



# Rapport 477|91

Oppdragsgiver

Statens forurensningstilsyn

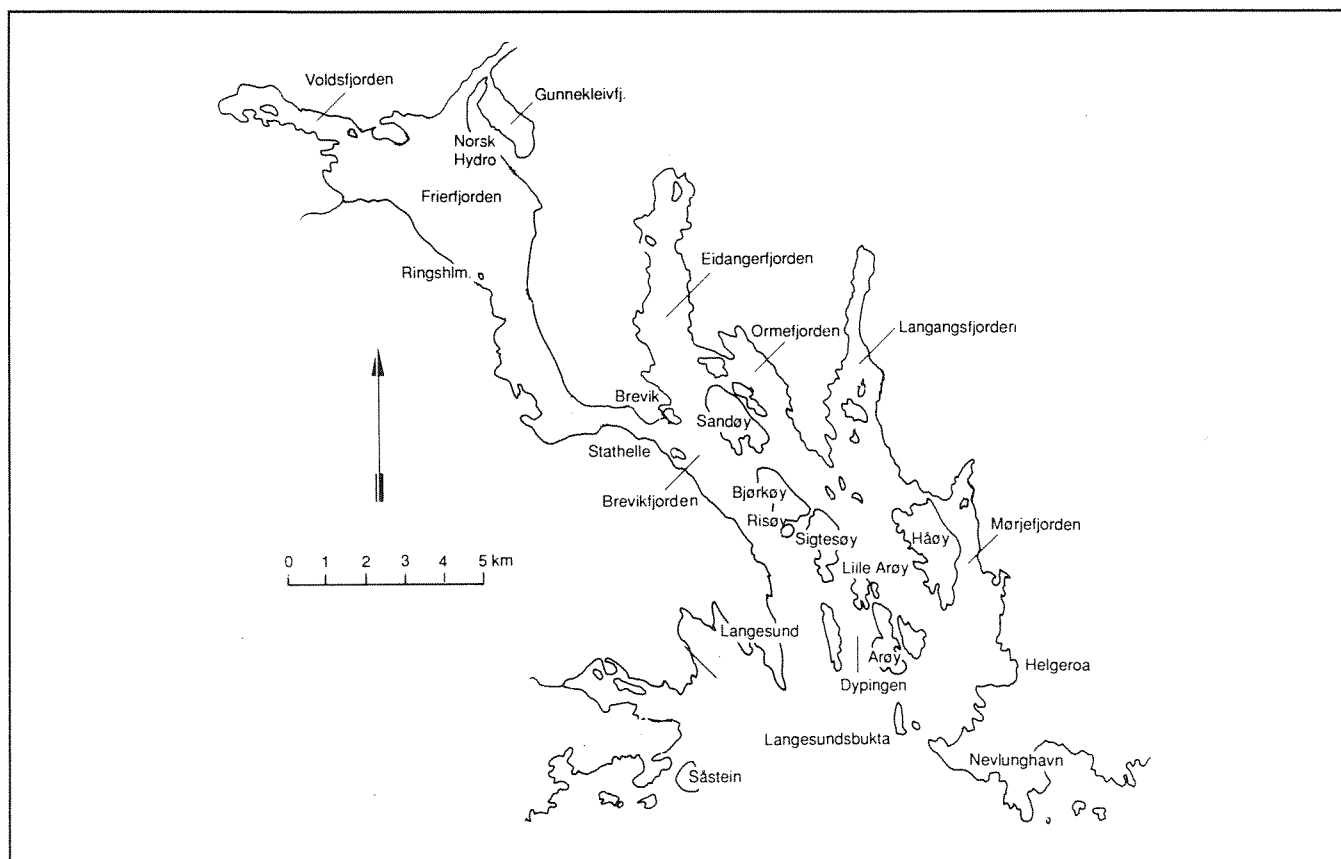
Utførende institusjoner

NIVA,  
Ancylus

## Undersøkelse av eutrofiering i **Grenlandsfjordene** 1988-89

### Delrapport 7:

### Modellberegninger av miljøeffekter i Ormefjorden



# NIVA - RAPPORT

Norsk institutt for vannforskning



NIVA

Prosjektnr.:	Undernr.:
O-800378	
Løpenr.:	Begr. distrib.:
2691	

<b>Hovedkontor</b> Postboks 69, Korsvoll 0808 Oslo 8 Telefon (47 2) 23 52 80 Telefax (47 2) 39 41 89	<b>Sørlandsavdelingen</b> Televeien 1 4890 Grimstad Telefon (47 41) 43 033 Telefax (47 41) 44 513	<b>Østlandsavdelingen</b> Rute 866 2312 Ottestad Telefon (47 65) 76 752 Telefax (47 65) 78 402	<b>Vestlandsavdelingen</b> Breiviken 5 5035 Bergen - Sandviken Telefon (47 5) 95 17 00 Telefax (47 5) 25 78 90	<b>Akvaplan-NIVA AVS</b> Søndre Tollbugate 3 9000 Tromsø Telefon (47 83) 85 280 Telefax (47 83) 80 509
--	---	--	--	--

Rapportens tittel: Undersøkelse av eutrofiering i Grenlandsfjordene 1988 - 89 Delrapport 7 Modellberegninger av miljøeffekter i Ormefjorden	Dato: 20/11-91 Trykket: NIVA 1991
Forfatter(e): Anders Stigebrandt, Ancylus Jarle Molvær, NIVA	Faggruppe: Marinøkologi
	Geografisk område: Telemark
	Antall sider: 53 Opplag: 130

Oppdragsgiver: Statens forurensningstilsyn (SFT) (Overvåkingsrapport nr. 477/91. TA 812/91)	Oppdragsg. ref. (evt. NTNF-nr.):
---	----------------------------------

**Ekstrakt:**

Det er anvendt en matematisk modell for Grenlandsfjordene som beskriver hvordan mengden av planteplankton og siktedyp i overflatelaget, samt oksygenforhold i dypvannet påvirkes av utslipp av fosfor og oppløst og partikulært organisk materiale til Frierfjorden. Modellen er oppbygget av generelle beskrivelser av fysiske og biokjemiske prosesser. Noen få konstanter er kalibrert mot måledata fra fjordområdet.

Tilførsler av fosfor fra Frierfjorden via Langesundsfjorden til Ormefjorden skjer i hovedsak som fosfat og fosfor bundet til brakkvannsplankton. Effekten av denne tilførselen er forholdsvis liten mht. midlere siktedyp og sedimentering av organisk materiale i dypvannet. En halvering av fosfortilførselen til Frierfjorden vil imidlertid omtrent halvere konsentrasjonen av planteplankton i overflatelaget under store planktonoppblomstringer og dermed gi klart bedre siktedyp i slike situasjoner. Redusert tilførsel av oppløst farget materiale gjennom brakkvann fra Frierfjorden vil også klart forbedre siktedypet. På den annen side kan større siktedyp medføre en mindre økning i oksygenforbruket i dypvannet, men i praksis er dette usikkert pga. stor innflytelse fra nabofjordene.

4 emneord, norske

1. Overvåking
2. Ormefjorden
3. Vannkvalitetsmodell
4. Næringssalter

4 emneord, engelske

1. Monitoring
2. Ormefjord
3. Water quality model
4. Nutrients

Prosjektleder

  
Jarle Molvær

For administrasjonen

  
Torgeir Bakke

ISBN 82-577 -2042-9

NORSK INSTITUTT FOR VANNFORSKNING  
OSLO

O-800378

UNDERSØKELSE AV EUTROFIERING I GRENLANDSFJORDENE 1988-89

DELRAPPORT 7

MODELLBEREGNINGER AV MILJØEFFEKTER I ORMEFJORDEN

Gøteborg/Oslo, 20/11 1991

Anders Stigebrandt, Ancylus  
Jarle Molvær, NIVA

## FORORD

Foreliggende rapport inngår i en undersøkelse av eutrofiering i Grenlandsfjordene, som er en del av den tiltaksorienterte overvåking av dette fjordområdet. Overvåkingen inngår i Statlig program for forurensningsovervåking, som administreres av Statens forurensningstilsyn (SFT). Undersøkelsene finansieres av den lokale industrien (Hydro Porsgrunn, Hydro Rafnes, Elkem PEA A/S, Union A/S, Statoil) og SFT. Deler av eutrofiundersøkelsen er også finansiert av NIVAs egne forskningsmidler.

Prosjektet startet vinteren 1988 etter inngående drøftelser i Kontaktutvalget for overvåking av Grenlandsfjordene og Skienselva. Prøveinnsamlingen ble avsluttet høsten 1989.

Prosjektet er todelt, og omfatter både utvikling av en dose-respons modell, og feltundersøkelser som skal ajourføre kunnskapen om tilstanden i fjordområdet og gi datainput til modellen. Prosjektet har således omfattet undersøkelser av :

- Forurensningstilførsler (rapportert 1989)
- Vannutskiftning i fjordene (rapportert 1991)
- Biomasse og suspendert stoff i overflatelaget (rapportert 1991)
- Næringssalter og begrensende faktorer for algevekst (rapportert 1991)
- Gruntvannssamfunn (rapportert 1991)
- Organisk belastning og oksygenforhold i dypvannet (rapportert 1991)
- Bløtbunnsfauna i Håøyfjorden (rapportert 1989)
- Siktedyp og optiske størrelser i Skienselva (rapportert 1991)

Utvikling av dose-responsmodeller omfatter utvikling av modeller for næringssaltkonsentrasjon, siktedyp og oksygenforhold i Friierfjorden, Langesund -Eidangerfjorden, Ormefjorden og Håøyfjorden. Den foreliggende rapport omhandler Ormefjorden basert på beregningsresultater fra en modell for tilstanden i samtlige fjorder i Grenland.

I tillegg vil det bli utarbeidet en konklusjonsrapport med en sammenfattende vurdering eutrofitilstanden, og med anbefalinger om tiltak/prediksjon av effekter.

Professor Anders Stigebrandt, Gøteborg, har forestått utarbeidelse av modellen. Jarle Molvær, NIVA, har hatt ansvar for innsamling og tilrettelegging av data for kalibrering av modellen, samt prosjektledelse. Ved NIVA har fagassistentene Unni Efraimsen og Frank Kjellberg hatt ansvar for oppfølging av lokalt feltarbeid, primær databearbeidelse og datapunching.

# INNHALDSFORTEGNELSE

	Side
FORORD .....	1
KONKLUSJONER .....	3
1. INNLEDNING .....	5
2. BESKRIVELSE AV ORMEFJORDEN .....	7
2.1 Bakgrunnsdata .....	7
2.2 Oseanografiske forhold .....	8
3. MODELLBEREGNINGER .....	12
3.1 Bruk av data for initialtilstand og drivning av modellen .....	12
3.2 Simulering av nåværende forhold .....	14
4. SIMULERING AV FORHOLDENE MED REDUSERTE UTSLIPP TIL FRIERFJORDEN	20
4.1 Forutsetninger .....	20
4.2 Resultat .....	20
5. KONKLUSJONER .....	24
6. REFERANSER .....	26
7. FIGURER TIL KAPITTEL 2 OG 3 .....	27
APPENDIKS: Grenlandsfjordmodellen .....	45

## KONKLUSJONER

1) Modellen synes å beskrive fysisk sirkulasjon og biokjemisk omsetning i hele vannsøylen på en tilfredsstillende måte. Saltholdighet, temperatur og de fleste av øvrige tilstandsvariabler er tilfredsstillende simulert. Beregnede konsentrasjoner av marint plankton er høyere enn hva som ble observert. Dette skyldes trolig manglende eller altfor glisne observasjoner i tid og rom og/eller at modellen ikke inkluderer beiting på planteplankton.

2) Fosforbudsjettet for perioden 10 mars - 24 september 1988 viser relativ stor tilførsel av uorganisk fosfor (fosfat) fra Frierfjorden via Eidangerfjorden.

Fra Eidangerfjorden tilføres også fosfor bundet til brakkvannsplankton som i hovedsak eksporteres videre til Håøyfjorden. Pga. lav synkehastighet er det bare en liten del av brakkvannsplankton som synker ned i Ormefjordens dypvann.

Det er stor nettoproduksjon av marint plankton i fjorden, samt nettoimport fra Håøyfjorden. En tilsvarende mengde plankton synker ned til fjordens eget dypvann og bunnsediment.

3) Tilførselen av fosfor, hovedsakelig via Eidangerfjorden, betyr forholdsvis lite både for midlere siktedyp og for fluksen av marint organisk materiale ned i bassengvannet. Fosfortilførselen synes imidlertid å være begrensende for produksjonen av plankton i overflatelaget. En minskning av fosfortilførselen kan derfor vesentlig forbedre minimale siktedyp som opptrer ved intense planktonblomstringer i overflatelaget slik at f.eks. en halvering av fosfortilførselen til Frierfjorden for slike situasjoner vil omtrent halvere den maksimale planktonkonsentrasjonen i Ormefjordens brakkvannslag.

4) En reduksjon av tilførselen av farvet oppløst organisk materiale vil gi klart forbedret siktedyp. Et økt siktedyp vil imidlertid ikke gi opphav til en økt konsentrasjon av marint plankton i 5 - 15 m dyp i det intermediære laget.

5) Modellsimuleringene viser at vannkvaliteten i bassengvannet (oksygenforholdene) ikke er følsom for en forbedring av vannkvaliteten i overflatelaget (større siktedyp). Årsaken til dette er at Ormefjorden er en liten del av et større fjordkompleks og innflytelsen fra Håøyfjorden er bestemmende mht. forholdene i bassengvannet.

6) Modellsimuleringene viser at det er en stor import av nærings-salter og farvet oppløst organisk materiale samt brakkvannsplankton fra Eidangerfjorden. Hvis denne transporten reduseres vil forholdene i Ormefjordens overflatelag bli forbedret.

7) Erfaringene med modellen viser klart at det er meget viktig å ha tilgang til data med god nøyaktighet og dekning for drivning og test av modellen. Fra arbeidet med modellen kan vi konkludere at stor usikkerhet knytter seg til nedbrytingsrater, kjemisk sammensetning og optiske egenskaper av antropogent partikulært og oppløst materiale. Det er også usikkerhet omkring konsentrasjonene av planteplankton og hvor mye beiting påvirker disse.

## 1. INNLEDNING.

En målsetting med prosjektet "Undersøkelse av eutrofiering i Grenlandsfjordene" er å beskrive sammenheng mellom næringssaltutslipp til Frierfjorden og eutrofiering både i Frierfjorden og i fjordområdet utenfor Brevik. Spesielt skal beskrives sammenheng mellom tilførsel av næringssalter og siktedyp og klorofyll *a* i overflatelaget respektive oksygenforhold i dypvannet. Eksporten av næringssalter til kystvannet skal også kvantifiseres.

For hver av hovedbassengene i Grenlandsfjordene blir det utgitt en separat rapport. Frierfjorden og den brukte matematiske grunnmodellen er beskrevet i delrapport 2. Langesundsfjorden - Brevikfjorden - Eidangerfjorden er beskrevet i delrapport 6 og Håøyfjorden i delrapport 8.

Til beregningene har vi brukt en modell som beregner forholdene i alle fjordbasseng i Grenlandsfjordene til samme tid. Modellen er oppbygget av sammenkoblede modeller av samme type (grunnmodellen) som ble brukt for Frierfjorden. Grunnmodellen og det som er spesielt for den koblede modellen er beskrevet i Appendiks til denne rapporten.

For hver enkelt delrapport blir de oseanografiske forholdene beskrevet med hovedvekt på forholdene under intensivundersøkelsen i april - august 1988. Denne ble gjennomført for å innhente data til modellutviklingen og en tilstandsbeskrivelse for fjordområdet under intensivundersøkelsen presenteres i kap. 2.2.3. Resultatene fra modellberegningene av nåværende forhold samt sammenligninger med observerte forhold (modelltest) er presentert i kap. 3. I kap. 4 presenteres beregninger av fremtidige forhold i fjordområdet etter det at ulike begrensninger er foretatt av utslippene til Frierfjorden. Rapporten avsluttes med konklusjoner i kap. 5.



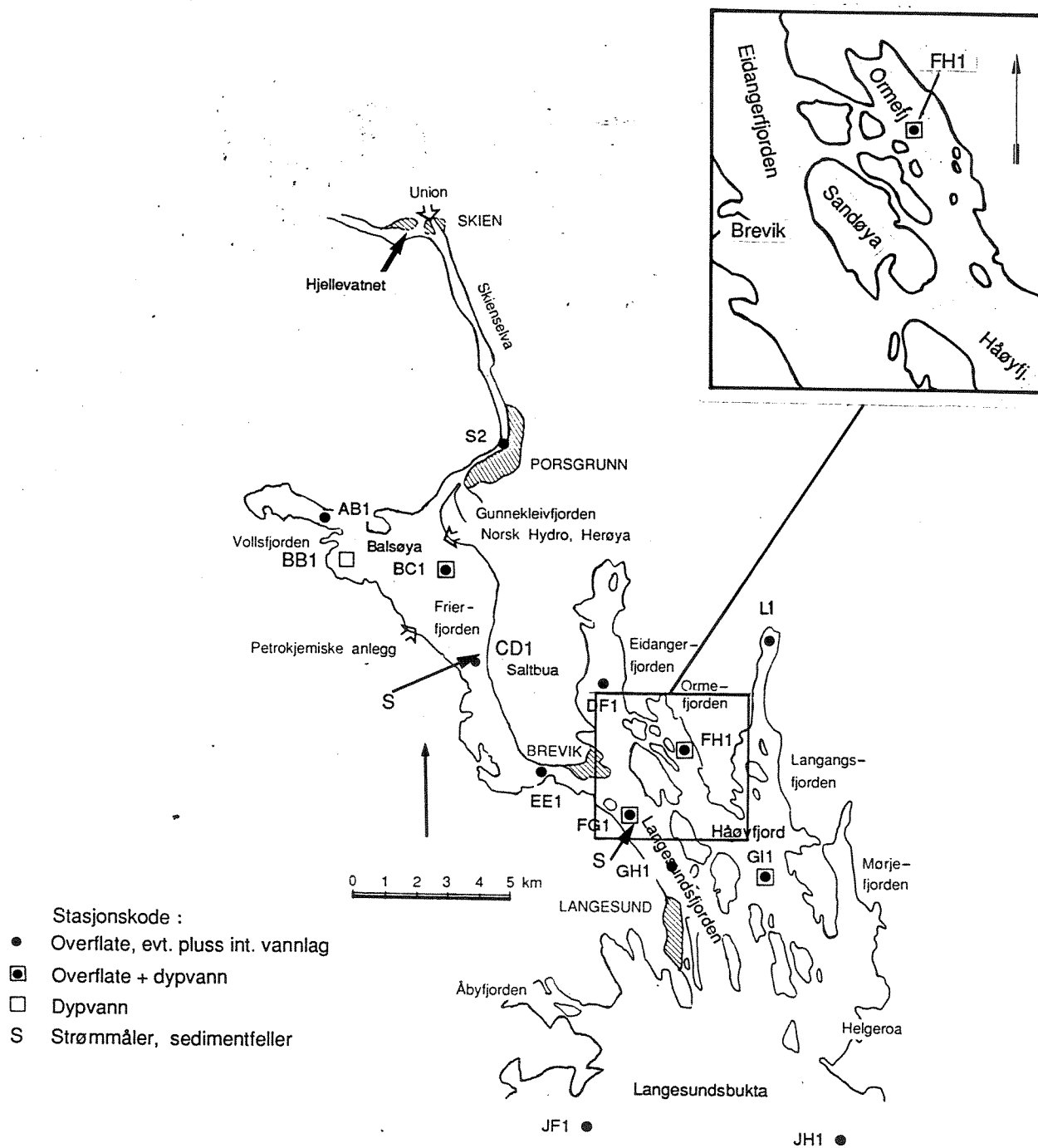


Fig. 2.1 Kart over Grenlandsfjordene med innregnede prøvetakingsstasjoner.

