



Rapport 570/94

Oppdragsgiver

Statens forurensningstilsyn

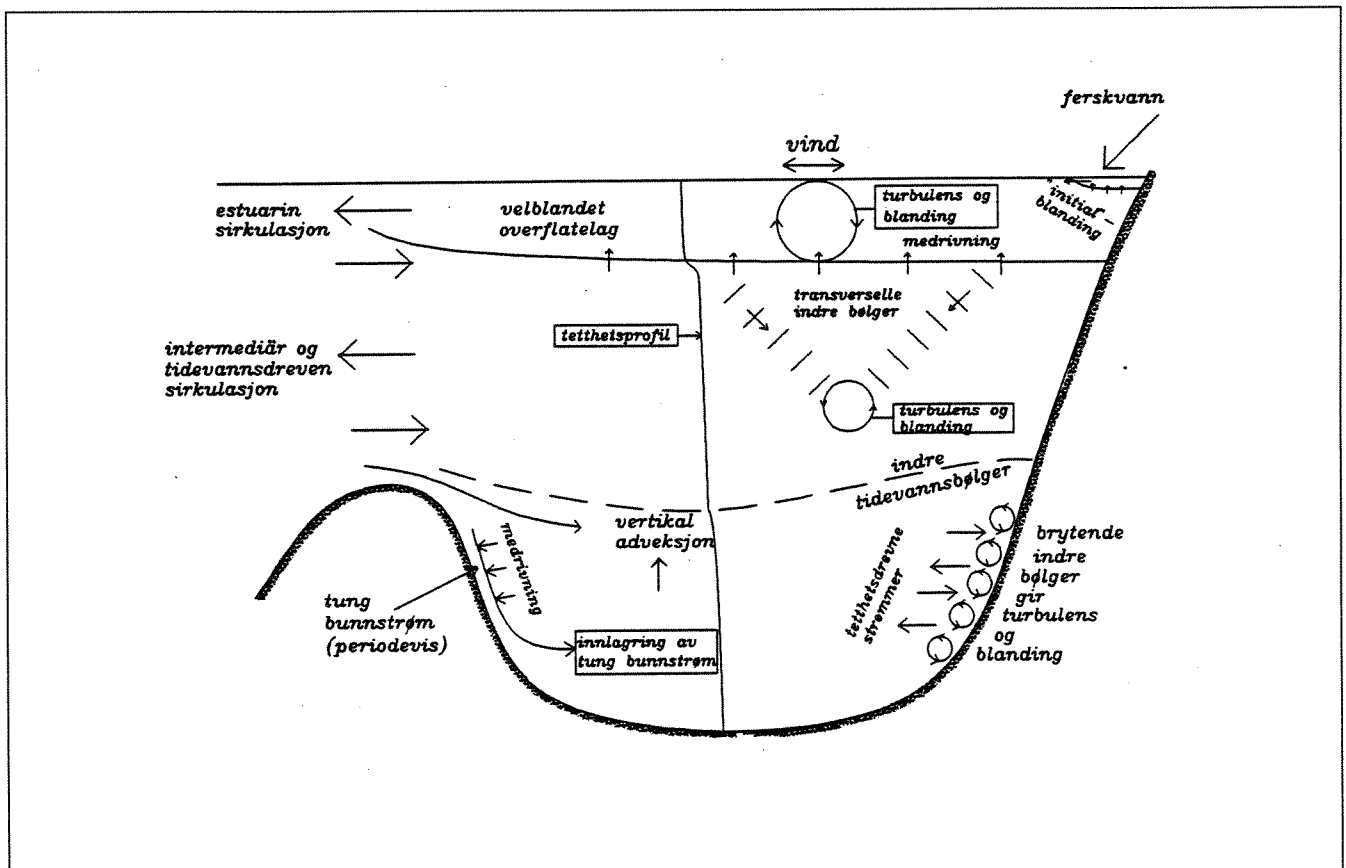
Norsk Hydro Glomfjord fabrikk

Statkraft

Utførende institusjon NIVA

Undersøkelser av miljøforhold i Glomfjord og Holandsfjord i 1991-92

Delrapport 2. Modellsimulering
av effekter av endret ferskvann-
tilførsel til Holandsfjord



NIVA - RAPPORT

Norsk institutt for vannforskning  NIVA

Prosjektnr.: O-910300	Undernr.:
Løpenr.: 3060	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 2. Modellsimulering av effekter av endret ferskvannstilførsel til Holandsfjord.	Dato: 7/6-94	Trykket: NIVA 1994
Forfatter(e): Anders Stigebrandt Jarle Molvær	Faggruppe: Marin økologi	Geografisk område: Nordland
	Antall sider: 49	Opplag:

Oppdragsgiver: Norsk Hydro Glomfjord Fabrikker, Statkraft og Statens forurensningstilsyn (SFT). (Overvåkingsrapport nr. 570/94. TA-nr. 1100/1994).	Oppdragsg. ref.:
--	------------------

Ekstrakt: <p>Det er utarbeidet en matematisk modell som simulerer effekter av endret tilførsel av ferskvann og av partikulært materiale til indre og ytre Holandsfjord. Modellen er brukt for å simulere fem ulike kombinasjoner av disse to variablene.</p> <p>Utslipet fra Svartisen kraftverk vil medføre at tykkelsen av brakkvannslaget i fjorden øker vesentlig, spesielt vinterstid. Dette medfører økt risiko for isdannelse. Konsentrasjonen av planteplankton over og under brakkvannslaget vil øke noe. Endringene i siktedyp vil være relativt små, men avhenger også av hvordan tilførselen av partikulært materiale øker eller avtar for de to delene av fjorden. Det vil fortsatt være gode oksygenforhold i dypvannet etter vassdragsreguleringen.</p>

4 emneord, norske

1. Holandsfjord
2. Vassdragsregulering
3. Modell
4. Planteplankton

4 emneord, engelske

1. Holandsfjord
2. Hydropower regulation
3. Marine modelling
4. Phytoplankton

Prosjektleder



Jarle Molvær

For administrasjonen



Torgeir Bakke

ISBN 82-577-2561-7

**NORSK INSTITUTT FOR VANNFORSKNING
OSLO**

**ANCYLUS
GØTEBORG**

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

DELRAPPORT 2

**MODELLSIMULERING AV EFFEKTER FRA ENDRET
FERSKVANNSTILFØRSEL TIL
HOLANDSFJORD**

**Oslo, 21. april 1994
Anders Stigebrandt, Ancylus
Jarle Molvær, NIVA**

FORORD

Foreliggende rapport presenterer resultater fra en matematisk modell for Holandsfjord. 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 Holandsfjord. Dette ble utført for å dokumentere tilstanden før Svartisen kraftverk kom i drift ved årsskiftet 1992/93, og dermed endret tilførsel av ferskvann til fjorden, og for å gi 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 var således to-delt, og tilstandsbeskrivelsen for Holandsfjord 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 ferskvannstilrenning 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. Morten Due ved Norges vassdrags- og elektrisitetsvesen har bistått med å skaffe tilveie temperaturdata for ferskvannet.

INNHold

Side:

FORORD	1
SAMMENDRAG	3
1. INNLEDNING	4
1.1 Formål	4
1.2 Modellen	5
2. TOPOGRAFI	6
3. MÅLEDATA	7
3.1 Ferskvannsavrenning	7
3.2 Meteorologiske data	8
3.3 Hydrofysiske, vannkjemiske og biologiske data fra fjordområdet	11
3.4 Tilførsler av plantenæringssalter	12
4. HYDROGRAFI	12
4.1. Overflatelaget	12
4.1.1 Ferskvannsinholdet i overflatelaget	15
4.1.2 Hydraulisk kontroll av ferskvannsinholdet i overflatelaget	17
4.2 Intermediært lag	20
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 ferskvannstilførsel	34
5.4 Konklusjoner	39
6. LITTERATUR	41
APPENDIKS 1	42
APPENDIKS 2	43

SAMMENDRAG

- 1. Ved utbyggingen av Svartisen kraftverk innerst i Holandsfjord vil fjordens årlige ferskvannstilførsel nær bli tredoblet. Videre skjer en forflytning av ferskvannstilførselen til fjordens innerste del, og fordelingen over året endres. Dette kan endre visse sider av de hydrofysiske og biologiske forholdene i fjorden. Forut for vannkraftutbyggingen var miljøforholdene i fjorden lite kjent. Undersøkelsen i 1991-92 hadde som formål å dokumentere de viktigste sidene av miljøforholdene før reguleringen var gjennomført, samt gjennom en matematisk modell simulere tilstanden i fjorden etter reguleringen. Denne rapporten gjengir resultatene fra modellsimuleringene.*
- 2. I den matematiske modellen for beregning av virkningene på planktonkonsentrasjoner og siktedyp, er fjorden inndelt i to områder, indre og ytre Holandsfjord og det beregnes gjennomsnittsverdier for hvert område. Modellen ble testet mot ukentlige målinger tatt i Holandsfjord sommeren 1991. Deretter ble den brukt for å studere effekter av ulike kombinasjoner av tilførsler av ferskvann og breslam (partikulært materiale), i alt er beregninger utført for 5 ulike scenarier.*
- 3. Ved ferskvannsreguleringen vil tykkelsen av brakkvannslaget i fjorden øke vesentlig. I fjordens indre del vil typisk tykkelse være 3-5 m og i ytre Holandsfjord en tykkelse på 2-3 m, noe som er omkring en dobling i forhold til tilstanden før reguleringen. Spesielt vinterstid vil brakkvannslaget være mye tykkere enn tidligere, noe som medfører øket risiko for isdannelse. Fjordens overflatevann blir kaldere enn tidligere, spesielt i fjordens indre del.*
- 4. Som følge av øket ferskvannstilførsel og dermed øket omblending og tykkere brakkvannslag kan konsentrasjonen av plannteplankton i brakkvannet øke noe. Hvis tilførselen av breslam avtar etter reguleringen, vil siktedypet øke og dermed blir det også noe høyere konsentrasjoner av plankton under brakkvannslaget.*
- 5. På grunn av stor vannutskifting i kombinasjon med relativ stor terskeldyp (45 m) vil effekten på oksygenforholdene i dypvannet være ubetydelig.*

1. INNLEDNING

1.1 Formål

Ved Stor-Glomfjordutbyggingen blir ferskvannstilførselen til Holandsfjord på årsbasis mere enn tredoblet. I tidsrommet medio august - medio mai blir økningen relativt sett enda større.

Forut for denne undersøkelsen var tilstanden i fjordsystemet lite kjent. Reguleringen kan imidlertid endre visse sider av de hydrofysiske forhold i fjordsystemet, først og fremst tykkere brakkvannslag i fjordens indre del, med lavere saltholdighet, og kortere oppholdstid samt endret tilførsel av breslam til Holandsfjord, og dermed endret turbiditet.

Dette vil i så fall medføre endret gjennomskinnelighet og dermed forandrete forhold for planteplanktonets vekst. På forhånd var det imidlertid ikke mulig å anslå graden av påvirkning, og dermed mulighetene for effekter videre mot dyreplankton og høyere deler av næringskjeden.

