Drammensfjorden går mot Horten og Bastøy. TM-bildet viser gradienter på tvers av Ytre Oslofjord ned til Slagentangen med kaldest vann på vestsiden. Vi finner også en lomme med kaldere vann ved Jeløy (AVHRR-bildet). Det er en svak signatur av kaldt vann ved Glomma's vestre løp. Det samme gjelder kaldt vann fra Løperen som ikke synes å ha sydlig spredning. Utenfor det kaldeste Glommavannet ligger det varmere vann til noe syd for Tisler og med en spiss ut i Oslofjorden. En kaldere vannmasse fra Skagerrak synes å strømme inn i munningen av Ytre Oslofjord på østsiden. Her kan det imidlertid være noe atmosfæriske problemer (Sørensen m.fl. 1990a) som gir inntrykk av noe kaldere vann enn hva som egentlig er tilfelle.

3.6.2 Sporstoffsimuleringen

Modellen viste den 9. juni kl 0800 innstrømmning i Breidangen med litt antydning til virveldannelse. Den 10. juni kl 0000 var det mer typisk virveldannelse i Breidangen (figur 19), men da med sentrum langt vest i Breidangen. Det er også en virvel-dannelse nord for Bolærne.

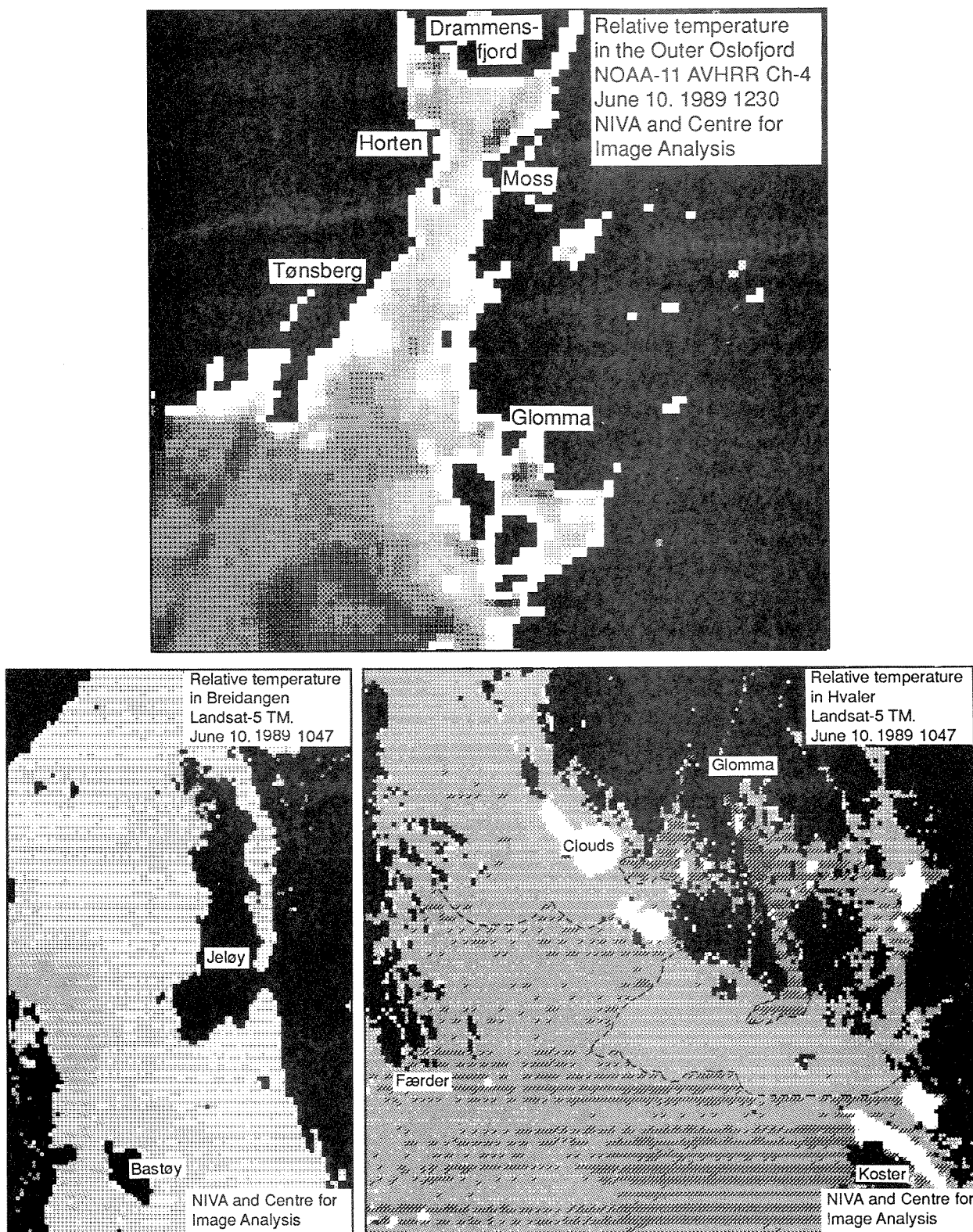
Sporstoffsimuleringen kl 1200 (figur 20) viser moderate spredninger i Breidangen og virvelen i området forhindrer spredning ut fra Breidangen mot sør.

