



# Statlig program for forurensningsovervåking

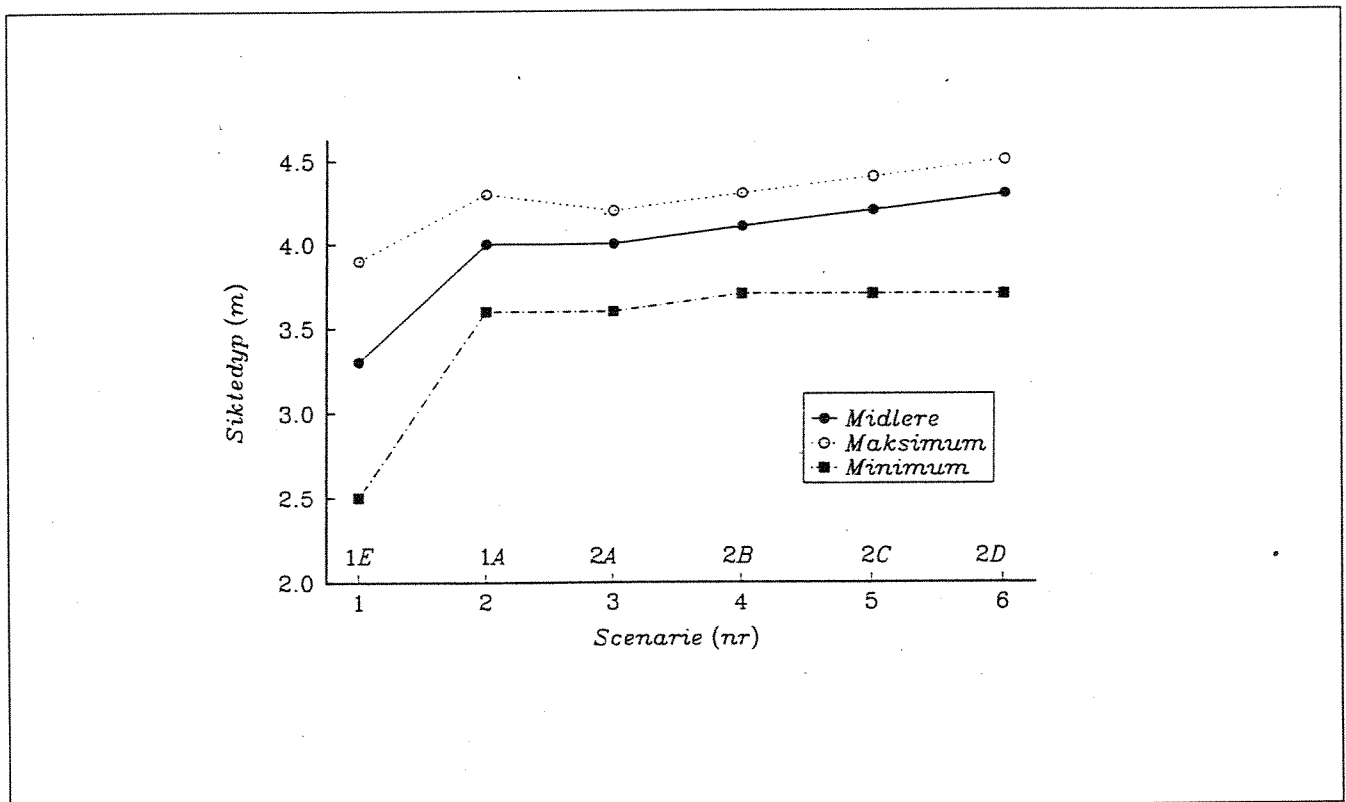
## Rapport 572/94

Oppdragsgiver      Statens forurensningstilsyn  
Norsk Hydro Glomfjord fabrikk  
Statkraft

Utførende institusjon NIVA

## Undersøkelser av miljøforhold i Glomfjord og Holandsfjord i 1991-92

Delrapport 4. Modellsimulering  
av effekter av endret tilførsel av  
ferskvann og næringsalter til  
Glomfjord



# NIVA - RAPPORT

Norsk institutt for vannforskning



NIVA

Prosjektnr.: O-910300	Undernr.:
Løpenr.: 3063	Begr. distrib.:

Hovedkontor	Sørlandsavdelingen	Østlandsavdelingen	Vestlandsavdelingen	Akvaplan-NIVA A/S
Postboks 173, Kjelsås 0411 Oslo Telefon (47) 22 18 51 00 Telefax (47) 22 18 52 00	Televeien 1 4890 Grimstad Telefon (47) 37 04 30 33 Telefax (47) 37 04 45 13	Rute 866 2312 Ottestad Telefon (47) 62 57 64 00 Telefax (47) 62 57 66 53	Thormøhlensgt 55 5008 Bergen Telefon (47) 55 32 56 40 Telefax (47) 55 32 88 33	Søndre Tollbugate 3 9000 Tromsø Telefon (47) 77 68 52 80 Telefax (47) 77 68 05 09

Rapportens tittel: Undersøkelser av miljøforhold i Glomfjord og Holandsfjord i 1991 - 92. Delrapport 4. Modellsimulering av effekter av endret tilførsel av ferskvann og næringsalter til Glomfjord.	Dato: 21/4-94	Trykket: NIVA 1994
	Faggruppe: Marin økologi	
Forfatter(e): Anders Stigebrandt Jarle Molvær	Geografisk område: Nordland	
	Antall sider: 51	Opplag:

Oppdragsgiver: Norsk Hydro Glomfjord Fabrikker, Statkraft og Statens forurensningstilsyn (SFT). (Overvåkningsrapport nr. 572/94. TA-nr. 1102/1994).	Oppdragsg. ref.:
---	------------------

**Ekstrakt:**

Det er utarbeidet en matematisk modell som simulerer effekter av endret tilførsel av næringsalter og av ferskvann til Glomfjord. Modellen er brukt til å simulere effekter av seks ulike kombinasjoner av disse to variablene.

Ifølge modellberegningene gir overføringen av ferskvann til Holandsfjord små effekter mht. algevekst og siktedyp i indre del av Glomfjord. Det er ingen innvirkning på oksygenforholdene i fjordens dypvann.

Reduserte utslipp av næringsalter fra Norsk Hydro Glomfjord Fabrikker i tidsrommet 1981 - 91 har i gjennomsnitt ført til en halvering av planktonkonsentrasjonen i fjordens overflatelag. Nivået for minste siktedyp er økt med omkring 1 meter. Ved ytterligere utslippsreduksjoner blir effekten forholdsvis liten, og midlere siktedyp kan øke med omkring 0.2 m.

4 emneord, norske

1. Glomfjord
2. Eutrofimodell
3. Næringsalter
4. Ferskvannstilførsel

4 emneord, engelske

1. Glomfjord
2. Eutrophication model
3. Nutrients
4. Freshwater discharge

Prosjektleder

Jarle Molvær

For administrasjonen

Jørgen Bakke

ISBN 82-577-2557-9

**NORSK INSTITUTT FOR VANNFORSKNING  
OSLO**

**ANCYLUS  
GØTEBORG**

**O-910300  
UNDERSØKELSER AV MILJØFORHOLD I GLOMFJORD OG  
HOLANDSFJORD I 1991-92**

**DELRAPPORT 4**

**MODELLSIMULERING AV EFFEKTER AV ENDRET TILFØRSEL AV  
FERSKVANN OG NÆRINGSSALTER TIL GLOMFJORD**

**Oslo, 21.4 1994  
Anders Stigebrandt, Ancylus  
Jarle Molvær, NIVA**

## **FORORD**

*Foreliggende rapport presenterer resultater fra en matematisk modell for Glomfjord. Arbeidet inngår som en del av en bred undersøkelse av Glomfjord og Holandsfjord utført for Statkraft, Norsk Hydro Glomfjord Fabrikker og Statens forurensningstilsyn. Norsk institutt for vannforskning (NIVA), Oslo, har hatt det faglige og økonomiske ansvaret for gjennomføringen av undersøkelsene. Jarle Molvær NIVA har vært prosjektleder.*

*Parallelt med modellundersøkelsen har et omfattende måleprogram blitt gjennomført i Glomfjord. Dette har dokumentert tilstanden før vann ble overført fra Glomfjord til Svartisen kraftverk og har gitt dataunderlag for testing og kalibrering av modellen. Basert på modellresultatene gis i denne rapporten en beskrivelse av forventede virkninger på hydrofysiske og vannkjemiske forhold av endringen i ferskvannstilførsel.*

*Prosjektet er således to-delt, og tilstandsbeskrivelsen for Glomfjord utgis som egen rapport. Foreliggende rapport er forfattet av Anders Stigebrandt og Jarle Molvær, den førstnevnte har utført modellarbeidet.*

*Ved Statkraft har overingeniør Jan-Petter Magnell utført beregningene av ferskvannstilførsel til Holandsfjord og Glomfjord. Hovedkontakt har vært Jens Petter Taasen.*

*Ved Statens forurensningstilsyn har Turid Winther-Larsen vært kontaktperson og Kristine Haukalid har vært kontakt ved Norsk Hydro Glomfjord Fabrikker.*

*Det norske meteorologiske institutt, Oslo, har bistått med å skaffe tilveie klimadata.*

# INNHOOLD

Side:

FORORD . . . . .	1
SAMMENDRAG . . . . .	3
1. INNLEDNING . . . . .	4
1.1 Formål . . . . .	4
1.2 Modellen . . . . .	5
2. TOPOGRAFI . . . . .	6
3. MÅLEDATA . . . . .	7
3.1 Ferskvannsavrøring . . . . .	7
3.2 Meteorologiske data . . . . .	8
3.3 Hydrofysiske, vannkjemiske og biologiske data . . . . .	10
3.4 Tilførsler av plantenæringssalter . . . . .	10
4. HYDROGRAFI . . . . .	11
4.1 Overflatelaget . . . . .	12
4.2 Intermediært lag . . . . .	15
4.2.1 Analyse av strømmålinger ved fjordens munning . . . . .	16
4.2.2 Analyse av TS-målinger i fjordens indre del . . . . .	18
4.3 Dypvannet . . . . .	20
5. RESULTAT FRA MODELLBEREGNINGENE . . . . .	21
5.1 Drivning av fjorden under intensivperioden . . . . .	21
5.2 Sammenligning av målt og beregnet tilstand . . . . .	27
5.3 Modellprognoser for tilstandforandringer ved forandret tilførsel av ferskvann og . . . . .	34
5.3.1 Scenarier . . . . .	34
5.3.2 Resultater . . . . .	35
5.3.3 Usikkerhet i modellprognosene . . . . .	39
5.4 Konklusjoner . . . . .	42
6. LITTERATUR . . . . .	43
APPENDIKS 1 . . . . .	44
APPENDIKS 2 . . . . .	45

## SAMMENDRAG

1. Undersøkelser i Glomfjord i 1981-1982 viste til dels sterke effekter av næringssaltutslipp i strandsonen og fjordens overflatelag. Fram til 1991 ble næringssaltutslippene til fjorden redusert med ca. 75% (fosfor) og 55% (nitrogen). På den annen side er det mulig at den store reduksjonen av ferskvannstilførselen til Glomfjord ved Stor-Glomfjordutbyggingen ville endre visse sider av de hydrofysiske forhold, først og fremst økt oppholdstid for fjordens brakkvannslag. Dette kunne bidra til å øke planteplanktonproduksjonen i Glomfjord, og dermed motvirke de positive effektene av reduserte næringssaltutslipp.
2. For å gi svar på spørsmål om effekter på fjordens hydrofysiske, hydrokjemiske og biologiske forhold av endret ferskvannstilførsel og endret utslipp av næringssalter har en matematisk modell blitt utviklet for Glomfjord. Modellen er inndelt i tre områder tilsvarende indre, midtre og ytre Glomfjord. Modellen ble testet mot ukentlige målinger tatt i Glomfjord sommeren 1991. Modeller ble deretter brukt for å studere effekter av seks ulike kombinasjoner (scenarier) for tilførsler av ferskvann og næringssalter.
3. Reduksjonen av utslippene av næringssalter fra Hydro Glomfjord Fabrikker i perioden fra 1981 til 1991 har i følge modellen medført en kraftig reduksjon (halvering) av gjennomsnittlig planktonkonsentrasjonen i overflatelaget i hele Glomfjord. Dette gir en økning på 0.6-0.7 m i midlere siktedyp for indre og midtre del og noe mindre i ytre del. Siktedypminimum har øket med ca. 1 m i midtre og indre områder.
4. En fortsatt reduksjon av utslippene av næringssalter vil gi ytterligere reduksjon av planktonkonsentrasjonen i overflatelaget og øking av siktedypet, spesielt i indre og midtre områder av fjorden. Potensialet for forbedringer ble imidlertid kraftig redusert gjennom de store reduksjonene av næringssaltutslipp som ble gjennomført i perioden fram til 1991. Dette gjør at man ikke kan forvente større forbedringer ved framtidige utslippsreduksjoner. En øking av midlere siktedyp med ca. 0.2 m, kan teoretisk oppnås i indre og midtre områder av fjorden.
5. Den gjennomførte ferskvannsreguleringen gir i følge modellen opphav til bare små effekter. Overflatetemperaturen vil bli noe forhøyet. Det blir noe forhøyet planktonkonsentrasjon i overflatelaget i fjordens indre del mens konsentrasjonen synker noe i midtre og ytre deler. Siktedypet blir noe lavere i fjordens indre del. Planktonkonsentrasjonene under overflatelaget vil øke marginalt. Dette vil ikke ha betydning for oksygenforbruket i fjordens dypvann.

## 1. INNLEDNING

### 1.1 Formål

Ved Stor-Glomfjordutbyggingen blir ferskvannstilførselen til Glomfjord på årsbasis redusert til cirka en fjerdedel av tidligere tilførsel. Man forutså at reguleringen kunne endre visse sider av de hydrofysiske forhold i fjordens overflatelag, først og fremst ved mindre tykkelse av laget, høyere saltholdighet og noe lenger oppholdstid.

En lenger oppholdstid for overflatelaget kunne medføre at produksjonen av planteplankton i Glomfjord ble større enn under tidligere forhold. Derfor ønsket Glomfjord Fabrikker å få vurdert hvilke konsekvenser det kunne få for tilstanden i fjorden når en stor del av det tidligere ferskvannsutslippet gjennom Glomfjord kraftverk ble overført til Svartisen kraftverk ved Holandsfjord.

I tillegg ønsket Glomfjord Fabrikker å få vurdert konsekvensene av endret tilførsel av næringssalter.

Hovedformålet for undersøkelsene i Glomfjord var dermed:

1. Ajourført status etter at betydelige utslippsreduksjoner fra Glomfjord Fabrikker er gjennomført etter den første undersøkelsen i 1981-82.
2. Utvikle en modell som beskriver sammenheng mellom tilførsel av ferskvann og næringssalter og hydrofysiske, hydrokjemiske og biologiske forhold. Modellen skal brukes til å prognostisere effekter av endret tilførsel av ferskvann og næringssalter og gi økt forståelse av resultatene fra tilstandsbeskrivelsen.

Denne rapporten omhandler pkt. 2: modellutviklingen.

## 1.2 Modellen

For studie av sammenhengen mellom ferskvannstilførsel, nærings saltutslipp, vannkvalitet og primærproduksjon kreves en modell med høy oppløsning både vertikalt og i tiden. Her blir anvendt en modell av samme type som nylig ble brukt for Grenlandsfjordene (Stigebrandt & Molvær, 1991, 1993). Modellen er nærmere beskrevet i Appendiks 2 til denne rapporten.

For å beskrive horisontale gradienter blir fjorden inndelt i tre delområder, indre, midtre og ytre Glomfjord med tilsvarende hovedstasjoner, G4, G6, G7, se Fig. 1.1. Hvert område blir altså beskrevet ved en vertikal profil. Horisontale gradienter innen hvert delområde vil dermed ikke framgå av beregningene.

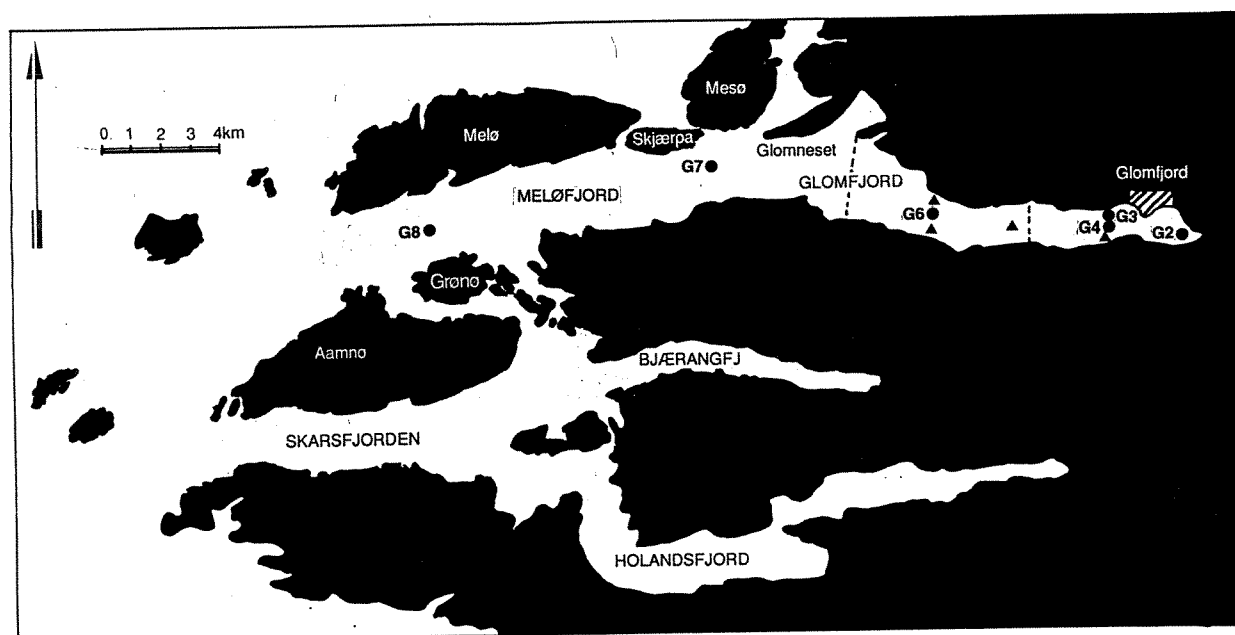


Fig. 1.1 Kart over Glomfjord med inntegnet posisjoner for målestasjoner. NVEs stasjoner er markert med svart trekant. Grensene mellom ulike modellområder er vist med prikket linje.



Som modellens nedre grense brukes fjordens terskeldyp, dvs ca. 100 m dyp. Modellen vil dermed omfatte det brakkvannspregede og næringsrike overflatelaget, og det underliggende intermedie sjøvannslaget som har sterke koblinger både til kystvannet og til overflatelaget. Fjordens dypvann inkluderes ikke av modellen siden det i undersøkelsene i 1981 ble bedømt at det bare var små og avgrensede effekter på bløtbunnsfaunaen i dypvannet.

Modellen gir prognoser for eutrofitilstanden i Glomfjord målt ved næringssaltkonsentrasjoner, siktedyp og konsentrasjon av planteplankton ved ulike kombinasjoner av næringssaltutslipp og ferskvannstilførsel.

For å teste modellen blir modellresultatene sammenlignet med målinger av modellens tilstandsvariabler fra hver av modellens delområder. For å få en realistisk simulering av sirkulasjonen i modellen må denne være drevet med målte meteorologiske, hydrologiske og oseanografiske (i modellens grense mot havet) data. Disse formål er den viktigste anledningen til de hyppige målinger som ble foretatt i fjorden under den såkalte "intensivperioden" i juni-august 1991.

## 2. TOPOGRAFI

Glomfjord består av et basseng som har sin terskel i ytre del av Meløyfjorden. Terskeldypet er ca 100 m og fjorden har et største dyp på ca. 370 m. Fjordens areal er ca. 47 km<sup>2</sup>. For modellsimuleringene er fjorden inndelt i tre områder (Fig. 1.1). Fjordarealet på ulike dyp for de tre modellområdene gis i Tabell 2.1.

Tabell 2.1 Arealet av de tre modellområdene i utvalgte dyp.

Dyp (m)	Areal (km <sup>2</sup> )			Totalt
	Område 1	Område 2	Område 3	
0	6.8	13.9	26.1	46.8
10	6.6	13.5	25.1	45.2
50	5.4	11.2	21.2	37.8
100	4.0	8.9	17.0	29.9
200	0.5	5.0	10.2	15.7
300	0	0	4.8	4.8
370	0	0	1.0	1.0

### 3. MÅLEDATA

#### 3.1 Ferskvannsavrenning

Statkraft har beregnet den daglige ferskvannsavrenningen til de tre modellområdene for årene 1977 til og med 1992. Fra disse kan en beregne at midlere ferskvannsavrenning i perioden 1977-1991 (15 år) for de tre modellområdene var henholdsvis 32.8 (1), 2.8 (2) og 2.5 (3) m<sup>3</sup>/s. Avrenningen til modellområde 1 inkluderer driftsvannføringen gjennom Glomfjord kraftstasjon (ca. 81% eller 26.5 m<sup>3</sup>/s). Ferskvannsavrenningen i 1991 til de tre modellområdene er vist i Fig. 3.1. Dessuten kommer nedbør direkte på havoverflaten. Hvis nedbøren målt ved klimastasjonen i Halså også er representativ for nedbøren på Glomfjord, er midlere ferskvannstilførsel i 1991 gjennom nedbør direkte på havoverflaten henholdsvis 0.41, 0.84 og 1.58 m<sup>3</sup>/s for de tre modellområdene, eller for hele fjorden 2.83 m<sup>3</sup>/s. Usikkerheten i størrelsen av den beregnede ferskvannstilførselen (utenom Glomfjord kraftstasjon) er 10-15% for månedene mai til august og noe større for øvrige månedene. Usikkerheten mht. tidspunktet for maksimal ferskvannstilførsel er ±1-2 døgn (Magnell, 1994).