Hovedformålet for undersøkelsene i Holandsfjord var:

1. *Etablere status for hydrofysiske, vannkjemiske og biologiske forhold som kan tenkes å bli vesentlig påvirket av endret ferskvannstilførsel. Det velges metoder som gir mulighet for påvisning av eventuelle vesentlige endringer gjennom etterundersøkelser.*
2. *Utvikle en modell som beskriver sammenheng mellom ferskvannstilførsel og hydrofysiske, hydrokjemiske forhold samt biologiske forhold. Modellen skal brukes til å prognostisere effekter av endret ferskvannstilførsel og gi økt forståelse av resultatene fra tilstandsbeskrivelsen.*

Som nevnt i Forordet var denne undersøkelsen ene halvdelen av en bred undersøkelse som omfattet både Holandsfjord og Glomfjord (Molvær et al., 1991). Hva modellutviklingen angår er det en tilpasset versjon av "Glomfjordmodellen" som anvendes på Holandsfjord.

1.2 Modellen

For studie av sammenhengen mellom ferskvannstilførsel, næringssaltutslipp, vannkvalitet og primærproduksjon kreves en modell med høy oppløsning både vertikalt og i tiden. Her blir anvendt en tilpasset versjon av Glomfjordmodellen (Stigebrandt & Molvær, 1994b). Denne modell er av samme type som senest ble brukt for Grenlandsfjordene (Stigebrandt & Molvær, 1990, 1993). Modellen er nærmere beskrevet i Appendiks 2 til denne rapporten.

For å beskrive horisontale gradienter blir fjorden inndelt i to delområder, indre (Nordfjord) og ytre Holandsfjord med tilsvarende hovedstasjoner H2 og H5, se Fig. 1.1. Hvert område blir altså beskrevet ved en vertikal profil. Horisontale gradienter innen hvert delområde vil dermed ikke framgå av beregningene.

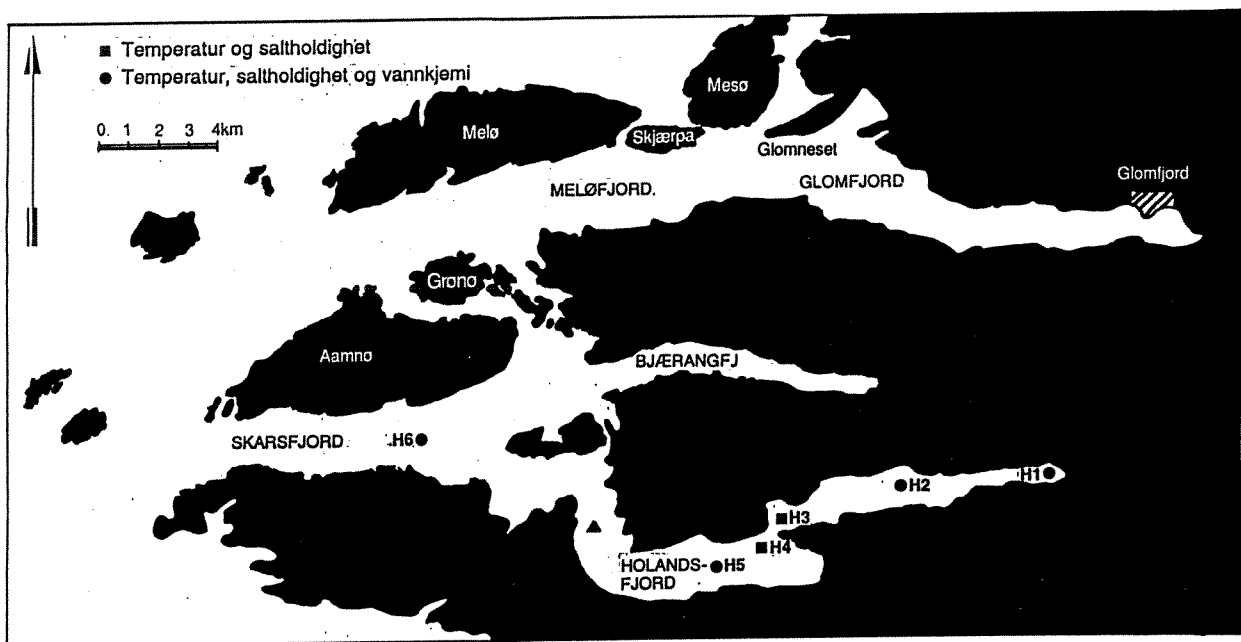


Fig. 1.1 Holandsfjord med inntegnet posisjoner for målestasjoner. Hvor NVEs stasjoner ikke er sammenfallende med dette prosjektets stasjoner, er de merket med svart trekant.

I følge prosjektforslaget skulle terskeldypet brukes som modellens nedre grense, dvs ca. 45 m dyp. Modellen vil dermed omfatte det brakkvannspregede overflatelaget, og det underliggende intermediære sjøvannslaget som har sterke koblinger både til kystvannet og til overflatelaget. Modellen inkluderer imidlertid også dypvannet siden dette er hensiktsmessig.

Modellen gir prognoser for eutrofitilstanden i Nordfjord og Holandsfjord målt ved næringssaltkonsentrasjoner, siktedyp og konsentrasjon av planteplankton ved varierende 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 anledning til de hyppige målinger som ble foretatt i fjorden under den såkalte "intensivperioden" i juni-august 1991.

2. TOPOGRAFI

Nordfjord (indre Holandsfjord) har et areal på 8.9 km² og en terskel med største dyp ca 110 m ved Enganeset. Fjordbassenget innenfor terskelen har et største dyp på ca 250 m. Bredden ved havoverflaten av fjordens munning mot selve Holandsfjord, ved Enganeset, er ca. 375 m. (Fig. 1.1)

Selve Holandsfjord har et areal på 23.2 km² og største dyp er ca 170 m. Terskelen mot ytre kystområder, ved Kalvskjær, er ca. 45 m. En horisontal innsnevring, med største dyp ca 115 m, finnes ved Kopskjær hvor bredden ved havoverflaten er ca. 850 m (Fig. 1.1). Fjordarealer og tersklens bredde for ulike dyp gis i Tabell 2.1 og 2.2. I modellen bruker vi en terskel som har sin bredde fra tverrsnittet ved Kopskjær og maksimalt dyp fra terskelen ved Kalvskjær.

Tabell 2.1. Fjordenes areal på ulike dyp. Indre H=Holandsfjord innenfor Enganeset (dvs. Nordfjord). Ytre H=fjordområdet mellom Enganeset og Kalvskjær.

Dyp (m)	Areal (km ²)		Totalt
	Indre H	Ytre H	
0	8.88	23.2	32.08
10	8.57	21.9	30.47
50	6.45	15.45	21.90
100	3.9	8.2	12.1
200	1.07	0	1.07
230	0	0	0

Tabell 2.2. Munningenes bredde på ulike dyp. "Indre" er sundet ved Enganeset og "Ytre" en kombinasjon av innsnevringene ved Kopskjær og Kalvskjær.

Dyp (m)	Munningsbredde(m)	
	Indre	Ytre
0	370	850
40	290	390
46	280	0
100	175	0
108	0	0

3. MÅLEDATA

3.1 Ferskvannsavrenning

Statkraft har beregnet den daglige ferskvannsavrenningen til de to modellområdene for årene 1977 til og med 1992. Fra disse har vi beregnet at midlere ferskvannsavrenning for perioden 1977-1991 (15 år) var 6.2 m³/s til Nordfjord og 10.7 m³/s til Holandsfjord. Midlere årssyklus for ferskvannsavrenningen er vist i fig. 3.1. Ferskvannsavrenningen til de to fjordene i 1991 vises i Fig. 3.2. Fra denne figuren kan en se at det er store variasjoner i avrenning, med flomtopper i forbindelse med stor nedbør om sommeren og høsten. Dessuten kommer nedbør direkte på havoverflaten. Hvis nedbøren målt ved klimastasjonen Halså er representativ for nedbøren på Nordfjord og Holandsfjord, er

midlere ferskvannstilførsel i 1991 gjennom nedbør direkte på havoverflaten henholdsvis 0.54 og 1.42 m³/s. Usikkerheten i størrelsen av den beregnede ferskvannstilførselen er 10-15% for månedene mai til august og noe større for de øvrige månedene. Usikkerheten mht. tidspunktet for maksimal ferskvannstilførsel er ±1-2 døgn (Magnell, 1994).

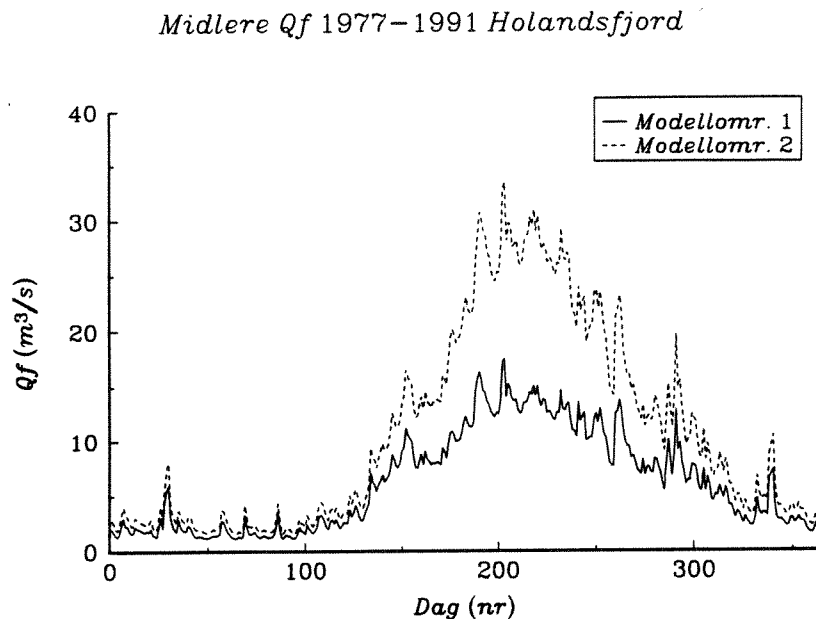


Fig. 3.1. Midlere årssyklus for ferskvannsavrenningen i perioden 1977-91.

Ved utbyggingen av Svartisen kraftverk overføres dels vann som før rant gjennom Glomfjord kraftstasjon, og dels vann fra lokalfeltene for Glomfjord og Nordfjord/Holandsfjord. I tillegg overføres også vann fra nedbørsfelt som før drenerte til sjømråder utenfor disse fjordene. Den uregulerte ferskvannstilførselen til Nordfjord fra lokalfeltet reduseres med ca 50% på årsbasis (til ca. 3.1 m³/s), samtidig som årsforløpet også vil bli noe forandret. For Holandsfjorden blir reduksjonen ca. 67% over året (til ca. 3.5 m³/s) og også her blir årsforløpet noe endret. Med overføring fra Glomfjord kraftstasjon vil midlere driftsvannføring gjennom Svartisen kraftverk å være ca. 50 m³/s.

3.2 Meteorologiske data

Hverken i forbindelse med foreliggende prosjekt eller tidligere er det blitt utført meteorologiske målinger i Holandsfjord. Topografisk og geografisk ligner dette fjordsystemet Glomfjord. For drivning av modellen for Holandsfjord/Nordfjord vil vi derfor bruke samme meteorologiske datasett som blir brukt for Glomfjord-modellen.