## 2. BESKRIVELSE AV ORMEFJORDEN.

### 2.1 Bakgrunnsdata.

Fjordens areal og volum i ulike dyp er gitt i Tabell 2.1. Over terskeldypet har området god forbindelse med Håøyfjorden (sund 5), se kart i Fig. 2.1 og Tabell 2.2. Fjorden har også en trang og grunn forbindelse med Langesundsfjorden - Eidangerfjorden (sund 3).

Tabell 2.1 Ormefjordens areal og volumforhold i ulike dyp.  
Volumet er vannets volum under angitt dyp.

dyp (m)	areal (km <sup>2</sup> )	volum (km <sup>3</sup> )
0	2.01	0.0472
10	1.50	0.0297
20	1.14	0.0165
30	0.62	0.0077
40	0.32	0.0030
50	0.16	0.0006
57	0	0

Tabell 2.2 Terskeldyp, bredde ved havoverflaten og areal av sundene til Ormefjorden.

sund (nr)	terskeldyp (m)	bredde ved havoverfl. (m)	areal (m <sup>2</sup> )
3	10	80	440
5	20	500	4950

Tilførselen av ferskvann til Grenlandsfjordene er helt dominert av tilførselen fra Skienselva (ca. 60 - 1000 m<sup>3</sup>/s) via Frierfjorden

og Breviksundet. En mere detaljert beskrivelse av topografi og ferskvannsavrenning finner en i Molvær og Stigebrandt (1991). Dominerende mengder av næringssalter fra avrenning fra land og industri kommer likeledes fra Frierfjorden og de lokale bidrag er svært små sammenlignet med disse, se Ibrekk og Gulbrandsen (1989).

## 2.2 Oseanografiske forhold.

### 2.2.1 Lagdeling og vannmasser.

En kan dele opp Ormefjordens vann i tre forskjellige vannmasser, se Fig. 2.2. Nærmest havoverflaten er et brakkvannslag. Den ofte store ferskvannstilførselen fra Skienselva danner et brakkvannslag av varierende tykkelse og saltholdighet i alle Grenlandsfjordene. I

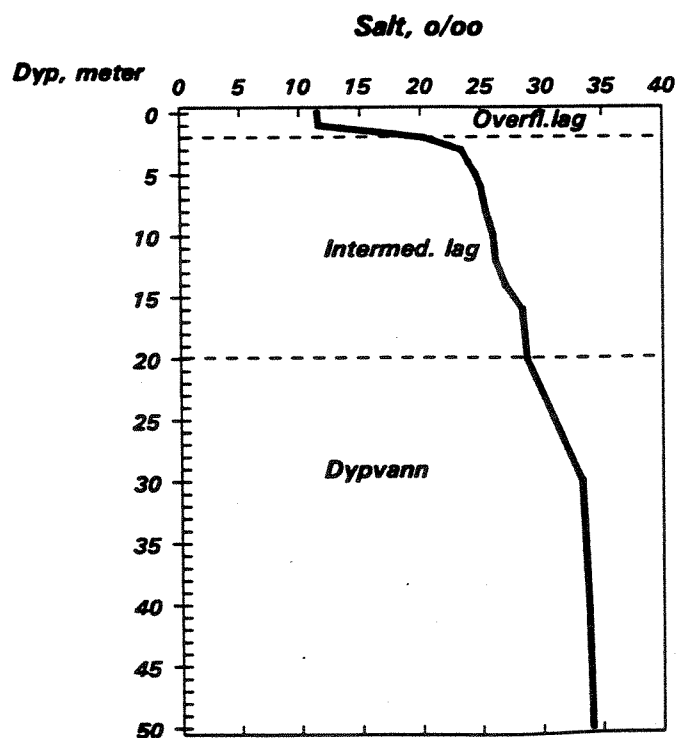


Fig. 2.2 Ormefjordens vannmasser - prinsippskisse.

Ormefjorden er laget ofte 2-3 m tykt og med saltholdighet i intervallet 6-20 (psu). Brakkvannslaget inneholder ofte høye konsentrasjoner av næringssalter, spesielt av nitrogenforbindelser, fra

utslippene til Frierfjorden. Laget er noe misfarvet av utslipp av oppløst og partikulært materiale til Frierfjorden, men langt mindre enn i Frierfjorden.

Under brakkvannslaget og ned til straks under terskeldypet mot Håøyfjorden finner en det intermediære laget. Dette laget ventileres effektivt, først og fremst gjennom vertikale fluktuasjoner i tetthetsfeltet i Håøyfjorden. Disse er i sin tur drevet av tetthetsfluktuasjoner i Langesundsbukta. Oppholdstiden er anslått til å være av størrelsesorden 5 dager (se Molvær og Stigebrandt, 1991). Dette stemmer godt med beregnede resultat presenterte i denne rapporten (kap. 3.2.1).

Under terskeldypet mot Håøyfjorden finner en basseng- eller dypvannet. Vannet over 40 m ble delvis fornyet i både 1988 og 1989. Under dette dyp var det hydrogensulfid i 1988-89. Det er ikke kjent hvor ofte dette vannet blir fornyet. I Molvær & Stigebrandt (1991) ble oppholdstiden for dypvannet anslått å være 1-3 år.

#### 2.2.2 Tidligere undersøkelser

Det har ikke tidligere vært gjennomført undersøkelser i Ormefjorden.

#### 2.2.3 Undersøkelsene i 1988

##### 2.2.3.1 Måleprogram.

I tidsrommet 24 april - 24 august 1988 utførte NIVA omtrent ukentlig målinger i og utenfor Grenlandsfjordene, se Fig. 2.1. I tillegg ble det utført målinger hver måned i terskelbassengene og i nedre del av Skienselva. Følgende tilstandsvariabler ble målt ved ukemålingene: salinitet, temperatur, tot-P,  $PO_4$ -P, tot-N,  $NO_3$ -N,  $NH_4$ -N, klorofyll a og siktedyp. For å få en god beskrivelse av forholdene i overflate-laget og i det intermediære laget ble saltholdighet og temperatur målt med såkalt salinoterm i hver meter ned til 10 m og i annenhver meter deretter ned til 20 m. Deretter var måletettheten 5 m ned til terskeldypet. De øvrige tilstandsvariablene ble målt i 0-2, 8 og 20 m dyp, se Källqvist (1990). Ved målingene hver måned i terskelbassengene ble det

i Ormefjorden tatt vannprøver fra 30, 40 og 50 m dyp. Disse ble analysert mht. saltholdighet, temperatur og oksygen. De øvrige tilstandsvariablene ble bestemt for 30 og 50 m dyp.

De oseanografiske målinger som ble foretatt i og utenfor fjordsystemet skal brukes på to måter. Målingene i Langesundsbukta skal brukes for å beregne transporter mellom kystvannet og fjordene. Målingene inne i fjordsystemet skal brukes for å teste modellen. Bl.a. for å få med en større dypvannsutsiftning som skjedde i midten av april velger vi å simulere perioden 10 mars - 24 september 1988. Denne perioden, som slik strekker seg utenfor det ukentlige måleprogrammet, vil vi i det følgende benevne testperioden.

#### 2.2.3.2 Forhold i og resultater fra Ormefjorden.

Saltholdighetsobservasjonene (Fig. 3.4a) viser et markert sprangsjikt på 2-3 m dyp. I det intermediære laget var det innstrømning av salttere og derved tyngre vann i månedsskiftet april - mai og i slutten av juni. Flere innstrømninger av vann med forholdsvis lav saltholdighet (overflatevann fra Skagerrak) forekom i perioden. Det innstrømmende lettere vannet i begynnelsen av juli var forholdsvis varmt og opptrer som en meget markert temperaturfront (Fig. 3.5a).

Det var høye konsentrasjoner av nitrat (Fig. 3.9a) i brakkvannslaget under hele perioden, med maksimum i forbindelse med vårflommen i Skienselva og lave saltholdigheter i mai og minimum i forbindelse med lav vannføring i Skienselva og stor planktonoppblomstring i siste halvdel av august. Det var relativt høy ammoniumkonsentrasjon i brakkvannslaget i forbindelse med vårflommen (Fig. 3.10a). Fosfatkonsentrasjonene var lave i 0-2 og 8 m dyp fra slutten av mars og til slutten av testperioden (Fig. 3.6a). En meget høy verdi (53  $\mu\text{g/l}$ ) i 8 m dyp i slutten av mai avvek mye fra det normale.

Klorofyllmålingene, presentert i Fig. 3.7a, viser maksimum under overflatelaget i slutten av april. I overflatelaget opptrådte maksima i slutten av juni og i begynnelsen av juli samt i slutten av august. I august og september skjedde oppblomstring av dinoflagellater. Denne oppblomstringen er podet av en blomstring i kystvannet, se

Källqvist (1990).

Bassengvannet var stort sett stagnant i hele perioden (Fig. 3.13a - 3.18a). Oksygenplottet (Fig. 3.15a) viser dog at en mindre innstrømning i tidsrommet 25 mars - 20 april ga forbedrete oksygenforhold på 40 m dyp. På 50 m dyp var det hydrogensulfid i hele perioden og høye konsentrasjoner av fosfat (Fig. 3.16a) og ammonium (Fig. 3.18a) samt ingen nitrat (Fig. 3. 17a).

### 3. MODELBEREGNINGER

Grunnmodellen og det som er spesielt for den koplede modellen er beskrevet i Appendix til denne rapporten. Modellen har simulert dels nåværende utslippsforhold (1988) og dels forhold med reduserte utslipp. Vi starter med å kort beskrive hvordan modellen er dreven av ytre forhold. Deretter presenteres modellresultatene for nåværende utslippsforhold. I kap. 4 presenteres modellresultatene for simuleringer med reduserte utslipp.

#### 3.1 Bruk av data for initialtilstand og drivning av modellen.

De initiale vertikale fordelingene av tilstandsvariablene i vannsøylen i Ormefjorden er tatt fra målingene 10 mars som er startdag for simuleringene (testperioden). Initialverdiene av tilstandsvariablene i bunnsedimentet er ukjente. I modellen finnes to typer organisk materiale på og i bunnsedimentet. Dels lett nedbrytbar fersk marint organisk materiale (plankton) og dels tungt nedbrytbar ikke-marint materiale med en antatt halveringstid på titalls år, se Stigebrandt & Molvær (1990). I reelle bunnsediment finnes i tillegg til disse fraksjoner også organisk materiale med mye lengre halveringstid. Materiale med lang halveringstid blir anrikt i bunnsedimentet slik at sammensetningen av organisk materiale i bunnsedimentet blir annerledes enn sammensetningen av nedsynkende organisk materiale. Det foreligger ingen målinger av organisk materiale i Ormefjordens bunnsediment.

Initiale konsentrasjonen av ikke-marint organisk materiale i bunnsedimentet med halveringstid på titalls år er ved modellberegningene vilkårlig satt lik  $100 \text{ g C m}^{-2}$ . Konsentrasjonen av ferskt dødt samt levende marint organisk materiale i bunnsedimentet er satt lik henholdsvis 7 og  $1 \text{ g C m}^{-2}$ .

Modellen er dreven av døgnmiddel av observerte meteorologiske forhold ved Langøytangen fyr og av observert ferskvanns- og næringssalttilførsel fra land, se delrapport 2 om Frierfjorden (Stigebrandt og Molvær, 1990). Nytt for denne modellsimulering (sammenlignet med den i delrapport 2) er at vi nå bruker de oppgitte daglige utslippene av

nitrat, ammonium og fosfat fra Hydro Porsgrunn. Vi har også endret utslippet av nitrat fra Skiensvassdraget fra 2300 til 2800 tonn/år, noe som tilsvarer målt midlere konsentrasjon på ca 250  $\mu\text{g/l}$  på stn. S2 i 1988.

Foreliggende koplede modell er drevet av de observerte forhold på stasjon JH1 i Langesundsbukta, se Fig. 3.1 - 3.3. Ved de ukentlige observasjonene ble samtlige variabler unntatt salinitet og temperatur bare observert ned til 20 m dyp (målinger burde ha blitt tatt ned til største terskeldyp). Dette gjelder således også klorofyll, som brukes for å beregne konsentrasjonene av marint plankton. Vi har derfor vært nødt å anta konsentrasjonene for dyp større enn 20 m. Dette innebærer selvfølgelig økt usikkerhet i beregningsresultatene. Observasjonene var glisne før og etter intensivperioden (21 april - 24 august) og vi fikk derfor ingen representative observasjoner av bl.a.

vår oppblomstringen. For konsentrasjonene i kystvannet under 20 m har vi derfor tilpasset et profil for vertikale fordelingen av marint plankton slik at profilet går gjennom den målte verdien  $\text{Chl}(20)$  på 20 m, jf. Aure & Stigebrandt (1990). Målt som klorofyll,  $\text{Chl}$  [ $\mu\text{g/l}$ ], er fordelingen under 20 m dyp beskrevet av eksponentialfunksjonen  $\text{Chl} = \text{Chl}(20)e^{-(z-20)/50}$ , hvor  $z$  er dypet. For trefiber og brakkvannsplankton har vi satt konsentrasjonene i Langesundsbukta lik null. For oksygen, som ikke ble målt i Langesundsbukta, har vi satt konsentrasjonen lik metningsverdien i vannsøylen over 30 m og 85% av metningsverdien dypere ned.



### 3.2 Simulering av nåværende forhold.

For å forenkle en sammenligning presenterer vi modellresultatene og den målte tilstanden i isopletdiagrammer for hver enkelt variabel på samme side (i kap. 7). Vi vil dels presentere fordelinger i tiden for intervallet 0-22m (overflatelag og øvre intermediært lag) og dels fordelinger for hele vannmassen. For konstruksjon av isopletdiagrammer av modellresultatene har vi brukt beregnede data for annen- hver dag og med høy vertikal oppløsning. Isopletdiagrammene for den målte tilstanden er basert på, unntatt salinitet og temperatur ned til terskeldyp, bare noen få målepunkter i hver vertikal. I de øvre vannlag er vertikale tatt omtrent ukentlig og i terskelbassengene med ca. 1 måneds mellomrom. Dette kan være årsak til endel avvik mellom observerte og beregnede tilstand.

#### 3.2.1 Overflatelag og øvre intermediære lag.

Fig. 3.4 og 3.5 viser observert og beregnet saltholdighet og temperatur i 0-22 m i Ormefjorden. Det er store likhetstrekk mellom beregnede og observerte felt. Den beregnede innstrømmingen av salt vann i begynnelsen av april ble ikke observert i Ormefjorden siden det ikke ble målt på dette tidspunktet. Beregnet temperatur er altfor lav på 20 - 22 m dyp i august og september. Dette skyldes at vi måtte høye terskelen fra 26 til 20 m som diskutert i kap. 3.1 ovenfor. Det beregnede sprangsjiktet på 1-3 m dyp er skarpere enn det observerte. Dette skyldes hovedsakelig at blandingen simuleres på en forenklet måte i modellen.

Midlere vannutskiftning gjennom sundene er vist i Tabell 3.1.

Isopletdiagram av strømhastighet i de to sundene er vist i Fig. 3.11 og 3.12. En kan notere fra Fig. 3.11 at strømmen i overflatelaget i sund 3 stort sett hele perioden er rettet fra Eidangerfjorden til Ormefjorden. Denne strømmen transporterer vann med lav saltholdighet og høye nærsaltkonsentrasjoner til Ormefjorden.

Midlere innstrømning av vann til Ormefjorden, gjennom sund 5, er beregnet å være  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ . Gjennom sund 3 er beregnet midlere

innstrømning 25 m<sup>3</sup>/s. Basert på den sammenlagde vannutskiftningsraten er midlere oppholdstid for vannet over terskeldypet i Ormefjorden ca 3 dager, se også Molvær og Stigebrandt (1991). Midlere oppholdstid for overflatelaget, 0 - ca. 3 m, er formodentlig omtrent densamme som for det intermediære laget siden fjorden savner egen estuarin sirkulasjon av betydning. Oppholdstiden for overflatelaget er trolig følsom for vindretningen. Spesielt ved vind fra syd kan overflatelaget sannsynligvis bli liggende i indre deler av fjorden i lengre perioder.

Tabell 3.1 Midlere vannutveksling (m<sup>3</sup>/s) gjennom sund 3 = forbindelsen med Eidangerfjorden og sund 5 = forbindelsen med Håøyfjorden. Utstrømning fra Ormefjorden er betegnet negativ.

	sund 3	sund 5	Sum
Inn	25	99	124
Ut	-17	-107	-124
Netto	8	-8	0

Fig. 3.6 viser observert og beregnet fosfatkonsentrasjon. Beregningene og observasjonene viser generelt lave konsentrasjoner i øvre vannlag under større del av perioden. Den høye konsentrasjon som ble observert i slutten av mai på 8 m dyp finnes ikke i beregningene. Ved sammenligning mellom målt og beregnet konsentrasjonsutvikling må en ta i betraktning at det er mye høyere oppløsning i modellen enn ved målingene. Dette gjelder både oppløsningen i tiden og vertikalt.