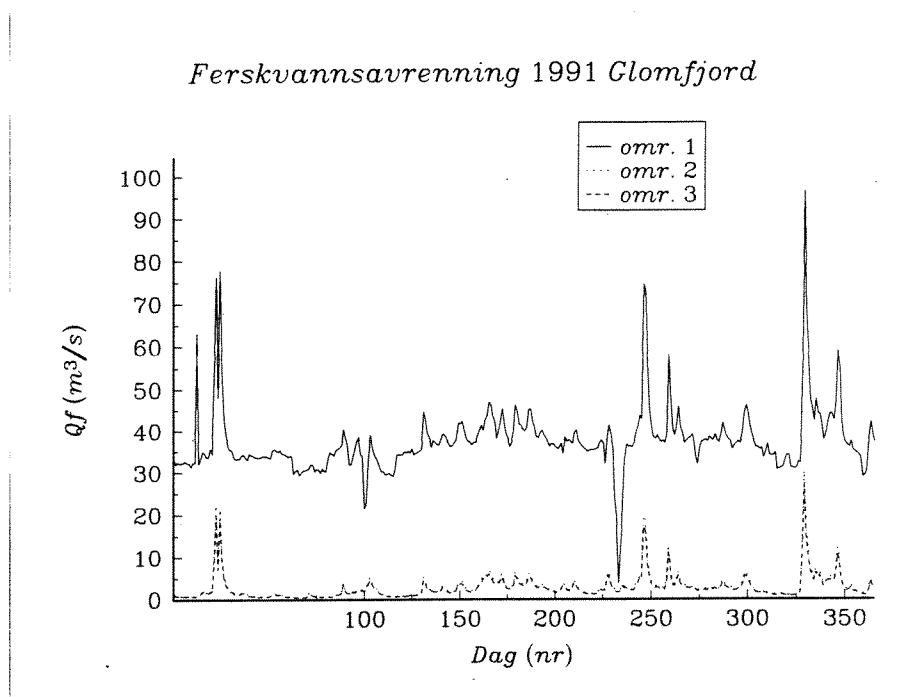


Fig. 3.1 Ferskvannsavrenningen til Glomfjord i 1991.

Etter overføring av vann til Svartisen kraftverk er midlere ferskvannsavrenning gjennom Glomfjord kraftstasjon redusert fra ca 27 til ca. 3.6 m<sup>3</sup>/s, dvs. en midlere reduksjon med ca. 87%. I tillegg er tilførselen fra lokalfeltene til modellområde 1, midlere uregulert

avrenning ca  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ , redusert med ca 12% til ca.  $5.3 \text{ m}^3/\text{s}$ . Dette betyr at midlere ferskvannsavrenning til indre Glomfjord (modellområde 1) gjennom reguleringen er redusert med ca. 75%.

### 3.2 Meteorologiske data

En undersøkelse av meteorologi og luftkvalitet i Glomfjord ble gjennomført i årene 1980-82 (Sivertsen, 1982). I undersøkelsen ble det også gjort sammenligning mellom vindforholdene i Glomfjord og forholdene i det mer åpne kystområdet. Undersøkelsen viste bl.a. at vinden er sterkt kanalisert langs fjordaksen, vanligvis med vind utover fjorden om vinteren og om natta hele året og vind innover (fra vestlig kant) på dagtid i sommerhalvåret. Sterkest vind forekommer oftest når det blåser fra vestlig kant om vinteren. Vinden i ytre strøk er i gjennomsnitt noe sterkere enn i Glomfjord.

Fra Det norske meteorologiske institutt, Klimaavdelingen, har vi fått data for 1991 fra noen klimastasjoner i det aktuelle området. Vi har undersøkt værdata fra klimastasjonene Nord-Solvær, Glomfjord, Bodø VI samt nedbørmålinger fra Halså (Fig. 1.1). Nord-Solvær manglet data for august og september. Glomfjord har ingen observasjoner av nedbør. Bodø VI, derimot, har fullstendige observasjoner og dessuten er det blitt gjort observasjoner fire ganger i døgnet (mot tre for de to andre stasjonene).

Klimastasjonen Glomfjord rapporterte lavere vindstyrke enn de to andre klimastasjonene, noe som er i samsvar med hva Sivertsen (1982) konkluderte. Fig. 3.2 viser den såkalte blandingsvinden (den funksjon av vindstyrken som er av størst betydning for vindblandingen, se Appendiks 2) beregnet fra observasjonene i Glomfjord og Bodø VI. Den noe sterkere vinden ved Bodø VI er trolig representativ for de mindre beskyttede ytre delene av Glomfjord. Fig. 3.3 viser at lufttemperaturen ved klimastasjonene Bodø VI og Glomfjord er nokså like. Dette forhold gjelder også øvrige meteorologiske variabler, unntatt vindstyrke som diskutert ovenfor og nedbør. I 1991 var nedbøren ved Bodø VI 931 mm mens den var omtrent dobbelt så stor, 1926 mm, i Halså.

For modellberegningene har vi valgt å bruke observasjonene fra Bodø VI, med unntak for nedbør hvor vi bruker observasjonene fra Halså. Modellen drives av døgnmiddel av lufttemperatur, vind, luftfuktighet, skydekke og nedbør. Innstråling fra solen og utveksling av varme, vann og mekanisk energi beregnes fra formlene gitt i Stigebrandt (1990).

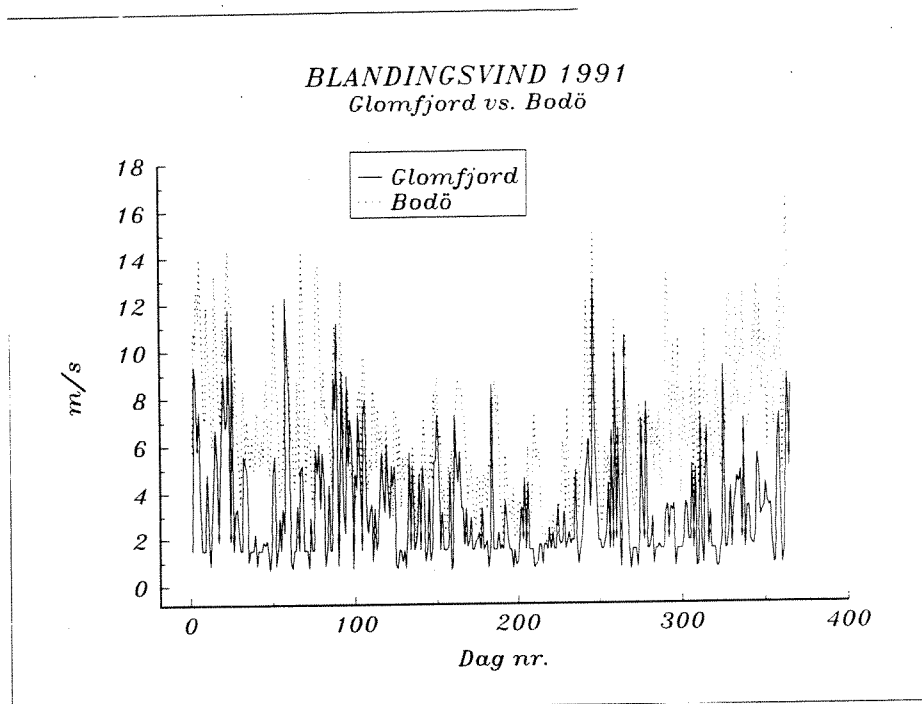


Fig. 3.2 Blandingsvind i 1991 beregnet fra observasjoner fra Glomfjord og Bodø VI.

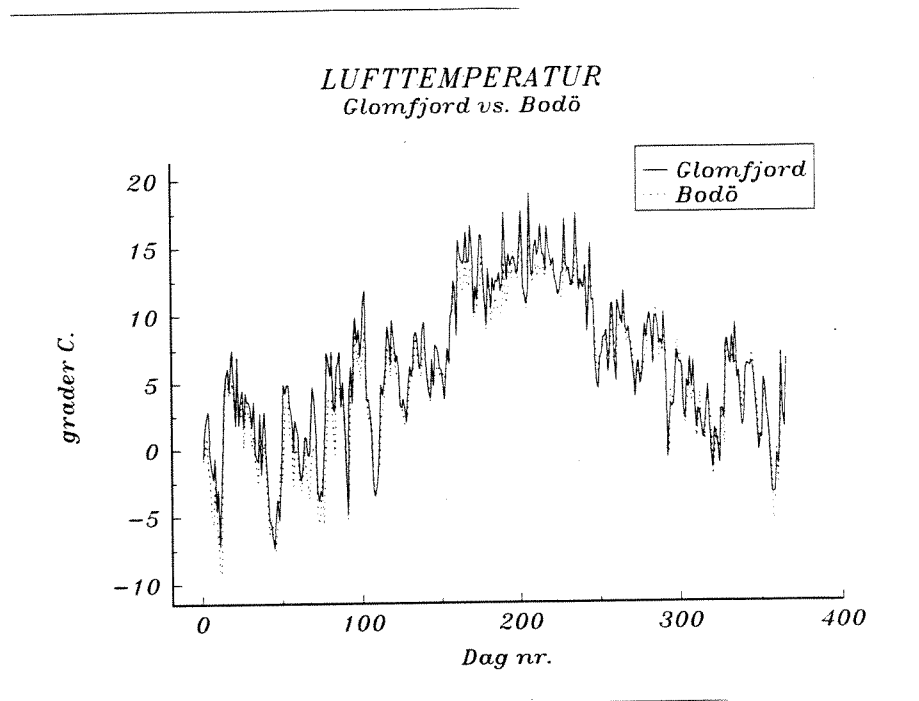


Fig. 3.3 Observert lufttemperatur i 1991 fra Glomfjord og Bodø VI.

### 3.3 Hydrofysiske, vannkjemiske og biologiske data

For å tilfredsstille modellens databehov skulle vertikale profiler med høy vertikal oppløsning tas hver uke under minst to måneder (intensivperioden) på et antall spesifiserte stasjoner. Spesielt viktig i denne sammenheng er stasjon G8 fordi denne representerer forholdene i kystvannet. Målingene fra G8 skal brukes som ekstern drivning av modellen.

I tidsrommet 29.5 - 7.8.91 ble målinger av temperatur, saltholdighet, plantenæringssalter og klorofyll utført med ca 1 ukes mellomrom - den såkalte "intensivperioden" for kalibrering av modellen. Av forskjellige grunner ble en del av målingene mislykket slik at for stasjon G8 kan vi bare bruke målingene i tidsrommet 25.6-24.7.91. Denne perioden er altså den reelle intensivperioden og kun en måned lang. Også i denne perioden er det en del mangler, bl.a. gjelder dette ammonium. Analysene av klorofyll på G8, det eneste målet for konsentrasjoner av planteplankton i intensivundersøkelsen, ble mislykket og mangler (jfr. Johnsen et al., 1994).

På hovedstasjonene i Glomfjord (G6, G7 og G8) ble målinger under den reelle intensivperioden utført den 25.6, 2.7, 10-11.7, 16.7 og 24.7.91. Av betydning for sammenligningen mellom modellresultat og målinger er at klorofylldata bare finnes fra toktet 10-11.7 og at oksygen i øverste 50 m av vannsøylen ble målt bare på stasjon G6. Måleprogram og metodikk er nærmere beskrevet av Johnsen et al. (1994). Det ble i tidsrommet mai-august 1991 også gjort målinger av temperatur, saltholdighet og strøm med 20 min. intervall ved selvregistrerende strømmålere i 5, 25, 50 og 80 m dyp mellom st. G7 og st. G8 i fjordens ytre del og av temperatur og saltholdighet med 20 min. intervall i 1.7, 6, 21 og 30 m dyp nær st. G4 innerst i fjorden.

Dessuten foreligger en god del salinitet- og temperaturdata fra fem vertikaler i Glomfjord. Dataene kommer fra målinger som NVE utført i tidsrommet 1977 til og med 1989. I denne rapporten vil også NVEs data bli analysert.

### 3.4 Tilførsler av plantenæringssalter

Daglige tilførsler av nitrogen og fosfor fra Hydro Glomfjord Fabrikker (utslipp på 8 m dyp som stiger opp til overflaten) under intensivperioden vises i Fig. 3.4. Midlere utslipp av nitrogen var ca. 2 tonn/døgn hvorav ca. halvparten var i form av ammonium. Midlere fosforutslipp var ca. 0.1 tonn/døgn. Som framgår av Fig. 3.4 varierte utslippene under intensivperioden med en faktor to. For øvrig regner vi med at midlere utslipp fra MOWI (fiskeoppdrett, utslippsdyp 10 m) var ca. 30 kg totN og 3 kg totP per døgn. Tilsvarende

tall for kommunale utslipp er henholdsvis 23 og 3 (kg/døgn). To tredjedeler av det kommunale utslippet går til overflaten mens resten slippes ut på 15 m dyp. Analyser av vannet som går gjennom Glomfjord kraftstasjon gir typiske verdier på 115-130 mg N/m<sup>3</sup> og 4-6 mg P/m<sup>3</sup>, se Johnsen et al. (1994).

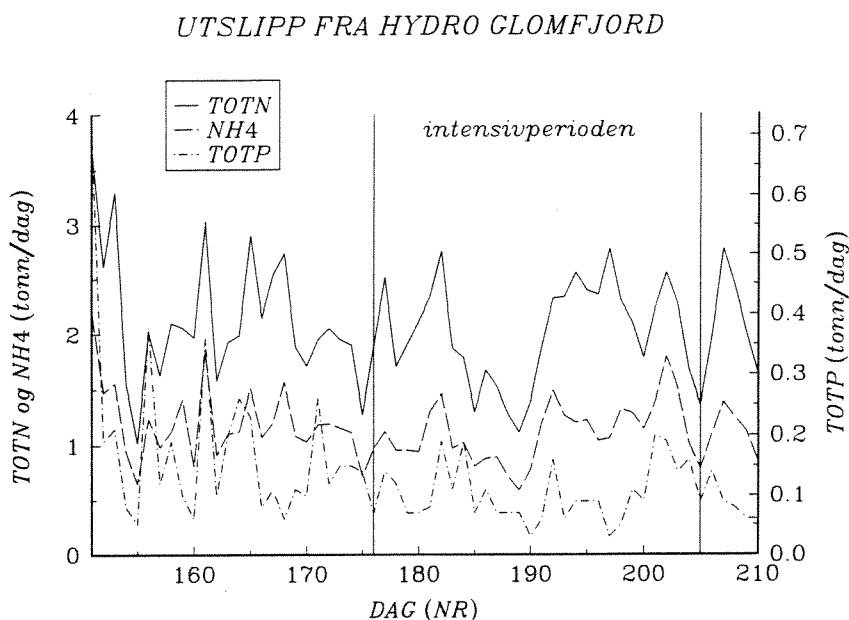


Fig. 3.4 Utslipp av nitrogen og fosfor (døgnmiddel) fra Glomfjord fabrikker under intensivperioden 1991.

#### 4. HYDROGRAFI

Vannmassene i Glomfjord kan inndeles i tre lag. Overflatelaget har en tykkelse som vanligvis varierer mellom ca. 0.5 og 3 m. Saltholdigheten er vanligvis 25-33 psu. Et intermediært lag ligger mellom overflatelaget og fjordens terskeldyp på ca 100 m. Laget har åpen forbindelse med kystvannet. Fra terskeldyp og ned til fjordens største dyp på ca. 370 m finner en dypvannet. Terskelen hindrer fri forbindelse med havet.

I dette kapitlet beskrives de hydrografiske forholdene i fjorden utfra bl.a NVEs måleserie av saltholdighet og temperatur og utfra målinger som ble foretatt med automatisk registrerende instrumenter i tidsrommet 28.5 - 5.8.1991. Størst vekt blir lagt på overflatelaget siden dette direkte vil bli påvirket av endret ferskvannstilførsel til Glomfjord.

## 4.1 Overflatelaget

### Datamaterielet

NVE har målt saltholdighet og temperatur i fem vertikaler i fjorden siden 1977. Tabell 4.1 viser antall målinger for hver stasjon og måned. Stasjonenes beliggenhet vises i Fig. 1.1. Nedenfor blir NVEs målinger utnyttet dels for å beskrive midlere årssyklus av saltholdighet og temperatur i de øverste 20 m av vannsøylen, og dels for å belyse sammenheng mellom innholdet av ferskvann i overflatelaget og ferskvannstilførselen til fjorden.

Ferskvannet fra kraftstasjonen stuper direkte i fjorden, og blandes raskt med sjøvannet. Allerede innerst i fjorden (NVE st. 1) er derfor overflatesaltholdigheten relativ høy, oftest 20-30 psu. Overflatesaltholdigheten øker utover fjorden pga. innblanding av sjøvann.

Brakkvannslaget er meget markert i hele fjorden fra mai til oktober, se Fig. 4.1. Dette skyldes både relativ stor ferskvannstilførsel og relativ svak vind i denne perioden. Laget har maksimal tykkelse i perioden juni til august da overflatesaltholdigheten også er som lavest. Under vinterhalvåret er det som regel et markert brakkvannslag bare i de innerste delene av fjorden. Temperaturen ved havoverflaten er lavere enn 7°C i perioden november til april med minimum lavere enn 4°C i januar-februar (Fig. 4.2).

Tabell 4.1. Antall TS-målinger foretatt av NVE i perioden februar 1977-august 1989, på de ulike stasjonene i Glomfjord.

måned		st. 1	st. 2	st. 3	st. 4
jan	4	6	4	4	5
feb	9	9	9	9	6
mar	4	7	7	7	4
apr	6	6	8	8	7
mai	5	6	5	6	5
jun	7	9	9	9	5
jul	7	6	8	7	7
aug	5	7	7	7	6
sep	6	6	7	7	4
okt	4	4	4	4	4
nov	3	4	3	4	3
des	1	1	2	2	1

Temperaturen overstiger  $10^{\circ}\text{C}$  i de øverste 5 m i juni-august med en tendens til noe stigende overflatetemperaturer utover fjorden.

For å gi et inntrykk av variabiliteten i lagdelingen vises saltholdighetens standardavvik på NVEs st. 3 (fig. 4.3). Variabiliteten i de øverste 0-3 m dyp avtar utover fjorden slik at standardavviket på st. 1 er litt større og på st. 5 litt mindre enn på st. 3.