Ferskvannstilf. 1991 Holandsfjord

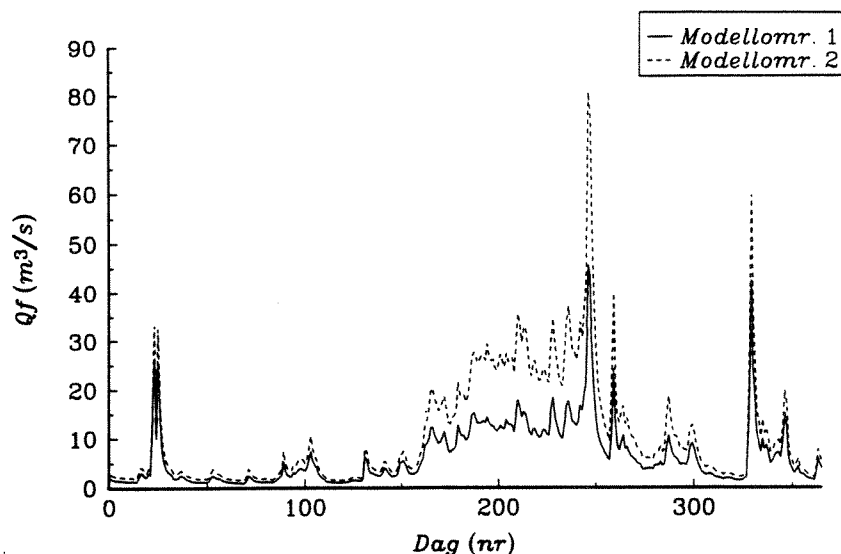


Fig. 3.2. Ferskvannsavrenningen i 1991.

En undersøkelse av meteorologi og luftkvalitet i Glomfjord ble gjennomført i årene 1980-82 (Sivertsen, 1982). I undersøkelsen ble det også gjort sammenligning av vindforholdene i Glomfjord med 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. De sterkeste vindene 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 savnet helt 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. 3.3 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 mest representativ for de mindre beskyttede ytre delene av Glomfjord. Fig. 3.4 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, blandingsvind, luftfuktighet, skydekke og nedbør. Innstråling fra solen samt utveksling av varme, vann og mekanisk energi beregnes fra formlene gitt i Stigebrandt (1990).

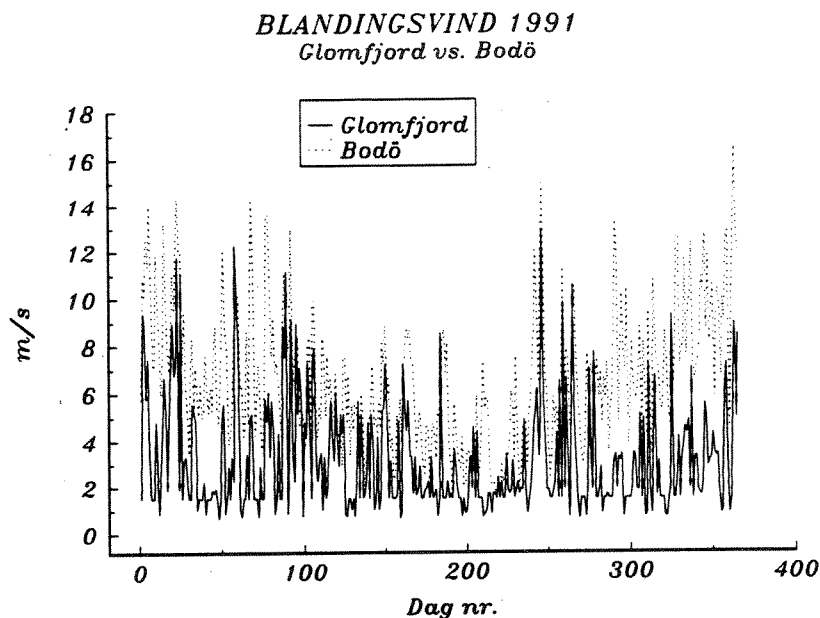


Fig. 3.3. Blandingsvind i 1991 beregnet fra vindobservasjoner fra Glomfjord og Bodø VI.

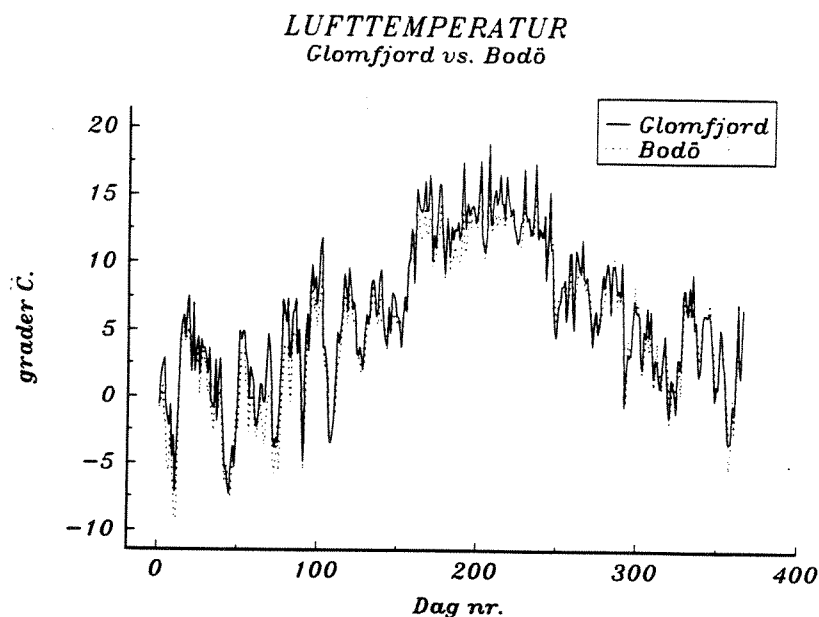


Fig. 3.4. Observert lufttemperatur i 1991 ved Bodø VI og Glomfjord.

3.3 Hydrofysiske, vannkjemiske og biologiske data fra fjordområdet

For å tilfredsstillere 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 i Meløyfjord fordi denne representerer forholdene i kystvannet. Målingene fra G8 skal brukes som ekstern drivning av modellen for Holandsfjord-Nordfjord.

I tidsrommet 29.5 - 7.8.91 ble målinger av temperatur, saltholdighet, plantenæringsalter 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. Målingene på G8 av klorofyll, det eneste målet for konsentrasjoner av planteplankton i intensivundersøkelsen, ble mislykket og mangler. I Nordfjord (stasjon H2) og Holandsfjord (stasjon H5) ble målinger under den reelle intensivperioden utført den 26.6, 3.7, 8.7, 18.7 og 25.7. Salinitet- og temperaturmålingene den 3.7 ble mislykket og mangler. Måleprogram og metodikk er nærmere beskrevet i Holte et al., (1994).

Dessuten foreligger en stor mengde salinitet- og temperaturdata fra seks vertikaler i Nordfjord og Holandsfjord. Dataene kommer fra målinger som NVE startet i 1976. I denne rapporten vil også NVEs data bli analysert.

3.4 Tilførsler av plantenæringssalter

Det er ikke gjort vannkjemiske analyser av ferskvannet som renner ut i Holandsfjord og Nordfjord. Analyser av vannet som går gjennom Glømfjord kraftstasjon gir typiske verdier på 115-130 mg N/m³ og 4-6 mg P/m³ (se rapport 3). Vi bruker disse konsentrasjonene også i Holandsfjord og Nordfjord. Basert på en midlere avrenning på 17 m³/s gir dette en årlig tilførsel på 60-70 tonn nitrogen og 2-3 tonn fosfor til Holandsfjord og Nordfjord.

4. HYDROGRAFI

Vannmassene i Nordfjord og Holandsfjord kan inndeles i tre lag. Overflatelaget med en tykkelse som varierer mellom 0.5 og 3-4 m og med en saltholdighet som i Nordfjord ligger mellom 10 og 33 psu og i Holandsfjord mellom 15 og 33 psu. Et intermediært lag som ligger mellom overflatelaget og terskeldypet (ca. 45m). Dypvannet befinner seg fra terskeldypet og ned til fjordenes største dyp. Terskelen ved Kalvskjær hindrer fri forbindelse med havet for vannet under terskeldypet.

I dette kapitlet beskrives midlere hydrografiske forhold i fjordene hovedsakelig utfra NVEs lange måleserie. Størst vekt blir lagt på overflatelaget siden dette direkte vil bli påvirket av endret ferskvannstilførsel til Holandsfjord og Nordfjord.

4.1. Overflatelaget

NVE har målt saltholdighet og temperatur med høy vertikal oppløsning i seks vertikaler i fjorden siden 1976 (en stasjon nr. 7 ble tatt bare en gang). Tabell 4.1 viser antall målinger for hver stasjon og måned. Stasjonenes beliggenhet vises i Fig. 1.1. Spesielt stasjonene 3 og 4, på hver sin side av Enganaset i henholdsvis Nordfjord og Holandsfjord, er blitt målt et stort antall ganger. De indre stasjonene 1 og 2 i Nordfjord har relativt få målinger vinterstid (desember - april) på grunn av problem å gjøre målinger når fjorden er islagt. Nedenfor blir NVEs målinger utnyttet for å beskrive midlere årssyklus av saltholdighet og temperatur i de øverste 20 m av vannsøylen og for å belyse sammenheng mellom innholdet av ferskvann i overflatelaget og ferskvannstilførselen til fjordene.

Tabell 4.1

Antall TS-målinger på hver stasjon i Nordfjord - Holandsfjord.
Målingene er foretatt av NVE i perioden desember 1976 - mars 1990.

mnd	st. 1	st. 2	st. 3	st. 4	st. 5	st. 6
jan	4	6	26	28	12	10
feb	4	7	28	30	12	13
mar	3	7	23	22	9	8
apr	7	9	22	24	10	10
mai	10	10	22	23	11	9
jun	10	11	26	25	11	10
jul	12	12	27	27	11	11
aug	9	10	27	27	9	10
sep	8	9	25	24	8	7
okt	5	5	19	18	6	6
nov	7	7	24	23	8	8
des	2	5	27	28	10	9

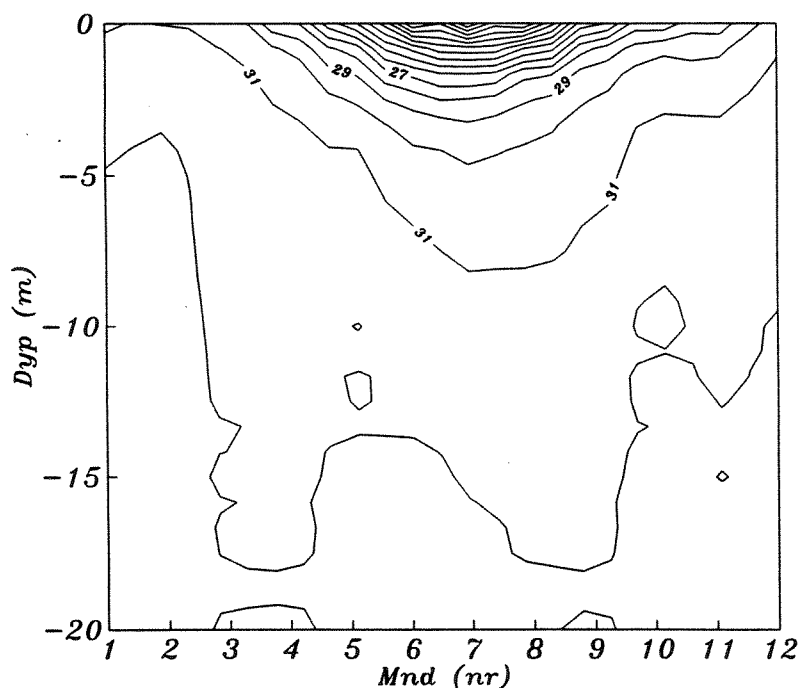


Fig. 4.1. Midlere årssyklus av saltholdighet 1977-91 på NVEs stasjon 4.