Fig. 3.8a og b viser beregnet klorofyll i marint plankton og i brakkvannsplankton og Fig. 3.7b viser summen av disse. Konsentrasjonene av brakkvannsplankton er generelt mye lavere enn konsentrasjonene av marint plankton. For brakkvannslaget viser observert klorofyll (Fig. 3.7a) maksima i slutten av april, i juli og i slutten av august. Modellen gir maksima av brakkvannsplankton i slutten av juni og i juli (Fig. 3.8a) samt maksima av marint plankton i april og

september. Under brakkvannslaget og ned til 20 m dyp beregner modellen seks maksima fordelt på perioden april til september. Sammenlignet med målingene gir modellen altfor høye planktonkonsentrasjoner, særlig for marint plankton. En interessant forskjell mellom blomstringene ser ut å være at noen er hovedsakelig lokal og noen ser ut å være stort sett importert. Den lokale karakteren av en blomstring viser seg gjennom at det samtidig er stor overmetning med oksygen (Fig. 3.8c). Blomstringen med maksimum i september ser ut å være importert fra Langesundsbukta og Håøyfjorden der det var meget høye klorofyllkonsentrasjoner i slutten av august (Fig. 3.2b). Denne konklusjon støttes av oksygenberegningene (Fig. 3.8c) som ikke viser noen tilsvarende økning av oksygenmetningen.

At modellen generelt beregner høyere planktonkonsentrasjoner enn det som ble målt kan ha flere forklaringer. En forklaring kan være at en fundamental prosess, som ikke finnes med i modellen, er betydningsfull i fjorden. Vi tror at beiting på planteplankton kan være av betydning men kan på nåværende tidspunkt ikke kvantifisere effekten av denne da ingen målinger av dyreplankton foreligger for testperioden. En annen forklaring til avviket mellom observerte og beregnede planktonkonsentrasjoner kan være at plankton kan være konsentrert til relativt tynne lag og begrensede områder ("patcher") og derved unngår å bli oppfanget gjennom ukentlige målinger i bare tre dyp. Dette måleproblem gjelder selvfølgelig også målingene i Langesundsbukta og derved inndata til modellen. Til sist kan vi fastslå at hvis vi hadde målinger av oksygen i fotisk sone ville det være mulig å redusere usikkerheten om planteproduksjonen gjennom sammenligning med beregnet oksygenkonsentrasjon.

Fig. 3.9 og 3.10 viser utvikling av nitrat og ammonium. En sammenligning viser at det er relativ god overensstemmelse mellom modellberegninger og observerte verdier slik at overflatelaget viser forhøyete konsentrasjoner i hele perioden. Dette er forårsaket av import fra Frierfjorden via Langesunds - Brevikfjorden. Generelt er observerte konsentrasjoner høyere enn beregnede i det intermediære laget. Dette kan muligens forklares av stort nitrogenforbruk i forbindelse med den intense planktonblomstringen i modellen.

### 3.2.2 Dypvannet

Modellen viser utvikling av samtlige variabler som er i tråd med observasjonene. I modellen var det en mindre innstrømming av nytt vann i begynnelsen og midten av april. Innstrømmingen penetrerte imidlertid bare ned til ca 35-40 m dyp. Dette er mest tydelig i temperaturplottet (Fig. 3.15b). Deretter er det stagnante forhold i bassengvannet. Slike forhold karakteriseres av minskende saltholdighet grunnet vertikal omblending. Under den stagnante perioden minsker konsentrasjonen av oksygen (for oksygenfrie forhold øker konsentrasjonen av hydrogensulfid) og konsentrasjonen av plantenæringsalter øker.

I perioden juli til september økte temperaturen i øverste del av dypvannet mindre i modellen enn observert. En forklaring til dette er, som allerede nevnt ovenfor, at terskelen mot Håøyfjorden ble hevet ved modellberegningene.

Modellen beregner også tidsutviklingen av konsentrasjoner av bunndyr og dødt marint organisk materiale (ferskt) på bunn. For disse variablene finnes ikke målinger for sammenligning mellom beregnede og observerte verdier.

### 3.2.3. Fosforbudsjett for Ormefjorden

I Tabell 3.2 presenteres det modellberegnete fosforbudsjettet for Ormefjorden for testperioden. Vi presenterer det totale lageret av fosfor knyttet til de ulike tilstandsvariablene ved slutten og ved begynnelsen av testperioden. Vi har også summert transportene gjennom de to sundene for testperioden og presenterer nettotransport inn i

Tabell 3.2. Fosforbudsjett for Ormefjorden. "Slutt" betegner fosforlageret ved slutten og "Start" lageret ved begynnelsen av beregningene. "Endr." (=Slutt-Start) er lagerendringen under beregningsperioden. "Mar. plank" = marint plankton, "Uorgan" = fosfat, "B. plank" = brakkevannsplankton, "Sedim." = bunnsediment (ferskt marint organisk materiale + gammel trefiber) og "Bent. dyr" = bentiske dyr. Alle tall er kg fosfor (P).

	Slutt	Start	Endr.	Eksport	Import	Imp - Eksp
Mar. plank	516	31	485	6392	7284	892
Uorgan.	2831	2280	551	6695	9120	2425
Trefiber	1	15	-14	97	106	9
B. plank	2	15	-13	947	907	-40
Sedim.	3226	1361	1865			
Bent. dyr	251	12	239			
Sum	6827	3714	3113			3286

og ut av Ormefjorden i kolonnene Import og Eksport. Total lagerendring under testperioden var 3113 kg og netto import var 3286 kg. Underskuddet på ca 170 kg P skal sees i relasjon til omsetningen av fosfor, som var ca 17400 kg, og må betegnes som uten betydning for modellresultatene. Fosforbudsjettet i Tab. 3.2 gjelder for produksjonssesongen (sommerhalvåret). For vinterhalvåret med lite biologisk produksjon vil en større del av importert uorganisk fosfor gå direkte ut i kystvannet via Håøyfjorden.

Fra Tabell 3.2 kan en se at Ormefjorden er nettoimportør av både uorganisk fosfor og fosfor bundet til marint plankton. Fra Tabell 3.3 ser en at den uorganiske fosforen importeres hovedsakelig fra Eidangerfjorden (via sund 3). Importen av marint plankton skjer hovedsakelig fra Håøyfjorden. Brakkvannsplankton importeres fra Eidangerfjorden og eksporteres til Håøyfjorden. Omsetingen av trefiber er ifølge beregningene meget ubetydelig. En bør imidlertid observere at beregningene av transport og omsetting av trefiber er meget usikre siden vi har vært nødt å anta vilkårlige egenskaper mht. fiberets synkehastighet og nedbrytingsrate i vannsøylen.

Tabell 3.3. Nettotransport av fosfor (kg) i ulike former for beregningsperioden gjennom sund 3 = forbindelsen med Eidangerfjorden og sund 5 = forbindelsen med Håøyfjorden. De ulike symbolene er forklart i Tabell 3.2.

	sund 3	sund 5	Sum
-----			
Mar. plank	-275	1167	892
Uorgan.	2531	-106	2425
Trefiber	33	-24	9
B. plank	269	-309	-40
-----			

En refleksjon som en kan gjøre er at hvis en kunne stenge av transporten gjennom sund 3 skulle Ormefjorden tilføres mindre av materiale knyttet til brakkvannslaget i Eidangerfjorden, deriblant uorganisk fosfor og oppløste antropogene organiske forbindelser.

## 4. SIMULERING AV FORHOLDENE MED REDUSERTE UTSLIPP TIL FRIERFJORDEN

### 4.1 Forutsetninger

Vi har beregnet midlere siktedyp  $D$ , midlere konsentrasjon av brakkvannsplankton BP i de øverste 5 m, midlere konsentrasjonen av marint plankton MP i dypintervallet 5 - 15 m samt midlere oksygenforbruk  $O_{2\text{kons}}$  under stagnante forhold i bassengvannet, under 30 m dyp, for fire ulike kombinasjoner av fosfortilførsel  $P$  og  $k_0$ -verdier.  $k_0$  er bidraget fra oppløste organiske antropogene stoffer til den vertikale svekningskoeffisienten for det fotosyntetisk aktive lyset, se sid. 43 i delrapport 2 (Stigebrandt & Molvær, 1990). Utslippet av de oppløste stoffene er ved modellberegningene de samme hver dag (konstant). For midlere vannføring i Skienselva ble det i delrapport 2 anslått at  $k_0=0.2$  under nåværende utslippsforhold (1988). Ved konstante utslipp blir  $k_0$  større for lav vannføring ( $Q$ ) og mindre for høy vannføring pga. fortynningen med ferskvannet i elva. Denne variasjon beskrives i modellen av faktoren  $250/Q$ . Det vil også være en fortykningseffekt grunnet innblanding av sjøvann (35 psu). Denne effekten beskrives i modellen av faktoren  $(35-S)/35$  hvor  $S$  er vannets salinitet. Vi vet ikke nedbrytingsraten for de oppløste antropogene stoffene. Ved modellberegningene har vi antatt at 55% av tilført mengde finnes igjen i Ormefjorden (45% har blitt nedbrutt på veien fra Frierfjorden).  $k_0$  for Ormefjorden blir slik beregnet fra følgende uttrykk:  $k_0=0.2 \times 0.55 \times (250/Q) \times (35-S)/35$ .

### 4.2 Resultat

Resultatene for de ulike kombinasjoner av fosforutslipp og utslipp av løst organisk stoff (uttrykt ved  $k_0$ -verdier) er gjengitt i Tab. 4.1 nedenfor. BP og MP har vi normalisert gjennom å dividere med konsentrasjonen i standardtilfellet (tilfelle nr. 1).

Tabell 4.1 Modellresultater for midlere siktedyp D, midlere konsentrasjoner av brakkvannsplankton BP og marine plankton MP samt midlere oksygenforbruk  $O_{2\text{kons}}$  i bassengvannet for fire ulike kombinasjoner av fosfortilførsler og  $k_o$ -verdier. Samtlige resultater er midlet over perioden 10/3 - 24/9 unntatt  $O_{2\text{kons}}$  som er midlet over perioden 5/7 - 24/9 (1988).

Tilfelle nr	P tonn/år	$k_o$ ( $m^{-1}$ )	D (m)	BP (%)	MP (%)	$O_{2\text{kons}}$ (ml/l/mnd)
1	93	0.2	7.0	100	100	0.32
2	47	0.2	7.2	39	96	0.28
3	93	0.0	7.9	107	99	0.38
4	47	0.0	8.2	42	95	0.31

Fra Tab. 4.1 ser en at en halvering av fosfortilførselen P (tilfelle 2) gir relativ små effekter på midlere siktedyp. Hvis derimot de farvede oppløste antropogene stoffene fjernes ( $k_o=0$ ) (tilfelle 3 og 4) fåes betydelige økninger i siktedypet. Modellsimuleringene viser altså at hvis en vil oppnå bedre siktedyp i Ormefjorden så må en i første rekke redusere utslippene av farvede oppløste forbindelser til Frierfjorden slik at  $k_o$  reduseres. Det bør påpekes at endel av den effekten vi tilskriver farvede oppløste organiske forbindelser kan være knyttet til partikulær materiale (fiber). Som allerede er nevnt har vi antatt at 45% av disse forbindelsene er blitt nedbrutt på veien til Ormefjorden. Det faktum at vi beregner større siktedyp enn som ble observert (jmf. Källqvist, 1991) peker i retning av at nedbrytningsraten for disse forbindelsene er lavere enn antatt. Følgelig kan effektene av disse stoffene i Ormefjorden være større enn beregnet (Tabell 4.1).

Resultatet ovenfor kan virke oppsiktsvekkende siden en allment har oppfattet planktonblomstringer i overflatelaget som en sterkt bidragende årsak til et redusert siktedyp i Grenlandsfjordene. En skal imidlertid bemerke seg at D i Tab. 4.1 er midlere siktedyp over en lang periode (~200 dager). Planktonoppblomstringer med stor amplitude



forekommer i overflatelaget bare under en liten del av denne perioden (se Fig. 3.7a) hvorfor bidrag fra disse til reduksjonen av D blir lite. Utslipp av farvet antropogen oppløst materiale pågår kontinuerlig og gir derfor et gjennomsnittlig større bidrag til reduksjonen av D.

Modellsimuleringene tyder på at det er en klar sammenheng mellom fosfortilførselen til overflatelaget og midlere konsentrasjon av brakkvannsplankton. Tilgangen til fosfor synes dermed å være begrensende for produksjonen av brakkvannsplankton, og en reduksjon av tilførselen med ca. 50% vil ifølge modellen redusere midlere konsentrasjon av brakkvannsplankton med ca. 60% (tilfelle 2 og 4). Selv om dette, ifølge resultatene ovenfor, ikke betyr så mye for midlere siktedyp D i Ormefjorden vil reduserte utslipp ha stor betydning for minimale siktedyp som opptrår ved kraftige oppblomstringer av plankton i overflatelaget. En reduksjon av fosforutslippene vil medføre en reduksjon av intensiteten av oppblomstringer av plankton i overflatelaget og derved fåes en økning av minimale siktedyp.

Overflatevannet i Frierfjorden får pga de antropogene utslippene en fosforkonsentrasjon på omlag  $15 \mu\text{g/l}$ . Summen av konsentrasjonene av uorganiske nitrogenforbindelser (nitrat og ammonium) er typisk 600 - 700  $\mu\text{g/l}$  (1988 års utslipp). Siden planteplankton krever N og P i vektsforholdet ca. 7 er slik nitrogen i stort overskudd og tilgjengelig fosfor vil sette et tak for maksimale planteproduksjonen. Hvis all fosfor omdannes til planteplankton skulle en forvente å få maksimale klorofyllkonsentrasjoner på  $15/0.7 = 21 \mu\text{g/l}$  siden forholdet klorofyll til fosfor er lik ca. 0.7 (se side 46 i Stigebrandt & Molvær, 1990). Slike høye klorofyllkonsentrasjoner ble observert 24 august 1988 i Ormefjordens overflatelag.

Hvis overflatevannet fra Frierfjorden blir liggende stagnant i avskjermede områder under en lengre tid, f.eks. i Ormefjorden, skulle en i slike tilfeller således forvente at planktonkonsentrasjonen målt som klorofyll kan gå opp imot  $20 \mu\text{g/l}$  med 1988 års utslipp. Ved slike tilfeller kan en, ut ifra de konstanter som brukes i modellen, forvente siktedyp på 2 - 2.5 m. Den 24 august 1988 var klorofyllkonsentrasjonen på stasjon FH1  $18.2 \mu\text{g/l}$  og siktedypet var 2.0 m. En

halvering av fosfortilførselen vil også mer enn halvere maksimale planktonkonsentrasjonen. Derved skulle minimale siktedypet øke til litt over 3 m med uforandret utslipp av oppløste organiske antropogene stoffer.

Modellsimuleringene (Tab. 4.1) viser at en bedring av lysforholdene i brakkvannslaget (økt siktedyp) ikke skulle gi opphav til høyere konsentrasjoner av marine plankton (MP) i 5-15 m dyp i det intermediære laget (tilfelle 3 og 4). Dette resultatet, som også gjelder for Håøyfjorden (se delrapport 8), skiller seg fra resultatene for Frierfjorden og Langesundsfjorden. Siden det drejer seg om et koplet system av fjorder må en akseptere at det ikke alltid er mulig å finne enkle forklaringer til slike små effekter.

Variasjonene i oksygenforbruket i bassengvannet ( $O_{2\text{kons}}$  i Tab. 4.1) er ikke så lette å forklare. En må huske på at Ormefjorden er en del av et koplet og komplekst system. Forandringer i andre deler av systemet kan ha større innvirkning på oksygenforbruket i bassengvannet i Ormefjorden enn lokal planktonproduksjon i Ormefjorden. Den relativ store økningen i oksygenforbruket i tilfelle 3 kan være forårsaket av en økt produksjon av planteplankton i Eidangerfjorden som kan gi opphav til økte konsentrasjoner av planteplankton på terskelnivået i Ormefjorden.

En sammenligning mellom resultatene i delrapport 6 og de som er presentert ovenfor viser at effekten av endringer av utslippene generelt er mindre i Ormefjorden enn i Langesundsfjorden. Dette er forventet siden Langesundsfjorden er nærmere kildene i Frierfjorden og har et mye tykkere og ferskere brakkvannslag. Dog kan sannsynligvis vind fra sør gi opphav til et tykkere brakkvannslag som kan bli liggende i lengre perioder, noe som er gunstig for en stor lokal planktonoppblomstring.

## 5. KONKLUSJONER

Modellen synes å beskrive fysisk sirkulasjon og biokjemisk omsetning i hele vannsøylen på en tilfredsstillende måte. Som følge av dette er også saltholdighet, temperatur og de fleste av øvrige tilstandsvariabler tilfredsstillende simulert. Konsentrasjonene av marint plankton er dog høyere enn hva som ble observert. Dette skyldes troligvis enten manglende eller altfor glisne observasjoner i tid og rom og/eller fravær av beiting på planteplankton i modellen.

Fosforbudsjettet for perioden 10 mars - 24 september 1988 relativ stor import av uorganisk fosfor (fosfat) fra Eidangerfjorden. Fra Eidangerfjorden importeres også fosfor bundet til brakkvannsplankton. Det er en viss nettoproduksjon av slike i Ormefjorden. Eksporten går hovedsakelig til Håøyfjorden. Pga. lav synkehastighet er det bare en liten del av brakkvannsplankton som synker ned i Ormefjordens dypvann. Det er stor nettoproduksjon av marint plankton i fjorden samt dessuten en viss import fra Håøyfjorden. Dette eksporteres til fjordens eget dypvann og bunnsedimenter.

Effekten av tilførselen av fosfor, hovedsakelig via Langesundsfjorden, er forholdsvis liten både hva gjelder midlere siktedyp og fluksen av marint organisk materiale ned i bassengvannet.

Fosfortilførselen synes imidlertid å være begrensende for produksjonen av plankton i overflatelaget slik at en minskning av fosfortilførselen vil gi en omtrent proporsjonal minskning av konsentrasjonen av plankton i overflatelaget. En minskning av fosfortilførselen kan derfor vesentlig forbedre minimale siktedyp som opptrår ved intense planktonblomstringer i overflatelaget. Dette vil ha størst betydning i områder hvor brakkvannet kan bli liggende i lengre perioder slik at maksimale blomstringer kan utvikles.

En reduksjon av tilførselen av farvet oppløst (alternativ partikulær) antropogen organisk materiale vil gi klart forbedret siktedyp. Et økt siktedyp vil imidlertid ikke gi opphav til en økt konsentrasjon av marint plankton i 5 - 15 m dyp i det intermediære laget.

Modellsimuleringene viser at vannkvaliteten i bassengvannet (oksygenforholdene) ikke er følsom for en forbedring av vannkvaliteten i overflatelaget (større siktedyp). Årsaken til dette er at Ormefjorden er en liten del av et større fjordkompleks og innflytelsen fra Håøyfjorden er stor mht. forholdene i bassengvannet.