I sentrale og ytre deler av fjorden viser modellen effekten av den kraftige innstrømmningen i fjorden. Det storstilte mønsteret stemmer her godt med satellittobservasjonene.

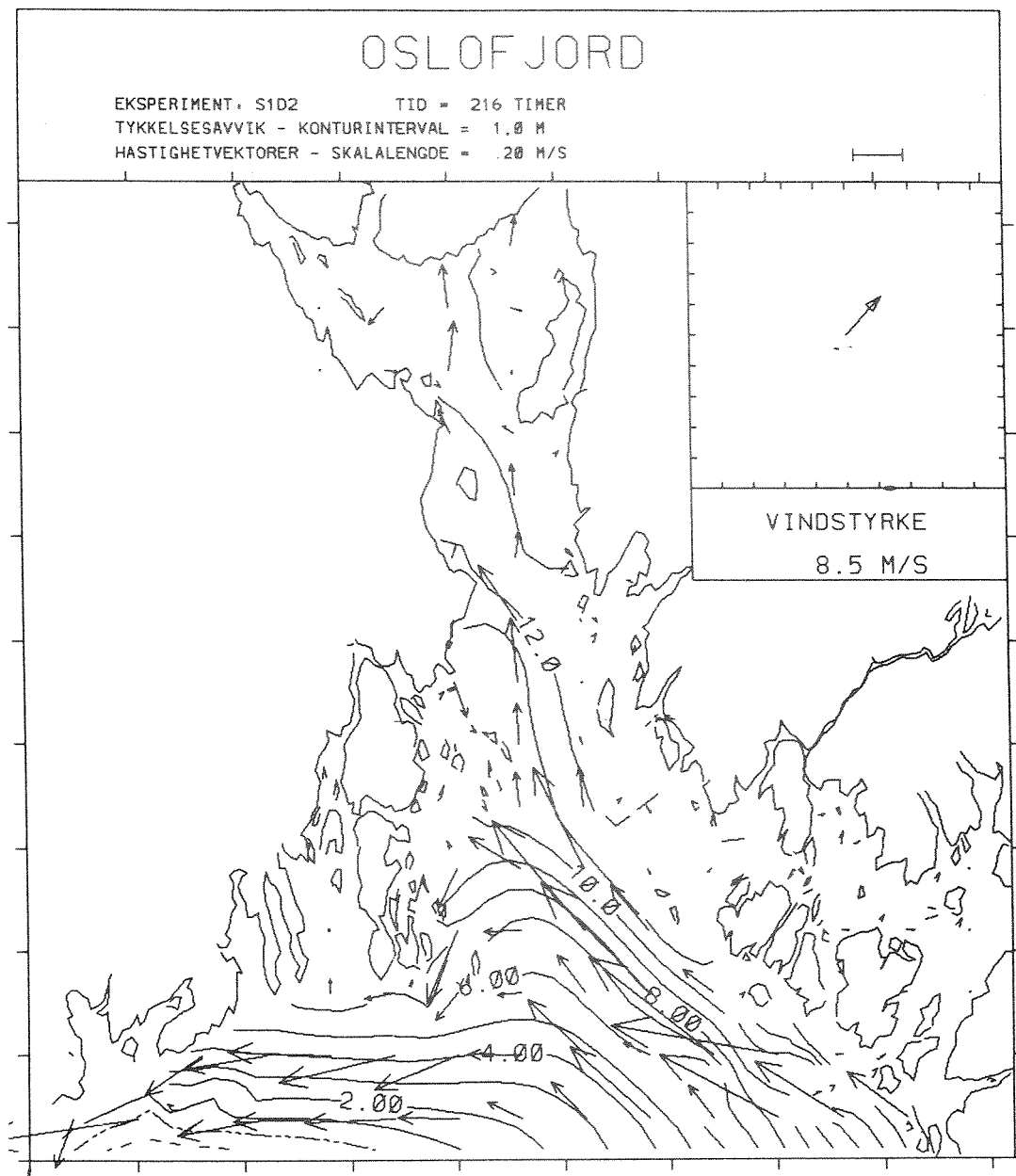
3.6.3 Diskusjon av avvik mellom modell og observasjon