Både Nordfjord og Holandsfjord hadde et markert, ofte 1-4 m dypt brakkvannslag i perioden april til desember (fig. 4.1). Overflatesaltholdigheten i Nordfjord var lavere enn 20 psu i perioden mai til september. I samme periode er overflatesaltholdigheten noen enheter (psu) høyere i Holandsfjord. Midt i vinteren med ofte lav ferskvannstilførsel var

saltholdigheten høy og lagdelingen er svak helt opp til havoverflaten. Temperaturen var lavere enn 7°C i perioden november-april med minimum lavere enn 4°C i januar-februar ved havoverflaten (Fig. 4.2). Temperaturen oversteg 10°C i de øverste 5 m i juni-august.

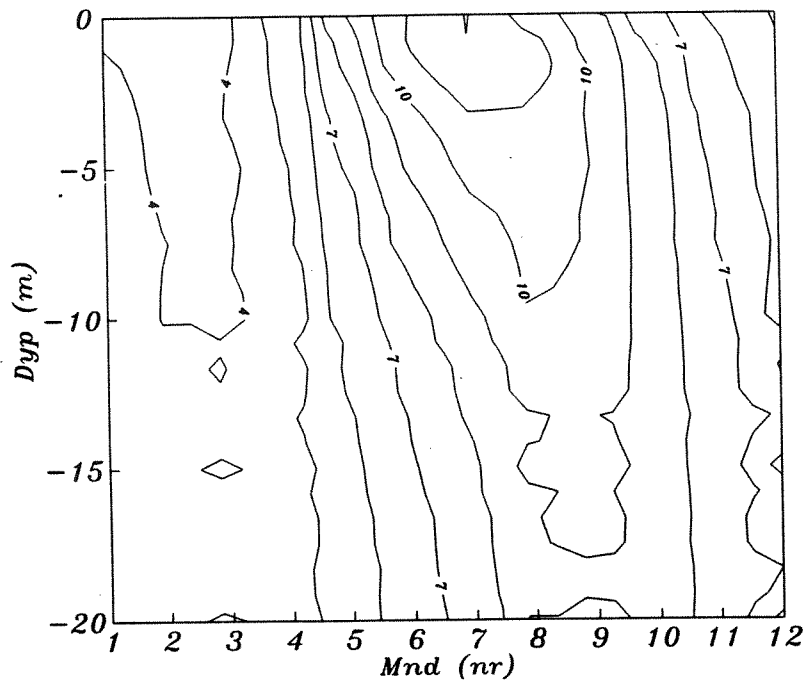


Fig. 4.2. Midlere årssyklus av temperatur 1977-1991 på NVEs stasjon 4.

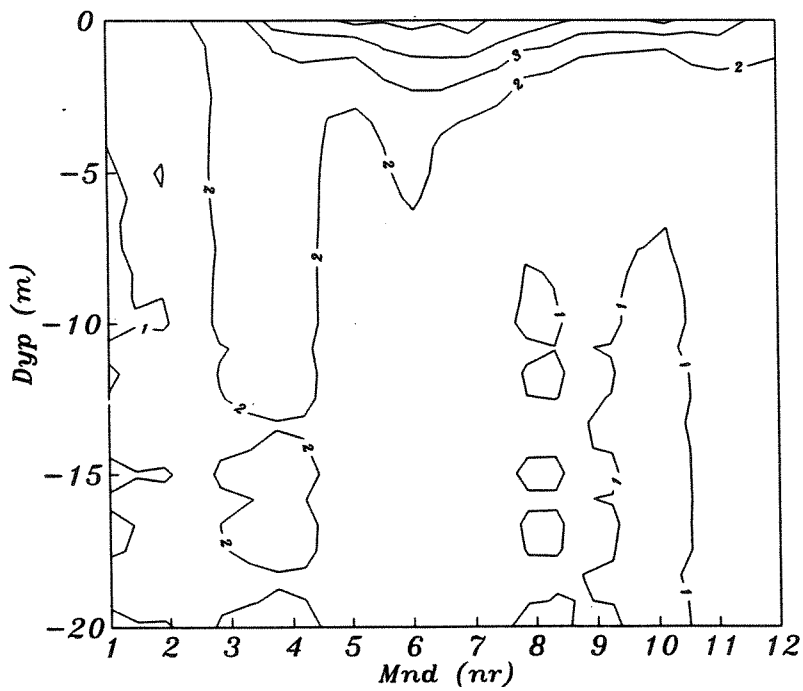


Fig. 4.3. Årssyklus av saltholdighetens standardavvik på NVEs stasjon 4.

For å gi et inntrykk av variabiliteten i lagdelingen over året vises i Fig. 4.3 saltholdighetens standardavvik på NVEs st. 4 i Holandsfjord. Variabiliteten i de øverste 5 m var større i Nordfjord enn i Holandsfjord, spesielt midt i sommeren (juni og juli).

4.1.1 Ferskvannsinholdet i overflatelaget

Lokal ferskvannstilførsel til fjorden medfører at overflatelaget får 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 målt saltholdighet på dypet z under havoverflaten, D_{ref} er et referansedyp i øvre del av intermediære laget som antas 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 var dypere enn overflatelaget i Holandsfjord og Nordfjord. Beregningene er ikke særlig følsomme for valget av D_{ref} så lenge dette er i intervallet 5-15 m. Hvis en skulle velge et mye dypere referansedyp kan en få signifikante bidrag til H_{1f} fra det intermediære laget, hvis dette er lagdelt mht. saltholdighet.

For å få enkle mål for overflatelagets saltholdighet og tykkelse kan en bruke en ekvivalent to-lags-sjiktning hvor øvre laget har saltholdighet S_1 og tykkelse H_1 og nedre lag har saltholdighet S_{ref} . At lagdelingen er ekvivalent med den observerte innebærer at både ferskvannsinhold (ferskvannshøyde, H_{1f}) og potensiell energi PE har samme verdi som i den observerte lagdelingen (se Stigebrandt, 1987). Den potensielle energien PE i den oppmålte profilen er

$$PE = g \rho_f \beta \int_0^{D_{ref}} (S_{ref} - S(z)) z dz \quad (2)$$

Her er ρ_f ferskvannets tetthet og β er definert gjennom ligningen for brakkvannets tetthet som funksjon av saltholdighet S , $\rho = \rho_f(1 + \beta S)$. Den numeriske verdien av β er 0.0008 (psu^{-1}). Ved denne beskrivelsen av tettheten har en sett bort fra temperaturens innvirkning. Dette er vanligvis er en meget god tilnærming i brakkvannslaget fjorder, ikke minst i fjorder i Nordland hvor temperaturen er lav stort sett hele året.

Den potensielle energien i den ekvivalente to-lags-lagdelingen skal være lik PE, dvs.

$$g \rho_f \beta (S_{ref} - S_1) \frac{H_1^2}{2} = PE \quad (3)$$

Ferskvannsinholdet i den ekvivalente lagdelingen skal være lik H_{1f}

$$H_1 \frac{S_{ref} - S_1}{S_{ref}} = H_{1f} \quad (4)$$

Fra lign. (3) og (4) kan S_1 og H_1 uttrykkes i H_{1f} og PE

$$S_1 = S_{ref} - \frac{g \rho_f \beta H_{1f}^2 S_{ref}^2}{2 PE} \quad (5)$$

$$H_1 = \frac{2 PE}{g \rho_f \beta H_{1f} S_{ref}} \quad (6)$$

Vi har utnyttet NVEs målinger og beregnet H_{1f} , PE, S_1 og H_1 for samtlige tidspunkt på samtlige stasjoner. Deretter har vi for hver stasjon beregnet middelerverdier av disse størrelsene og av S_{ref} . Resultatene er presentert i Tabell 4.2.

Tabell 4.2. Stasjonsvis analyse av NVEs målinger i Nordfjord/Holandsfjord. Midlere S_1 , H_1 , S_{ref} og H_{1f} med $D_{ref}=7$ m.

stasjon (nr)	S_1 (psu)	H_1 (m)	S_{ref} (psu)	H_{1f} (m)
1	24.84	3.21	31.20	0.47
2	26.21	3.45	31.44	0.47
3	27.85	3.59	31.59	0.35
4	28.34	3.52	31.62	0.30
5	28.12	3.30	31.66	0.32
6	28.28	3.74	31.65	0.32

Tabell 4.2 viser at overflatelagets midlere tykkelse er omtrent konstant i hele fjorden mens midlere saltholdighet øker litt utover fjorden. Disse resultatene viser at fjorden tilnærmevis kan betraktes som en horisontalt velblandet fjord. Midlere ferskvannshøyde H_{1f} er omtrent konstant med unntak for de to innerste stasjonene i Nordfjord hvor ferskvannshøyden er større enn lenger ut i fjordsystemet. Også midlere referansesaltholdighet S_{ref} er praktisk talt konstant i fjordsystemet. Ved tolkingen av resultatene i denne tabellen skal en imidlertid ha i mente at det er ulike antall

observasjoner for hver stasjon og at stasjon 1 og 2 i Nordfjord har bare et fåtall vintermålinger med lav ferskvannstilførsel (se Tab. 4.1). Ferskvannsvolumet i ulike deler av fjorden gis av produktet av ferskvannshøyden og det fjordareal som hver stasjon representerer.

4.1.2 Hydraulisk kontroll av ferskvannsinholdet i 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). I en fjord hvor dypet av brakkvannslaget er mye mindre enn dypet av fjordmunningen er den teoretiske ferskvannshøyden H_{1f} gitt av (se Stigebrandt og Molvær, 1994a)

$$H_{1f} = \phi \left(\frac{Q_f^2}{g \beta S_{ref} B_m^2} \right)^{1/3} \quad (7)$$

hvor $g = 9.82 \text{ m/s}^2$ og B_m er munningens bredde. I følge teorien, se nedenfor, skal koeffisienten ϕ ha en verdi mellom 1.5 og $3^{1/2}$ for fjorder med smal munning. Dette forutsetter at det finnes en såkalt indre hydraulisk kontroll av utstrømningen av brakkvann. Denne antas å være lokalisert til en tverrseksjon av fjorden med minimumsbredde. Verdien av ϕ er bestemt av overflatelagets dynamikk i området fra fjordens indre og fram til den indre hydrauliske kontrollseksjonen (se Stigebrandt, 1975). Et karakteristisk trekk ved en indre hydraulisk kontroll er at tykkelsen av brakkvannslaget (og dermed ferskvannshøyden) minsker vesentlig ved passasje av kontrollen.

Stasjon 3 og 4, på hver sin side av sundet ved Enganeset, har flest målinger. Disse stasjonene har stort sett samme midlere ekvivalent lagtykkelse samt midlere ferskvannshøyde (Tabell 4.2). Det kan ut fra dette fastslås at i måleperioden 1977-91 var det vanligvis ikke noen indre hydraulisk kontroll i dette sundet. I slutten av 70-åra ble det gjort en laboratoriesimulering av blandingen i sundet ved Enganeset. Det ble da antatt at en indre hydraulisk kontroll var etablert i sundet (Smith et al, 1979), noe som altså NVEs målinger viser å ikke være tilfelle.