Modellsimuleringene viser at det er en stor import av næringssalter og farvet oppløst organisk materiale samt brakkvannsplankton fra Eidangerfjorden gjennom sund 3. Hvis denne transporten kunne bli redusert, slik at Ormefjorden nesten utelukkende hadde vannutskiftning med Håøyfjorden, skulle forholdene i Ormefjordens overflatelag bli forbedret. Modellsimuleringene viser at en reduksjon av fosfortilførselen til Frierfjorden med 50% vil redusere fosfortilførselen gjennom sund 3 fra nåværende (1988) 2.5 tonn til 1.4 tonn. Dette viser at planerte utslippsreduksjoner til Frierfjorden vil gi samme type forbedring i Ormefjorden som en reduksjon av vanntransporten gjennom sund 3.

Fra arbeidet med modellen kan vi konkludere at stor usikkerhet knytter seg til nedbrytingsrater, kjemisk sammensetning og optiske egenskaper av antropogent partikulært og oppløst materiale. Det er også usikkerhet betreffende kjemisk sammensetning, nedbrytingsrate og mengder av ulike typer av opplagret organisk materiale i bunnsedimentet. Videre er det viss usikkerhet kring konsentrasjonene av planteplankton og hvordan disse best skal kvantifiseres gjennom målinger. Betydningen av beiting for konsentrasjonen av planteplankton i fjordområdet bør undersøkes.

Erfaringene med modellen viser klart at det er meget viktig å ha tilgang til data med god nøyaktighet og dekning for drivning og test av modellen.

## 6. REFERANSER.

- Aure, J. og Stigebrandt, A., 1990: Quantitative estimates of the eutrophication effects of fish farming on fjords. *Aquaculture*, 90, 135-156.
- Ibrekk, O, og R. Gulbrandsen, 1989: Overvåking av Grenlandsfjordene. Delprosjekt forurensningstilførsler. NIVA, Overvåkingsrapport 356/89.
- Källqvist, T., 1990: Undersøkelse av eutrofiering i Grenlandsfjordene 1988 - 89. Delrapport 5. Planteplankton og næringssalter i overflatevannet. NIVA, Rapp. No. 461/91
- Molvær, J. og A. Stigebrandt, 1991: Undersøkelse av eutrofiering i Grenlandsfjordene 188-89. Delrapport 3. Vannutskiftning i fjordene. NIVA, Rapport 450/91.
- 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, Rapp. No. 428/90. 74 sid.

7. FIGURER TIL KAPITTEL 2 OG 3.

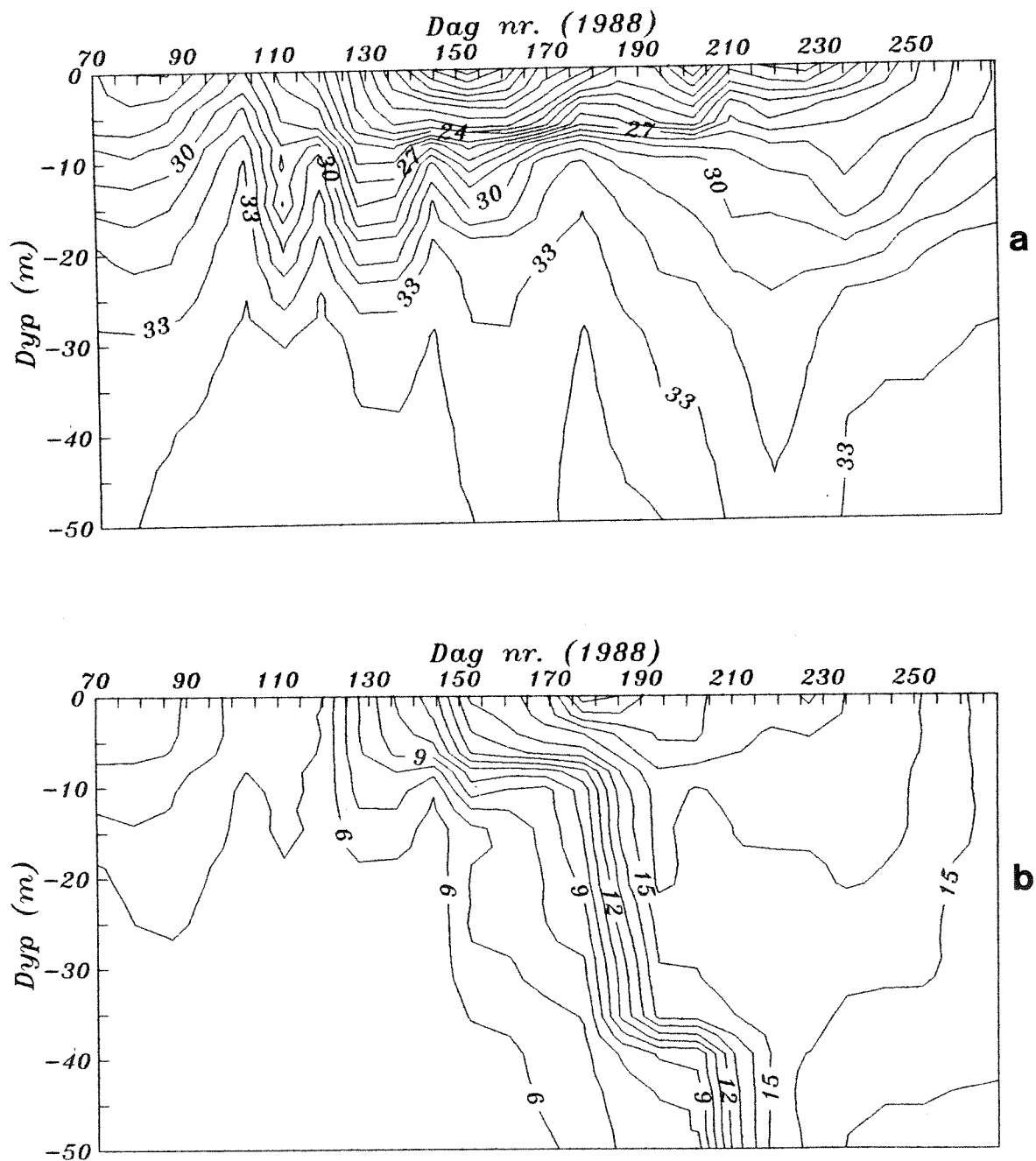


Fig. 3.1 Observert utvikling av a) salinitet (psu) og b) temperatur (°C) i Langesundsbukta 0-50 m (Stn JH1) i perioden 10 mars - 24 sept 1988.

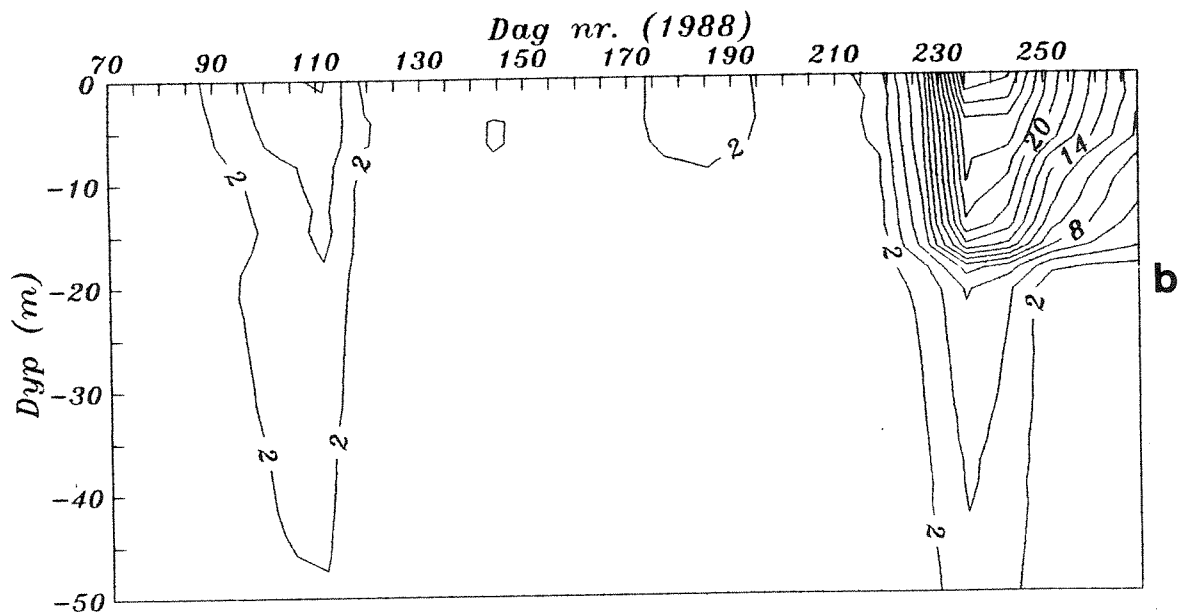
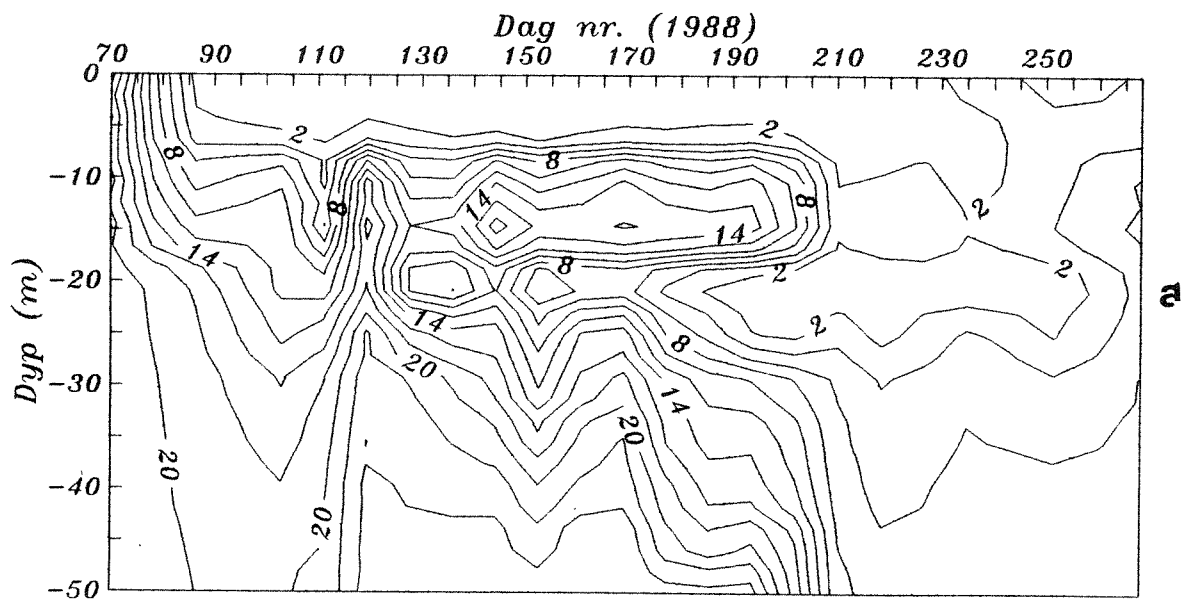


Fig. 3.2 Observert utvikling av konsentrasjonen av a) fosfat og b) klorofyll ( $\mu\text{g/l}$ ) i Langesundsbukta 0-50 m (Stn JH1) i perioden 10 mars - 24 sept. 1988. I intervallet 20 - 50 m har en antatt konsentrasjonene.

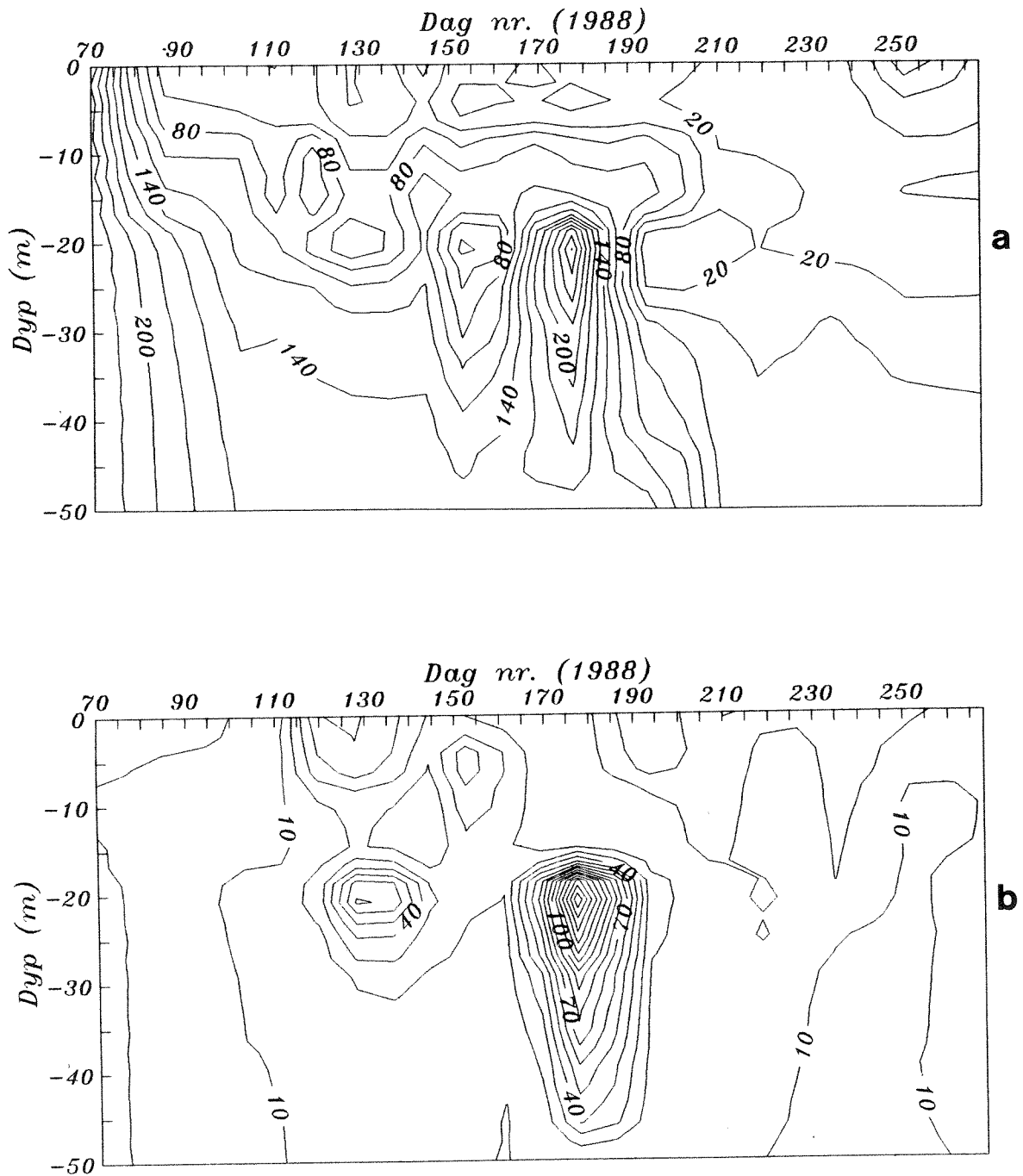


Fig. 3.3 Observert utvikling av konsentrasjonen av a) nitrat og b) ammonium ( $\mu\text{g/l}$ ) i Langesundbukta 0-50 m (Stn JH1) i perioden 10 mars - 24 sept. 1988. I intervallet 20 - 50 m har en antatt konsentrasjonene.



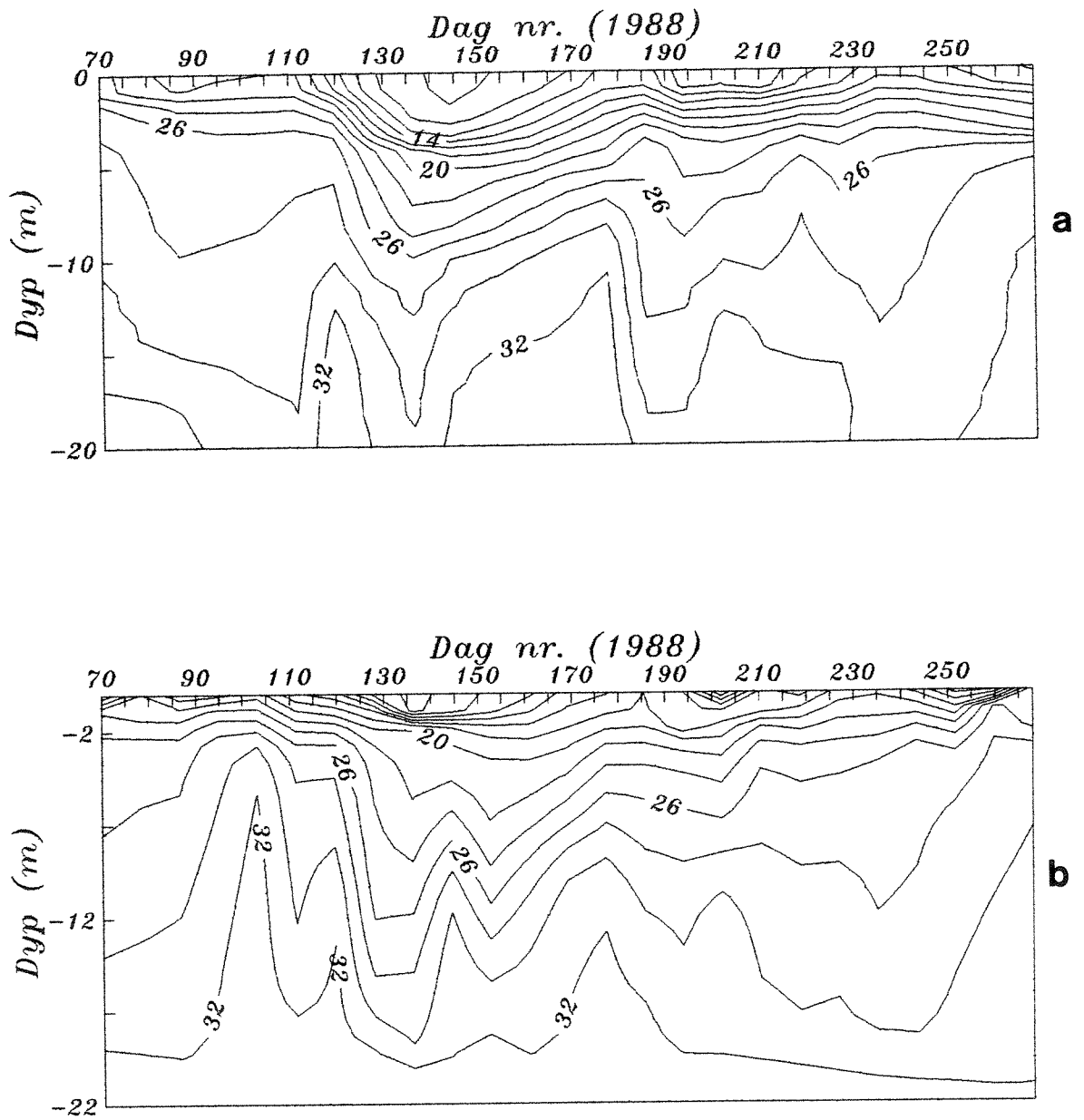


Fig. 3.4 Utvikling av a) observert og b) beregnet salinitet (psu) i Ormefjorden 0-22 m (Stn FH1) i perioden 10 mars - 24 sept 1988.