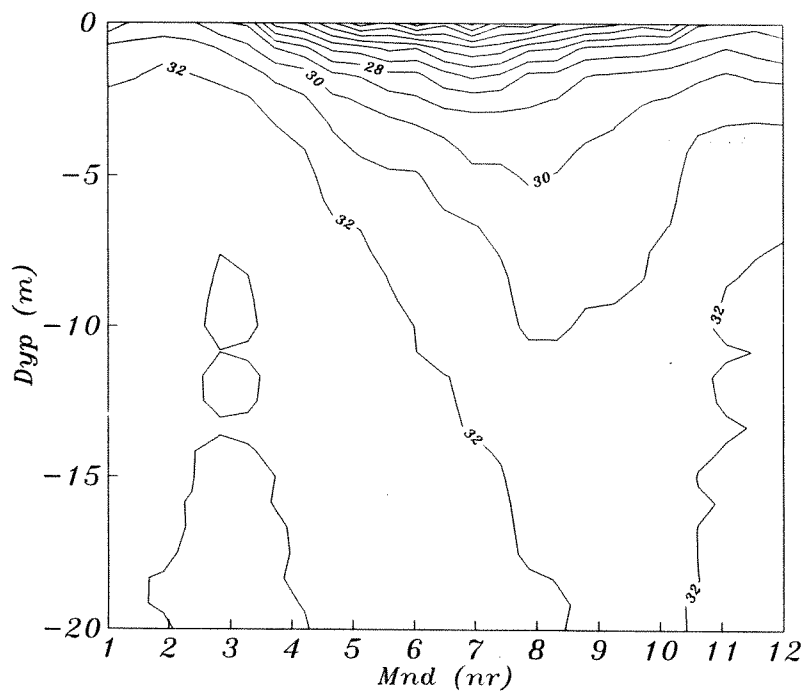


Fig. 4.1 Midlere årssyklus av saltholdighet 1977-89 på NVEs stasjon 3

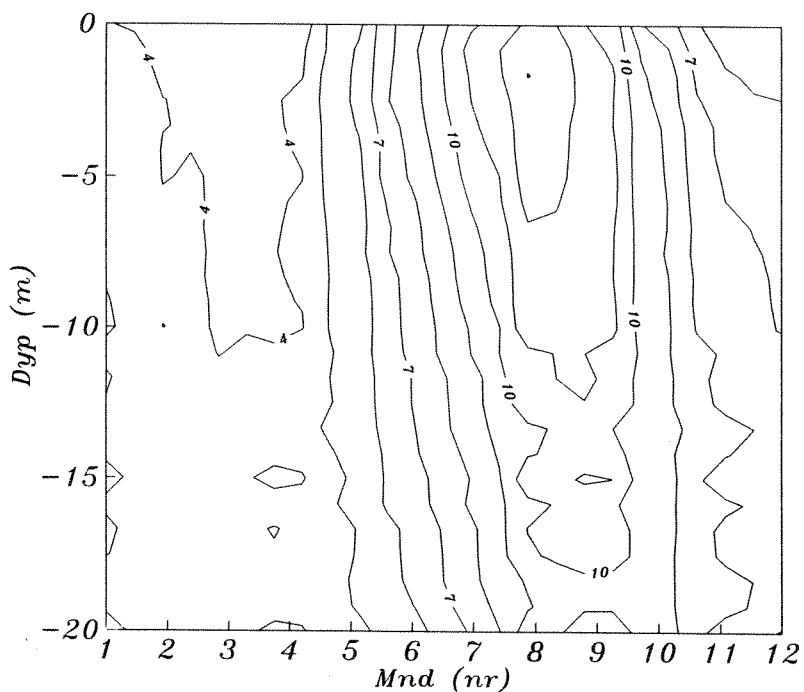


Fig. 4.2 Midlere årssyklus av temperatur 1977-89 på NVEs stasjon 3



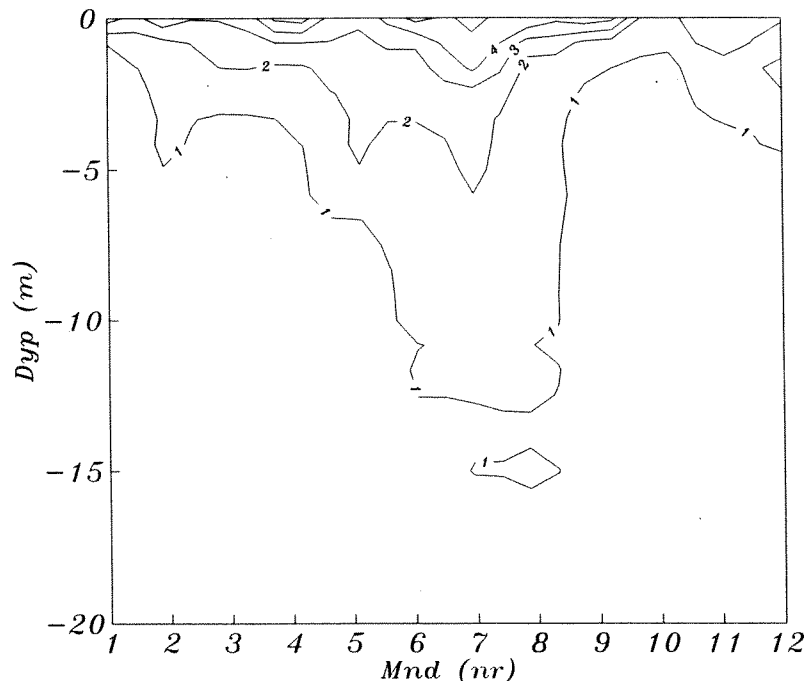


Fig. 4.3 Midlere årssyklus av saltholdighetens standardavvik for 1977-89 på NVEs stasjon 3

#### Ferskvannsinholdet i overflatelaget

Lokal ferskvannstilførsel til fjorden medfører at overflatelaget får en lavere saltholdighet enn det intermediære laget. Mengden ferskvann som er nedblandet i overflatelaget kan uttrykkes som tykkelsen  $H_{1f}$  av et ferskvannslag som inneholder like mye ferskvann som brakkvannslaget.  $H_{1f}$  kan beregnes fra målinger ved hjelp av uttrykket

$$H_{1f} = \int_0^{D_{ref}} \frac{S_{ref} - S(z)}{S_{ref}} dz \quad (1)$$

hvor  $S(z)$  er saltholdigheten på dypet  $z$  under havoverflaten,  $D_{ref}$  er et referansedyp i øvre del av intermediære laget som antas å ikke være påvirket av lokal ferskvannstilførsel, og  $S_{ref} = S(D_{ref})$ . For beregningene har vi valgt å sette referansedyptet  $D_{ref}$  til 7 meter, noe som alltid er dypere enn overflatelaget i Glomfjord. Beregningene er ikke særlig følsomme for valget av  $D_{ref}$  så lenge dette ligger i intervallet 5 - 15 m. Hvis en skulle velge et mye dypere referansedyp kan en få signifikante bidrag til  $H_{1f}$  fra det intermediære vannet, hvis dette er lagdelt mht. saltholdighet.

Et generelt trekk ved ferskvannshøyden  $H_{1f}$  er at denne øker med økende ferskvannstilførsel samt avtar utover fjorden. Det er også en temmelig stor spredning av ferskvannstykkelsen, noe som trolig i høy grad skyldes vindeffekter (horisontale

transporter) på overflatelaget.

Tykkelsen av overflatelaget i en fjord avhenger både av blandingsgrad og ferskvannstilførsel. Ferskvannshøyden  $H_{1f}$  derimot, forventes teoretisk å være uavhengig av i hvilken grad ferskvannet er oppblandet med sjøvann (se Stigebrandt, 1975). Den teoretiske ferskvannshøyden  $H_{1f}$  er gitt av

$$H_{1f} = \phi \left( \frac{Q_f^2}{g \beta S_{ref} B_m^2} \right)^{1/3} \quad (2)$$

Den teoretiske verdien av  $\phi$  ligger mellom 1.5 og  $3^{1/2}$  for fjorder med smal munning og en verdi nær 1 hvis fjorden har omtrent konstant bredde. Videre er  $g=9.82 \text{ m/s}^2$ ,  $\beta=0.0008 \text{ psu}^{-1}$  og  $B_m$  er munningens bredde (ca. 1500 m for indre Glomfjord). I teorien antas at det finnes en såkalt indre hydraulisk kontroll av utstrømningen av brakkvann. Denne antas å være lokalisert til en tverrseksjon av fjorden innenfor et avsnitt hvor fjordens bredde øker brått utover. Verdien av  $\phi$  er bestemt av overflatelagets dynamikk i området fra fjordens indre og fram til den indre hydrauliske kontrollen. Indre Glomfjord kan ikke betraktes som en smal fjord siden det ikke finnes noen seksjon med markert minimum i bredden. I Stigebrandt & Molvær (1994a,b) ble NVEs TS-data fra Holandsfjord benyttet for å bestemme en empirisk  $\phi$ -verdi lik 2.3 for denne fjorden. Siden det ikke er noen innsnevret munning i overgangen mellom indre og midtre Glomfjord bør verdien av  $\phi$  være mindre for indre Glomfjord enn for Holandsfjord hvor det er en markert innsnevring i ytterste del.

Uten å analysere årsaken i detalj kan en konstatere at en får best statistisk overensstemmelse mellom observert og teoretisk ferskvannshøyde i fjordens indre del (modellområde 1) hvis en i ligningen ovenfor setter  $\phi=2.1$ . Analysen er gjort med samme metodikk som er beskrevet i Stigebrandt & Molvær (1994 a,b). Som et supplement til modellberegningene kan ferskvannshøyden i indre Glomfjord beregnes av ligning (2) med  $\phi=2.1$ .

#### 4.2 Intermediært lag

Det intermediære laget omfatter dybdeintervallet mellom overflatelaget og terskeldypet, dvs. mellom 0.5-3 og 100 m dyp. På grunn av god vannutskifting drevet av svingninger i tetthetsfeltet i kystvannet og tidevannet er forholdene i det intermediære laget omtrent lik forholdene i kystvannet. Nedenfor presenteres målinger med selvregistrerende instrumenter som ble foretatt i det intermediære laget fra slutten av mai til begynnelsen av august i 1991 (jfr. kap. 3.3). Salinitet, temperatur og strøm ble målt i fjordens ytre del og

salinitet og temperatur i fjordens indre del.

Det kan nevnes at i følge dataprogrammet Fjordmiljø (Stigebrandt, 1992) bør midlere vannutskiftning i det intermediære laget i Glomfjord være ca 3800 m<sup>3</sup>/s slik at midlere oppholdstid i fjorden for vann i dette laget blir ca. 11 døgn.

#### 4.2.1 Analyse av strømmålinger ved fjordens munning

For å få et supplement til de ukentlige målingene av tetthetsfeltet under intensivperioden i kystområdet utenfor Glomfjord og Holandsfjord ble en rigg med strømmålere på dypene 5, 25, 50 og 80 m utlagt i en posisjon øst for G8, se Fig. 1.1. Strøm (retning og hastighet), temperatur og saltholdighet (konduktivitet) ble registrert i perioden fra 15.05.91 kl 16<sup>10</sup> til 8.08.91 kl 8<sup>10</sup> med et 2.5 timer langt avbrudd 9.07.91 for ettersyn av målerne.

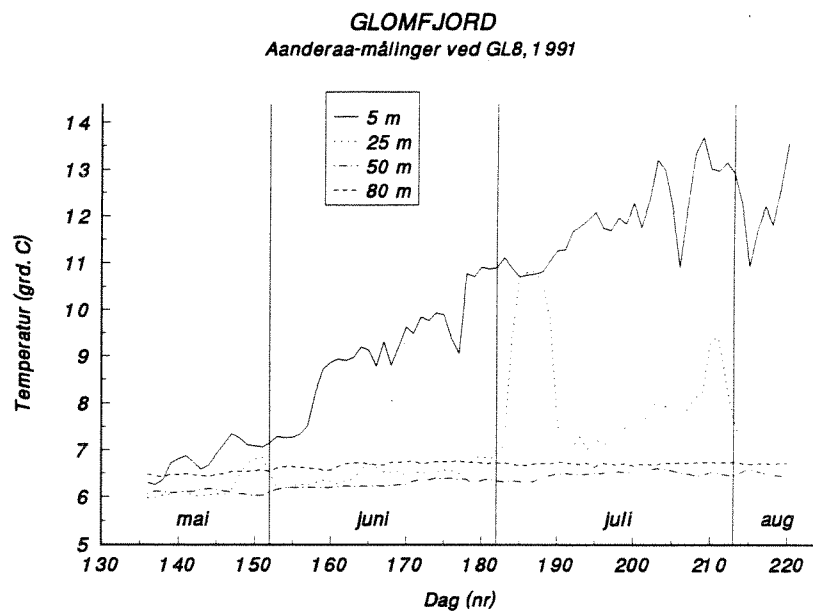


Fig. 4.4 Døgnmiddel av temperatur registrert av Aanderaamålerne like ved G8 i 1991.

Døgnmiddel for hele måleperioden av temperatur og saltholdighet vises i henholdsvis Fig. 4.4 og 4.5. Temperaturen på 5 m dyp økte jevnt under perioden fra ca. 6.5°C til ca. 13°C (Fig. 4.4). De største kortperiodiske svingningene fant en på 25 m dyp i forbindelse med innstrømming av overflatevann med lavere salinitet fra kysten. Meget markerte innstrømninger fant sted i begynnelsen og slutten av juli. På 50 og 80 m dyp var temperaturen ganske konstant i intervallet 6 - 6.8°C med de laveste temperaturene på 50

m dyp. Saliniteten i 5 m dyp (Fig. 4.5) var speilvendt i forhold til temperaturen i samme dyp (Fig. 4.4) og avtok jevnt utover perioden fra ca. 33 til ca 30 psu. På 25 m dyp avtok saliniteten i forbindelse med innstrømning av varmere overflatevann fra kystområdet. På 50 og 80 m dyp var saliniteten temmelig konstant under hele måleperioden.

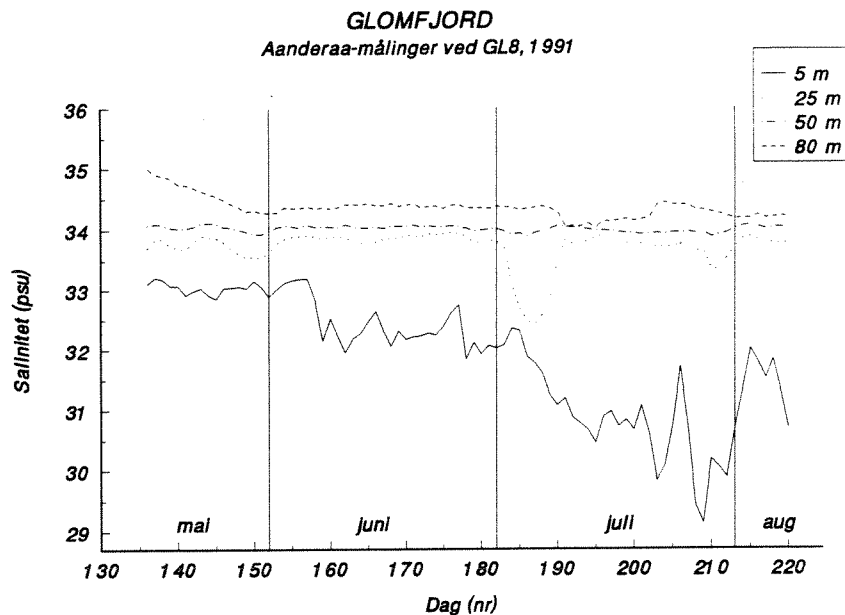


Fig. 4.5 Døgnmiddel av salinitet registrert av Aanderaamålerne like ved G8 i 1991.

Strømmen ble dekomponert i retningene nord-syd og øst-vest (fjordens hovedretning). Middelhastighetene for hele perioden var små, i intervallet 0 - 1.4 cm/s. Høyeste registrerte strømhastigheter på 5 og 25 m dyp var 35-40 cm/s. På 50 og 80 m dyp var høyeste registrerte strømhastigheter henholdsvis 15 og 10 cm/s. Døgnmiddel av strømhastigheten langs fjordens hovedakse (øst-vest) vises i Fig. 4.6. På alle dyp var det vekslende strøm inn og ut av fjorden. Brakkvannslaget i ytre Glomfjord er ofte tynnere enn 5 m og måleren på dette dypet lå iblant i brakkvannslaget og iblant under dette. Ved de intermediære innstrømningene i henholdsvis begynnelsen og slutten av juli var strømmen sterk og rettet ut fjorden på 5 m dyp og svakere og rettet inn fjorden på 25 m.

Det ble foretatt spektralanalyse av samtlige tidsserier av dekomponert strøm, temperatur og saltholdighet. Alle spektra viser dels såkalt "hvitt brus" (amplituder som varierer helt tilfeldig) for perioder kortere enn 1 time, dels en markert topp ("energimaksimum") for perioden til det halvdaglige tidevann (ca. 12.5 timer). Tidevannsmaksima var mer markert dypere ned i vannmassen fordi brusnivået der er lavere. På de største dypene (50 og 80

m) finnes også en kvartdaglig tidevannskomponent. At en finner kraftige tidevannssvingninger i saltholdighet- og temperaturregistreringene tyder på at det forekommer indre bølger med tidevannsperiode. Sannsynligvis er disse bølgene generert av tidevannsstrømmen ved terskelen til Glomfjord.

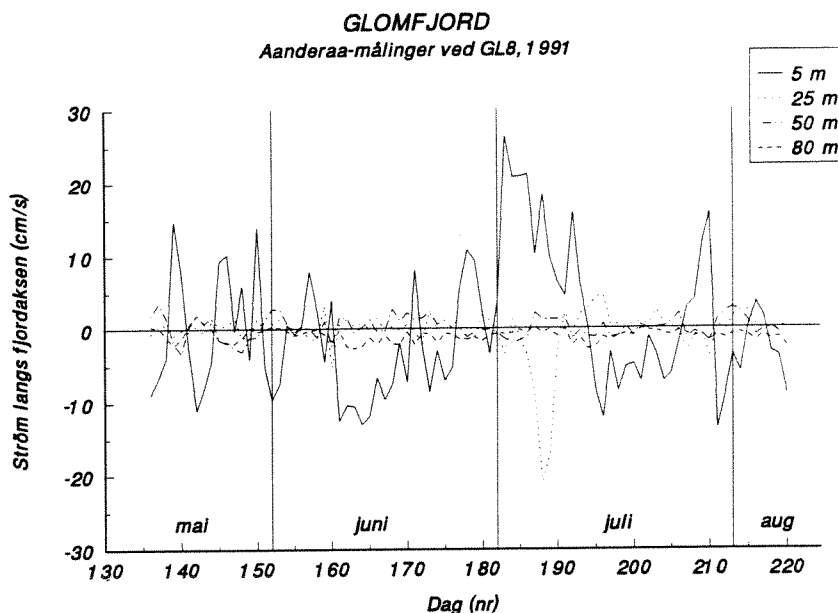


Fig. 4.6 Døgnmiddel av strømhastighet langs fjordens hovedakse (øst-vest), registrert av Aanderaamålerne like ved G8 i 1991.

#### 4.2.2 Analyse av TS-målinger i fjordens indre del

For å samle in data til testing av modellen ble det plassert en såkalt TS-kjede (en serie instrumenter til måling av Temperatur og Salinitet) i nærheten av st. G4 i fjordens indre del, se Fig. 1.1. Instrumentet målte temperatur og salinitet på dypene 1,7, 6, 11, 21 og 30 m i perioden 28.05.91 kl 15<sup>54</sup> til 5.08.91 kl. 20<sup>20</sup> med et kort avbrudd for oversyn 10.07.91. Sensorene på 11 m dyp virket ikke tilfredsstillende.

Døgnmiddel av temperatur og salinitet på 1,7, 6, 21 og 30 m dyp vises i henholdsvis Fig. 4.6 og 4.7. Temperaturen på 1,7 og 6 m øket jevnt over måleperioden fra ca 6°C til ca 14°C. På 21 og 30 m utvikles temperaturen nokså likt. Det er markerte temperaturøkninger i begynnelsen og slutten av juli, noe som vi også fant på 25 m dyp på G8. Saliniteten på 1,7 m dyp er lav i slutten av mai men relativt høy i juni. I juli er saliniteten igjen lavere. På 6 m dyp viser saliniteten samme generelle trekk som på 5 m

dyp på G8. På 21 og 30 m synker saliniteten i begynnelsen og slutten av juli i forbindelse med intermediær innstrømning av overflatevann fra kysten.

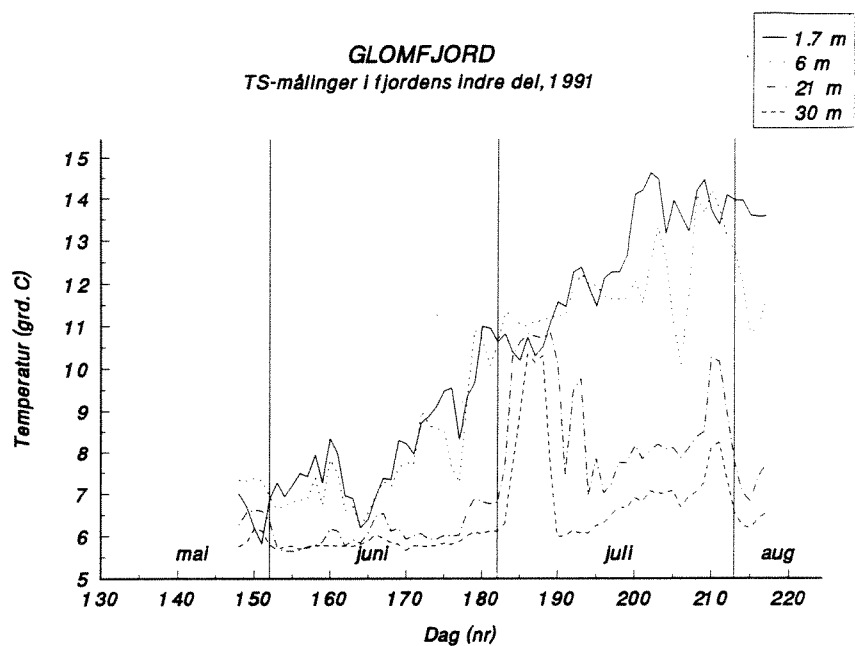


Fig. 4.7 Døgnmiddel av temperatur registrert av TS-kjeden ved st. G4 i 1991.

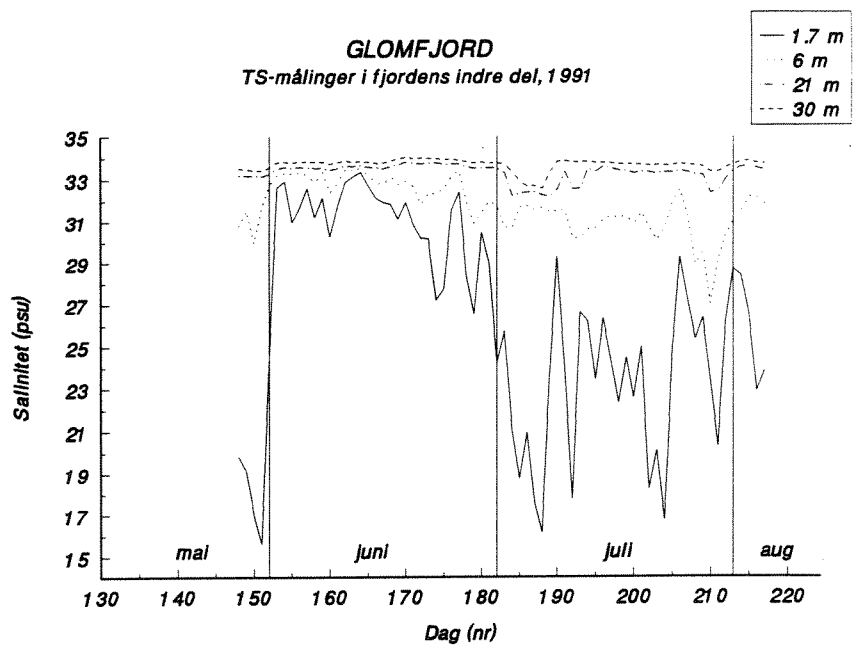


Fig. 4.8 Døgnmiddel av salinitet registrert av TS-kjeden ved st. G4 i 1991.