Det er rimelig å anta at de øvre vannmassene er godt blandet pga. den kraftige vinden. TM-bildet viser en svak sydtransport på vestsiden av fjorden ned til Horten, og i AVHRR-bildet synes det å ligge noe kaldere vann vest av Jeløy. Det synes derfor som om transporten ut fra Breidangen er beskjeden. Modellresultatene viser (figur 19) antydning av en motvirvel med sørgående strøm langs Jeløy som kan gi en slik effekt.

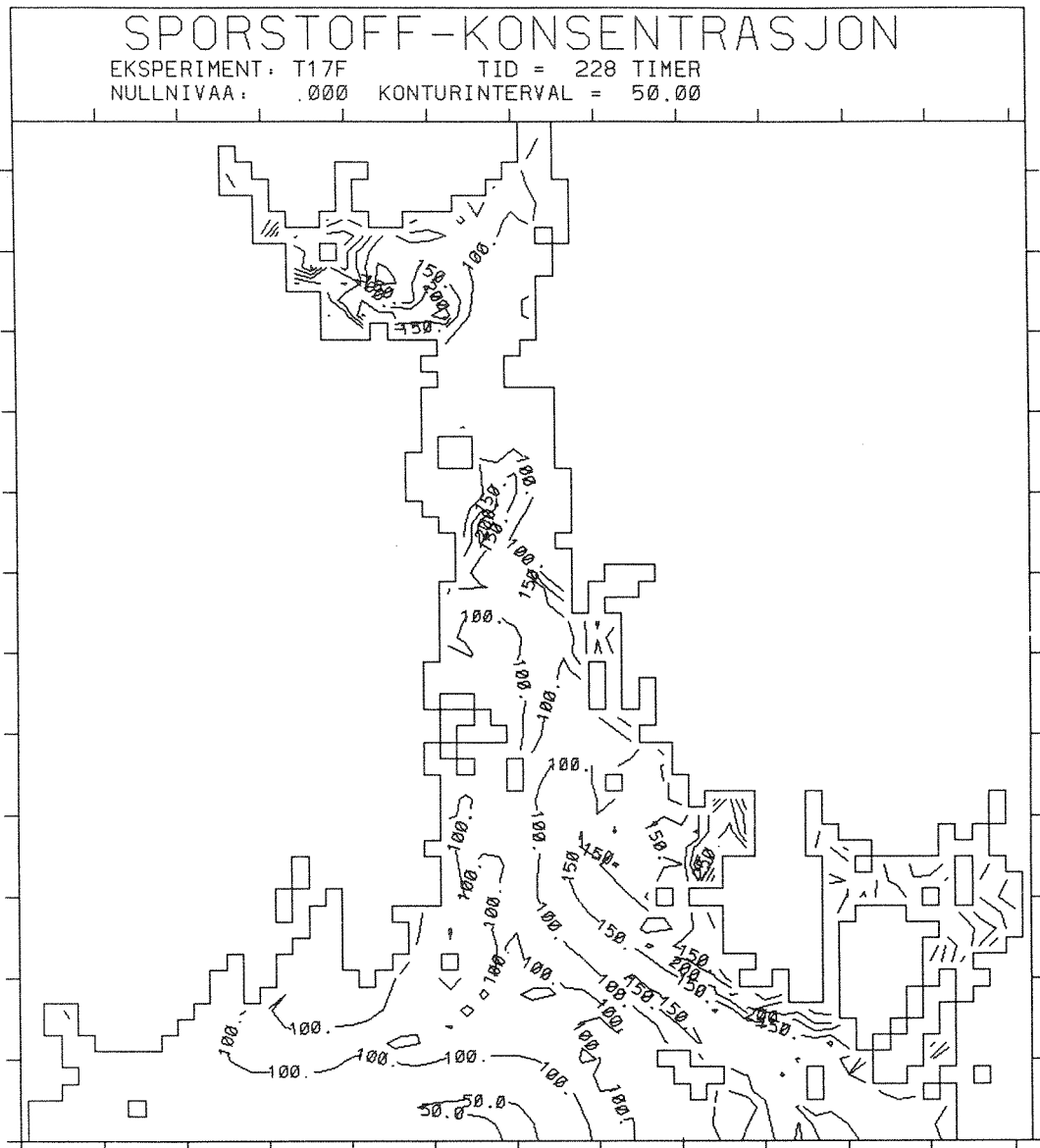
Igjen synes konklusjonen å være at modellen fanger opp den storstilte responsen bra, men at enkeltdetaljer mangler. De avvik som foreligger mellom modell og observasjoner kan forklares ved litt for sterke strømmer på modellgrensen til Skagerrak.