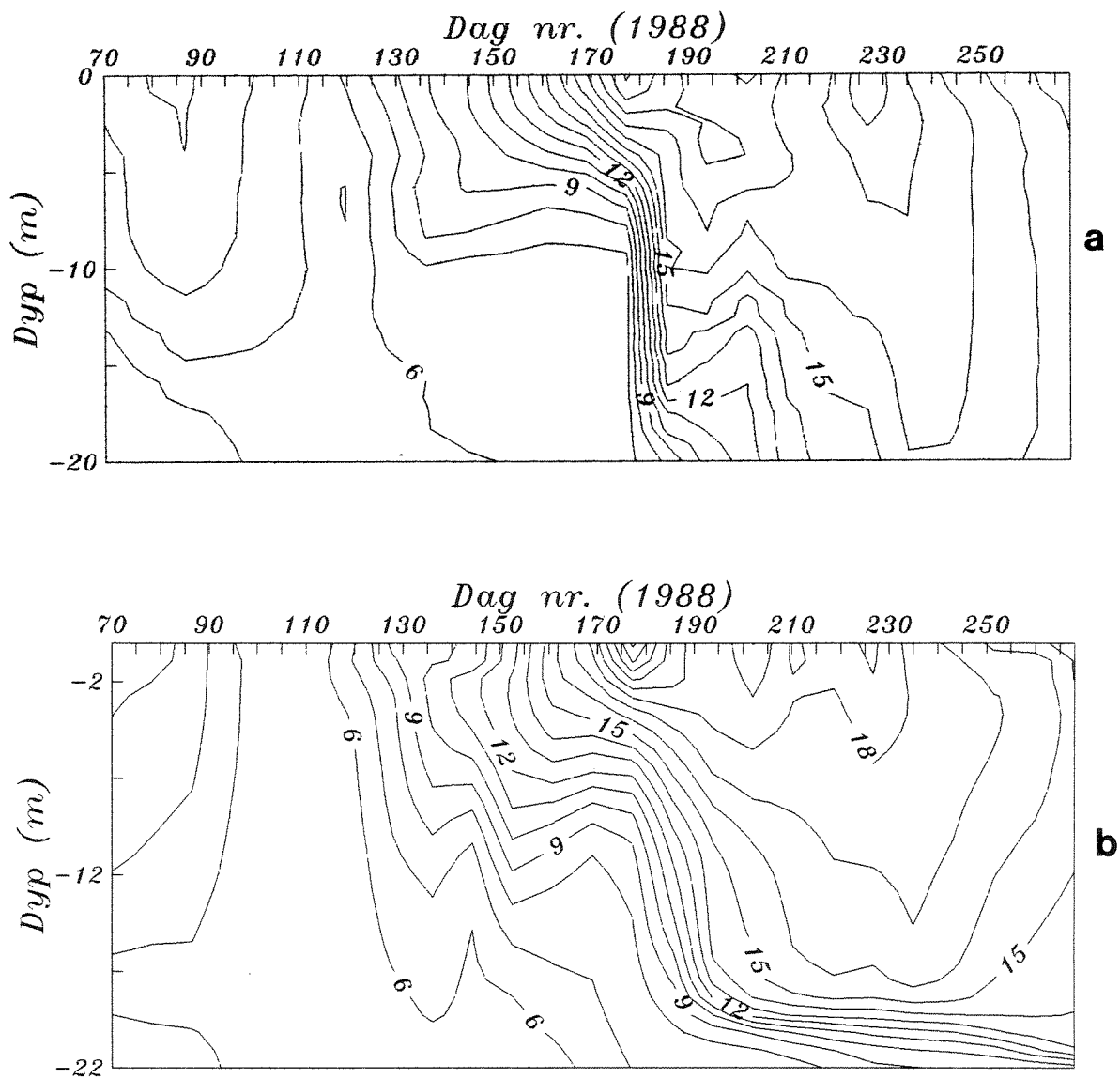


Fig. 3.5 Utvikling av a) observert og b) beregnet temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ ) i Ormefjorden 0-22 m (Stn FH1) i perioden 10 mars - 24 sept 1988.

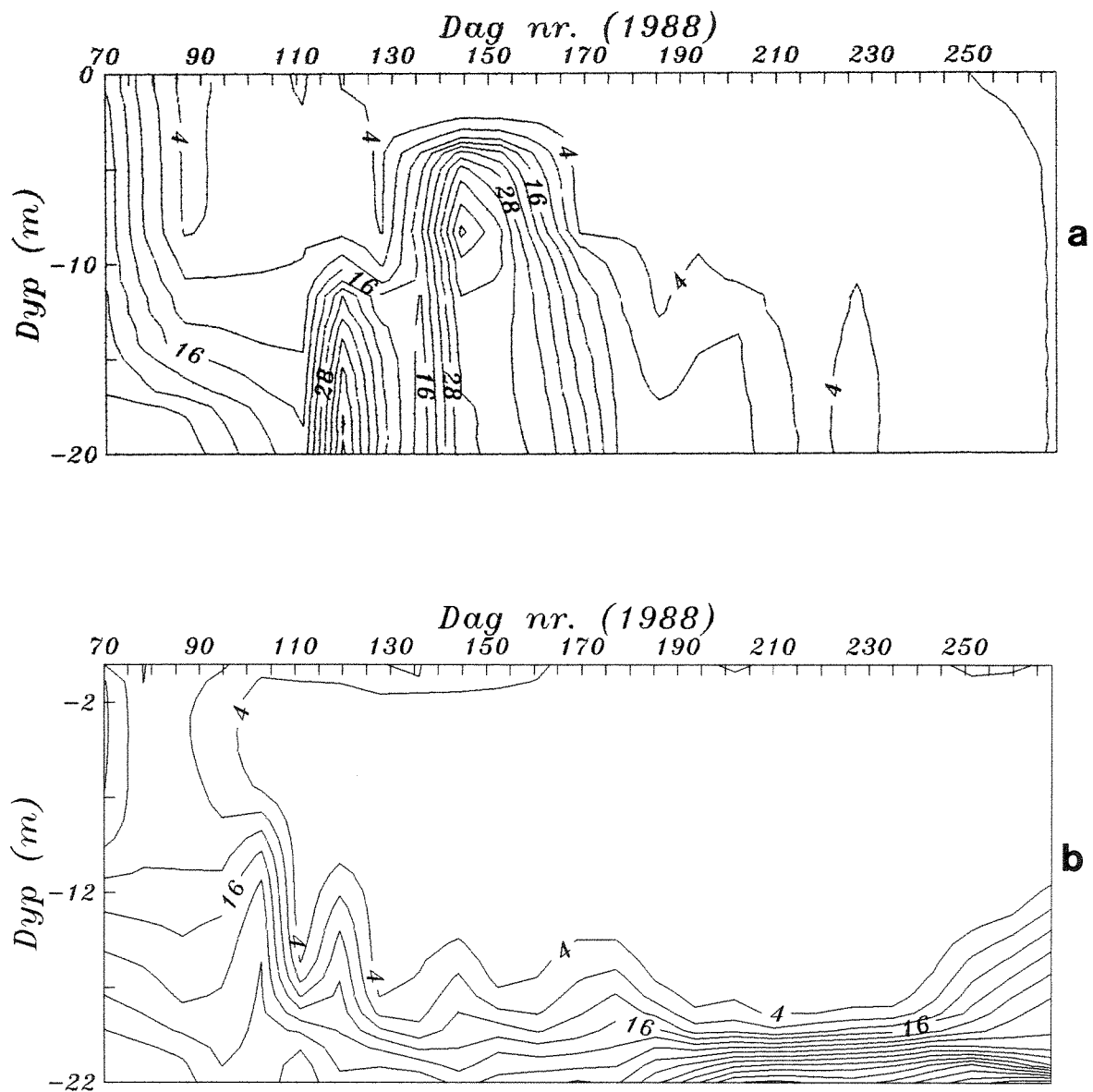


Fig. 3.6 Utvikling av a) observert og b) beregnet fosfat ( $\mu\text{g/l}$ ) i Ormefjorden 0-22 m (Stn FH1) i perioden 10 mars - 24 sept 1988.

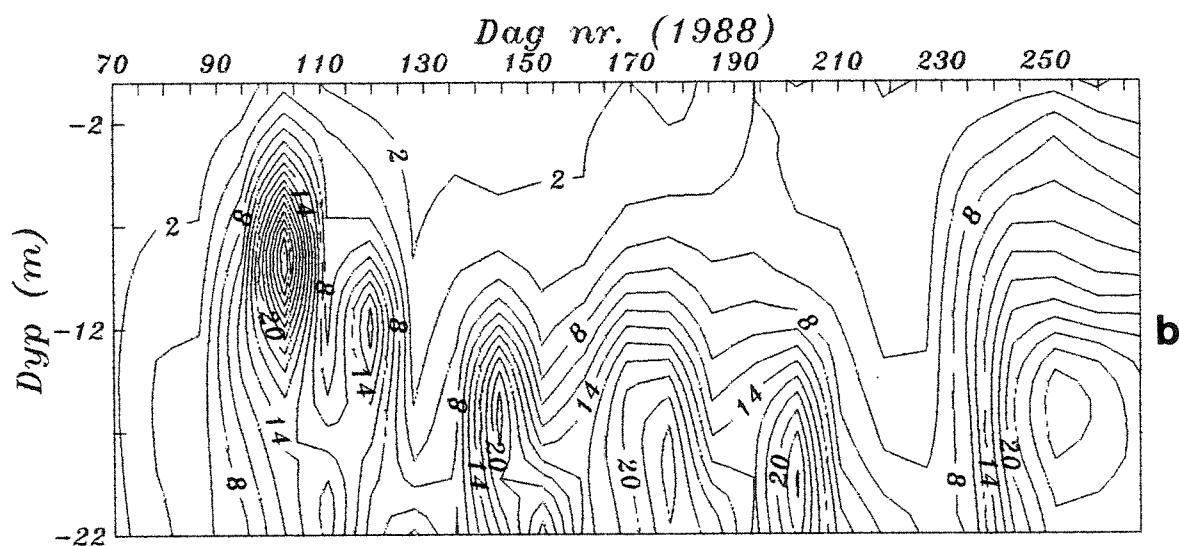
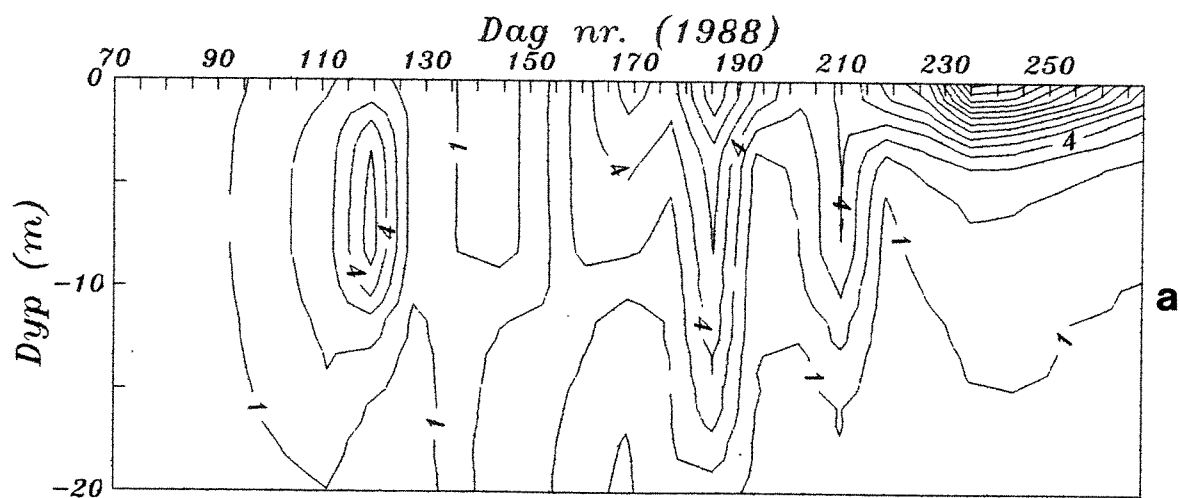


Fig. 3.7 Utvikling av a) observert og b) beregnet klorofyll ( $\mu\text{g/l}$ ) i Ormefjorden 0-22 m (Stn FH1) i perioden 10 mars - 24 sept 1988.

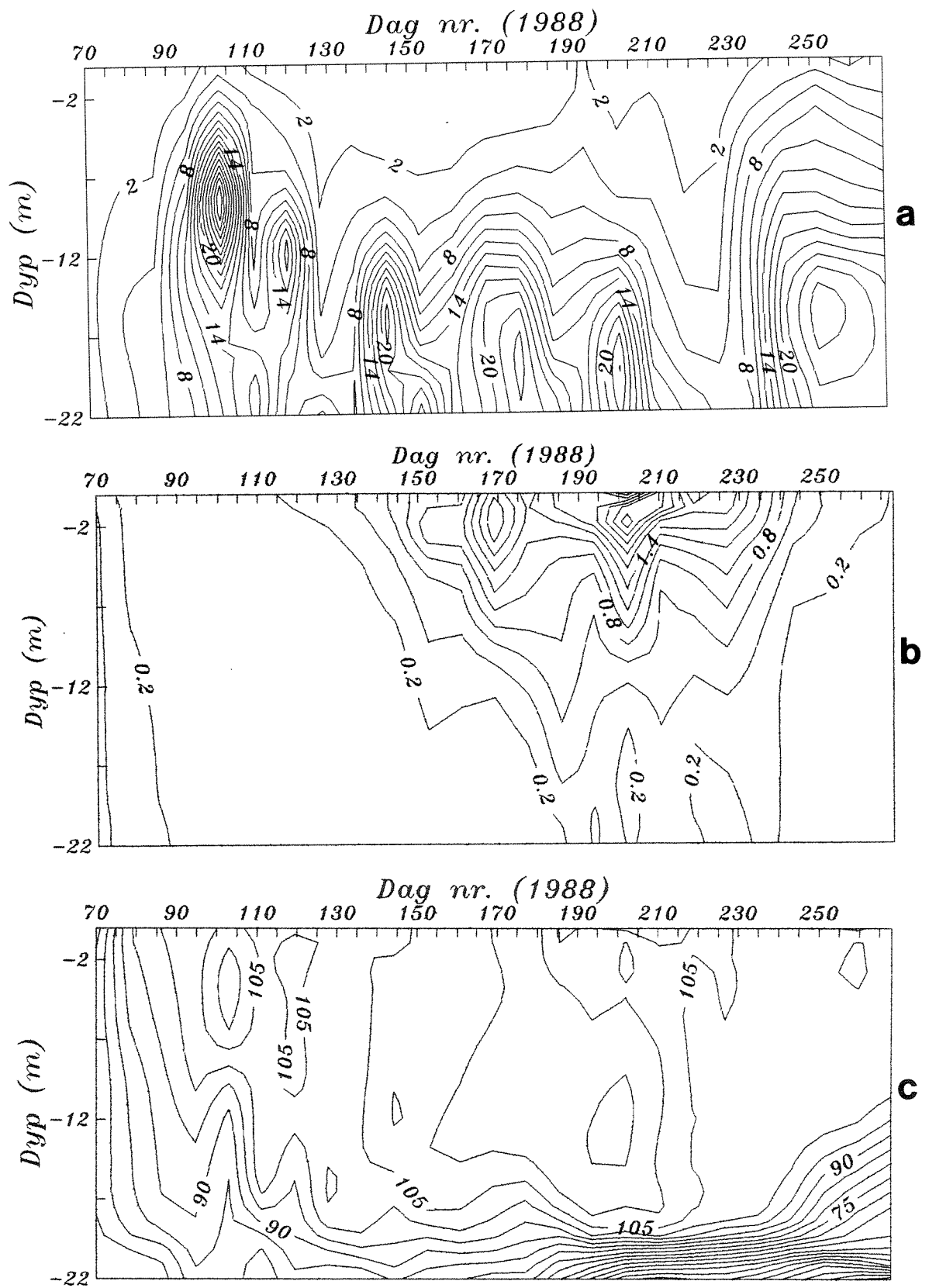


Fig. 3.8 Beregnet utvikling av klorofyll ( $\mu\text{g/l}$ ) i a) marint plankton og b) brakvannsplankton og c) oksygenmetning (%) i Ormefjorden 0-22 m (Stn FH1) i perioden 10 mars - 24 sept 1988.