Vi har gjennomført en regresjonsanalyse av observerte H_{1f} mot Q_f hvor vi tilpasset data til funksjonen

$$H_{1f} = a Q_f^b \quad (8)$$

Konstantene a og b blir bestemt ved den såkalte minste kvadraters metode. For

ferskvannstilførselen Q_f bruker vi for alle stasjoner tilførselen til Holandsfjord pluss Nordfjord. Ferskvannet har en midlere oppholdstid av størrelsesorden en uke i fjordsystemet. For beregningene har vi derfor brukt middel av ferskvannstilførselen over syv døgn før prøvetaking. Resultatene er robuste og altså lite følsomme for valget av periodelengde for midling (Stigebrandt og Molvær, 1994a).

I Tabell 4.3 nedenfor presenteres resultatene av den statistiske analysen for de seks stasjonene. Tabellen viser at det er relativt god sammenheng mellom H_{1f} fra regresjonskurven og observerte H_{1f} . Eksponenten b har en verdi som er meget nær den fra teorien forventede verdien (0.67). For stasjonene i Holandsfjord er amplitudekoeffisienten a ca. 50% høyere enn den forventede verdien fra ligning (7). Dette skyldes dels at vi ikke har tatt hensyn til kontraksjon av strømmen i munningen og dels at den estuarine returstrømmen formodentlig ikke er jevnt fordelt i hele vannsøylen under brakkvannslaget men er konsentrert til nivå like under brakkvannslaget (Stigebrandt og Molvær, 1994a). Disse effektene kan en foreløpig inkludere i ligning (7) gjennom å sette $\phi=2.3$ for Holandsfjord. For indre og midtre Nordfjord (san 1 og 2) er den observerte ferskvannshøyden klart større enn den forventede. Det kan være flere årsaker til dette. En kan være at dominerende vestlig vind (se avsnitt 3.2 i Stigebrandt og Molvær, 1994b) under dagtid (da målinger blir foretatt) til tider stuer opp brakkvannet innerst i fjorden. Man bør også forvente at friksjon mellom brakkvannet og underliggende vann skal gi opphav til noe økt ferskvannstykkelse, spesielt lengst inn i Nordfjord hvor fjorden er smal.

Usikkerheten i analysen, uttrykket ved størrelsen på standardfeilen i koeffisientene a og b , kan skyldes flere faktorer. En er at vi i denne analysen ikke har med ferskvannstilførsel gjennom nedbør direkte på havoverflaten, noe som også gir en systematisk overvurdering av størrelsen av koeffisienten b i analysen ovenfor. En annen er at den beregnede ferskvannstilførselen er beheftet med en viss usikkerhet. En tredje er indre bølger og andre vindeffekter som til tider kan gi opphav til oppstuvning og en ujevn fordeling av ferskvann i fjordenes overflatelag. En fjerde mulig feil ligger i målt saltholdighet og dyp, det sistnevnte spesielt hvis båten fra hvilken målinger blir foretatt driver med vind eller strøm. Den type salinoterminstrument som ble brukt av NVE er forøvrig kjent for å ikke være særlig nøyaktig (± 0.2 psu hvis instrumentet er godt kalibrert).

Tabell 4.3 Resultat av regresjonsanalyse av observerte H_{1f} vs Q_f vha. lign. (8).
 \pm angir standardavviket i koeffisientene a og b.

Stasjon	a	b
1	0.09 ± 0.02	0.59 ± 0.07
2	0.08 ± 0.01	0.61 ± 0.05
3	0.04 ± 0.00	0.72 ± 0.04
4	0.04 ± 0.00	0.73 ± 0.04
5	0.06 ± 0.01	0.60 ± 0.07
6	0.04 ± 0.01	0.72 ± 0.07

3-6	0.04 ± 0.00	0.70 ± 0.02

En kan oppsummere analysen av NVEs målinger med å konstatere at ferskvannshøyden i brakkvannslaget i Holandsfjord og ytre Nordfjord (st. 3) følger teorien for en fjord med smal munning med en indre hydraulisk kontroll ved Kopskjær hvis en bruker $\phi=2.3$. De innerste to stasjonene i Nordfjord viser dog en større ferskvannshøyde enn øvrige stasjoner, noe som kan skyldes vindoppstuing, tidvis stor lokal ferskvannstilførsel samt friksjonseffekter.

Analysen viser at det til vanlig ikke er noen indre hydraulisk kontroll i sundet ved Enganeset. Årsaken er at den totale ferskvannstilførselen til Holandsfjord innenfor Kopskjær er vesentlig større enn den til Nordfjord. Etter vassdragsreguleringen vil imidlertid ferskvannstilførselen innenfor Enganeset være nesten like stor som den totale innenfor Kopskjær. Forholdene vil da sannsynligvis ligge til rette for at en indre hydraulisk kontroll skal etableres ved Enganeset (Stigebrandt og Molvær, 1994a).

Gjennom å bestemme den empiriske verdien av ϕ til 2.3 har vi kalibrert den enkle modellen for ferskvannshøyden, ligning (7), til å gjelde for Holandsfjord. Vi kan bruke modellen for å anslå ferskvannshøyden i Holandsfjord og Nordfjord etter utbyggingen av Svartisen kraftverk. Før utbyggingen gir en samlet ferskvannstilførsel til fjordene på for eksempel $4 \text{ m}^3/\text{s}$ (typisk vinterverdi, se Fig. 3.1) en ferskvannshøyde på ca. 0.1 m i begge fjordene. Etter utbyggingen gir en ferskvannstilførsel på $50 \text{ m}^3/\text{s}$ til Nordfjord en ferskvannshøyde på ca. 0.6 m i Holandsfjord og ca. 1 m i Nordfjord. For sammenligning med forholdene før utbyggingen kan nevnes at denne ferskvannstilførselen er noe høyere enn det tidligere månedsmiddel for juli (maksimum, se Fig. 3.1). En kan derfor etter utbyggingen forvente sterk lagdeling ved havoverflaten også om vinteren. Det er derfor

mulig at islegging under perioder med frost vil kunne bli mye mere omfattende enn før utbyggingen.

4.2 Intermediært lag

Det intermediære laget omfatter dybdeintervallet mellom overflatelaget og den ytre terskelen, dvs mellom 0.5-4 og 45 m dyp. På grunn av god vannutveksling drevet av tidevannet og svingninger i tetthetsfeltet i kystvannet er forholdene i det intermediære laget omtrent lik forholdene i kystvannet. I følge dataprogrammet Fjordmiljø (Stigebrandt, 1992) bør midlere vannutskiftningsrate i det intermediære laget i Holandsfjord inklusiv Nordfjord være ca 1500 m³/s slik at midlere oppholdstid i fjorden for vann i dette laget blir ca. 10 døgn.

4.3 Dypvannet

Dypvannet strekker seg fra ytre terskeldyp (45 m) og ned til største dyp. Holandsfjord er en såkalt bølgefjord slik at tidevannet genererer indre tidevannsbølger ved den ytre terskelen. Disse bølgene er instabile og mister sin energi til turbulens i dypvannet, og er der den helt dominerende energikilde for turbulens. I følge dataprogrammet Fjordmiljø skal oppholdstiden for dypvannet være ca. 20 måneder og laveste oksygenkonsentrasjon (minimum) skal være ca 4.8 ml/l. Det senere stemmer godt med målingene i 1991-92 (se Holte et al. 1994).

5. RESULTAT FRA MODELLBEREGNINGENE

Indre (Nordfjord) og ytre Holandsfjord betraktes som to adskilte modellområder, med tilsvarende hovedstasjoner (stasjon H2 og H5, 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 den målte drivning av fjorden under den såkalte intensivperioden i 1991, fra 25 juni (dag 176) til 24 juli (dag 205), se kap. 3.3 (Appendiks 1 gir en fullstendig liste over dagnr. og datoer). Deretter følger en sammenligning mellom målt og beregnet tilstand i fjorden under intensivperioden. Beregnede effekter av forandret drivning (forandret tilførsel av ferskvann og mineralpartikler) blir deretter presentert og diskutert. Kapitlet blir avsluttet med oppsummering og konklusjoner.

5.1 Drivning av fjorden under intensivperioden

Ferskvannstilførselen under intensivperioden er vist i Fig. 5.1. Under de første ti dagene økte den totale tilførselen til fjordene fra ca 20 m³/s til 40 m³/s (døgnmiddel) med ca. 1/3 av tilførselen til Nordfjord og resten til Holandsfjord. Under resterende del av perioden var tilførselen relativt konstant. Lufttemperaturen (døgnmiddel) avtok de første dagene i intensivperioden fra ca. 14°C til ca 10°C i månedsskiftet juni-juli 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 den største delen av perioden (Fig. 5.3). Innstrålingen av varme fra sola er beregnet å variere mellom ca. 300 W/m² (døgnmiddel) under dager med lettskyet pent vær og omtrent halvparten av dette dager med overskya vær. I Fig. 5.4 vises nedbør og luftfuktighet i intensivperioden.

Konsentrasjonene av næringssalter i ferskvannet er satt til henholdsvis 125 mg N/m³ (som nitrat) og 5 mg P/m³ (som fosfat), jmf. kap. 3.4 ovenfor. For ferskvannets temperatur har vi brukt NVEs målinger ved utløpet fra Engabrevatn.

Forholdene på stasjon G8 under intensivperioden ble bestemt ved målinger følgende dager 25/6, 2/7, 12/7, 16/7 og 24/7. Dessuten lå det automatisk registrerende målere (Aanderaa) med sensorer for strømhastighet og strømretning, saltholdighet og temperatur på dypene 5, 25, 50 og 80 m i en posisjon øst for G8. Disse målingene er rapportert i Stigebrandt & Molvær (1994b).

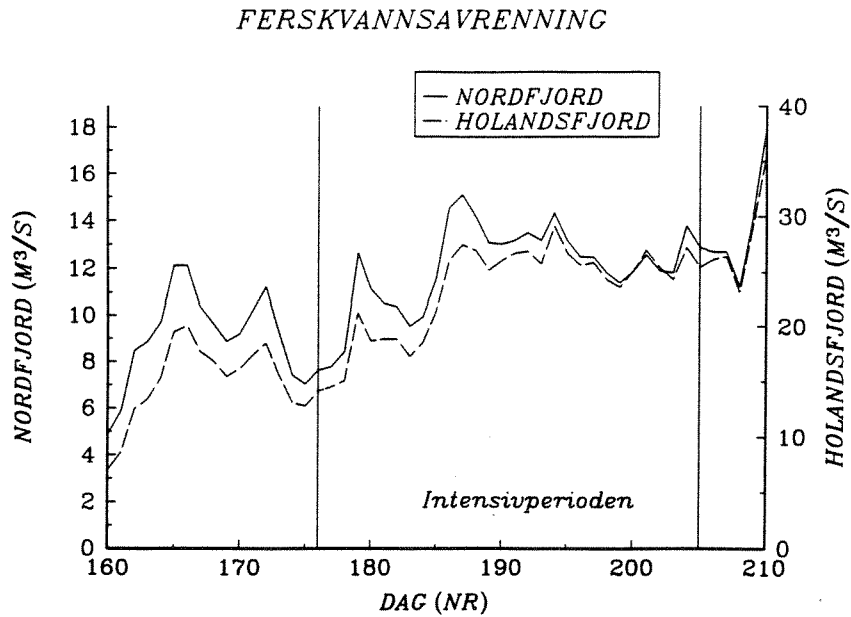


Fig. 5.1. Ferskvannstilførsel til Nordfjord og Holandsfjord i intensivperioden 25/6 (dag 176) - 24/7 (dag 205) i 1991.