Alle tidsserier av temperatur og saltholdighet har blitt spektralanalysert. Samtlige spektra viser et energimaksimum for perioden et halvt døgn. Dette er spesielt markert for de tre dypeste målepunktene under den siste del av måleperioden da lagdelingen var som sterkeste. Dette viser at indre tidevannsbølger også forekommer høyt oppe i vannsøylen langt inne i fjorden. Saltholdighet- og temperaturspektrene er meget lik hverandre, noe som en vil forvente med en noenlunde stabil relasjon mellom temperatur og salinitet. Generelt ser det ut til å være lite vertikale bevegelser med perioder kortere enn et halvt døgn i de øverste 30 m av vannsøylen i indre Glomfjord.

### 4.3 Dypvannet

Dypvannet strekker seg fra terskeldypet (100 m) og ned til største dyp. Glomfjord er en såkalt bølgefjord slik at tidevannet genererer indre tidevannsbølger ved den ytre terskelen. Som allerede er omtalt ovenfor ble indre tidevannsbølger registrert både av Aanderamålerne øst for G8 og av TS-kjeden i fjordens indre del. De indre tidevannsbølgene mister sin energi til turbulens. I dypvannet er energitilførselen fra indre tidevannsbølger den dominerende energikilden for turbulens og blandingsprosesser. I følge dataprogrammet Fjordmiljø kan en forvente at oksygenminimum i fjordens dypvann skal være ca 4.9 ml/l. Det senere stemmer rimelig godt med observerte minimumsverdier, se Johnsen et al. (1994).

## 5. RESULTAT FRA MODELLBEREGNINGENE

Glomfjord inndeles i tre modellområder, med tilsvarende hovedstasjoner (stasjon G4, G6 og G7, se Fig. 1.1). Horisontale gradienter innen hvert område vil ikke framgå av beregningene. Modellen har høy oppløsning i vertikalen (1 m) og i tiden (1 døgn), se Appendiks 2 for en beskrivelse av modellen.

I dette kapitlet beskriver vi først målingene av modellens drivkrefter/prosesser (ferskvannstilførsel, meteorologiske og hydrofysiske forhold, næringssaltutslipp mv.) under den såkalte intensivperioden i 1991, fra 25 juni (dag 176) til 24 juli (dag 205), se kap. 3.3 (jfr. Appendiks 1 for dagnr. og datoer). Deretter følger en sammenligning mellom den målte og beregnede tilstand i fjorden i intensivperioden. Beregnede effekter av forandret drivning (forandret tilførsel av ferskvann og næringsalter) blir deretter presentert og diskutert. Kapitlet blir avsluttet med konklusjoner.

### 5.1 Drivning av fjorden under intensivperioden

Ferskvannstilførselen i intensivperioden er vist i Fig. 5.1. Tilførselen til indre Glomfjord (modellomr. 1) var nokså konstant rundt 40 m<sup>3</sup>/s. Tilførselene til midtre og ytre Glomfjord var omtrent like store og varierte mellom ca 2 og 6 m<sup>3</sup>/s. Lufttemperaturen (døgnmiddel) avtok de første dagene i intensivperioden fra ca. 14°C til ca 10°C i månedsskiftet juni-juli

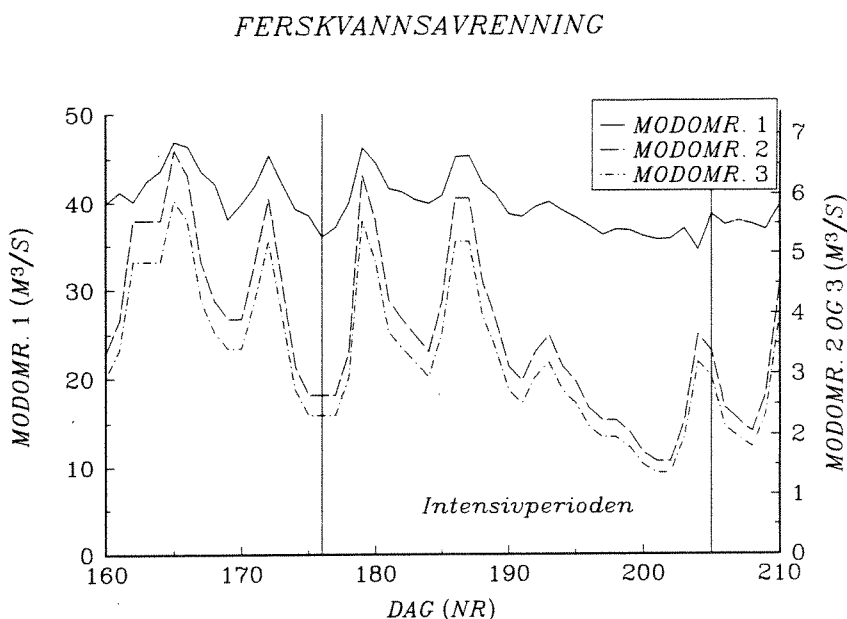


Fig. 5.1. Ferskvannstilførsel til Glomfjord i intensivperioden 25.6 (dag 176) - 24.7.91 (dag 205).



for deretter å sakte øke fram til ca 20.7 da døgnmiddeltemperaturen var helt oppe i 16-17°C (Fig. 5.2). De siste dagene i intensivperioden sank temperaturen igjen ned mot 10°C. Vinden (blandingsvinden) var svak i hele perioden unntatt den første uken i juli da vinden var moderat (Fig. 5.2). Det var temmelig overskya større delen av perioden (Fig. 5.3). Innstrålingen av varme fra sola er beregnet å variere mellom ca. 300 W/m<sup>2</sup> (døgnmiddel) for dager med lettskyet pent vær og omtrent halvparten av dette dager med overskya vær. Til slutt, Fig. 5.4, vises nedbør og luftfuktighet i intensivperioden.

For beregningene har vi satt konsentrasjonene av næringssalter i ferskvannet til henholdsvis 125 mg N/m<sup>3</sup> (som nitrat) og 5 mg P/m<sup>3</sup> (som fosfat). Øvrige tilførsler av næringssalter er beskrevet i kap. 3.4 ovenfor. Basert på noen temperaturmålinger som ble tatt av NVE i juli 1991 i Stor-Glomvatn har vi satt ferskvannets temperatur til å øke fra 3°C i begynnelsen til 4°C ved slutten av intensivperioden.

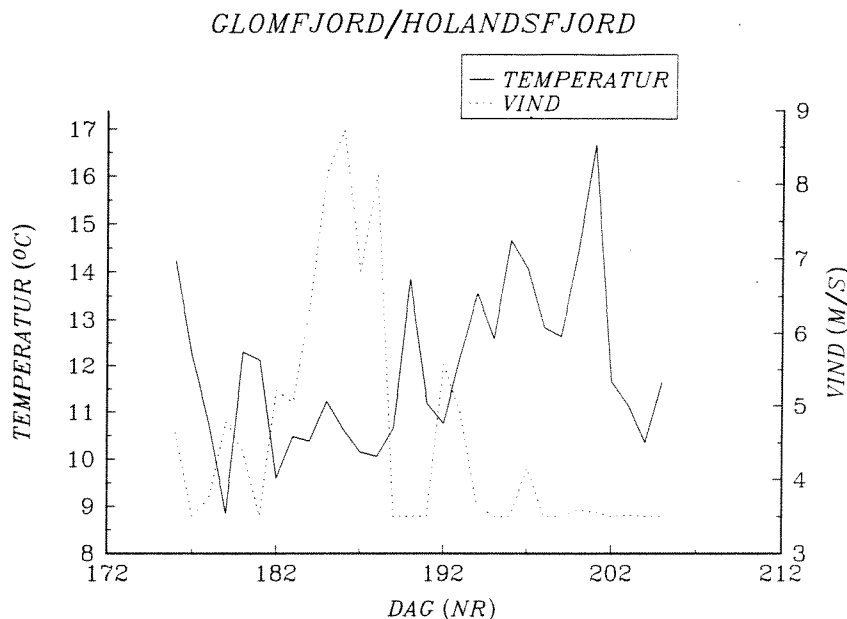


Fig. 5.2. Lufttemperatur og blandingsvind (døgnmiddel) i intensivperioden.

Forholdene på stasjon G8 under intensivperioden ble bestemt ved målinger følgende dager 25.6, 2.7, 10-11.7, 16.7 og 24.7.91. Dessuten lå det i perioden automatisk registrerende målere (Aanderaa) med sensorer for strømhastighet og strømrretning, saltholdighet og temperatur på dypene 5, 25, 50 og 80 m i en posisjon øst for G8. Disse målingene er rapportert ovenfor.

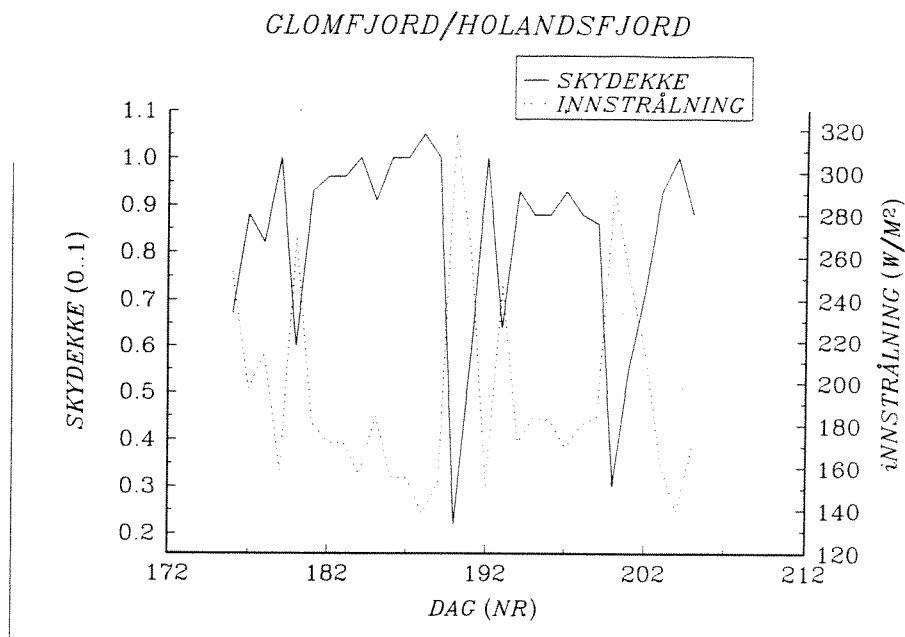


Fig. 5.3. Skydekke og innstråling fra solen (døgnmiddel) i intensivperioden.

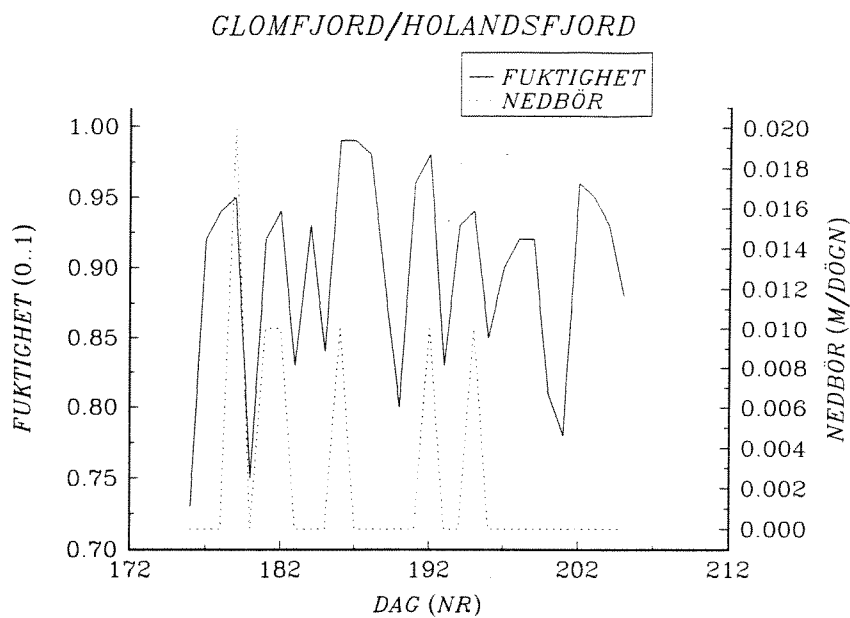


Fig. 5.4. Luftfuktighet (døgnmiddel) og nedbør under døgnnet i intensivperioden.

I forbindelse med økende lufttemperatur og kraftigere vind (Fig. 5.2) i begynnelsen av juli avtok saltholdigheten (Fig. 5.5) samtidig som temperaturen økte i overflatelaget (Fig. 5.6). Temperaturen økte og saltholdigheten avtok samtidig også i de øverste 30 m av

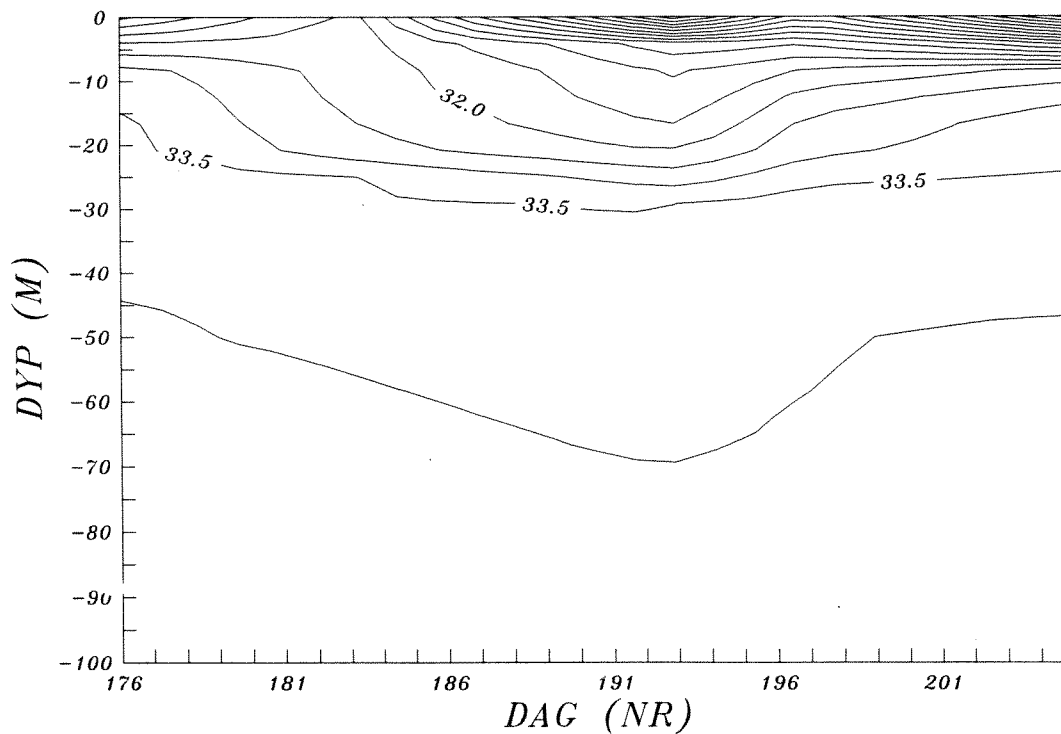


Fig. 5.5. Saltholdigheten på ulike dyp under intensivperioden på stasjon G8.

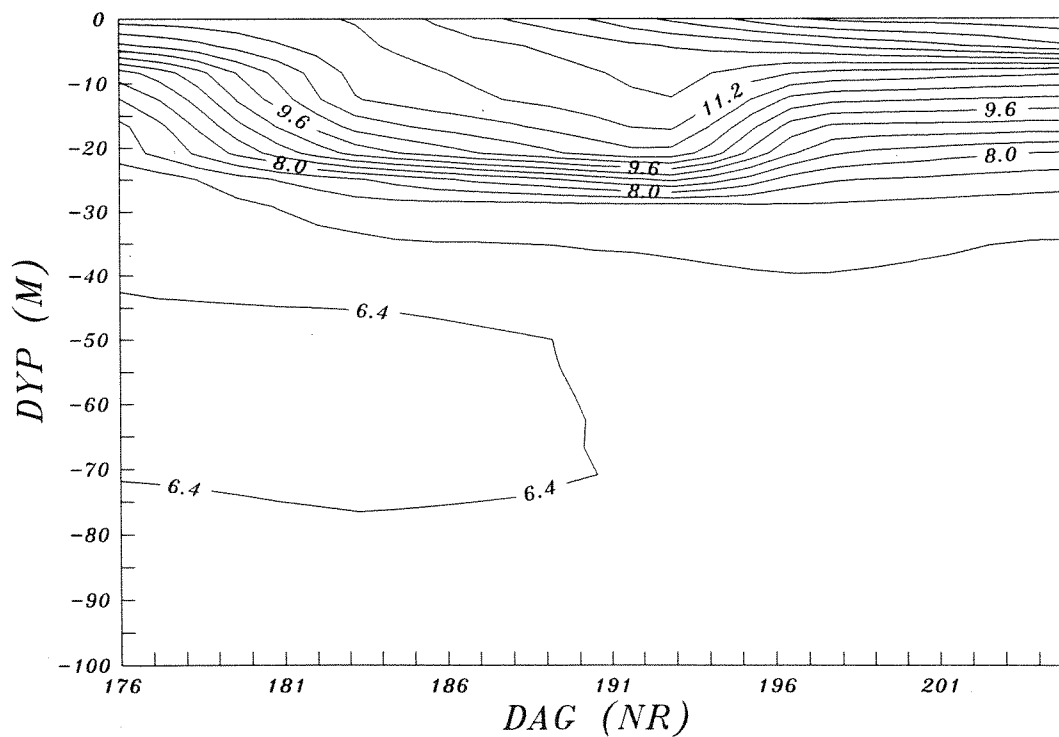


Fig. 5.6. Temperaturen på ulike dyp under intensivperioden på stasjon G8.

vannsøylen i forbindelse med en intermediær innstrømning av overflatevann fra kysten. Denne kan også ses meget tydelig i registreringene fra Aanderaa-måleren på 25 m dyp, (se Fig. 4.4 og 4.5). Både data fra Aanderaamålerne og toktdata viser at bevegelsene fra

30-40 m dyp og ned til terskeldypet (ca. 100 m) var beskjedne under hele intensivperioden.

Under hele perioden var konsentrasjonene av fosfat (Fig. 5.7) og nitrat (Fig. 5.8) lave i fotisk sone (ca. 0-20 m) og øket jevnt nedover i vannsøylen. Imidlertid forekom relativ høye nitratkonsentrasjoner i det brakke overflatelaget i midten og slutten av intensivperioden. Ammoniumkonsentrasjonene var relativ høye i overflatelaget men målingene er usikre, se Johnsen et al. (1994). Ved fotosyntese blir oksygen frigjort og hvis der er en positiv nettoproduksjon kan vannet bli overmettet på oksygen. Dette var tilfelle på st. G8, noe som kan tyde på en positiv nettoproduksjon av organisk materiale (Fig. 5.9). Vannet kan også bli overmettet på oksygen ved hurtig oppvarming. Dette er dog intet problem i modellen som har med begge effektene. Siktedypet avtok fra 6-7 m i begynnelsen til 3-4 m mot slutten av intensivperioden (Fig. 5.10). En skal bemerke seg at endringer i siktedyp kan skyldes endrede konsentrasjoner av både plankton og mineralpartikler. Effekten av mineralpartikler er dog mindre i Glomfjord enn i Holandsfjord, jfr. Stigebrandt og Molvær (1994b).

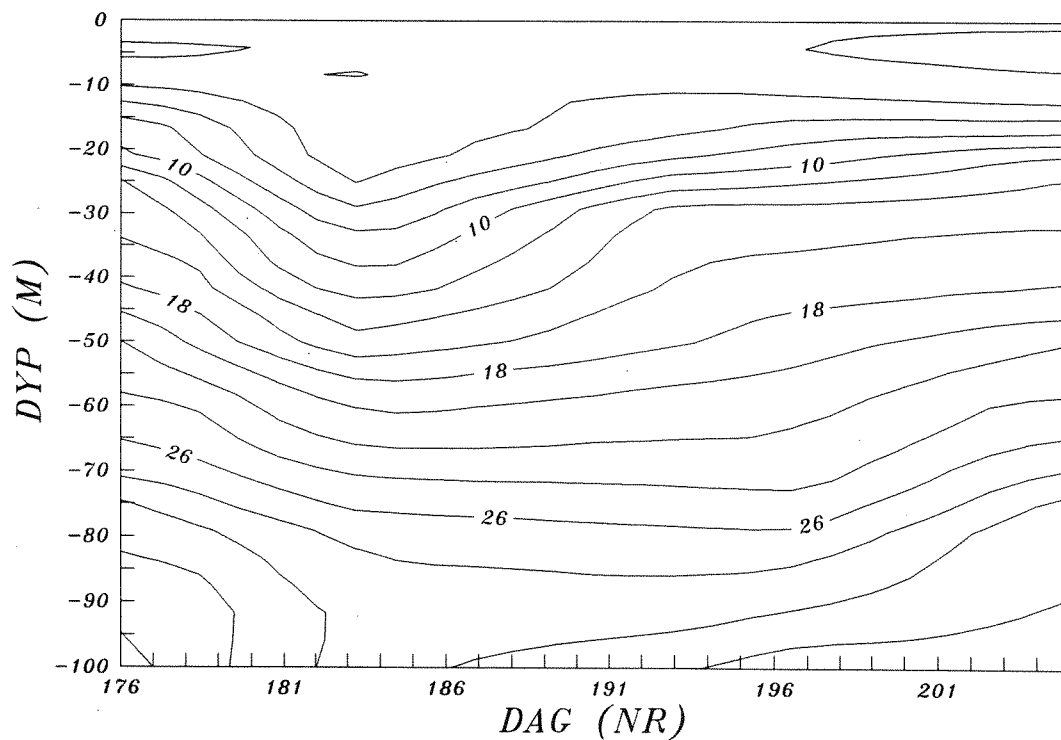


Fig. 5.7. Fosfatkonsentrasjonen på ulike dyp under intensivperioden på stasjon G8.