Figur 18. Relativ temperaturfordeling i Ytre Oslofjord kl. 1230 (øvre) og kl. 1047 (nedre) den 10. juni 1989. Mørkt er lav og lyst er høy temperatur. Bildebehandling ved NIVA og Centrum för bildanalys.



Figur 19. Simulert hastighets- og konturplott for 10.juni 1989 kl.0000



Figur 20. Simulert fordeling av sporstoff den 10. juni 1989 kl. 1200.

3.7 Verifikasjon for den 22. juni 1989

3.7.1 Tolkning av satellittbildet

Den 22. juni 1989 foreligger et AVHRR bilde fra kl. 1347 som viser det kaldere Drammensfjordvannet i de vestre deler av Breidangen (figur 21). En del varmere vann ligger nord for Horten og mot Jeløy. Dette kan tyde på noe stillestående vann i området og svake strømmer. Glomma's vestre løp har en tendens til å bre seg nordvestover og vann fra Løperen ligger på utsiden og noe vestover uten noen klar sydlig spredning. Lenger ut på den vestre side av randen kan det se ut til at kaldere vann strømmer nordover. Bildet inneholder mye atmosfæriske forstyrrelser langs svenskekysten og det er derfor vanskelig å vurdere hva som skjer ved Tisler.

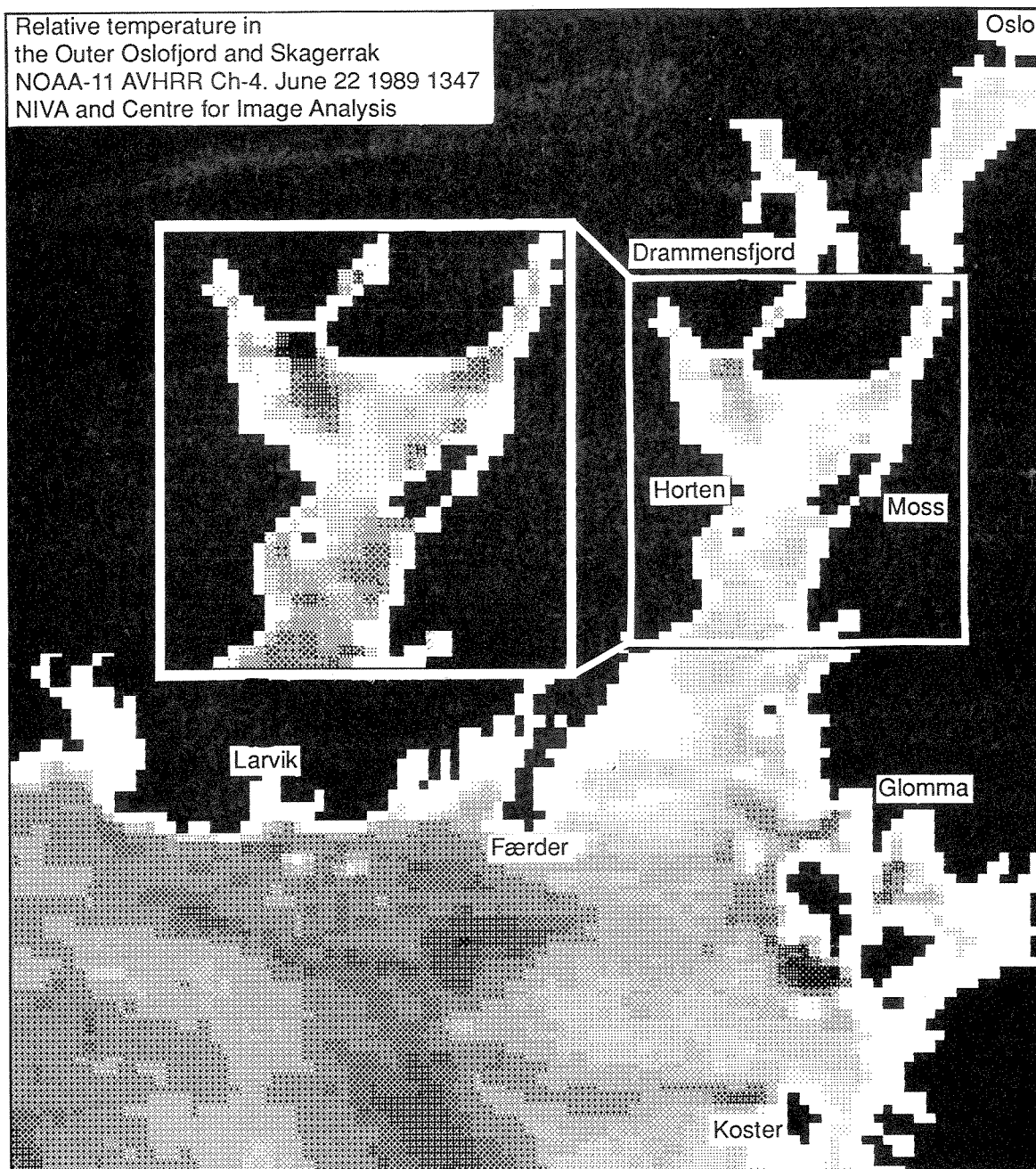
3.7.2 Sporstoffsimuleringen

Sporstoffmodellen (figur 22) stemmer bra for Breidangenområdet når det gjelder spredningen av Drammensfjordvann. Dette presses nordover og holder seg stort sett inne i Breidangen.

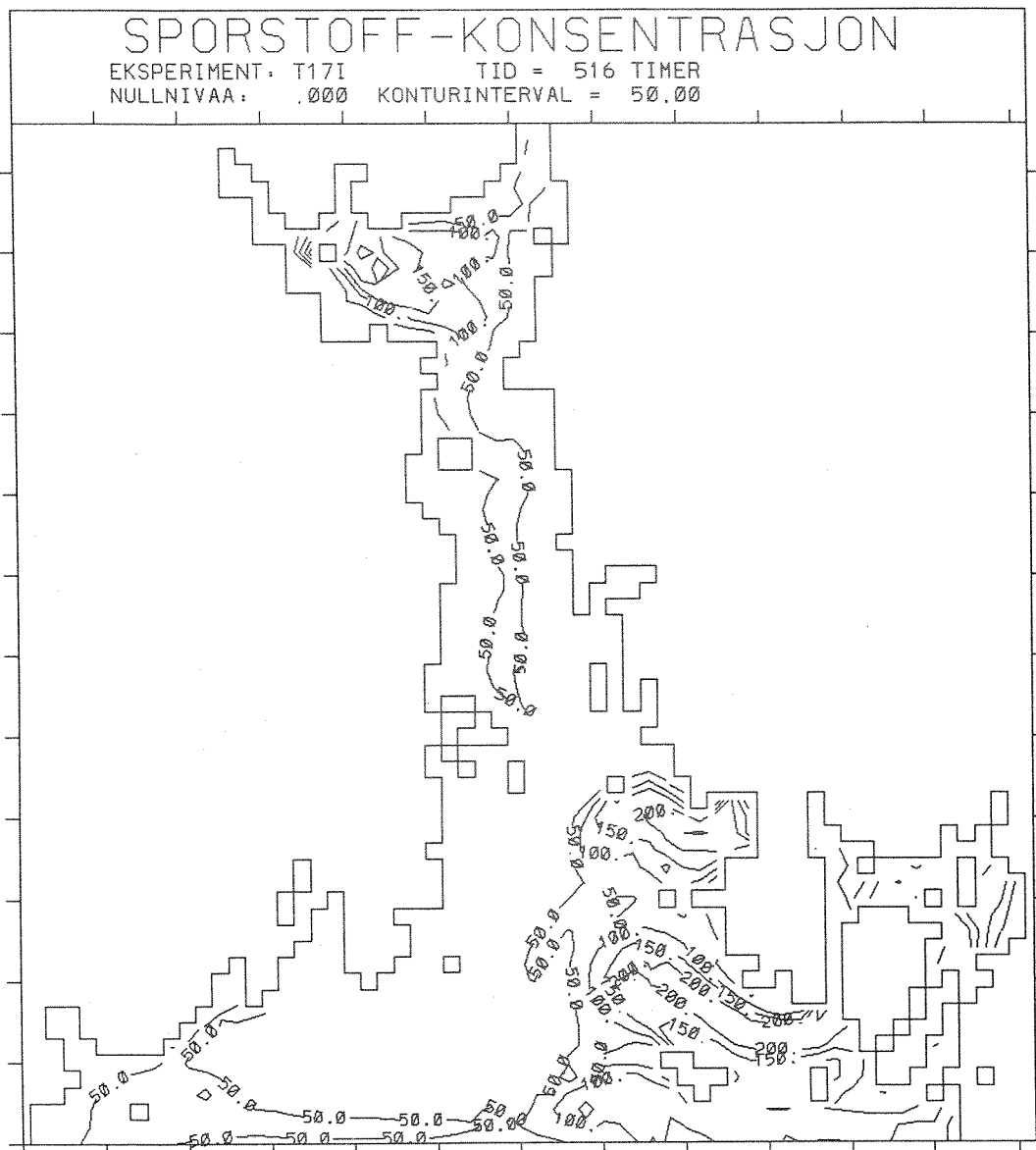
Glomma's vestre løp som brer seg nordvestover passer også bra med tolkningen av satellittbildet. Spredningen av Glommavann fra Løperen mot NV simuleres bra av modellen. Fordelingen i sørvest tyder på en tilbakestrøm langs norskekysten nordøstover eller stagnante vannmasser. De simulerte strømforholdene er vist i figur 23.