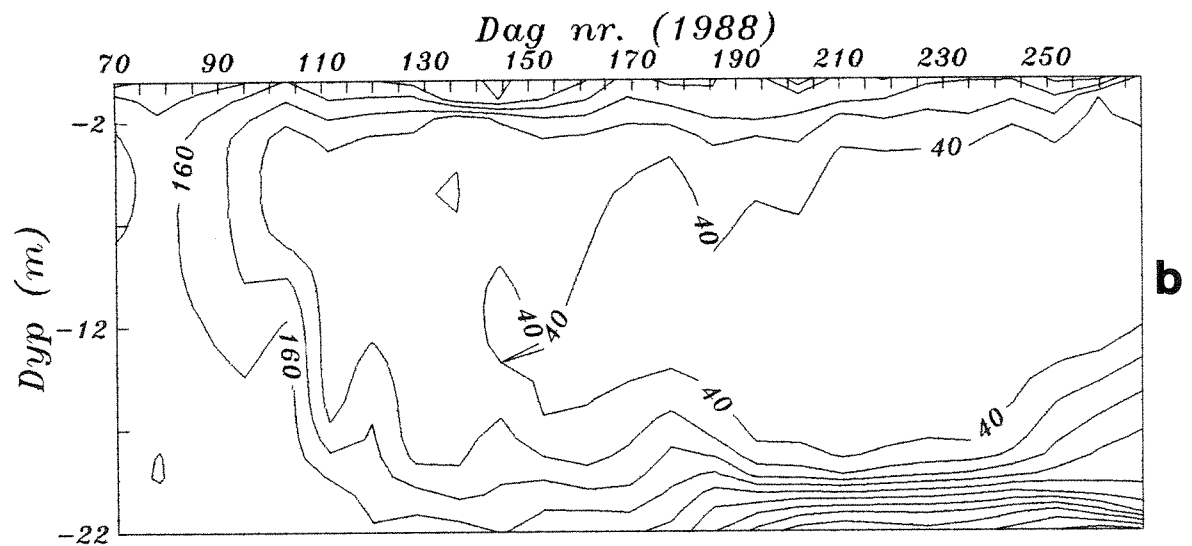
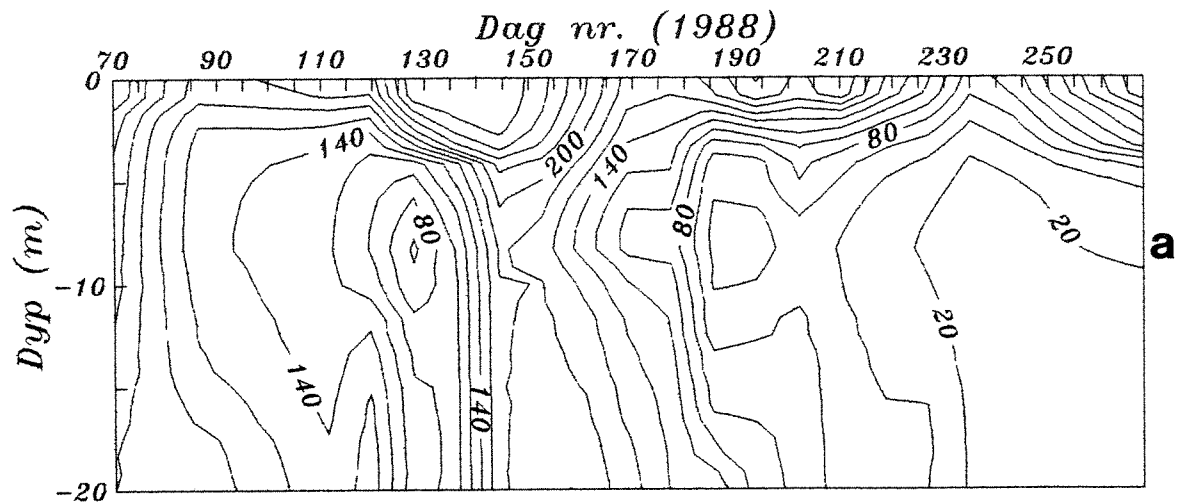


Fig. 3.9 Utvikling av a) observert og b) beregnet nitrat ( $\mu\text{g/l}$ ) i Ormefjorden 0-22 m (Stn FH1) i perioden 10 mars - 24 sept 1988.

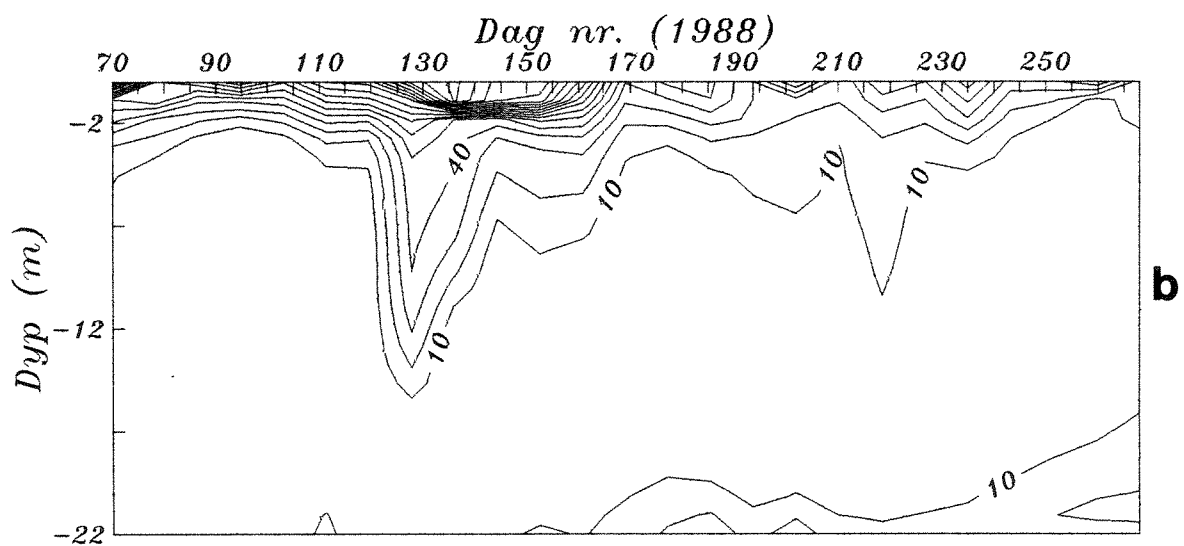
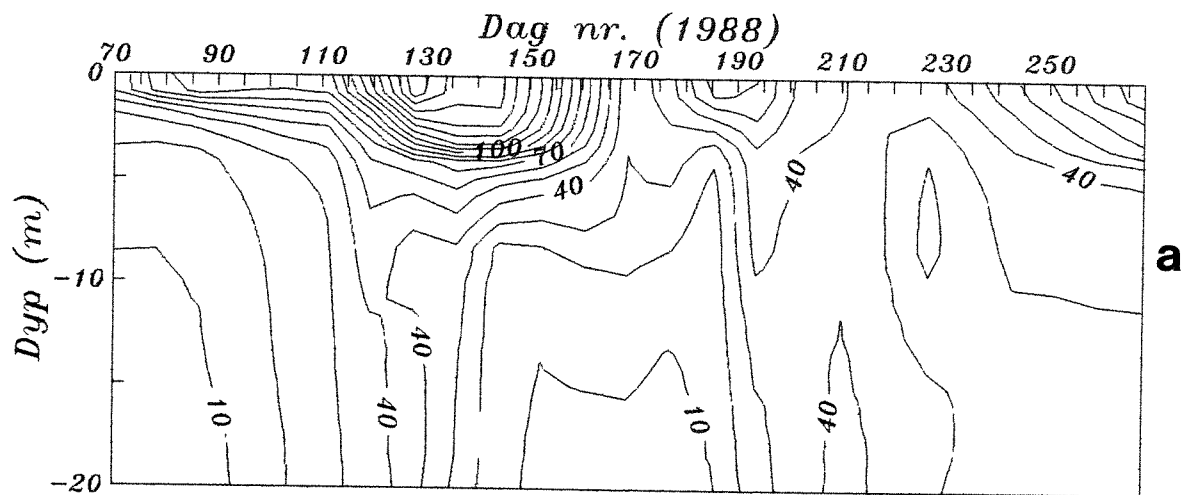


Fig. 3.10 Utvikling av a) observert og b) beregnet ammonium ( $\mu\text{g}/\text{l}$ ) i Ormefjorden 0-22 m (Stn FH1) i perioden 10 mars - 24 sept 1988.

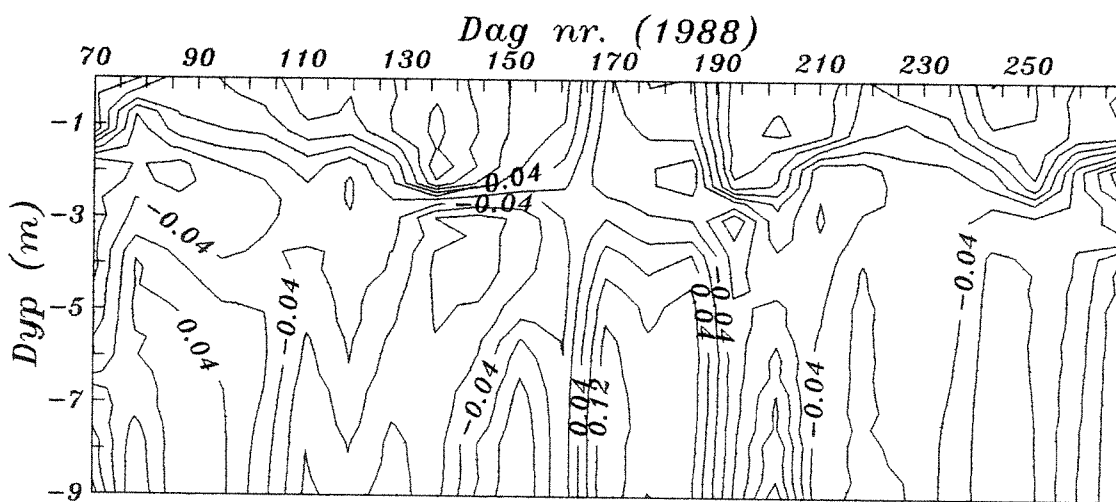


Fig. 3.11 Beregnet strømhastighet (m/s) i sund 3 mellom Eidangerfjorden og Ormefjorden. Positiv strøm er rettet inn i Ormefjorden.



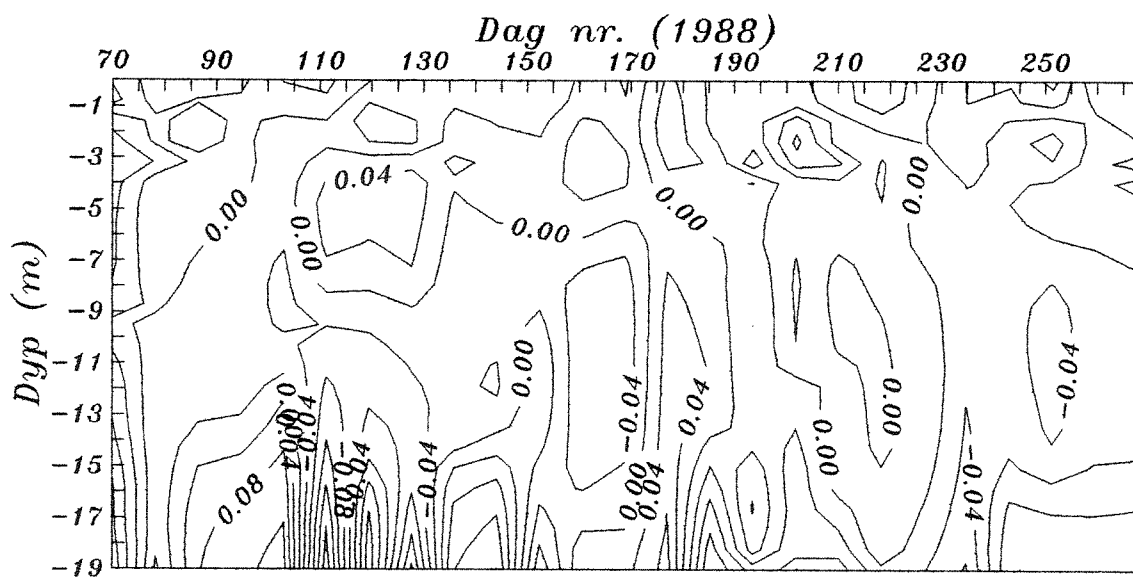


Fig. 3.12 Beregnet strømhastighet (m/s) i sund 5 mellom Ormefjorden og Håøyfjorden. Positiv strøm er rettet inn i Ormefjorden.

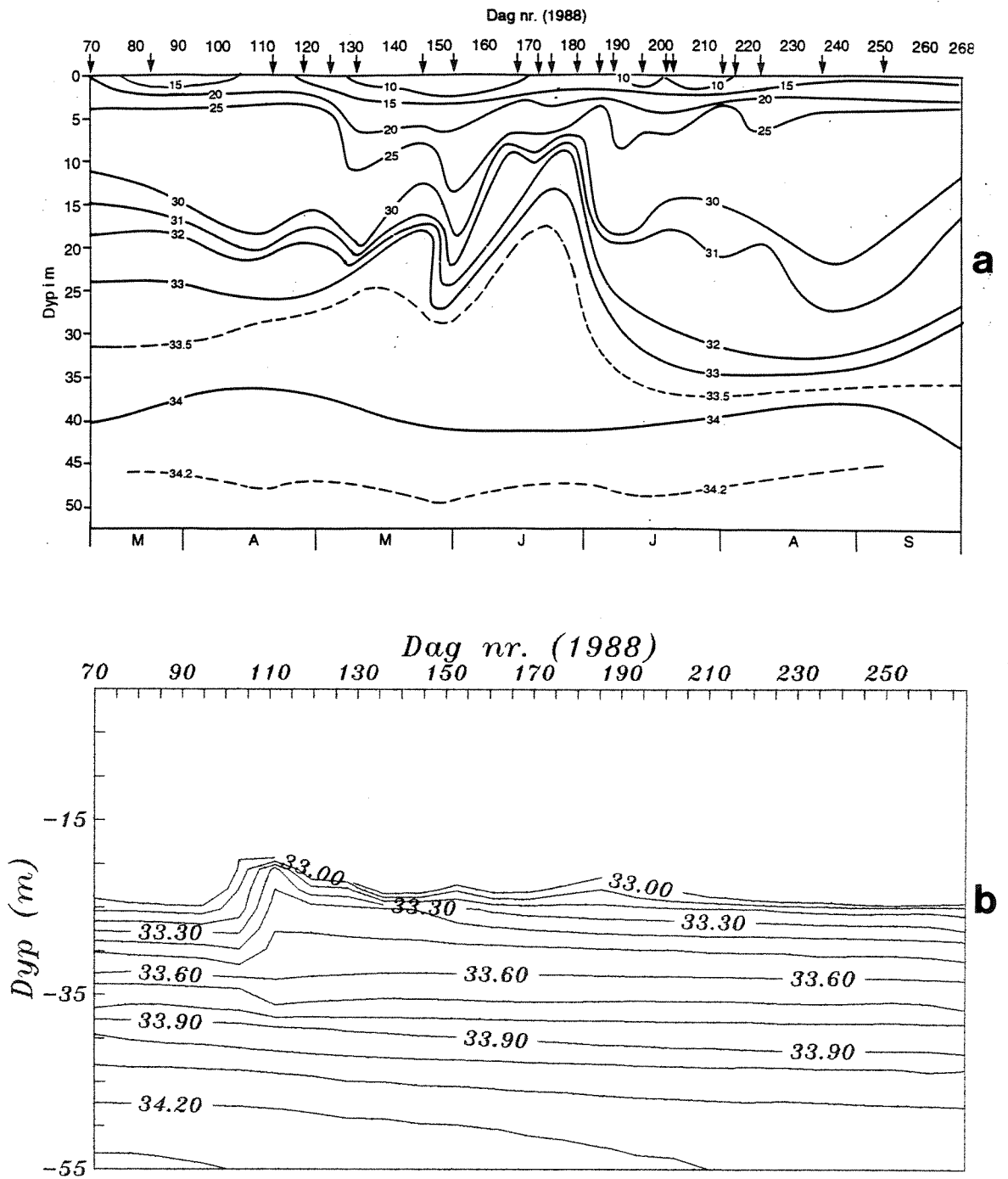


Fig. 3.13 Utvikling av a) observert og b) beregnet salinitet (psu) i Ormefjorden 0-55 m (Stn FHL) i perioden 10 mars - 24 sept 1988.

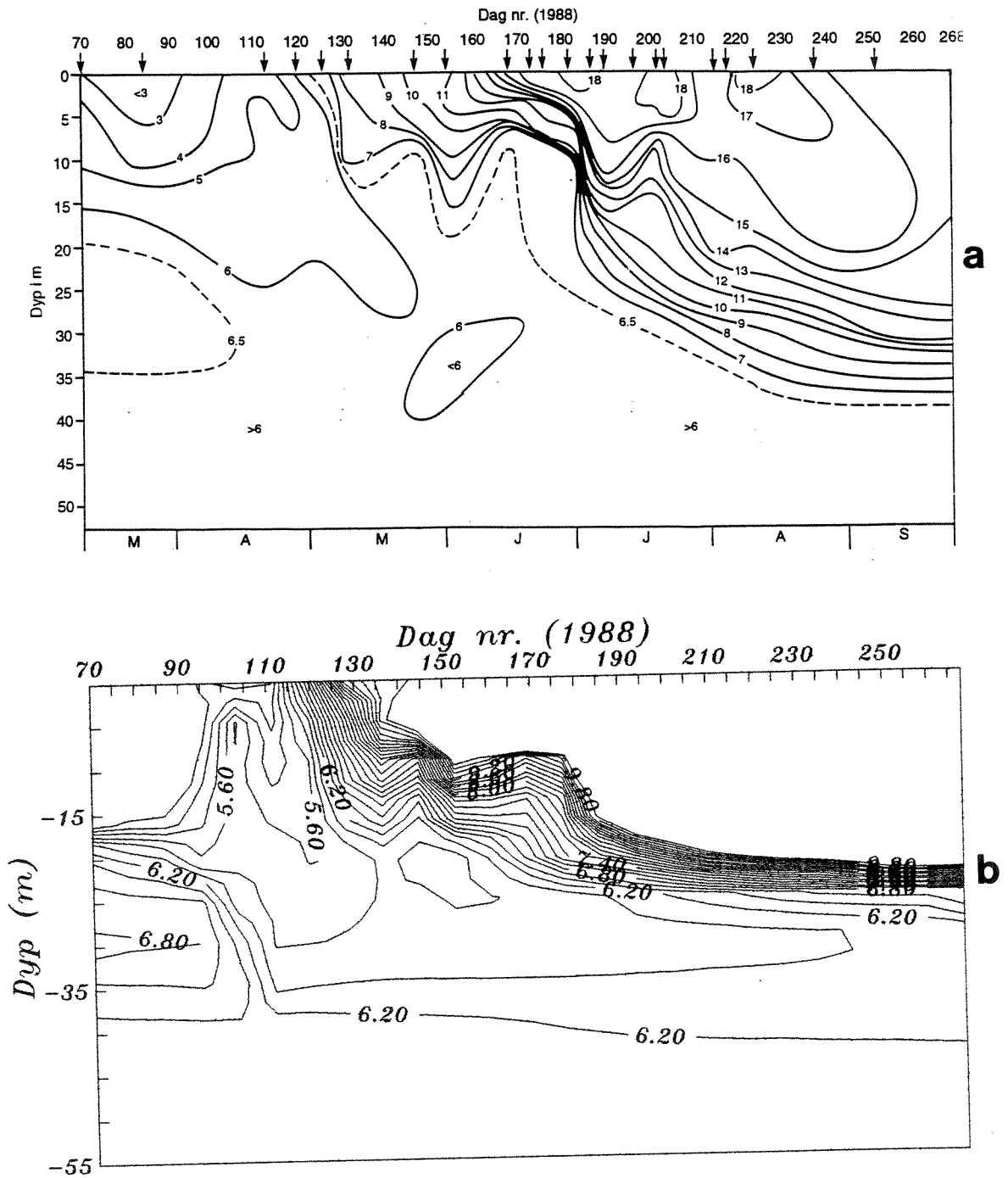


Fig. 3.14 Utvikling av a) observert og b) beregnet temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ ) i Ormefjorden 0-55 m (Stn FH1) i perioden 10 mars - 24 sept 1988.