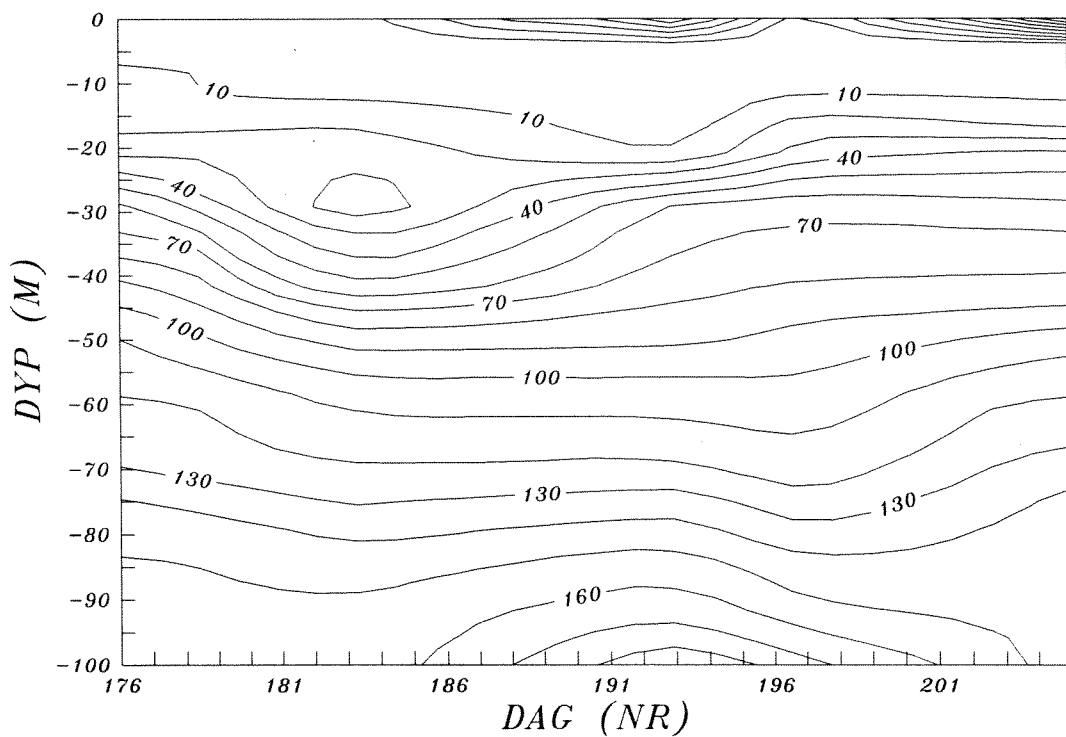


Fig. 5.8. Nitratkonsentrasjonen på ulike dyp under intensivperioden på stasjon G8.

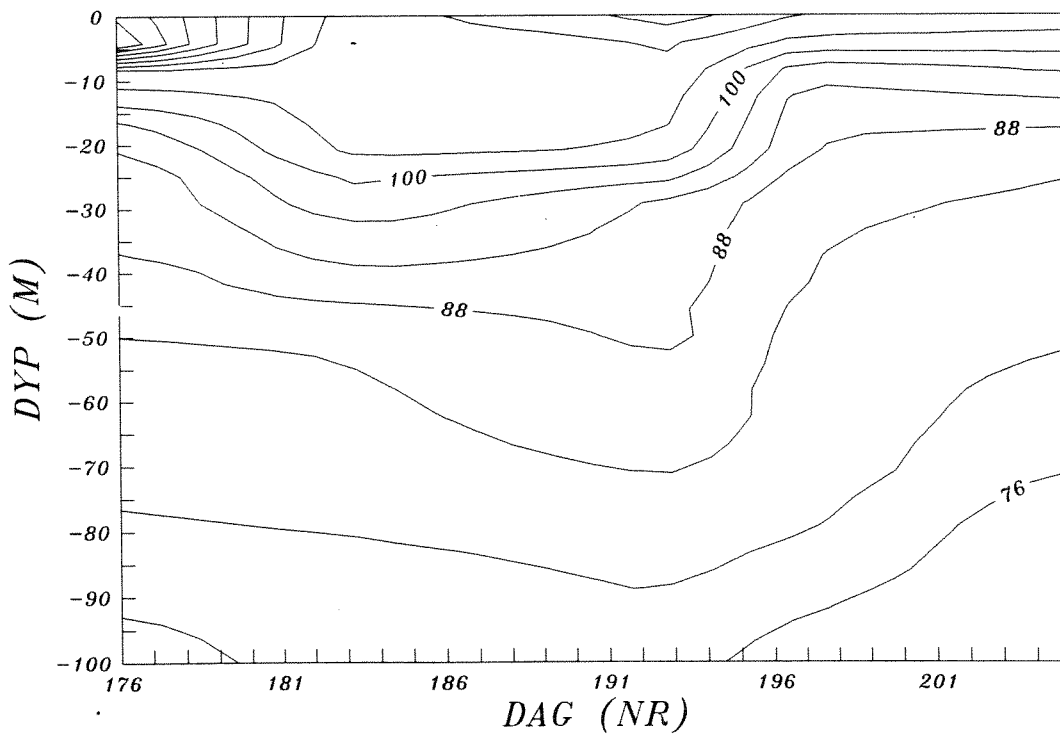


Fig. 5.9. Oksygenmetning (%) på ulike dyp under intensivperioden på stasjon G8.

## SIKTEDYP GLOMFJORD

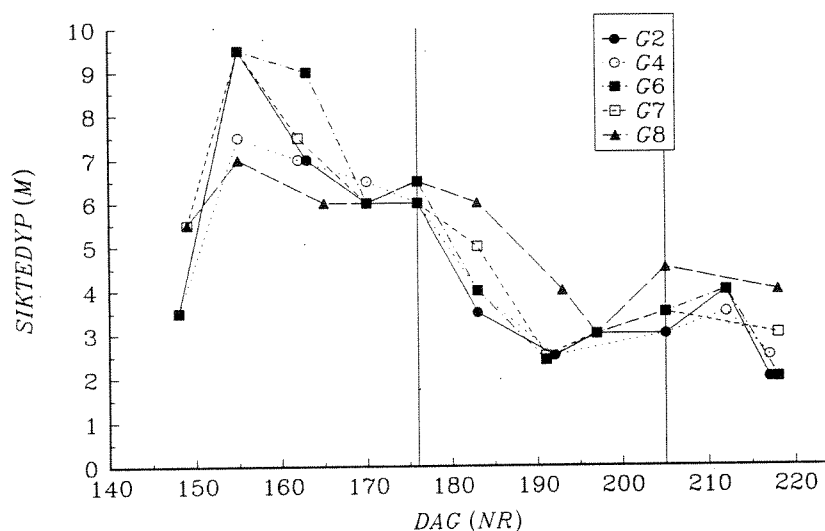


Fig. 5.10 Observerte siktedyp i Glomfjord sommeren 1991.

### 5.2 Sammenligning av målte og beregnede tilstand

Vi har kjørt modellen for Glomfjord for intensivperioden. I dette kapitlet sammenligner vi målte og beregnede egenskaper hos fjorden. For sammenligningen viser vi både målte og beregnede isopletdiagrammer for de øverste 20 m gjennom intensivperioden for noen utvalgte størrelser hvor vi har relativt gode data. Vi vil hovedsakelig sammenligne beregninger for modellområde 2 (midtre Glomfjord) med observasjoner fra st. G6 siden denne stasjonen har bedre datadekning enn både st. G4 og st. G7. Det minnes om at modellen gir horisontale gjennomsnitt for et modellområde, lokale gradienter innen dette beregnes ikke. Det forekommer systematiske gradienter i brakkvannsfordelingen i indre Glomfjord, med et gjennomsnittlig tykkere brakkvannslag på nordsiden av fjorden (se Molvær et al., 1984). St. G6 gir et bedre bilde av midlere forhold i modellområde 2 enn G4 gir av modellområde 1 siden det ikke er så store laterale gradienter i overflatelaget i modellområde 2. Ved sammenligningen skal en ha i mente dels at målte hydrografiske, hydrokjemiske og biologiske data ikke er fullstendige og dessuten tildel av tvilsom kvalitet, se kap. 3.3, og dels at det er naturlige kortperiodiske svingninger i fjorden som påvirker målingene og gjør at disse ikke sikkert er helt representative for tilstanden i fjorden. Isopletdiagrammene basert på målingene er konstruert fra maksimum fem (ukentlige) vertikaler mens diagrammene basert på måleresultatene er basert på daglige profiler med 1 m vertikal oppløsning. Modellbaserte isopletdiagrammer viser derfor flere detaljer både i tid og i rom.

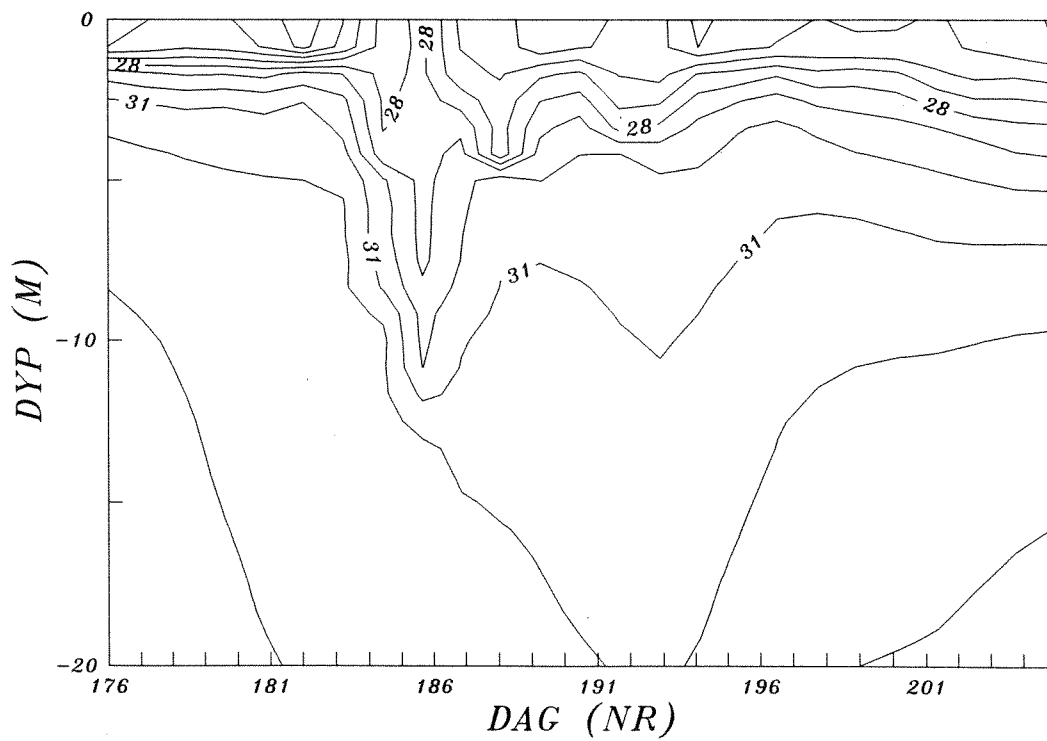
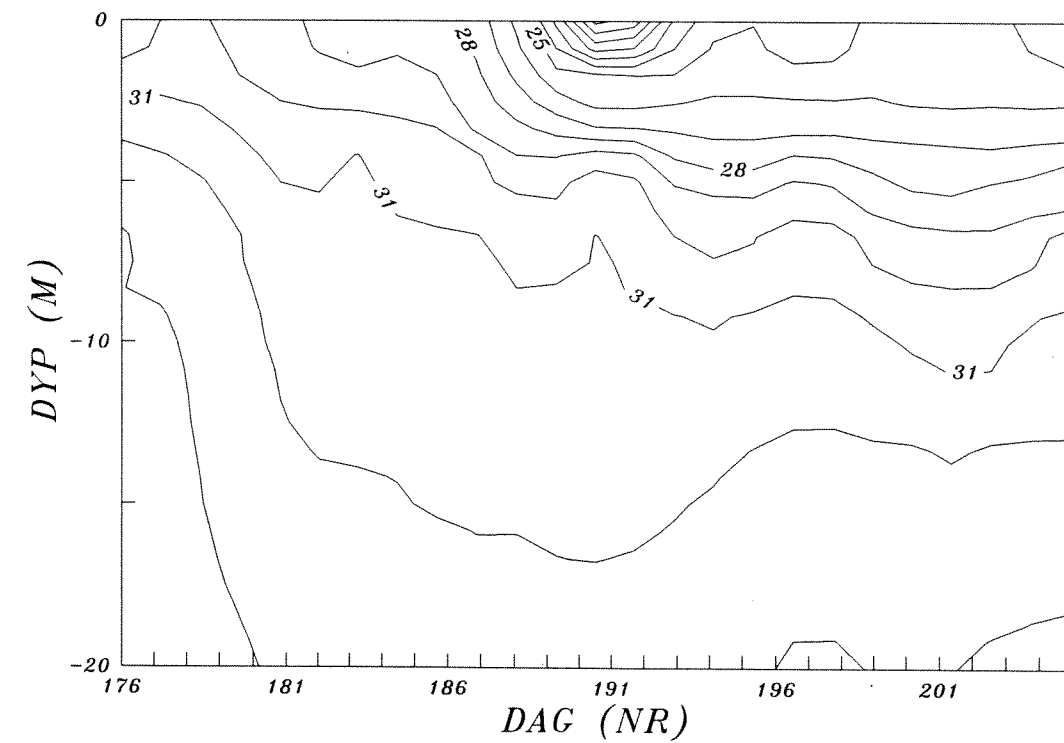


Fig. 5.11 Saltholdighetsutvikling (psu) i midtre Glomfjord under intensivperioden.  
 a) observert på G6 og b) beregnet fra modellen.

Fig. 5.11a viser observert og Fig. 5.11b viser beregnet saltholdighet på stasjon G6. Bildet er omtrent det samme for øvrige modellområder (ikke vist), dog med stigende overflatesaltholdighet utover fjorden. I modellen blir ferskvannet ved utløpene til fjorden blandet med tre ganger så mye sjøvann, tatt fra et fire meter tykt lag med saltholdighet større enn 20 psu (såkalt initialblanding). Modellen synes å gi noe mindre blanding mellom brakkvannet og underliggende sjøvann enn hva som er observert.

Temperaturutviklingen stemmer relativt godt med observert temperaturutvikling, se Fig. 5.12a,b. Temperaturen i de øverste metrene blir muligens litt høy i perioder med pent vær. En mulig årsak er at modellen ikke tar hensyn til skyggeeffekter av omgivende høye fjell.

For vannlaget mellom overflatelaget og 100 m dyp (terskeldypet) beregner modellen midlere vannutskifting mellom Glomfjord og kystvannet i intensivperioden til ca. 3300 m<sup>3</sup>/s, noe som stort sett stemmer med estimatet gitt i kap. 4.2. Sannsynligheten for at dette stemmer styrkes av strømmålingene øst for G8. En transport på ca. 3300 m<sup>3</sup>/s motsvarer midlere strømhastigheter ut og inn fjorden på ca. 5 cm/s, noe som er i tråd med strømmålingene, se kap. 4.2.1.

Vi har undersøkt modellens følsomhet når det gjelder beregnet vannutskifting for størrelsen på henholdsvis vertikal blanding (ved vertikale diffusiviteten  $\kappa$ ) og effektiviteten av trykkdrivningen av strømmen gjennom munningen (ved koeffisienten  $\alpha$ , se modellbeskrivelsen i Appendiks 2). Beregnet vannutskifting viste seg å være meget robust. En reduksjon av  $\alpha$  fra 0.5 til 0.15 medførte en reduksjon av midlere transport fra ca 3300 m<sup>3</sup>/s til 2800 m<sup>3</sup>/s. Videre ga en variasjon av  $\kappa$  med en faktor 2 en helt ubetydelig endring av transporten. Modellen er altså lite følsom for rimelige endringer i  $\kappa$  og  $\alpha$ .

Beregnete konsentrasjoner av næringssalter i overflatelaget er omtrent som observert. Fosfatkonsentrasjonen i brakkvannslaget er klart forhøyet innerst i fjorden på grunn av det store utslippet fra Hydro Glomfjord men i fjordens midtre og ytre deler har fosfatet blitt opptatt i plankton. Nitrogen, særlig nitrat, finnes derimot i overskudd i brakkvannslaget i hele fjorden. Som eksempel vises målte (G6) og beregnede (modellomr. 2) nitratkonsentrasjoner (Fig. 5.13. a,b).

Data om plankton (som klorofyll) finnes bare fra ett tokt (10.7 - dag 191). Dette er naturligvis et svakt sammenlikningsgrunnlag. Det ble målt verdier på 3-9 mg klorofyll/m<sup>3</sup> i dybdeintervallet 0-10 m og med avtagende konsentrasjoner nedenfor dette dybdeintervallet, se Johnsen et al. (1994). Gjennom å bruke en synkehastighet for



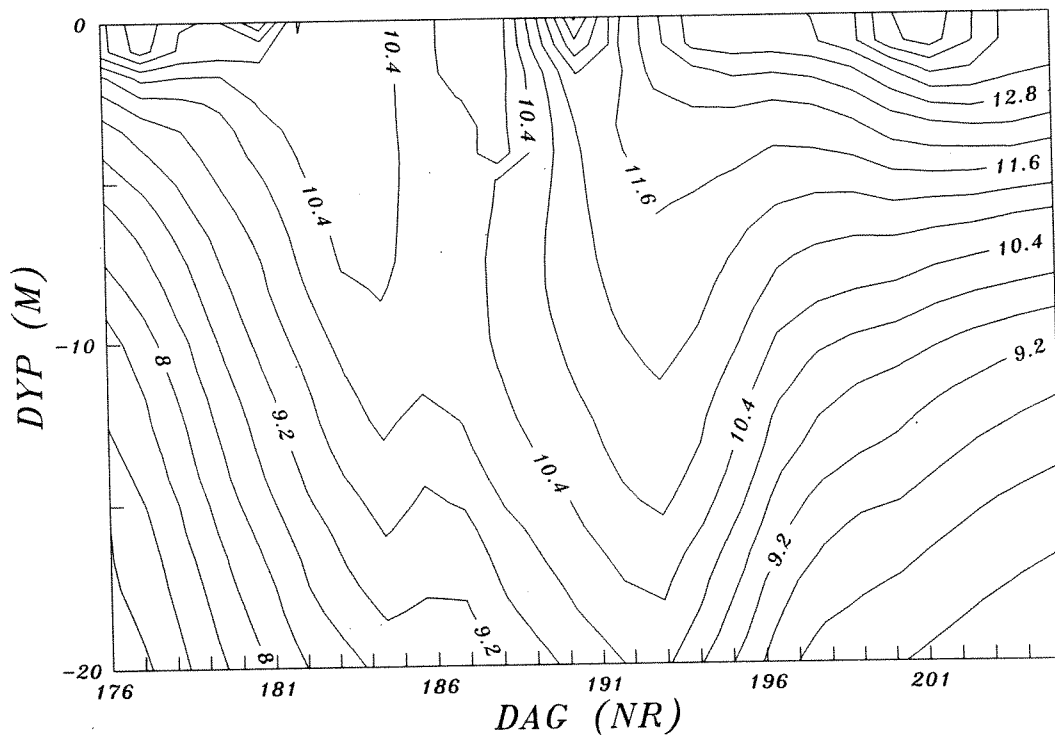
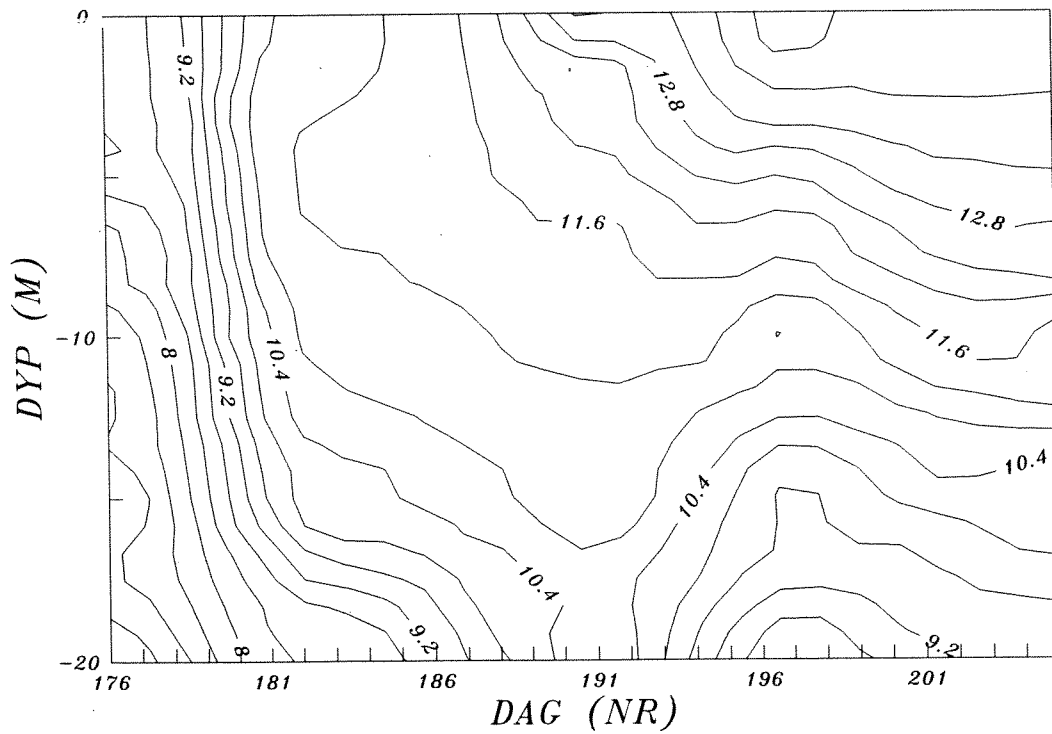


Fig. 5.12 Temperaturutvikling ( $^{\circ}\text{C}$ ) i midtre Glomfjord under intensivperioden.  
 a) observert på G6 og b) beregnet fra modellen.

plankton lik 0.3 m/døgn gir modellen planktonkonsentrasjoner som med omregningsfaktoren 1.4 ( 1 mg organisk P=1.4 mg klorofyll a har omtrent samme vertikale fordeling og amplitude som ble observert (Fig. 5.14b).