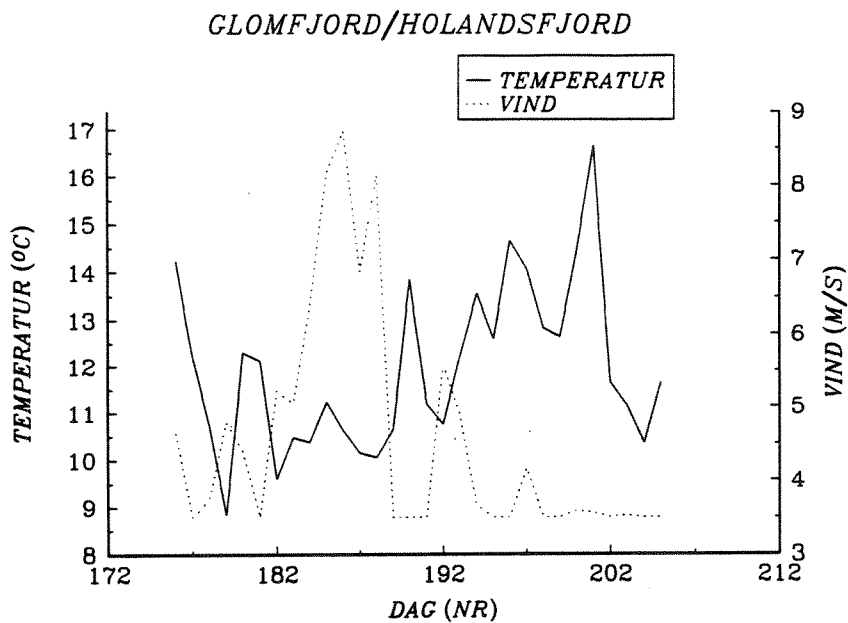


Fig. 5.2. Lufttemperatur og blandingsvind (døgnmiddel) i intensivperioden.

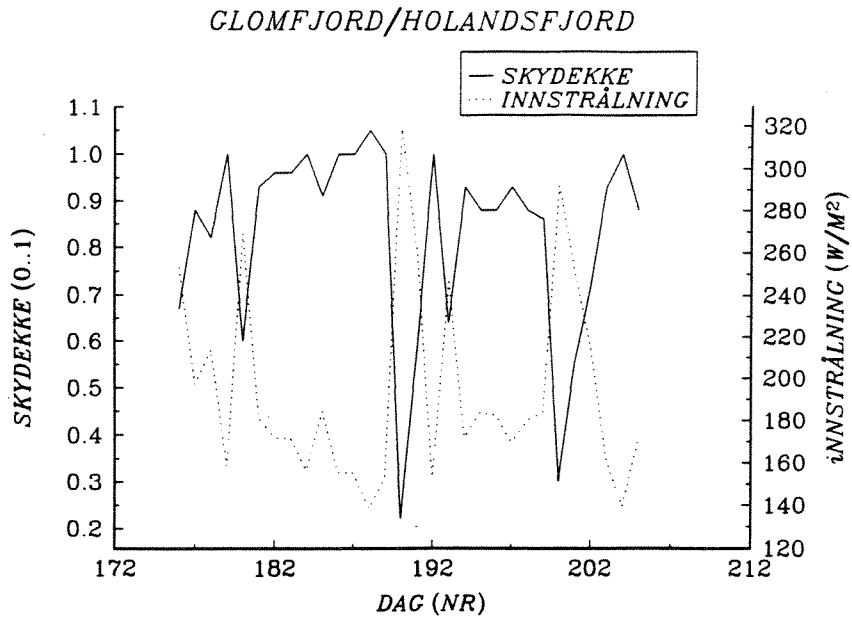


Fig. 5.3. Skydekke og innstråling fra solen (døgnmiddel) i intensivperioden.

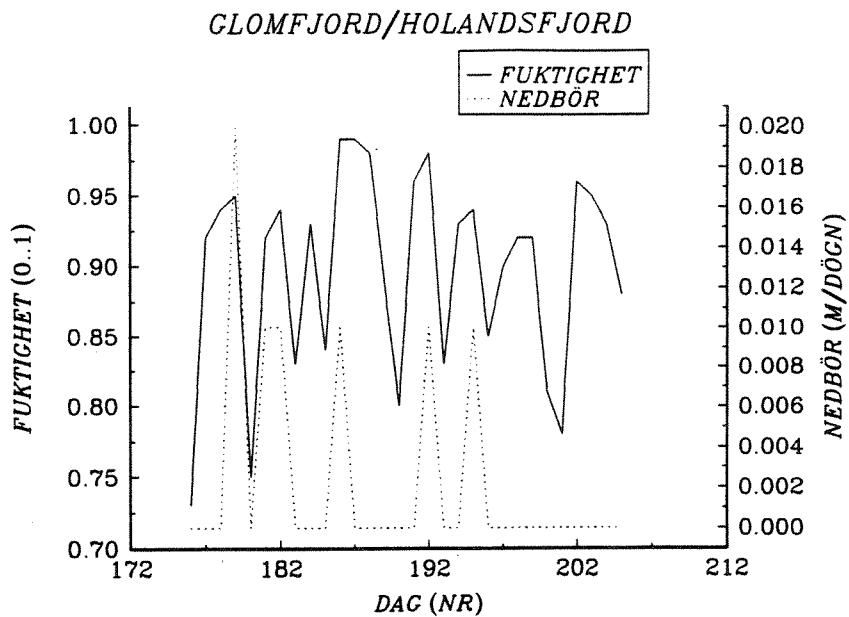


Fig. 5.4. Luftfuktighet (døgnmiddel) og nedbør under døgnet i intensivperioden.

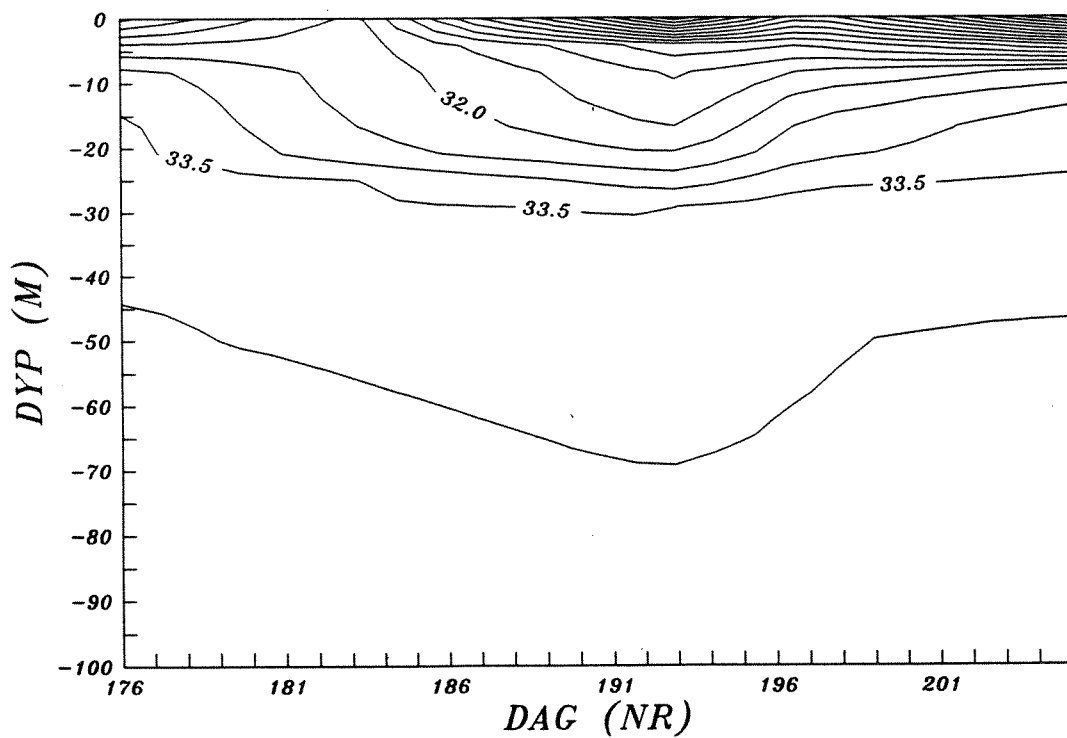


Fig. 5.5. Saltholdigheten på ulike dyp under intensivperioden på stasjon G8.

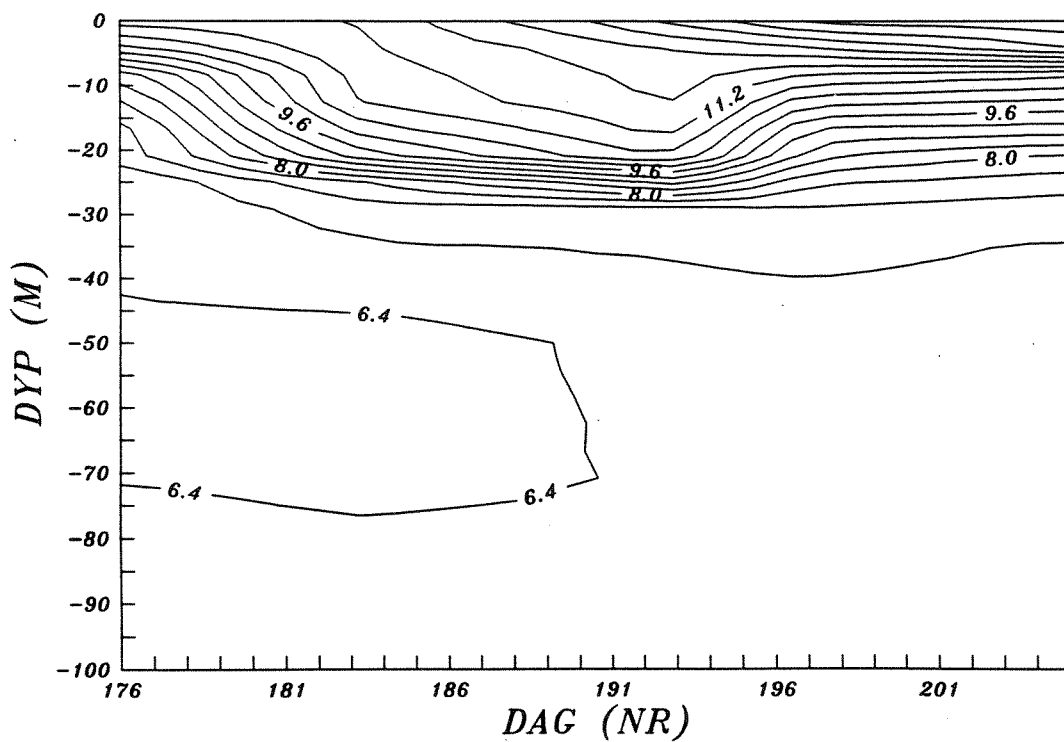


Fig. 5.6. Temperaturen på ulike dyp under intensivperioden på stasjon G8.