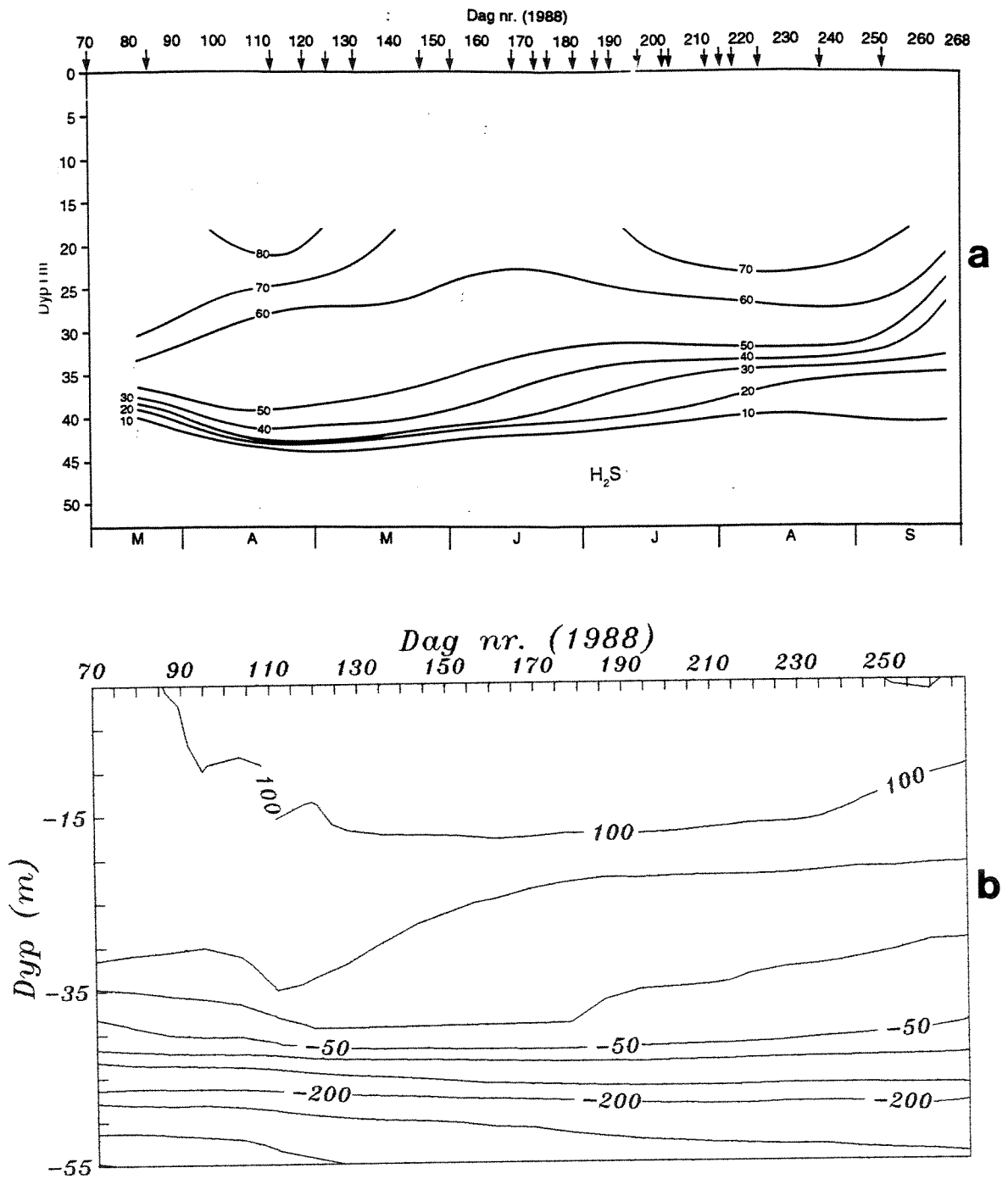


Fig. 3.15 Utvikling av a) observert og b) beregnet oksygenmetning (%) i Ormefjorden 0-55 m (Stn FH1) i perioden 10 mars - 24 sept 1988.

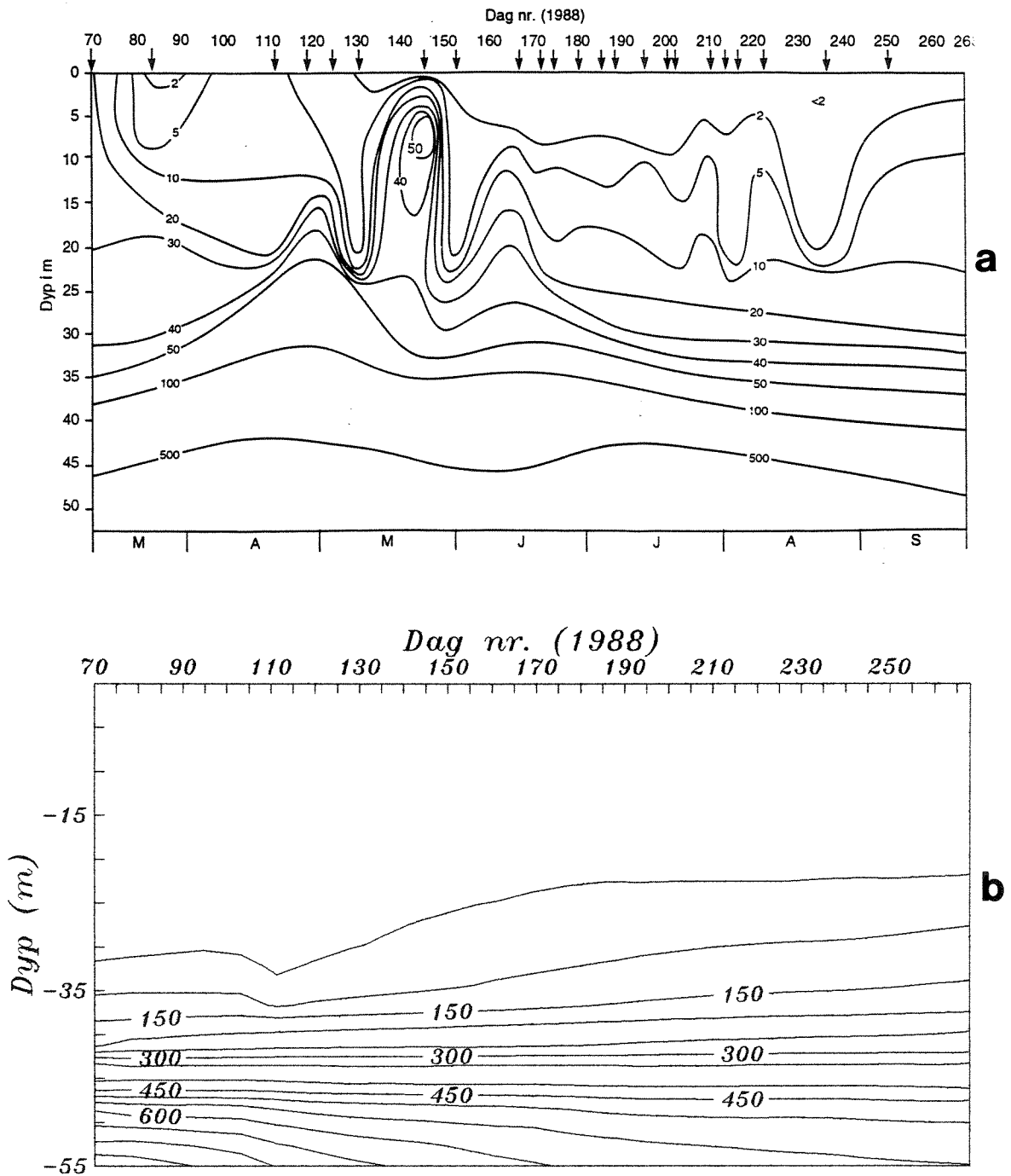


Fig. 3.16 Utvikling av a) observert og b) beregnet fosfat ( $\mu\text{g/l}$ ) i Ormefjorden 0-55 m (Stn FH1) i perioden 10 mars - 24 sept 1988.

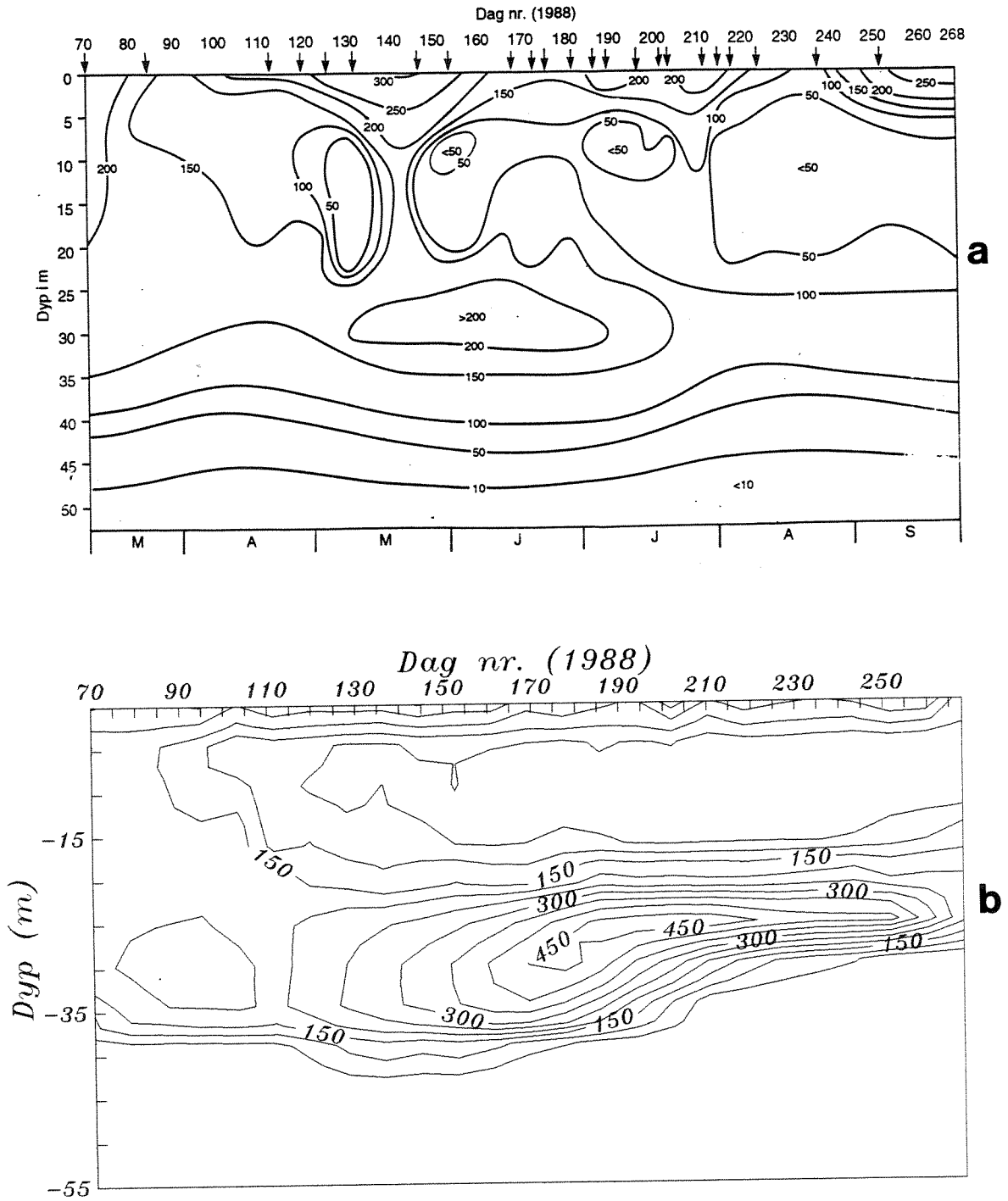


Fig. 3.17 Utvikling av a) observert og b) beregnet nitrat ( $\mu\text{g/l}$ ) i Ornefjorden 0-55 m (Stn FH1) i perioden 10 mars - 24 sept 1988.

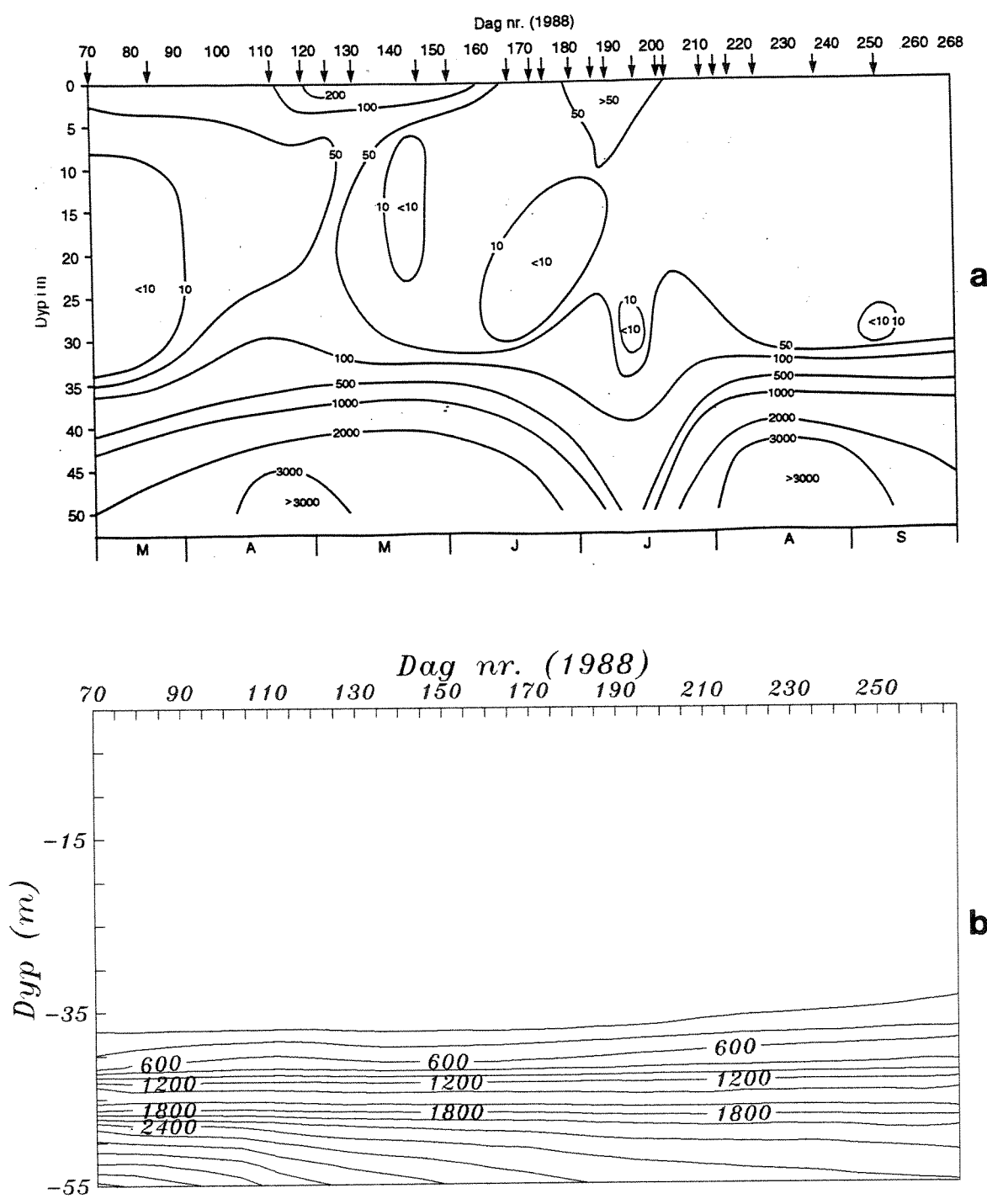


Fig. 3.18 Utvikling av a) observert og b) beregnet ammonium ( $\mu\text{g/l}$ ) i Ornefjorden 0-55 m (Stn FH1) i perioden 10 mars - 24 sept 1988.

APPENDIKS.

GRENLANDSFJORDMODELLEN.

Grenlandsfjordmodellen består av koplede delmodeller for de ulike bassengene. Hver delmodell er, med noen utvidelser og forandringer, den samme grunnmodell som ble brukt for Frierfjorden, se Stigebrandt & Molvær (1990). Utvidelser og forandringer ble beskrevet i Stigebrandt & Molvær (1991). Grunnmodellen er kortfattet beskrevet nedenfor, hvor også en kort omtale av det som er spesielt for den koplede modellen vil bli presentert.

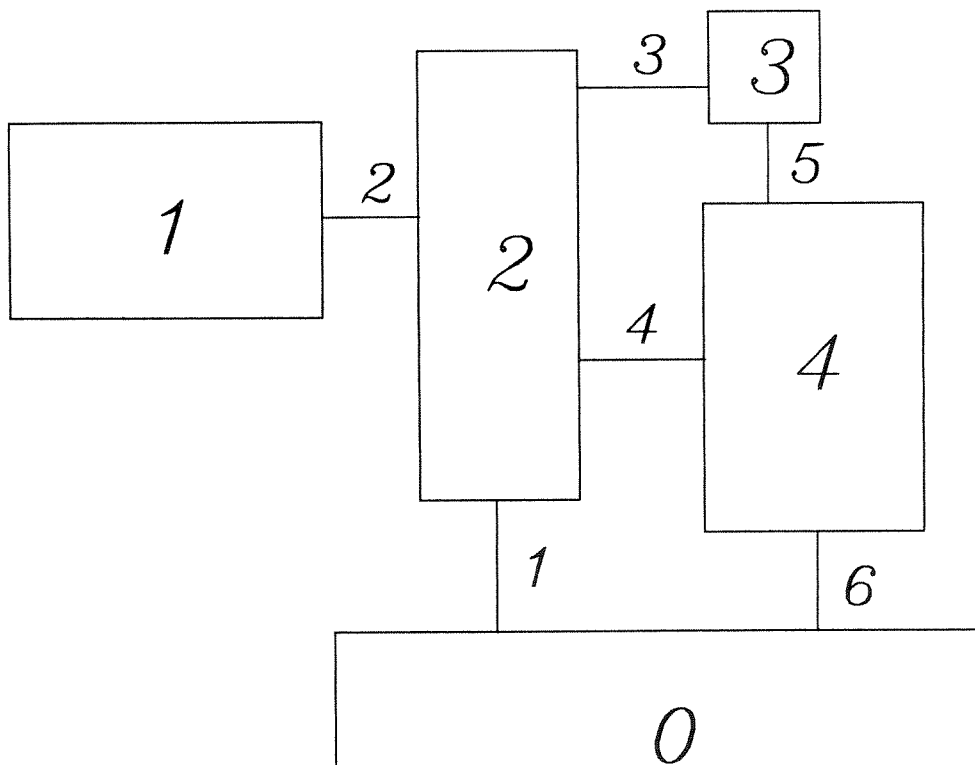


Fig. A.1 Skisse av modellkonfigurasjonen med fire fjordbasseng og sammenbindene sund. Langesundsbukta har fått betegnelsen "0".