Modellberegningene viser at planktonkonsentrasjonen i brakkvannslaget øker fra indre til midtre Glomfjord for å deretter avta utover fjorden, se Tab. 5.1 - 5.3 (scenario 2) nedenfor. Årsaken til den økende konsentrasjonen av plankton i overflatelaget fra indre til midtre Glomfjord er utlippene av næringssalter (spesielt fosfor) i fjordens indre del. I følge modellen er det tilgangen på fosfor som begrenser den totale produksjonen av plankton i overflatelaget, med meget lave fosfatkonsentrasjoner i midtre og ytre deler av fjorden. Dette forklarer hvorfor planktonkonsentrasjonen i overflatelaget avtar fra midtre til ytre Glomfjord.

I dybdeintervallet 5-15 m viser modellen en økende plankton-konsentrasjon innover fjorden. Gjennom plankton som synker ned fra overflatelaget er konsentrasjonen av plankton i dette laget i viss grad påvirket av utlippene av næringssalter innerst i fjorden. I dette dybdeintervallet er det i første rekke nitrogen som begrenser produksjonen av plankton. Dypere ned i fotisk sone er det til slutt mangel på lys som begrenser produksjonen.

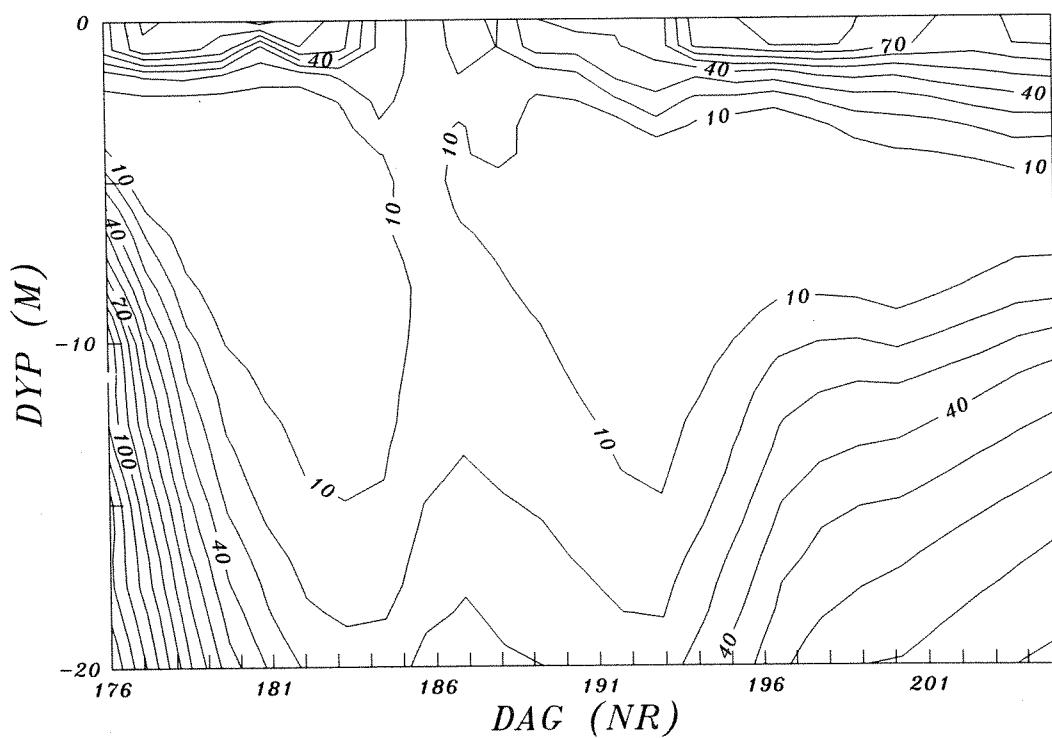
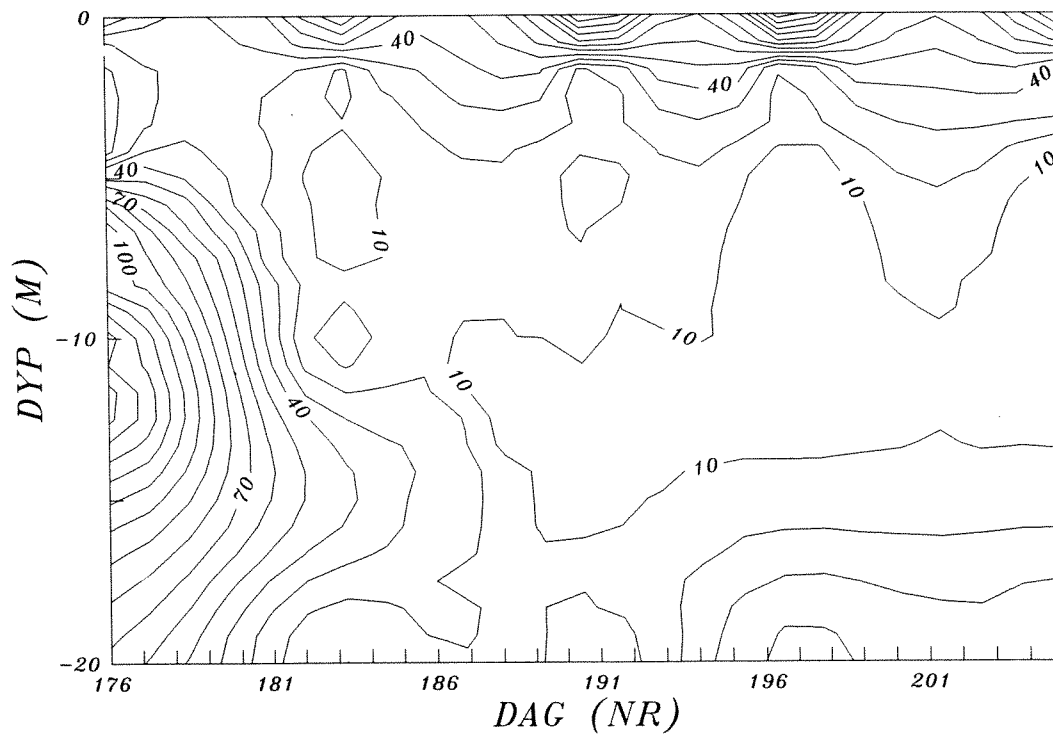


Fig. 5.13 Utvikling av nitratkonsentrasjonene ( $\text{mg N/m}^3$ ) i midtre Glomfjord under intensivperioden, a) observert på G6 og b) beregnet fra modellen.

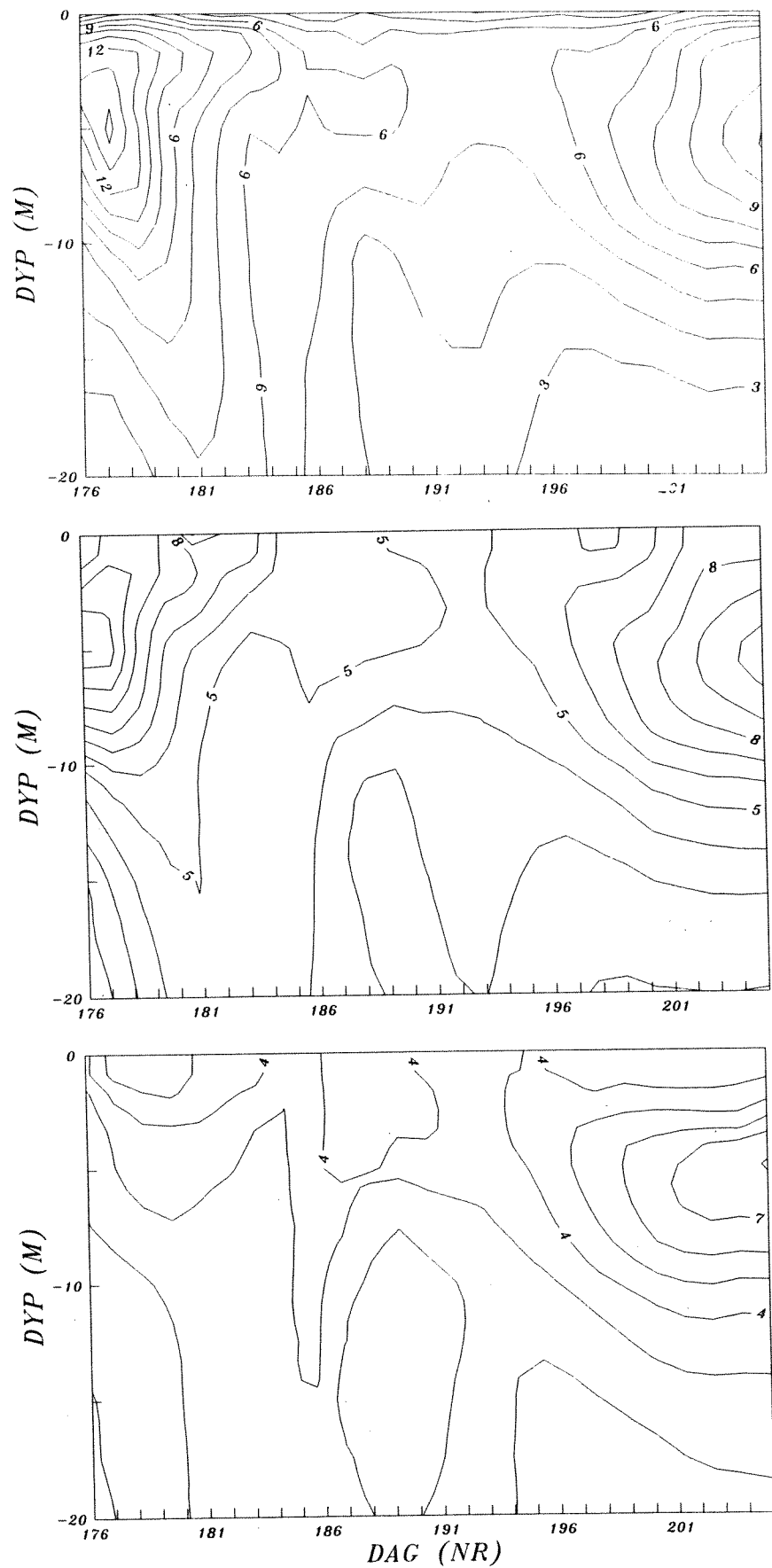


Fig. 5.14 Beregnet planktonkonsentrasjon (mg P/m<sup>3</sup>) i a) indre, b) midtre og c) ytre Glomfjord.

Vi kan oppsummere sammenligningen mellom modell og observasjoner med at overensstemmelsen gjennomgående er tilfredsstillende, spesielt mot bakgrunn av at vi sammenligner gjennomsnittsverdier for hele fjordområder med ukentlige punktmålinger. Det må påpekes at sammenligningsgrunnlaget hva gjelder plankton og visse næringsalter er meget spinkelt. Den beregnede vannutskiftning er sannsynlig sett i forhold til de målte strømhastigheter øst for stasjon G8.

### 5.3 Modellprognoser for tilstandforandringer ved forandret tilførsel av ferskvann og plantenæringsalter

#### 5.3.1 Scenarier

For å simulere tilstandsforandringer forårsaket av reguleringen av ferskvannet har vi kjørt modellen under intensivperioden for to scenarier med ferskvannstilførselen lik henholdsvis 1) tidligere ferskvannstilførsel og 2) med nåværende ferskvannstilførsel (etter reguleringen) som er ca. 25% av tidligere tilførsel, se kap. 3.1. Avrenningen av ferskvann til modellområdene 2 og 3 er ikke påvirket av reguleringen.

For å simulere endret tilførsel av næringsalter er brukt seks ulike alternativer for utslippet fra Hydro Glomfjord Fabrikker (tabell 5.1). For å få scenario 1 har vi multiplisert de daglige utslippene i 1991 med faktorene 4.3 og 2.3 for henholdsvis fosfor og nitrogen, jfr. Johnsen et al. (1994). Utslippene av ferskvann og næringsalter er kombinert i ulike scenarier, hvor f.eks. alternativ 2c betyr ferskvannstilførsel etter reguleringen og næringssaltutslipp lik 1/3 av utslippet i 1991. Utslippene av næringsalter fra øvrige kilder er for samtlige scenarier som beskrevet i kap. 3.4

Tabell 5.1 Scenarier for modellberegningene.

Scenario nr.	Utslipps-alternativ	Ferskvannstilførsel	Utslipp av næringsalter
1	1e	Før reguleringen	Utslipp sommeren 1981
2	1a	Før reguleringen	Utslipp sommeren 1991
3	2a	Etter reguleringen	Utslipp som sommeren 1991
4	2b	Etter reguleringen	2/3 av utslippet sommeren 1991
5	2c	Etter reguleringen	1/3 av utslippet sommeren 1991
6	2d	Etter reguleringen	100 kg N/døgn og 10 kg P/døgn

### 5.3.2 Resultater

For å kunne sammenligne de ulike scenariene har vi i Tabellene 5.2 - 5.4 satt opp noen nøkkelresultater for henholdsvis indre, midtre og ytre Glomfjord. Med overflatelaget menes i tabellene det øverste velblandede laget ved havoverflaten hvilket vanligvis er 0.5-3 m tykt. Med det øvre intermediære laget menes her dybdeintervallet 5-15 m hvilket representerer hoveddelen av fotisk sone.

Beregningene av innstrømning av kystvann til Glomfjord viser at denne ikke merkbart påvirkes av reguleringen (Tab. 5.3). Årsaken til dette er at vannutskiftningen bestemmes vesentlig av tetthetsvariasjoner i kystvannet og av tidevannet og disse blir ikke påvirket av reguleringen.

TABELL 5.2      Resultat av modellberegningene: INDRE GLOMFJORD (OMR 1).

	Scenario nr					
	1	2	3	4	5	6
Utslipp	1e	1a	2a	2b	2c	2d
Sirkulasjon						
inn (m <sup>3</sup> /s)	1414	1450	1462	1412	1432	1408
ut (m <sup>3</sup> /s)	1454	1490	1472	1422	1442	1418
Siktedyp						
midlere (m)	3.4	4.0	3.9	4.0	4.1	4.2
maksimum (m)	3.9	4.2	4.2	4.3	4.3	4.4
minimum (m)	2.6	3.5	3.5	3.6	3.6	3.6

#### OVERFLATELAGET:

Plankton						
mid. (mg Klf/m <sup>3</sup> )	11	5.6	6.5	5.1	4.9	4.1
maks (mg Klf/m <sup>3</sup> )	20	8.9	13	7.7	9.1	7.2
Fosfat (mg P/m <sup>3</sup> )	37	9.4	11	8.6	4.6	1.9
Nitrat (mg N/m <sup>3</sup> )	250	140	210	170	110	57

#### ØVRE INTERMEDIÆRT LAG (5-15 M):

Plankton						
midlere (mg Klf/m <sup>3</sup> )	10	8.5	9.2	8.7	8.4	8.0
maks (mg Klf/m <sup>3</sup> )	15	15	15	15	15	15
Fosfat (mg P/m <sup>3</sup> )	5.3	5.0	4.8	5.0	5.1	5.2
Nitrat (mg N/m <sup>3</sup> )	17	11	17	16	16	15

Som resultat av reduksjonen i ferskvannsutslippet fra Glomfjord kraftstasjon vil både konsentrasjonen av næringssalter og midlere planktonkonsentrasjon i overflatelaget i indre del av fjorden øke litt. Dette framgår gjennom en sammenligning mellom scenariene 2 (1a) og 3 (2a) i Tab. 5.1. Trolig årsak er at brakkvannet som følge av reguleringen får noe lengre oppholdstid samtidig som fortynningen med ferskvann blir mindre. Gjennom en lengre oppholdstid rekker plankton i indre del av fjorden å vokse litt mer enn tidligere, spesielt kan maksimumkonsentrasjonene øke. Som følge av økt planktonkonsentrasjon minsker siktedypet litt i indre Glomfjord. I fjordens midtre og ytre deler blir planktonkonsentrasjonene i overflatelaget noe redusert mens det er små effekter på næringssaltkonsentrasjonene. Siktedypet påvirkes ikke merkbart. Lenger ned i fotisk sone (5-15 m) blir det i hele fjorden små forandringer av konsentrasjonene av plankton og næringssalter. Siktedypet er generelt større i ytre enn i indre deler av fjorden, på tross av at planktonkonsentrasjonene er nokså like i overflatelaget. Årsaken til forskjeller i siktedyp er i slike tilfeller at overflatelaget er tykkere i indre enn i ytre deler av fjorden.

Innholdet av ferskvann i brakkvannslaget i Glomfjord er redusert til omtrent halvparten av tidligere innhold, se ligning (2) i kap. 4.1.1. Dette medfører at brakkvannslagets oppholdstid blir forlenget med ca 50%. Tykkelse og saltholdighet av brakkvannslaget avhenger av blandingen med sjøvann. De største hydrografiske forandringene fås i indre Glomfjord hvor brakkvannslaget tidligere var mest markert.

Reduksjon av utslippene av næringssalter fra Hydro Glomfjord Fabrikker vil i følge modellen medføre reduserte planktonkonsentrasjoner i overflatelaget i hele fjorden, med størst reduksjon i midtre del av fjorden hvor effektene av utslippet er størst for alle scenariene. Fig. 5.15 viser midlere klorofyllkonsentrasjon i brakkvannslaget i de tre modellområdene for de ulike scenariene. Den store reduksjonen av næringssaltutslippene fra Hydro Glomfjord Fabrikker mellom 1981 og 1991 har i følge modellen medført en halvering av midlere klorofyllkonsentrasjon i hele fjorden. Eventuelle utslippsreduksjoner etter 1991 vil ikke få samme store effekt (Fig. 5.15). Fig. 5.16a,b,c viser midlere og maksimale klorofyllkonsentrasjoner for de ulike modellområdene.

Fig. 5.17a,b,c viser midlere, maksimum og minimum av siktedypet for de ulike scenariene. Midlere siktedyp har i følge modellen økt med ca 0.6-0.7 m i fjordens indre og midtre områder og litt mindre i ytre områder som følge av utslippsreduksjonen mellom 1981 og 1991. Klart større forbedringer (ca 1 m) er blitt oppnådd mht. minimumsverdier av siktedypet som i følge modellen skal ha vært helt nede på 2.5 m med 1981 års utslipp. Ettersom utslippene allerede 1991 hadde blitt redusert med drøyt 75% for fosfor og med nesten 60% for nitrogen, sammenlignet med 1981 år utslipp, er naturlig nok potensialet for ytterligere forbedringer av siktedypet ikke like stor lengre, jfr. Fig. 5.17. Reduksjon av utslippene av næringssalter til overflatelaget medfører også en reduksjon av

planktonkonsentrasjonen lenger ned i fotisk sone, 5-15 m (Tab. 5.1-5.3) men effekten her er mye mindre enn på overflatelaget.

Hvis utslippet fra Glomfjord Fabrikker i 1991 ble innlagret i ca. 15 m dyp, ville man i overflatelaget få effekter tilsvarende scenario 6. Forholdene i det intermediære vannlaget vil heller ikke avvike nevneverdig fra scenario 6.

Modellen har ikke med dypvannet i Glomfjord. En kan imidlertid fra generell kunnskap om fjorder med god vannutskiftning og dyp terskel si at den vesle økning av plankton i fotisk sone under brakkvannslaget som en får i scenario 3 (utslipp 2a) ikke vil bidra til økt sedimentasjon av organisk materiale av betydning for oksygenforbruket. Tilsvarende gjelder for de scenarier hvor planktonkonsentrasjonen i dette laget minsker, noe som heller vil ikke ha betydning for oksygenforbruket i bassengvannet.

TABELL 5.3 Resultat av modellberegningene: MIDTRE GLOMFJORD (OMR 2).