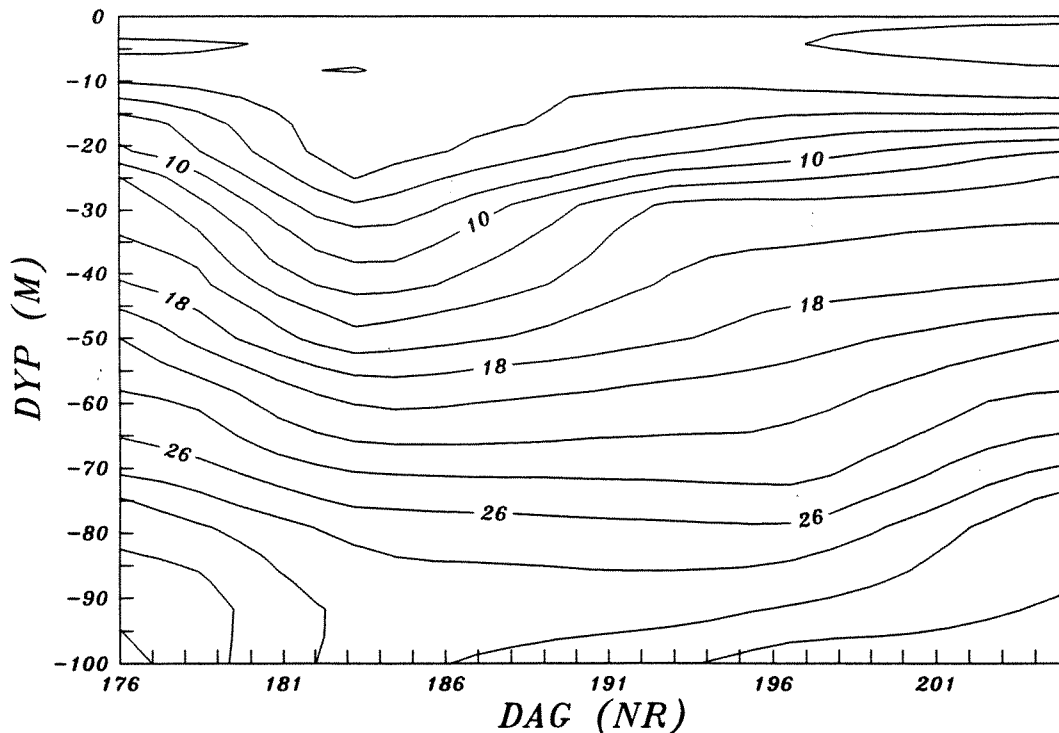


Fig. 5.7. Fosfatkonsentrasjonen (mgP/m^3) på stasjon G8 under intensivperioden.

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 vannsøylen i forbindelse med en intermedier innstrømming av overflatevann fra kysten. Denne kan også ses meget tydelig i registreringene fra Aanderaa-måleren på 25 m dyp (se Fig. 4.6 og 4.7 i Stigebrandt & Molvær (1994b)). 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 tyder på en positiv nettoproduksjon av organisk materiale (Fig. 5.9). Siktedypet avtok fra 6-7 m i begynnelsen til 3-4 m mot slutten av intensivperioden, se Stigebrandt & Molvær (1994b).

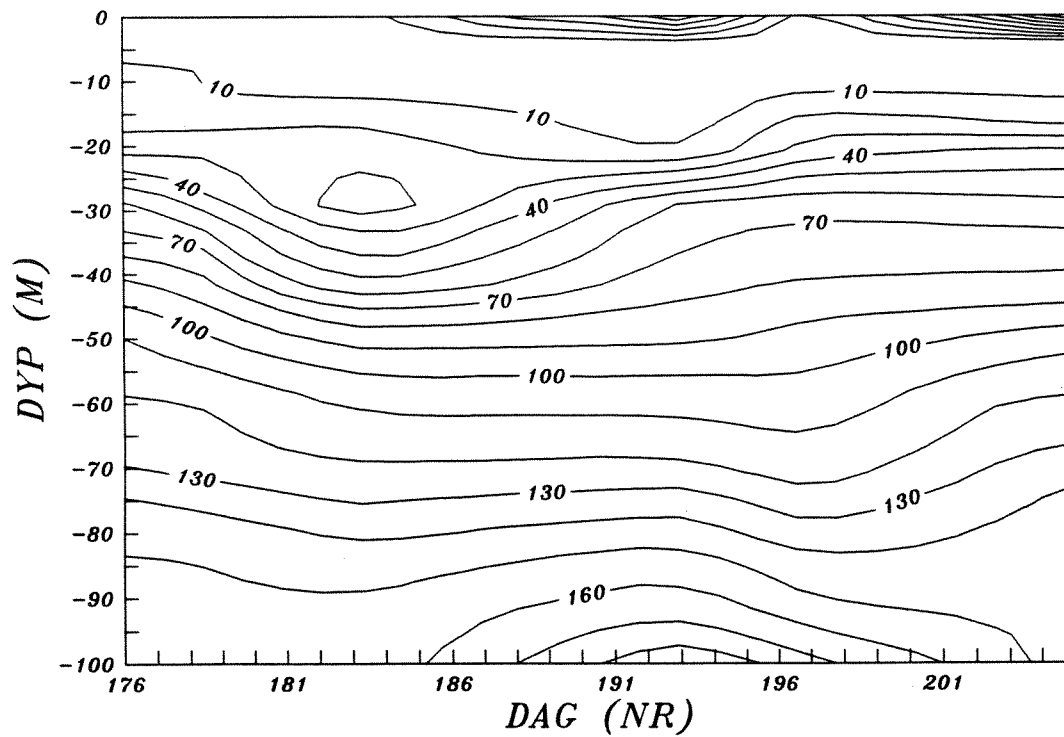


Fig. 5.8. Nitratkonsentrasjonen på ulike dyp under intensivperioden på stasjon G8.

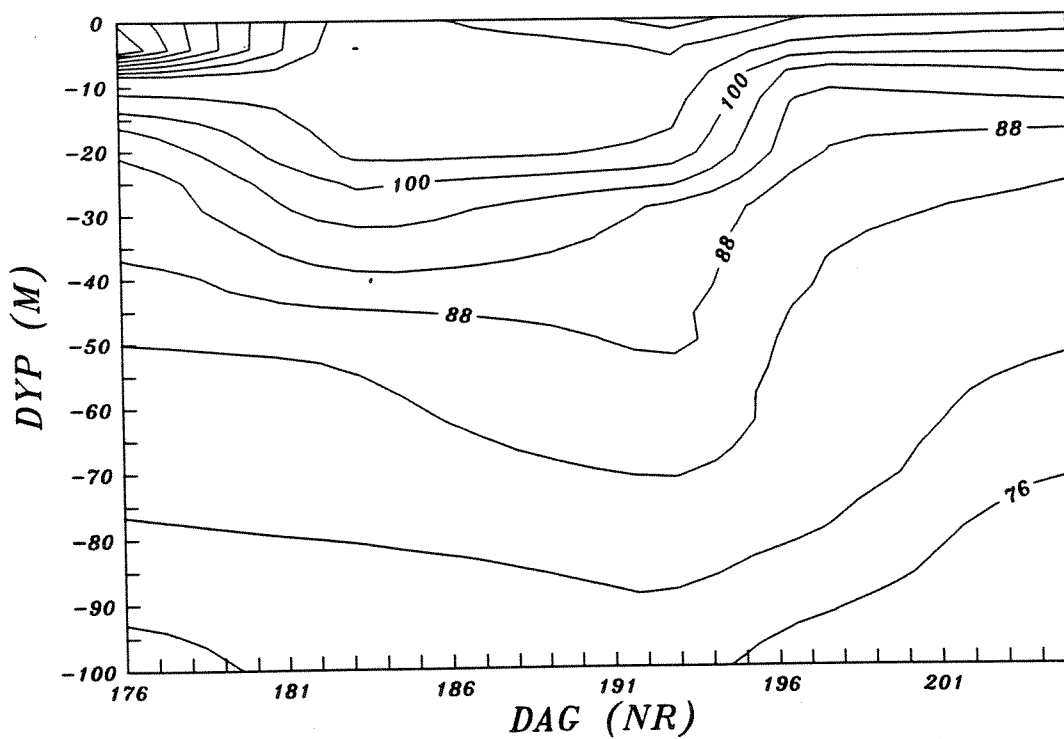


Fig. 5.9. Oksygenmetning (%) på ulike dyp under intensivperioden på stasjon G8.

I forbindelse med økningen av ferskvannstilførselen i første halvdel av juni (Fig. 5.1) minsket siktedypet kraftig. I Nordfjord minsket siktedypet fra 6 til ca 3.5 m mens reduksjonen i Holandsfjorden var mindre og lignet mer reduksjonen på stasjon G8. Dette kan tyde på at ferskvannet inneholdt mye mineralpartikler som raskt sedimenterte i fjordene. Denne tolkingen stemmer med målingene av sedimentasjon, se Holte et al. (1994). I modellen har vi lagt inn partiklenes effekt på lysforholdene slik at midlere siktedyp i intensivperioden blir ca 4.5 m.

5.2 Sammenligning av målte og beregnede tilstand

Vi har kjørt modellen for Holandsfjord og Nordfjord for intensivperioden. I dette kapitlet sammenligner vi målte og beregnede egenskaper hos fjordene. Ved sammenligningen minnes om at målte hydrografiske, hydrokjemiske og biologiske data ikke er fullstendige og dessuten tildels av usikker kvalitet, se kap. 3.3. Videre kan naturlige svingninger i systemet og lokale forskjeller påvirke målingene og gjøre det noe usikkert om de er representative som gjennomsnittsverdier for tilstanden i modellområdene. For sammenligningen viser vi både målte og beregnede isopletdiagrammer for de øverste 100 m gjennom intensivperioden for noen utvalgte størrelser hvor vi har relativt gode data. Det minnes om at lokale gradienter innen modellområdene ikke beregnes.

Saltholdigheten og vannets tetthet like over terskeldypet (45 m) i kystvannet (G8) var for en stor del av perioden høyere enn i bassengvannet i fjordene. Dette medførte at bassengvannet ble utskiftet i intensivperioden. Dette framgår tydelig av Fig. 5.10a som viser observert og Fig. 5.10b som viser beregnet saltholdighet i Holandsfjorden. Bildet er omtrent det samme for Nordfjord (ikke vist). Modellen viser noe mindre blanding mellom brakkvannet og underliggende sjøvann enn hva som er observert. I modellen blir ferskvannet ved utløpet i fjorden blandet med tre ganger så mye vann tatt fra et fire meter tykt lag med saltholdighet større enn 20 psu (såkalt initialblanding).

Temperaturutviklingen i hele vannmassen stemmer relativt godt med observert temperaturutvikling, se Fig. 11a og b. Temperaturen i øverste metrene bli dog altfor høy, spesielt i perioder med pent vær. En sannsynlig årsak til de høye temperaturene er at vi i modellen ikke har tatt hensyn til skyggeeffekten av omgivende, høye fjell. Den dynamiske effekten av noe forhøyet temperatur ved havoverflaten er helt uten betydning siden saltet er helt dominerende for tetthetsfeltet.

For vannlaget mellom havoverflaten og 45 m dyp (terskeldypet) er midlere beregnet vannutskiftning mellom Holandsfjorden og kystvannet i intensivperioden ca. $1700 \text{ m}^3/\text{s}$, noe som er i overensstemmelse med estimatet gitt i kap. 4.2.