3.7.3 Diskusjon av avvik mellom modell og observasjon

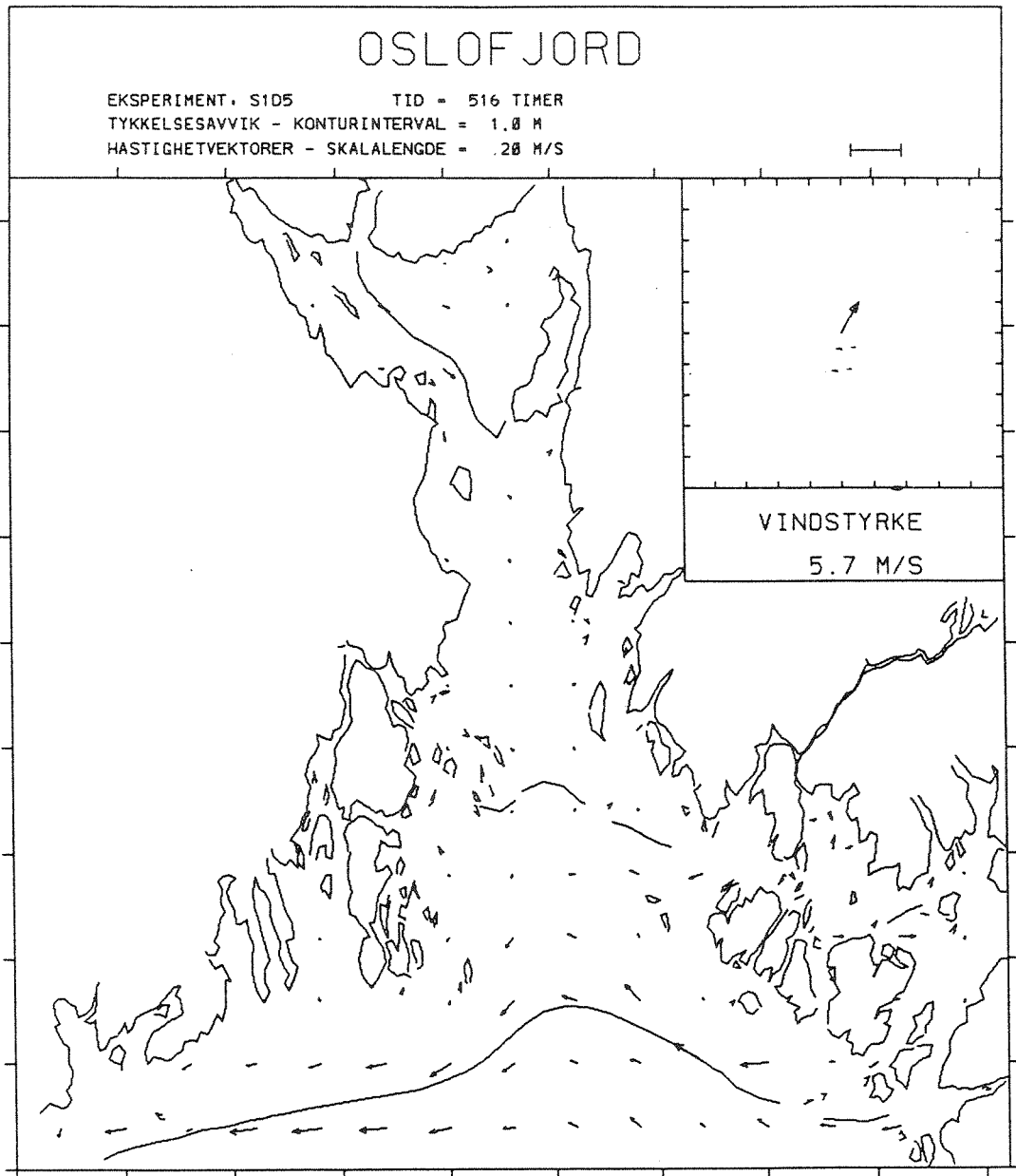
For denne situasjonen ser simuleringene ut til å gi et mønster som verifiseres svært godt av satellittbildet. Denne situasjonen avviker noe fra de andre ved at det i en periode på en uke har vært rolige vindforhold (solgangsbris). Dette indikerer at forholdene på den sørlige randen i slike tilfelle er bra simulert i motsetning til situasjoner med tidligere kraftige vinder.