	Scenario nr					
	1	2	3	4	5	6
Utslipp	1e	1a	2a	2b	2c	2d
Sirkulasjon						
inn (m <sup>3</sup> /s)	2031	1995	2022	2020	2014	2022
ut (m <sup>3</sup> /s)	2074	2038	2035	2033	2037	2035
Siktedyp						
midlere (m)	3.3	4.0	4.0	4.1	4.2	4.3
maksimum (m)	3.9	4.3	4.2	4.3	4.4	4.5
minimum (m)	2.5	3.6	3.6	3.7	3.7	3.7

OVERFLATELAGET:

Plankton						
mid. (mg Klf/m <sup>3</sup> )	20	8.9	8.6	7.5	6.5	5.6
maks (mg Klf/m <sup>3</sup> )	35	15	14	12	11	10
Fosfat (mg P/m <sup>3</sup> )	3.4	1.0	0.76	0.67	0.50	0.44
Nitrat (mg N/m <sup>3</sup> )	87	60	66	51	34	15

ØVRE INTERMEDIÆRT LAG (5-15 M):

Plankton						
midlere (mg Klf/m <sup>3</sup> )	8.2	6.9	7.3	7.0	6.7	6.4
maks (mg Klf/m <sup>3</sup> )	12	9.8	10	9.7	9.4	9.4
Fosfat (mg P/m <sup>3</sup> )	6.3	6.1	6.0	6.1	6.2	6.3
Nitrat (mg N/m <sup>3</sup> )	21	20	21	20	20	19



TABELL 5.4

Resultat av modellberegningene: YTRE GLOMFJORD (OMR 3).

	Scenario nr					
	1	2	3	4	5	6
Utslipp	1e	1a	2a	2b	2c	2d
Sirkulasjon						
inn (m <sup>3</sup> /s)	3328	3329	3325	3333	3327	3319
ut (m <sup>3</sup> /s)	3374	3375	3341	3349	3343	3335
Siktedyp						
midlere (m)	4.0	4.4	4.4	4.4	4.5	4.5
maksimum (m)	4.0	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9
minimum (m)	3.7	4.2	4.2	4.2	4.3	4.3
<b>OVERFLATELAGET:</b>						
Plankton						
mid. (mg Klf/m <sup>3</sup> )	11	5.8	5.2	4.8	4.5	4.2
maks (mg Klf/m <sup>3</sup> )	16	8.6	7.6	7.1	6.7	6.2
Fosfat (mg P/m <sup>3</sup> )	0.40	0.45	0.49	0.53	0.56	0.64
Nitrat (mg N/m <sup>3</sup> )	37	29	24	20	14	8.8
<b>ØVRE INTERMEDIÆRT LAG (5-15 M):</b>						
Plankton						
midlere (mg Klf/m <sup>3</sup> )	5.2	4.3	4.5	4.3	4.2	4.0
maks (mg Klf/m <sup>3</sup> )	9.0	7.2	7.3	7.0	6.6	6.2
Fosfat (mg P/m <sup>3</sup> )	5.2	5.2	5.1	5.2	5.2	5.3
Nitrat (mg N/m <sup>3</sup> )	15	15	15	15	14	14

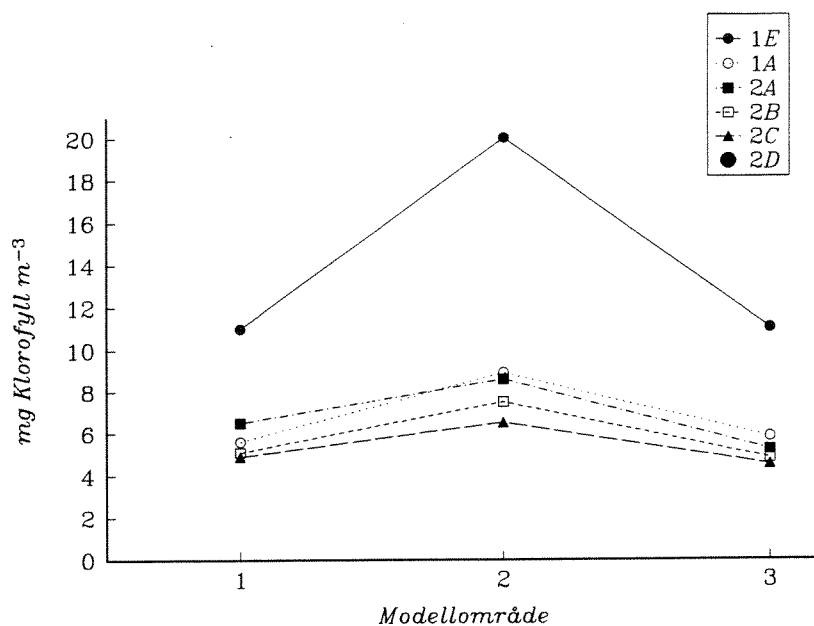


Fig. 5.15 Midlere klorofyllkonsentrasjon i ulike modellområder for de ulike utslippsscenariene.

### 5.3.3 Usikkerhet i modellprognosene

Modellen er bygget opp av matematiske beskrivelser av prosesser som hver for seg er verifisert for andre fjord- og havområder (jfr. Litteraturlisten). Noen av prosessene er imidlertid så varierende i tid og rom at en må tilpasse en koeffisient for hvert område og/eller tidsperiode. I modellen for Glomfjord har vi tilpasset initialblandingen av ferskvann, planteplanktonets synkehastighet og vannets optiske egenskaper.

Simuleringen av forandret tilførsel av ferskvann og næringssalter (forandret drivning) er gjort med utgangspunkt i målt tilstand den 25.6.91 (dag nr. 176). For alle stasjoner er det som før nevnt usikkerhet mht. konsentrasjonene av ammonium og klorofyll og på noen stasjoner også mht. oksygen og nitrat. Med kort oppholdstid (~ 1 uke) for brakkvannet i fjorden, sammenlignet med simuleringsperiodens lengde (4 uker), blir imidlertid en eventuell feil på grunn av uriktige startverdier liten. Opprinnelig var det imidlertid planlagt at intensivperioden som brukes for simulering, skulle ha en varighet på ca. to måneder. Med den forkortede intensivperioden blir naturlig nok innflytelsen av uriktige startverdier større enn forutsatt. Dette gjør at de beregnede effektene generelt blir litt underestimert, men formodentlig ikke mer enn 15-20%.

I modellen endres siktedypet bare ved endringer i konsentrasjonen av plankton. Siden mineralpartikler også påvirker siktedypet vil modellen i perioder med mye mineralpartikler i vannet gi større siktedyp enn hva som blir observert.

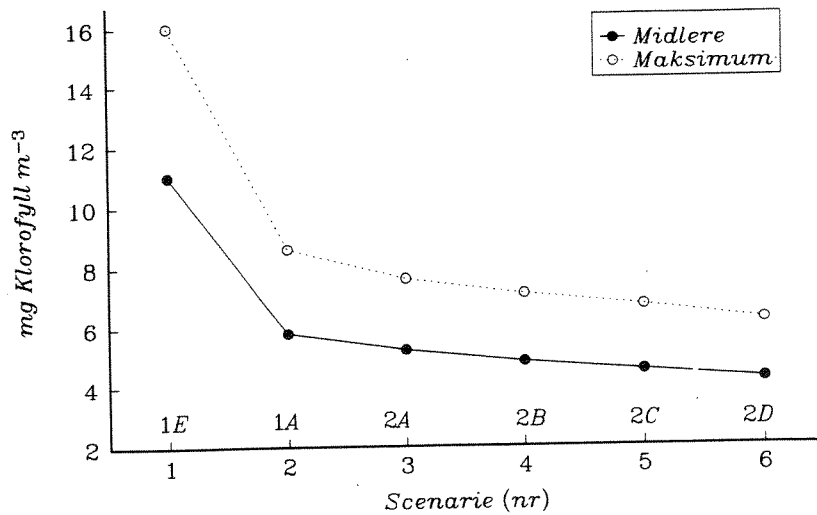
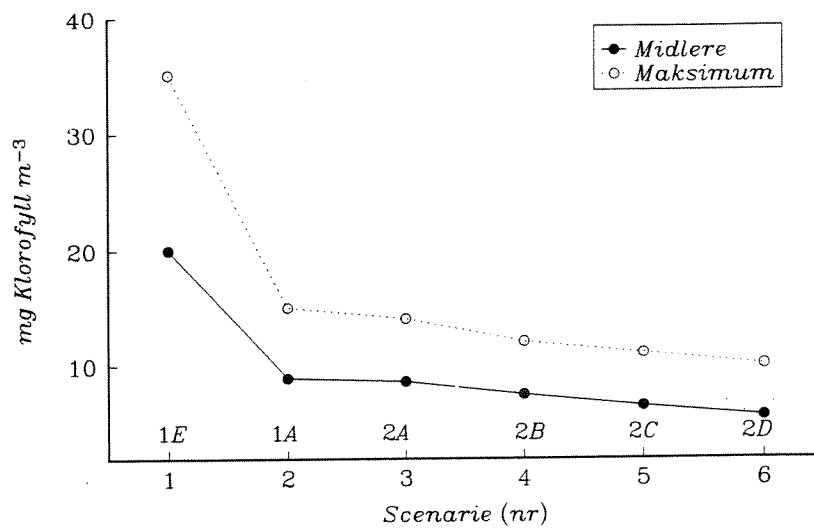
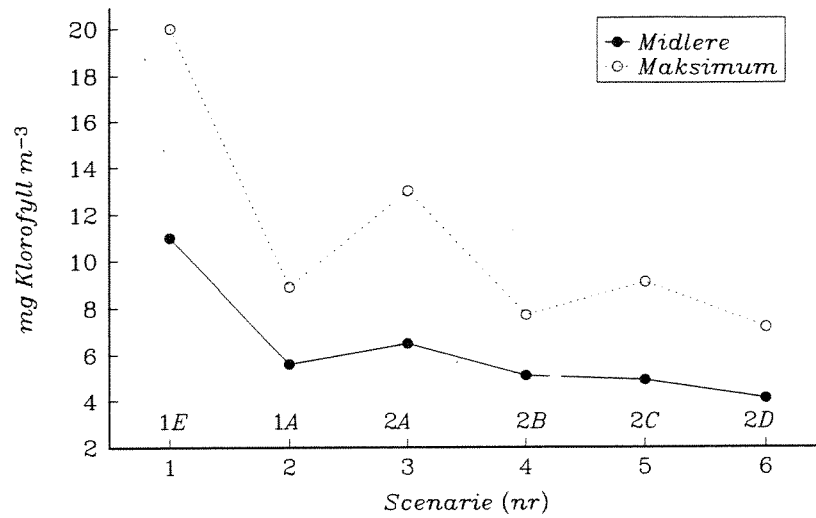


Fig. 5.16 Midlere og maksimum klorofyllkonsentrasjon for de ulike utslippsscenariene. a) Indre, b) midtre og c) ytre Glomfjord.

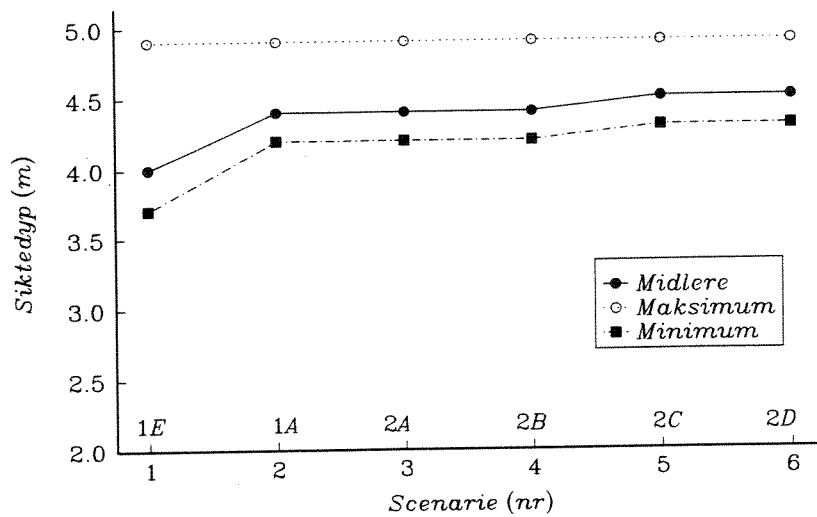
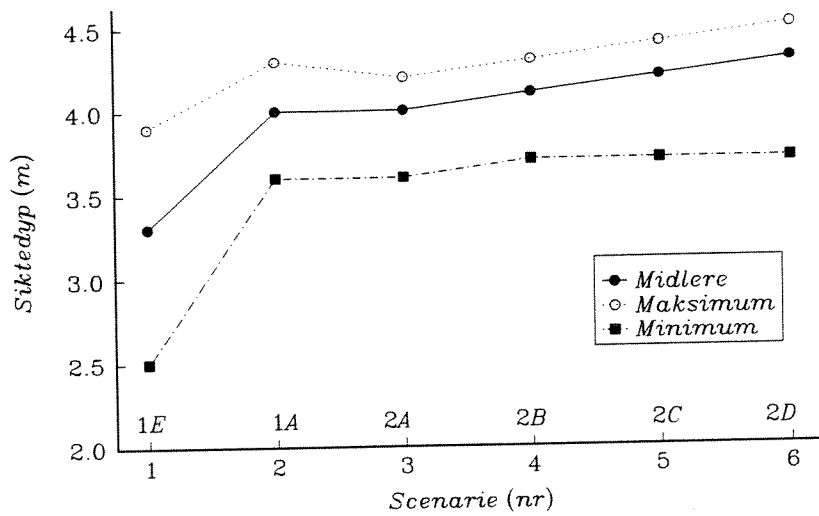
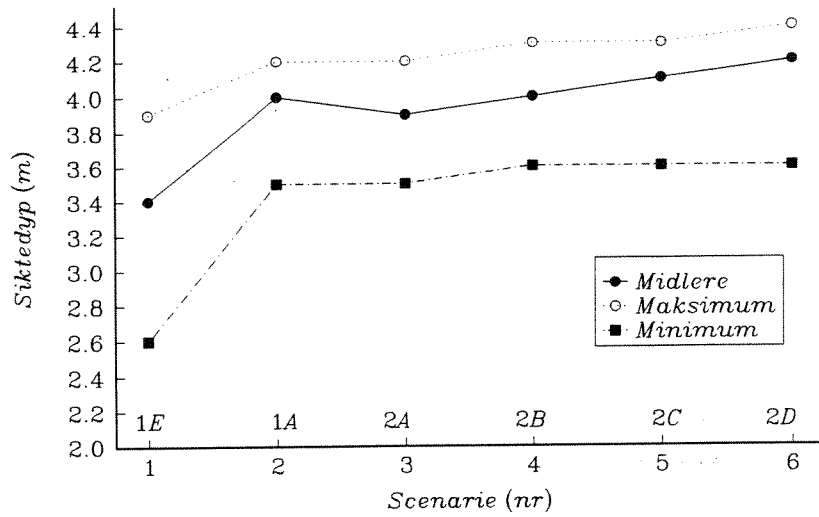


Fig. 5.17 Midlere, maksimum og minimum siktedyp for de ulike utslippsscenariene. a) Indre, b) midtre og c) ytre Glomfjord.

## 5.4 Konklusjoner

Beregningene viser at det er god vannutveksling mellom Glomfjord og kystvannet. Midlere oppholdstid for vannet mellom overflaten og 100 m dyp (terskeldypet) er beregnet til litt under to uker. Denne blir ikke forandret av den reduserte ferskvannstilførselen.

Den reduserte ferskvannstilførselen vil medføre at overflatetemperaturen både sommerstid og vinterstid vil bli noe høyere enn tidligere.

Et generelt trekk ved samtlige modellsimuleringer er at planktonkonsentrasjonen i overflatelaget øker utover fjorden for deretter å avta, med maksimum i midtre del av fjorden. Planktonkonsentrasjonen i fotisk sone under overflatelaget øker innover fjorden med maksimum i indre del av fjorden.

I følge modellen begrenses planktonproduksjonen i overflatelaget i midtre og ytre del av fjorden av tilgang på fosfor. Under dette laget begrenses produksjonen i hele fjorden av tilgang på nitrogen og lys.

Med uforandret tilførsel av næringssalter medfører den gjennomførte ferskvannsreguleringen noe høyere planktonkonsentrasjoner i overflatelaget i indre og noe lavere i midtre og ytre områder av Glomfjord. Det blir en liten reduksjon i siktedyp i indre Glomfjord. Planktonkonsentrasjonene under overflatelaget vil øke marginalt. Dette vil imidlertid ikke ha betydning for oksygenforbruket i dypvannet.

I følge modellberegningene har det fra 1981 til 1991 skjedd en halvering av planktonkonsentrasjonen i overflatelaget i hele Glomfjord som følge av reduksjonen av utslippene av næringssalter fra Hydro Glomfjord Fabrikker. Samtidig har det skjedd en markant forbedring av siktedypet, spesielt i indre og midtre områder av fjorden. Her har midlere siktedyp øket med ca 0.6-0.7 m mens siktedypminimum har øket med ca. 1 m.

Eventuell ytterligere reduksjon av utslippene av næringssalter vil gi lavere planktonkonsentrasjoner i overflatelaget og dermed større siktedyp i hele fjorden, med størst forandringer i indre og midtre deler av fjorden. Forandringene vil dog for alle utslippsalternativer bli langt mindre enn forandringene på grunn av reduksjonene i perioden 1981-91. Planktonkonsentrasjonen i fotisk sone under overflatelaget vil også reduseres noe med reduserte utslipp. En reduksjon av utslippene får ingen effekt av betydning for oksygenforbruket i dypvannet.

## 6. LITTERATUR

- Holte, B., Johnsen, T., Molvær, J., Næs, K., Pedersen, A. og Walday, M., 1993: Undersøkelser av miljøforhold i Glomfjord og Holandsfjord 1991-92. Delrapport 1: Vannkjemiske, biologiske og sedimentkjemiske forhold i Holandsfjord. NIVA rapp. nr #. # sider.
- Johnsen, T., Knutzen, J., Molvær, J., Pedersen, A. og Walday, M., 1994: Undersøkelser av miljøforhold i Glomfjord og Holandsfjord i 1991-92. Delrapport 3. Næringssalter, algebiomasse, oksygenforhold og gruntvannssamfunn i Glomfjord. NIVA rapp. nr # # sider.
- Magnell, J.-P., 1994: Usikkerheter i beregnet ferskvannstilførsel til Glomfjorden og Holandsfjorden. Statkraft Engineering, Notat 25.02.94.
- Molvær, J., Knutzen, J., Haakstad, M. og Tangen, K., 1984: Basisundersøkelse i Glomfjord 1981-82. Delrapport II. Vannutskiftning, vannkvalitet, miljøgifter i organismer og organismesamfunn på grunt vann. (Overvåkingsrapport nr. 128/84). NIVA rapp. nr 1605.
- Sivertsen, B., 1982: Meteorologi og luftkvalitet i Glomfjord 1980-82. NILU, Lillestrøm. Oppdragsrapport nr. 42/82. 39 sider.
- Stigebrandt, A., 1990: Kompendium i marin systemanalyse: Nr. 2. Diapyknisk blanding i havet. Göteborgs universitet, oceanografiska institutionen, 65 sid.
- Stigebrandt, A., 1992: Beregning av miljøeffekter av menneskelige aktiviteter. Lærebok for brukere av vannkvalitetsmodellen Fjordmiljø. Ancylus rapport 9201. Göteborg. 58 sider.
- Stigebrandt, A. og Molvær, J., 1990: Undersøkelse av eutrofiering i Grenlandsfjordene 1988-89. Delrapport 2. Modell for miljøeffekter fra utslipp av næringssalter, oppløst og partikulært materiale. Overvåkingsrapport 428/90. NIVA-rapport nr 2534. Göteborg/Oslo.
- Stigebrandt, A. og Molvær, J., 1993: Virkninger av planlagte tiltak for å redusere overgjødning i Grenlandsfjordene. NIVA-rapport nr 2908. Göteborg/Oslo.
- Stigebrandt, A. og Molvær, J., 1994a: Evidence for hydraulically controlled outflow of brackish water from Holandsfjord, Norway. (Innsendt til Journal of Physical Oceanography).
- Stigebrandt, A. og Molvær, J., 1994b: Undersøkelser av miljøforhold i Glomfjord og Holandsfjord i 1991-92. Delrapport 2: Modellsimulering av effekter av endret ferskvannstilførsel til Holandsfjord. NIVA rapp. nr 3060. Göteborg/Oslo.

## APPENDIKS 1

### Dagnr. og datoer benyttet i modellarbeidet sommeren 1991

<i>Dag nr.</i>	<i>Dato</i>	<i>Dag nr.</i>	<i>Dato</i>	<i>Dag nr.</i>	<i>Dato</i>
152	01.06	182	01.07	213	01.08
153	02.06	183	02.07	214	02.08
154	03.06	184	03.07	215	03.08
155	04.06	185	04.07	216	04.08
156	05.06	186	05.07	217	05.08
157	06.06	187	06.07	218	06.08
158	07.06	188	07.07	219	07.08
159	08.06	189	08.07	220	08.08
160	09.06	190	09.07	221	09.08
161	10.06	191	10.07	222	10.08
162	11.06	192	11.07	223	11.08
163	12.06	193	12.07	224	12.08
164	13.06	194	13.07	225	13.08
165	14.06	195	14.07	226	14.08
166	15.06	196	15.07	227	15.08
167	16.06	197	16.07	228	16.08
168	17.06	198	17.07	229	17.08
169	18.06	199	18.07	230	18.08
170	19.06	200	19.07	231	19.08
171	20.06	201	20.07	232	20.08
172	21.06	202	21.07	233	21.08
173	22.06	203	22.07	234	22.08
174	23.06	204	23.07	235	23.08
175	24.06	205	24.07	236	24.08
176	25.06	206	25.07	237	25.08
177	26.06	207	26.07	238	26.08
178	27.06	208	27.07	239	27.08
179	28.06	209	28.07	240	28.08
180	29.06	210	29.07	241	29.08
181	30.06	211	30.07	242	30.08
		212	31.07	243	31.08

## APPENDIKS 2

### BESKRIVELSE AV GLOMFJORDMODELLEN OG HOLANDSFJORDMODELLEN.

Modellene for Glomfjord og Holandsfjord består av koplede delmodeller for de ulike modellområdene. Hver delmodell er, med noen utvidelser og forandringer, lik den grunnmodell som ble brukt for Grenlandsfjordene (Stigebrandt & Molvær, 1990, 1991). Grunnmodellen er kortfattet beskrevet nedenfor.