## A 1. Modellområdet topografi.

Grenlandsfjordene er oppdelt i fire hovedbasseng nemlig Frierfjorden (basseng nr. 1), Langesundsfjorden (nr. 2), Ormefjorden (nr. 3) og Håøyfjorden (nr. 4).

Modelltopografien med fire fjordbasseng og sammenbindende sund vises i Fig. A.1. Sundenes betegnelse i modellen er også vist. Fordelingen av areal og volum for de ulike bassengene samt bredden av de forskjellige sundene i ulike dyp er gitt i de enkelte delrapportene og i Molvær og Stigebrandt (1991).

## A 2. Kort beskrivelse av grunnmodellen.

Modellen er bygget opp av matematiske beskrivelser av fjordbassengets og sundenes topografi, de viktigste fysiske, kjemiske og biologiske prosessene i fjorden samt utvekslingen av energi og materiale gjennom de ytre grenseflatene, dvs. havoverflaten og vertikale flater ved sund og elvemunnninger. Den horisontalt integrerte modellen dekker hvert enkelt fjordbasseng - fra havoverflaten ned til største dyp.

Bunnsedimentet inngår også i modellen. Modellen beregner vertikale fordelinger av (de horisontalt midlede) tilstandsvariablene, dvs. de variabler som beskriver tilstanden i fjordbassenget. En oversikt over grunnmodellen og de viktigste prosessene som virker i denne er gitt i Fig. A.2.

Saltholdighet og temperatur spiller en spesiell rolle siden disse sammen bestemmer vannets tetthet. I modellen er hvert fjordbasseng fra overflaten til største dyp inndelt i 1 m tykke lag og tidsoppløsningen er 1 døgn. Modellen har et velblandet overflatelag og tykkelsen av dette vil variere kontinuerlig med ferskvannstilførsel, varmeutveksling gjennom havoverflaten, vind og utstrømning gjennom sundene. Egenskapene til det velblandete overflatelaget er beregnet vha en sk. pyknoklinmodell. Blandingen mellom elvevann og sjøvann i elvemunnninger ("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 simulerer to typer vannutveksling mellom fjorden og området utenfor. Den ene er drevet av vannstandsforskjellen som årsakes fremst av tidevannet og den andre er drevet av indre trykkforskjeller (dvs. nede i vannsøylen men over terskeldypet) på begge sider av et sund pga. ulike vertikal tetthetsfordeling. I den senere inngår også

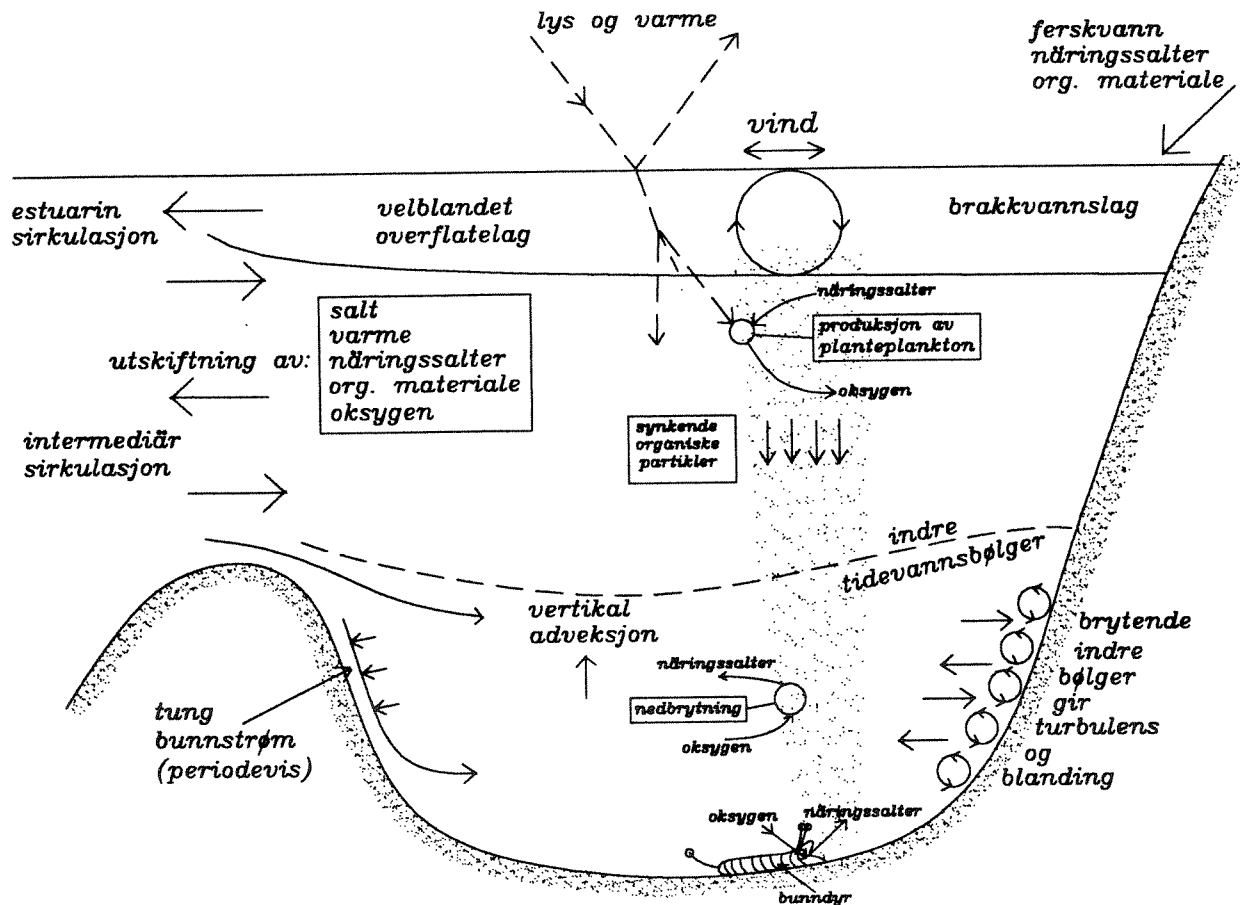


Fig. A.2 Oversiktlig beskrivelse av de viktigste prosessene som virker i grunnmodellen.

estuarin sirkulasjon årsaket av ferskvannstilførsel. I modellen innlagres det innstrømmende vannet i det dyp i bassenget hvor tettheten er lik det innstrømmende vannets. I tilfeller med spesiell høy tetthet på det innstrømmende vannet 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.

Modellen inneholder matematiske beskrivelser av biologiske/kjemiske prosesser hvilke omdanner materiale mellom organiske og uorganiske former. Bl.a. finns beskrivelser av planteplanktons vekst og respirasjon. Lysets nedtrengning blir beregnet fra vannets optiske egenskaper og konsentrasjonen av partikulært marint samt oppløst og partikulært ikke-marint organisk materiale. Plankton og ikke-marint partikulært organisk materiale (her trefiber) synker og blir nedbrutt, dels i vannsøylen og dels på bunn. Oksygen blir derved forbrukt. Bunnfaunaen står i modellen for nedbrytning av marint organisk materiale på bunnen (under oksiske forhold). En enkel modell for bunnfaunaens tilvekst og respirasjon er blitt brukt. Nedbrytningen i vannsøylen og på bunn under anoksiske eller nesten anoksiske forhold er ved bakterier. Modellen har også med bakteriell oksydering av ammonium til nitrat under oksiske forhold (nitrifikasjon). Reduksjon av nitrat til nitrogengass (denitrifikasjon) forekommer i modellen dels i vannmasser med lav oksygenkonsentrasjon (<0.5 ml/l) og dels i sedimenter hvis overliggende vann er oksisk og inneholder nitrat.

Modellen har følgende tilstandsvariabler i vannsøylen:

saltholdighet

temperatur

oksygenkonsentrasjon (hydrogensulfid blir regnet som negativ oksygen)

konsentrasjon av brakkvannsplankton

konsentrasjon av marint plankton

konsentrasjon av ikke-marint partikulær organisk materiale (fiber)

konsentrasjon av nitrat

konsentrasjon av ammonium

konsentrasjon av fosfat

På bunnen er tilstandsvariablene:

konsentrasjon av levende bunndyr

konsentrasjon av dødt organisk materiale, marint

konsentrasjon av ikke-marint organisk materiale (fiber)

### A 3. Beskrivelse av nyheter i den koplede modellen.

#### A 3.1 Koplingen mellom bassengene.

Vannutskiftningen gjennom et sund påvirker lagdelingen i de to angrensende bassengene og derved utskiftningen gjennom eventuelle andre sund i bassengene. I basseng med flere sund beregnes flødet gjennom sundene, og etterfølgende innlagring i omgivende basseng, sekvensielt, dvs. for hvert sund for seg, og ikke parallellt (samtidig). Dette forenkler beregningene vesentlig. I modellen er den barokline signalhastigheten uendelig (horisontalt integrert modell). Dette er motsatt forholdet i reelle fjorder hvor signaler om forandringer i lagdelingen vanligvis er mindre enn 1 m/s. Dette betyr at i en reell fjord vil det ta en viss tid før forandringer i lagdelingen årsaket av vannutbyte i et sund blir merkbar i fjordens eventuelle andre sund. Dette faktum rettferdiger en sekvensiell behandling i kombinasjon med et relativt langt tidssteg. I modellen brukes for integrasjonen tidssteget 5 timer eller kortere.

#### A 3.2 Nettotransporten av vann gjennom de ulike sundene.

Sammenlignet med ferskvannstilførselen til Frierfjorden er ferskvannstilførselen til de andre fjordområdene neglisjerbar. Gjennom at transportene i sundene beregnes sekvensielt må en gi fordelingen av nettotransport av vann gjennom sundene. Ved å prøve forskjellige fordelinger ved middelvannføring i Skienselva og forlange at den beregnete midlere vannstandsforskjellen mellom Langesundsbukta og et gitt basseng skal være uavhengig av hvilken vei en går fra Langesundsbukta til bassenget fås følgende omtrentlige fordeling av netto vanntransport, årsaket av vannstilførselen fra Skienselva, på de ulike sundene; sund nr.1: 70%, nr.2: 100%, nr.3: 2%, nr.4: 28%, nr.5: 2% og nr.6: 30%.

### A 3.3 Blanding i sundene.

Vann som strømmer gjennom et sund mellom to basseng kan få spesielt høy hastighet ved havoverflaten hvis det er stor tetthetsforskjell mellom de to bassengene. Derved kan medrivning av underliggende vann induseres. Dette er et fenomen som er observert i Breviksundet der det brakke vannet fra Frierfjorden ved utflødet til Langesundsfjorden river med seg underliggende vann slik at saltholdigheten ofte blir omtrent doblet. I modellen simuleres dette gjennom at vann fra et 5 m tykt lag under overflatelaget blir oppblandet i det innstrømmende vannlaget ved overflaten. Volumfluksen av det oppblandete vannet er satt til 20% av volumfluksen av innstrømmende overflatevann, noe som gir omtrent en dobling av innstrømmende vannets saltholdighet.

Modellberegningene viser at det til tider, spesielt i forbindelse med sterk opp- eller nedstrømming i kystvannet, kan bli forholdsvis høye strømhastigheter straks over terskeldypet. Ved slike tilfeller burde strømmen kunne skape en vesentlig blanding også på disse dyp selv om det ikke utvikles en tung bunnstrøm i fjorden. Dette er foreløpig ikke medtatt i modellen.

### A 3.4 Vertikal blanding i bassengvannet.

Tidevannsstrømmene i sundene genererer indre tidevannsbølger. Disse svarer for turbulensdannelse og vertikal blanding i fjordbassengene. Det er lett å anslå amplituden av tidevannsstrømmene i de fleste sund. For sundene 3 og 4, mellom Langesundsfjorden på den ene siden og Ormefjorden respektive Håøyfjorden på den andre siden, er det imidlertid ikke så enkelt og en skulle trenge å lage en spesiell modell (eller måle). Det er imidlertid god grunn til å anta at tidevannsstrømmene i disse to sundene har liten amplitude hvorfor vi i modellen neglisjerer tidevannsstrømmene i disse sundene. Tidevannstrømmene i disse sundene bidrar altså ikke i modellen til blandingen i terskelbassengene.

### A 3.5 Oksygenutveksling gjennom havoverflaten.

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 nå 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. Modellen for oksygenutveksling gjennom havoverflaten ble utviklet helt nylig og dens eksistens kunne ikke forutsis da vi ved prosjektstarten planla målingene for intensivperioden i 1988. Vi har derfor ikke data for å teste disse beregningene. Utifra erfaringer fra andre områder ser resultatene ut å være fornuftig.

### A 3.6 Nitrifikasjonsrater.

Ammonium oksyderes bakterielt til nitrat med nitritt som mellomprodukt. I Stigebrandt (1991b) ble ratekonstanten for nitrifikasjonsprosessen bestemt for terskelbasseng til ca.  $0.18 \text{ døgn}^{-1}$  ved temp.  $0^\circ\text{C}$ . Denne ratkonstant ser ut å passe godt også for terskelbassengene i Grenlandsfjordene. For å få observerte og beregnede ammoniumkonsentrasjoner å passe i overflatelaget har vi vært nødt å redusere ratkonstanten i dette lag til en tiendel av verdien i terskelbassengene. Årsaken til den lave nitrifikasjonsraten i overflatelaget er formodentlig at dagslyset virker hemmende på nitrifikasjonsprosessen, noe som er kjent fra litteraturen.

### A 3.7 Synkehastigheten for brakkvannsplankton.

For å få bedre overensstemmelse mellom observert og beregnet konsentrasjon av brakkvannsplankton i Langesundsfjorden reduserte vi synkehastigheten for brakkvannsplankton fra  $1.5 \text{ m/døgn}$  (brukt i Stigebrandt & Molvær, 1990) til  $0.75 \text{ m/døgn}$ . Denne endring gir bare små konsentrasjonsforandringer av brakkvannsplankton i Frierfjorden siden det i denne fjorden er oppholdstiden for brakkvannet og ikke synkehastigheten for plankton som er kritisk for oppblomstringer av brakkvannsplankton. Blomstringenes følsomhet for synkehastigheten til

brakkvannsplankton i Langesundsfjorden henger sammen med at brakkvannslaget her er mye tynnere enn i Frierfjorden. Med en altfor høy synkehastighet vil brakkvannsplankton synke ut av laget før det har rukket å formere seg og derved er en helt nødvendig forutsetning for blomstring ikke oppfylt.

#### A 4. Forslag til videreutvikling av Grenlandsfjordmodellen.

Ved modellsimuleringene med den koplede modellen har vi gjort en del erfaringer som kan komme til nytte for å forbedre modellen ved fremtidige simuleringer. De viktigste av disse omtales nedenfor.

For å oppnå en bedre beskrivelse av spredningen av trefiber bør en ha flere trefiberfraksjoner i modellen. Spesielt en eller to tyngre fraksjoner som eroderes fra elvebunnen ved flom. Det er meget ønskelig å få bedre kjennskap til fiberets egenskaper mht absorpsjon og spredning av lys, synkehastighet for ulike fraksjoner samt biokjemisk nedbryting i vannsøyle og bunnsediment.

For å få en bedre beskrivelse av effektene og spredningen i tid og rom av farvet oppløst organisk materiale skulle en trenge en eller flere tilstandsvariabler i modellen. En trenger også bedre kjennskap til dette materialets optiske og biokjemiske egenskaper (lyssvekkelse, nedbrytingsrate og kjemisk sammensetning).

Klorofyll a synes ikke å være entydig relatert til mengden marint partikulært organisk materiale. I fotisk sone årsaker nettoproduksjon av organisk materiale et markert oksygensignal som allerede nå beregnes av modellen. For å kunne bestemme nettoproduksjonen fra oksygensignalet må en i fremtiden måle oksygen også i fotisk sone.

I perioder vil formodentlig beiting fra dyreplankton være en viktig faktor for bestanden av planteplankton i Grenlandsfjordene. En bør derfor vurdere å ta med dyreplankton i modellen.

Modellen gir tidsutviklingen av bunndyr på alle dyp. Bunndyrene står i modellen for mesteparten av nedbrytingen av marint organisk materiale så lenge som oksygenkonsentrasjonen i overliggende vann er  $>2$  ml/l.

Bunndyrmodellen som brukes ser ut å fungere godt men har ikke kunnet testes siden det ikke foreligger kvantitative data som beskriver tids- og rumsfordeling av integrert mengde av bunndyr i fjordene (målt f.eks. som  $C/m^2$ ). Slike data skulle være meget verdifulle for modelltest og for å gi oppslag til mulige forbedringer av den bentiske delen av modellen.

#### 5. Litteraturliste for appendiks.

- Molvær, J. og A. Stigebrandt, 1991: Underøkelse av eutrofiering i Grenlandsfjordene 1988-89. Delrapport 3. Undersøkelser av vannutskiftning i fjordene. NIVA, Rapport 450/91.
- 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., 1991b: On the rate of nitrification in fjords. (manuscript).
- 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, Rapp. No. 428/90. 74 sid.
- Stigebrandt, A. og J. Molvær, 1991: Undersøkelse av eutrofiering i Grenlandsfjordene 1988-89. Delrapport 6. Modellberegninger av miljøeffekter i Langesundsfjorden - Eidangerfjorden. NIVA, Rapp. No. 4xx/91. xx sid.



---

Norsk institutt for vannforskning  NIVA

Postboks 69 Korsvoll, 0808 Oslo  
ISBN 82-577-2042-9