Figur 21. Relativ temperaturfordeling i Ytre Oslofjord den 22. juni 1989 kl. 1347. Mørkt er lav og lyst er høy temperatur. Innskutt bilde av Breidangen er sterkere kontraststrukket. Bildebehandling ved NIVA og Centrum för bildanalys.



Figur 22. Simulert fordeling av sporstoff den 22. juni 1989, kl 1200.



Figur 23. Simulert hastighets- og konturplott for 22.juni 1989 kl.1200

4. DISKUSJON

Tolkningen av sammenligningen mellom satellittbilder (her termiske og optiske) og modellresultater må utføres med en viss forsiktighet. F.eks. er det mulig å mistolke satellittbildene, idet temperaturen i de aller øverste centimetrene er sterkt påvirket av soloppvarming som vil kunne gi svært lokale variasjoner i temperaturer. I de tilfellene hvor en også har optiske bilder (turbiditet) ser en ofte klare forskjeller mellom disse og de termiske bildene. Det bør også påpekes at AVHRR-data som i hovedsak er brukt her, har en dårligere geometrisk oppløselighet (ca. 1 km) enn TM-data, og kan til tider være vanskelig å bruke i trange fjorder.

I tolkningen av satellittbildene er det også viktig å være klar over at de gir et øyeblikksbilde. F.eks. vil en vannmasse som først er fraktet nordover og deretter sørover se ut som den er ubevegelig, mens det i virkeligheten har foregått en dynamisk prosess i mellomtiden.

Modellen på sin side er heller ikke perfekt, idet den bare har et begrenset antall fysiske prosesser i seg. Det er derfor i utgangspunktet ikke å forvente at tolkninger av satellittbilder og modellresultater skal stemme overens i detalj. F.eks. vil ved sterke eller kraftige vinder dynamikken i fjorden naturlig nok være mer aktiv enn ved svake til moderate vinder. Det er derfor naturlig å forvente at modellen vil simulere fjordens respons bedre ved lette til moderate vindforhold. Det er også klart at modellen viser avvik i grensområdet mot Skagerrak. For å forbedre modellen i dette område bør den kobles til en Skagerrakmodell.

Med disse innledende forbehold er hovedkonklusjonen allikevel at modellen synes å simulere de storstilte strømforholdene i fjorden bra. Ikke minst synes modellen å fange opp endringer i strømmønsteret raskt når de ytre betingelsene endres. Videre synes også detaljbildet å være bra ved svake til moderate vinder. Dette skyldes antagelig at ved slike forhold er de viktigste fysiske forholdene som skaper strøm, med i modellen, dvs. man får en ren baroklin respons. Ved kraftige vindforhold er det å forvente at også andre fysiske prosesser er tilstede, som f.eks. stormflod/kraftig vannstandsøkning. Ettersom barotrope prosesser ikke er med i modellens styrende ligninger, og dersom disse gir signifikante bidrag til strømmønsteret, må avvik forventes. Dette gjelder også i situasjoner med sterke barotrope strømmer i Skagerrak (stor innstrømmning av Atlanterhavsvann eller brakkvann fra Østersjøen/Kattegat).