#### A 1. Sammendrag av grunnmodellen.

Modellen er bygget opp av matematiske beskrivelser av delområdets topografi, de viktigste fysiske, kjemiske og biologiske prosessene samt utvekslingen av energi og materiale gjennom de ytre grenseflatene, dvs. havoverflaten og vertikale flater ved modellområdets grenser til nærliggende områder og elvemunninger. Den horisontalt integrerte modellen dekker hvert enkelt modellområde -fra havoverflaten ned til største dyp. Bunnsedimenter inngår også i modellen. En grafisk oversikt over grunnmodellen og de viktigste prosessene som virker i denne er gitt i Fig. A1 og A2.

I modellen er hvert modellområde fra overflaten til største dyp inndelt i 1 m tykke lag. Tidsoppløsningen som er 1 døgn er bestemt av meteorologiske, hydrologiske og oseanografiske drivdata som gis som døgnmiddel. Modellen beregner vertikale fordelinger av (de horisontalt midlet) tilstandsvariablene, dvs. de variabler som beskriver tilstanden i modellområdet. Modellen har følgende tilstandsvariabler i vannsøylen: saltholdighet, temperatur, oksygenkonsentrasjon, konsentrasjon av marint plankton, konsentrasjon av nitrat, konsentrasjon av ammonium, konsentrasjon av fosfat. På bunnen er tilstandsvariablene: konsentrasjon av levende bunndyr og konsentrasjon av dødt marint organisk materiale.

Modellen har et velblandet overflatelag og tykkelsen av dette vil variere kontinuerlig med ferskvannstilførsel, varmeutveksling gjennom havoverflaten, vind og in- og utstrømning gjennom sundene. Egenskapene til det velblandede overflatelaget er beregnet vha en såkalt pyknoklinmodell. Blandingen mellom ellevann og sjøvann i elvemunninger ("initialblanding") er tatt med i modellen. Modellen beregner også den vertikale utvekslingen av vann samt suspendert og oppløst materiale mellom nærliggende lag i modellen (gjennom vertikal diffusjon og adveksjon samt gjennom synkende partikler).



Modellen beregner vannutveksling mellom modellens delområder og mellom modellens ytre delområde og kystområdet utenfor. Vannutvekslingen er drevet dels av vannstandsforskjellen som i hovedsak skyldes tidevannet og dels av indre trykkforskjeller (dvs. nede i vannsøylen men over terskeldypet) mellom bassengene på begge sider av et sund pga. ulike vertikal tetthetsfordeling. I den sistnevnte inngår også estuarin sirkulasjon drevet av ferskvannstilførselen. I modellen innlagres innstrømmende vann i det dyp i bassenget hvor tettheten er lik det innstrømmende vannets. I tilfeller med spesiell høy tetthet på innstrømmende vann vil dette kunne trenge ned under terskeldypet (som en tung bunnstrøm) og derved skifte ut bassengvann. En slik utskiftning er i mange tilfeller kun delvis. Glomfjordmodellen har sin nedre grense på terskeldypet hvorfor dypvannsutskifting ikke er aktuell i denne modellen.

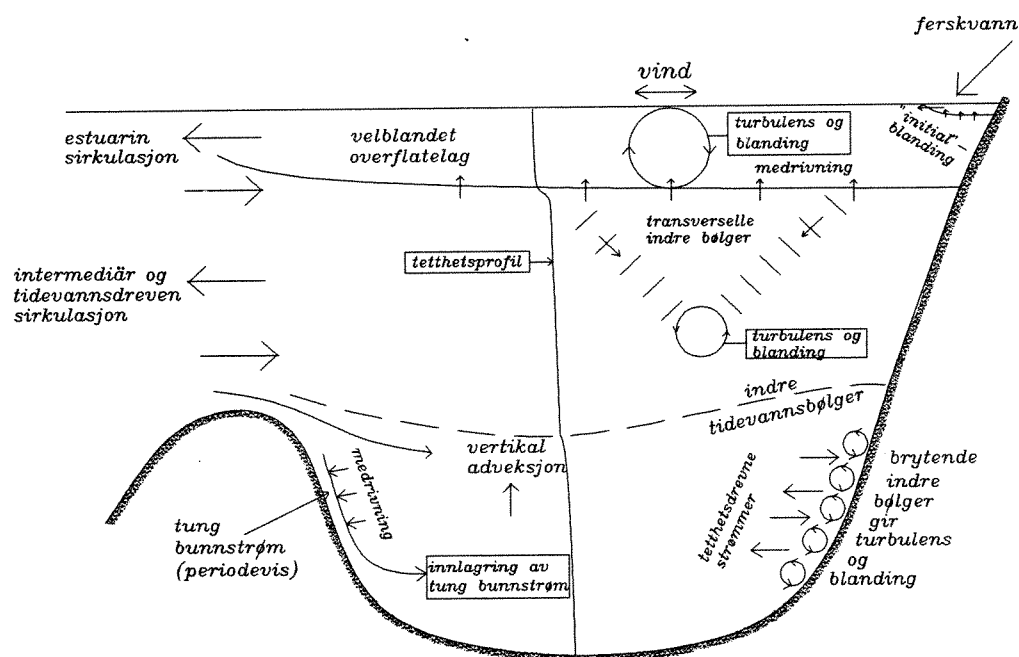


Fig. A1 Fysiske prosesser i fjordmodellen.

Modellen inneholder matematiske beskrivelser av biologiske/kjemiske prosesser hvilke omdanner materiale mellom organiske og uorganiske former. Bl.a. finns beskrivelser av planteplanktonets vekst og respirasjon. Lysets nedtrengning blir beregnet fra vannets optiske egenskaper og konsentrasjonen av partikulært marint organisk materiale (plankton). I Holandsfjordsmodellen påvirkes lysforholdene også av mineralpartikler. Plankton synker og blir nedbrutt, dels i vannsøylen og dels på bunn. Oksygen blir derved forbrukt. Bunnfaunaen står i modellen for nedbryting av marint organisk materiale på bunnen. En enkel modell for bunnfaunaens tilvekst og respirasjon er blitt brukt. Modellen har også med bakteriell oksydering av ammonium til nitrat (nitrifikasjon). Reduksjon av

nitrat til nitrogengass (denitrifikasjon) forekommer i modellen i sedimenter hvis overliggende vann er oksisk og inneholder nitrat. Plankton antas å være sammensatt i følge de såkalte Redfields forhold, dvs. C:N:P= 106:16:1.

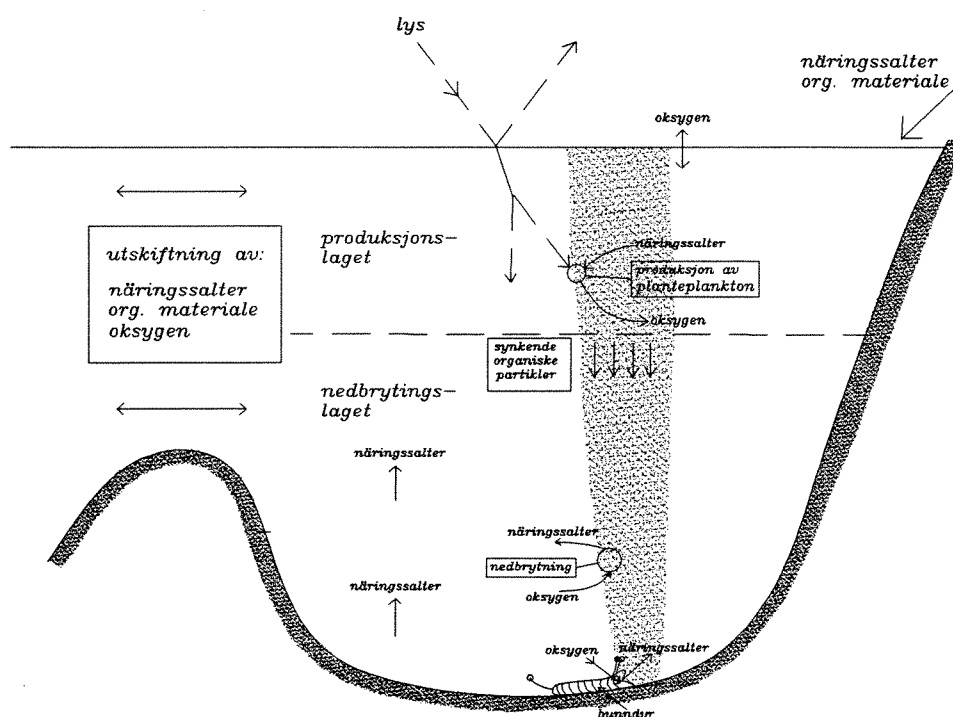


Fig. A2 Biologiske prosesser i fjordmodellen.

## A 2. Fysiske prosesser.

Modellens struktur er komplisert fordi tykkelsen av det gjennomblandede laget ved havoverflaten kan variere kontinuerlig med tilførselen av ferskvann, varmeutvekslingen gjennom havoverflaten, vindens hastighet og utskiftning av vann mellom ulike modellområder. Egenskapene til det velblandede laget ved havoverflaten beregnes vha. en såkalt pyknoklinmodell (Stigebrandt, 1985). Tykkelsen og saltholdigheten av det velblandede laget kan øke på grunn av vinddrevet medrivning av tyngre og saltere vann gjennom pyknoklinen. Termohalin konveksjon kan bidra til medrivningen. I perioder med økende ferskvannstilførsel/oppvarming og/eller avtakende vindblanding kan en ny, grunnere pyknoklin etableres (pyknoklinretrett). I pyknoklinmodellen får turbulensen i overflatelaget sin energi fra vinden. Energooverføringen fra vinden er proporsjonal med vindstyrken opphøyd i 3. potens, den såkalte blandingsvinden.

Tidevannstrømmer i sund genererer indre tidevannsbølger i tiliggende fjordbasseng. De

indre tidevannsbølgene mister energien til turbulens. Energien fra indre tidevannsbølger er vanligvis den dominerende energikilden for turbulensen i de fleste fjordbasseng. For å beregne den vertikale blandingen, bestemt ved den vertikale diffusiviteten  $\kappa$ , under det velblandede overflatelaget brukes metoden å beregne  $\kappa$  beskrevet i Stigebrandt & Aure (1989).

Vannutskiftningen gjennom et sund betraktes som drevet av trykkdifferansen mellom bassengene på hver side av sundet. Denne får bidrag både fra forskjeller i havoverflatens nivå, hovedsakelig på grunn av ferskvannstilførsel, og av forskjeller i indre trykk som skyldes ulik vertikal lagdeling i bassengene på begge sider av sundet. I modellen er hastigheten på et nivå proporsjonal med kvadratroten av den horisontale trykkforskjellen mellom bassengene. Brøkdelen  $\alpha$  av den horisontale trykkforskjellen brukes i modellen for å akselerere vann inn i sundet. Verdien  $\alpha=0.5$  som brukes i modellen er bestemt empirisk, se Stigebrandt (1990).

Vannet som strømmer inn i et modellområde antas å bli innlagret på det djup hvor tettheten er lik tettheten på det innstrømmende vannet. Om tettheten på det innstrømmende vannet over en terskel er meget høy kan det innstrømmende vannet penetrere dypt ned i terskelbassenget (aktuelt bare i Holandsfjordsmodellen). Det innstrømmende vannet danner i slike tilfeller en såkalt tung bunnstrøm som i modellen er beskrevet etter Stigebrandt (1987). Tunge bunnstrømmer river med seg omgivende vann og blir derved lettere på sin vei nedover. Samtidig øker vanligvis tettheten i omgivende vann nedover. På et visst nivå kan derfor tettheten i bunnstrømmen være lik tettheten på omgivende vann og en regner da med at vannet i den tunge bunnstrømmen blir innlagret på dette nivået. Det "gamle" bassengvannet over innlagringsnivået blir oppløftet av den tunge bunnstrømmen og ved større innstrømninger av tungt vann kan det gamle bassengvannet helt eller delvis bli utskiftet.

Vann som strømmer gjennom et sund mellom to basseng kan få spesielt høy hastighet ved havoverflaten hvor det ofte er stor tetthetsforskjell mellom de to bassengene. Derved kan medrivning av underliggende vann induseres på lesiden av sundet. Blanding i sund er et generelt fenomen som ble innført i modellen for Grenlandsfjordene, se Stigebrandt & Molvær (1991). I modellen simuleres slik blanding gjennom at vann fra et 5 m tykt lag under overflatelaget blir oppblandet i det innstrømmende vannlaget ved overflaten. Volumfluksen av oppblandet vann er presis som i Grenlandsfjordmodellen satt til 20% av volumfluksen av innstrømmende overflatevann.

Analogt med blanding i sund forekommer blanding i elvemunninger. Blanding mellom

ferskvann og sjøvann er avhengig av bl.a. ferskvannets fart ved utløpet. I modellen river ferskvannet med seg sjøvann fra et 4 m tykt lag med saltholdighet høyere enn 20 psu. Mengden sjøvann som rives med velges ved modellkalibreringen slik at modellens overflatesaltholdighet blir lik den observerte.

Synlig lys står for ca. 50% av energien i solstrålingen. Resten av energien finnes i UV- og IR-stråling som absorberes i det øverste centimeter av havet. Da synlig lys forplanter seg nedover i vannsøylen blir det svekket, noe som beskrives av den såkalte vertikale svekningskoeffisienten  $k_d$  ( $m^{-1}$ ). Denne kan deles opp i tre bidrag - ett fra planteplankton ( $k_p$ ), ett fra mineralpartikler ( $k_m$ ) og ett fra vannet selv pluss oppløste stoffer ( $k_b$ ) - slik at  $k_d = k_p + k_m + k_b$ . Fra siktedypsdata vinterstid har vi bestemt  $k_b = 0.10$ . For bidraget fra plankton bruker vi  $k_p = 0.4$  POP, hvor POP er konsentrasjonen av fosfor i plankton ( $mmol P m^{-3}$ ), se Stigebrandt & Molvær (1990). I Holandsfjordmodellen bruker vi en  $k_m$ -verdi bestemt fra siktedypmålinger. I modellen beregnes siktedypet gjennom vertikal integrasjon av  $k_d$  fra havoverflaten og nedover, se Stigebrandt & Molvær (1990).

### A 3. Biologiske og biokjemiske prosesser.

Delingshastigheten av plankton ved optimalt lys og ikke næringssaltbegrensing er satt til 1 deling per døgn ved temperaturen  $10^\circ C$  og  $Q_{10}$  er lik 1.9.  $Q_{10}$ -verdien er et mål på hvor mye hurtigere en prosess forløper hvis temperaturen blir økt med  $10^\circ C$ . De såkalte halvmetningskonstantene for fosfor ( $P_{1/2}$ ) og nitrogen ( $N_{1/2}$ ) er satt til henholdsvis 0.05 ( $mmol P m^{-3}$ ) og 0.5 ( $mmol N m^{-3}$ ). Planktonveksten er proporsjonal med det minste av uttrykkene  $IP/(P_{1/2} + IP)$  og  $IN/(N_{1/2} + IN)$ , hvor IP er konsentrasjonen av uorganisk fosfor (i ortofosfat) og IN er summen av nitrogen i nitrat og ammonium. Planktonveksten er også proporsjonal med  $(I/I_k)/(1 + (I/I_k)^2)^{1/2}$ , hvor I er belysningen og  $I_k$  er den såkalte lysfølsomhetsfaktoren (Jassby & Platt, 1976).  $I_k$  er satt til  $30 W m^{-2}$ . Nedbrytingen av plankton i vannsøylen er satt til  $0.03$  ( $døgn^{-1}$ ). I måleprogrammet ble planktonkonsentrasjonen målt ved dess innhold av klorofyll a (Klf). I modellen bruker vi planktonets innhold av fosfor (POP) for å beskrive konsentrasjonen av plankton. Vi trenger derfor å konvertere fra klorofyll til organisk fosfor. Vi bruker sammenhengen  $Klf = 41 POP$ , hvor Klf er uttrykket i  $mg Klf m^{-3}$  og POP i  $mmol P m^{-3}$ . Denne sammenhengen ble bestemt for Grenlandsfjordene. En skal ha i mente at det ikke finnes noen fiks sammenheng mellom Klf og POP uten denne kan variere mellom ulike planktonarter og med fysiologisk tilstand for en og samme art.

I modellen vokser bunnfaunaen hvis det er tilstrekkelig med marint organisk materiale i sedimentet og hvis oksygenkonsentrasjonen er høyere en viss grenseverdi ( $2 ml O_2 l^{-1}$ ),

det senere er alltid tilfelle i Glomfjord og Holandsfjord.

Ammonium oksyderes bakterielt til nitrat som mellomprodukt. Ratekonstanten for nitrifikasjonsprosessen er for terskelbasseng blitt bestemt til ca.  $0.18 \text{ døgn}^{-1}$  ved temperaturen  $0^\circ\text{C}$ . I overflatelaget har vi redusert ratekonstanten til en tiendedel av verdien i terskelbassengene. Årsaken til den lave nitrifikasjonshastigheten i overflatelaget er formodentlig at dagslyset virker hemmende på nitrifikasjonsprosessen, noe som er kjent fra litteraturen, se videre Stigebrandt & Molvær (1991).

Denitrifikasjon skjer ved bakteriell nedbryting av organisk materiale ved lave oksygenkonsentrasjoner. I Glomfjord og Holandsfjord er oksygenkonsentrasjonen altfor høy for at pelagisk denitrifikasjon skal være aktuell (grenseverdi ca  $0.5 \text{ ml O}_2 \text{ l}^{-1}$ ). Denitrifikasjon vil også skje i bunnsedimentene, ved redoksklinen, hvis ovenforliggende vann inneholder både oksygen og nitrat og hvis der er organisk materiale som kan brytes ned. Denne prosessen er i modellen antatt å være proporsjonal dels med nedbrytingshastigheten av organisk materiale og dels med forholdet  $\text{NO}_3/(\text{NO}_3 + \text{O}_2)$ . Prosessen er således i modellen spesielt effektiv ved høye nitrat- og lave oksygenkonsentrasjoner.

Planktonets synkehastighet varierer fra art til art men i sterkt lagdelte kystområder ligger den ofte i intervallet  $0\text{-}2 \text{ m døgn}^{-1}$ . Generelt synker små arter langsommere enn større arter. Visse arter (flagellater) kan svømme. Synkehastigheten under en spesiell periode må bestemmes gjennom kalibrering av modellen.

I modellen beregnes oksygenutvekslingen gjennom havoverflaten. Det matematiske formelverket i Stigebrandt (1991a) blir derved brukt. Dette er utprøvd med tilfredsstillende resultater vha. data fra Østersjøen og omgivende havområder. En kan i modellresultatene bl.a. se effekter av primærproduksjonen i fotiske sonen som en til tider meget markert overmetning med oksygen, ofte med maksimum omkring 10 m dyp.

#### A 4. Litteraturliste for appendiks 2.

- Jassby, A.D. and Platt, T., 1976: Mathematical formulation of the relationship between photosynthesis and light for phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.*, 21, 540-547.
- Stigebrandt, A., 1985: A model for the seasonal pycnocline in rotating systems with application to the Baltic proper. *J. Phys. Oceanogr.*, 15, 1392-1404.
- Stigebrandt, A., 1987: A model for the vertical circulation of the Baltic deep water. *J. Phys. Oceanogr.*, 17, 1772-1785.
- Stigebrandt, A., 1990: On the response of the horizontal mean vertical density distribution in a fjord to low-frequency density fluctuations in the coastal water. *Tellus*, 42A, 605-614.
- Stigebrandt, A. 1991a: Computations of oxygen fluxes through the sea surface and the net production of organic matter with application to the Baltic and adjacent Seas. *Limnol. Oceanogr.*, 36, 444-454.
- Stigebrandt, A. & Aure, J., 1989: Vertical mixing in the basin waters of fjords. *J. Phys. Oceanogr.*, 19, 917-926.
- Stigebrandt, A. og J. Molvær, 1990: Undersøkelse av eutrofiering i Grenlandsfjordene 1988-89. Delrapport 2. Modell for miljøeffekter fra utslipp av næringssalter, oppløst og partikulært materiale. NIVA Rapport Nr. 2534. 74 sid.
- Stigebrandt, A. og J. Molvær, 1991: Undersøkelse av eutrofiering i Grenlandsfjordene 1988-89. Delrapport 6. Modellberegninger av miljøeffekter i Langesundsfjorden - Eidangerfjorden. NIVA Rapport Nr. 2692. 59 sid.

---

**NIVA**



**Norsk institutt for vannforskning**

Postboks 173 Kjelsås, 0411 Oslo

Telefon: 22 18 51 00 Fax: 22 18 52 00

ISBN 82-577-2557-9