Særlig synes det som om modellen simulerer forholdene i Breidangen-

området og ned til Slagentangen og Bolærne meget bra. I de ytre delene og nærmest randen i sør, avviker modellresultatene til tider noe fra tolkningen av satellittbildene. Dette understreker betydningen av bruken av åpne randbetingelser. Ved denne randen forventes avvik fra tid til annen, da sirkulasjonen i Skagerrak til tider kan være forskjellig fra den som simuleres ved hjelp av den brukte åpne randbetingelsen i modellen. Mye tyder på at variasjoner i styrke og posisjon av den Baltiske strømmen (som også er regulert av og følsom for den generelle sirkulasjonen i Skagerrak) til tider har stor innflytelse på de lokale strømforholdene i den sørlige delen av Ytre Oslofjord.

Modellen simulerer strømforholdenes viktigste hovedtrekk også ved kraftige vinder og ikke minst under raske omskiftninger. Videre har spesielt modellen, pga. sin ikke-linearitet, gitt muligheten for beskrivelse av virveldannelse og dermed tolkning av en del spesielle forhold i satellittbildene ut fra en ny forståelse av fjordens dynamikk.

Bruk av satellittbilder til slike verifikasjonsstudier har vist seg å være meget nyttig og vil være et viktig verktøy i videre arbeid med verifikasjon og utvikling av denne type modeller.

5. Litteratur

- Luther, M.E., og O'Brien J.J. 1985, A model of the seasonal circulation in the Arabian Sea forced by observed Winds. Prog. Oceanogr., 14, pp. 353-385.
- Magnusson, J., Skei, J.M. og Sørensen, K, (1990): Eutrofisisituasjonen i Ytre Oslofjord. Delprosjekt 3.6. Hydrografiske og hydrokjemiske observasjoner i Ytre Oslofjord. Juni og august 1988. Rapport fra Statlig program for forurensningsovervåking. (Manus).
- Røed, L.P., 1990. On the interpretation of upper layer thickness in reduced gravity models. Submitted to J. Geophys. Res.
- Røed, L.P., Skåtun, H. og Irmann-Jacobsen, T.B, 1990. Eutrofisisituasjonen i Ytre Oslofjord 1989. Delprosjekt 4.8. Transportmodell. Simuleringer av strøm, sporstoffer og partikkelbaner. En analyse og oppsummering. Rapport 412/90 i Statlig program for forurensningsovervåking. VERITEC rapport nr. 90-3098, 55 s.
- Skåtun, H. og Røed, L.P., 1990. Eutrofisisituasjonen i Ytre Oslofjord. Delprosjekt 3.3b. Transportmodell av overflatelaget i Ytre Oslofjord. Rapport 2: Resultater fra simuleringene. En analyse og oppsummering. Rapport 396/90 i Statlig program for forurensningsovervåking. VERITEC rapport nr. 89-3055, 78 s.
- Syvitski, J.P.M, Burell, D.C. and Skei, J.M., 1987. Fjords. Processes and Products. Springer-Verlag. ISBN 0-387-96342-1.
- Sørensen, K., Lindell, T og 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 3.7 a: Optiske observasjoner-overflatevannets kvalitet sett ut fra observasjoner i overflatelaget og fjernmåling. Rapport 387/90 i Statlig program for forurensningsovervåking. NIVA rapport nr. 2365, 42 s.
- Sørensen, K., Aas, E og Lindell, T. 1990a. Eutrofisisituasjonen i Ytre Oslofjord 1989. Delprosjekt 4.6 a. Optiske observasjoner. Rapport 405/90 i Statlig program for forurensningsovervåking. NIVA rapport nr. 2407, 50 s.

Sørensen , K., Nilsen, J., Sæbø, H.V. og Holbæk-Hansen, E. 1990b.
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 i Statlig
program for forurensningsovervåking. NIVA rapport nr. 2434, 98 s.

Norsk institutt for vannforskning  NIVA

Postboks 69, Korsvoll
0808 Oslo 8

ISBN 82-577 -1773-8