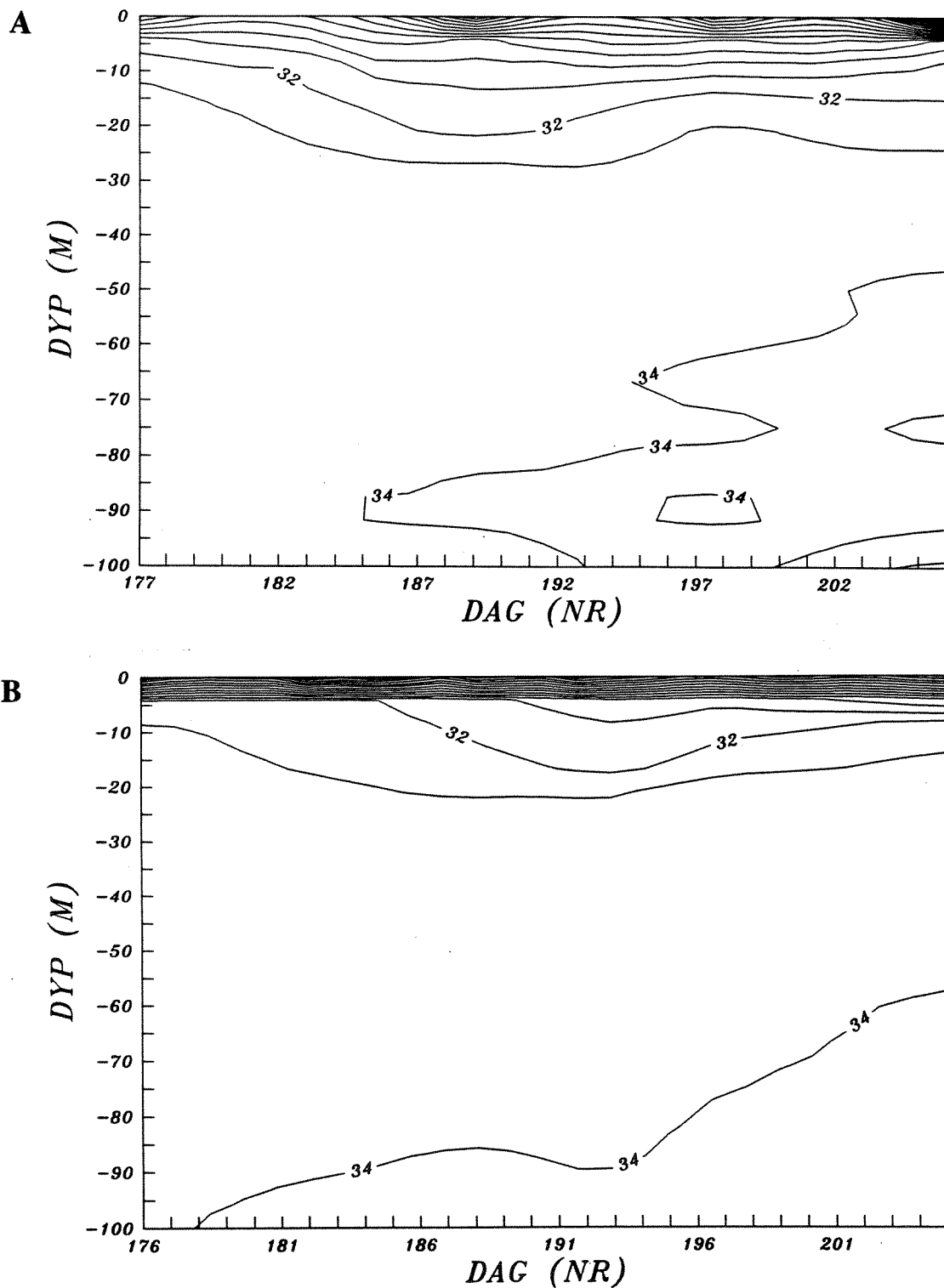


Fig. 5.10 Saltholdighetsutvikling (psu) i Holandsfjorden (utenfor Enganeset) under intensivperioden.

a) observert og b) beregnet fra modellen.

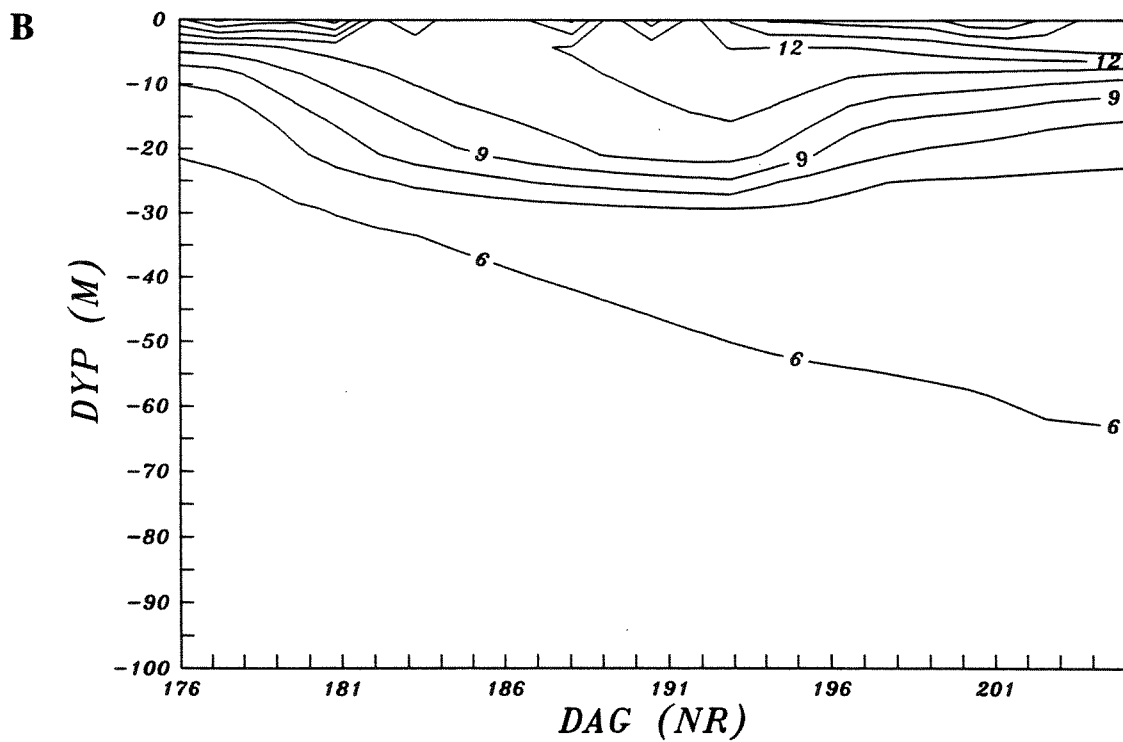
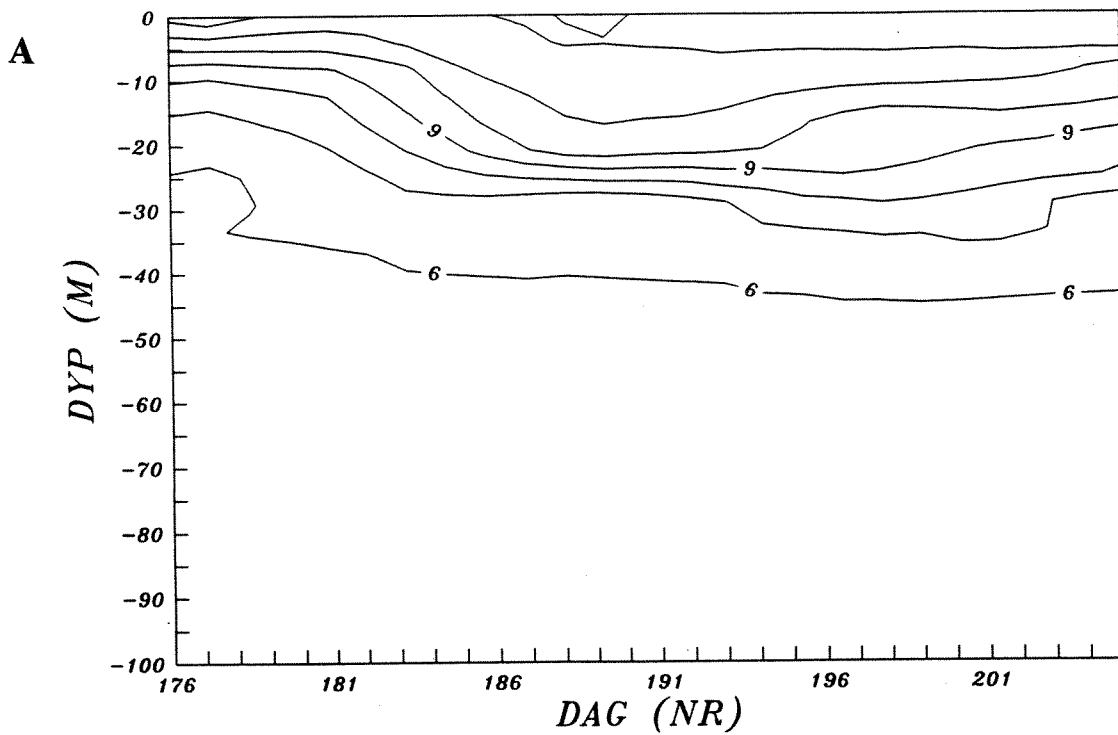


Fig. 5.11 Temperaturutvikling ($^{\circ}\text{C}$) i Nordfjord (innenfor Enganeset) under intensivperioden.
 a) observert og b) beregnet fra modellen.

Beregnete konsentrasjoner av næringssalter i overflatelaget er omtrent som observert. Midt i det intermediære laget er den beregnede vertikale konsentrasjonsgradienten sterkere enn observert men konsentrasjonene i dypvannet er omtrent som observert. Som eksempel vises nitratkonsentrasjonene i Holandsfjord (Fig. 5.12. a,b). Beregnede konsentrasjoner er høyere enn observerte i dybdeintervallet 25-50 m. Noe av denne forskjellen kan skyldes at utskiftningen av bassengvann er mere omfattende i modellen enn i virkeligheten. Dette kan skyldes at målt saltholdighet på G8 formodentlig er litt for høy (relativt til st. H2 og st. H5). Dette beror på at vi var nødt til å nedjustere de fleste målte saltholdigheter på H2 og H5 med 0.3 psu for å få den vertikale tetthetsfordelingen til å være statisk stabil.

Data om plankton (som klorofyll) på stasjonen H2 og H5 finnes bare for ett tokt (8/7 - dag 189), se Holte et al. (1994). Det ble målt et bredt maksimum i dybdeintervallet 5-10 m med ca 3 mg klorofyll/m³. Gjennom å bruke en synkehastighet for plankton lik 0.3 m/døgn får vi også i modellen et planktonmaksimum i dette dybdeintervallet hvilket med omregningsfaktoren 1.4 (1 mg organisk P=1.4 mg klorofyll) har samme amplitude som det observerte. Oksygen ble observert på hvert tokt på stasjon H2. Som allerede er omtalt kan oksygenmålingene brukes som et mål for biologisk nettoproduksjon. Fig. 5.14 a,b viser at målt og beregnet oksygenmetning i Nordfjord stemmer godt overens. Dette er et godt tegn på at planktonbiomassen i modellen stemmer overens med virkelig algebiomasse. Oksygen ble ikke målt i Holandsfjordens overflatelag.

Vi kan oppsummere sammenligningen mellom modell og observasjoner med at overensstemmelsen i hovedsak er god. Det må imidlertid påpekes at sammenligningsgrunnlaget hva gjelder plankton og visse næringssalter er meget spinkelt. Modellen gir noe for høye temperaturer i overflatelaget, muligens fordi den ikke har tatt hensyn til skyggeeffekten av omgivende høye fjell en del av døgnet. De beregnede planktonkonsentrasjoner stemmer godt med observerte både mht. vertikal fordeling og amplitude. Den siste konklusjonen er særlig basert på resultat av oksygenmålingene.

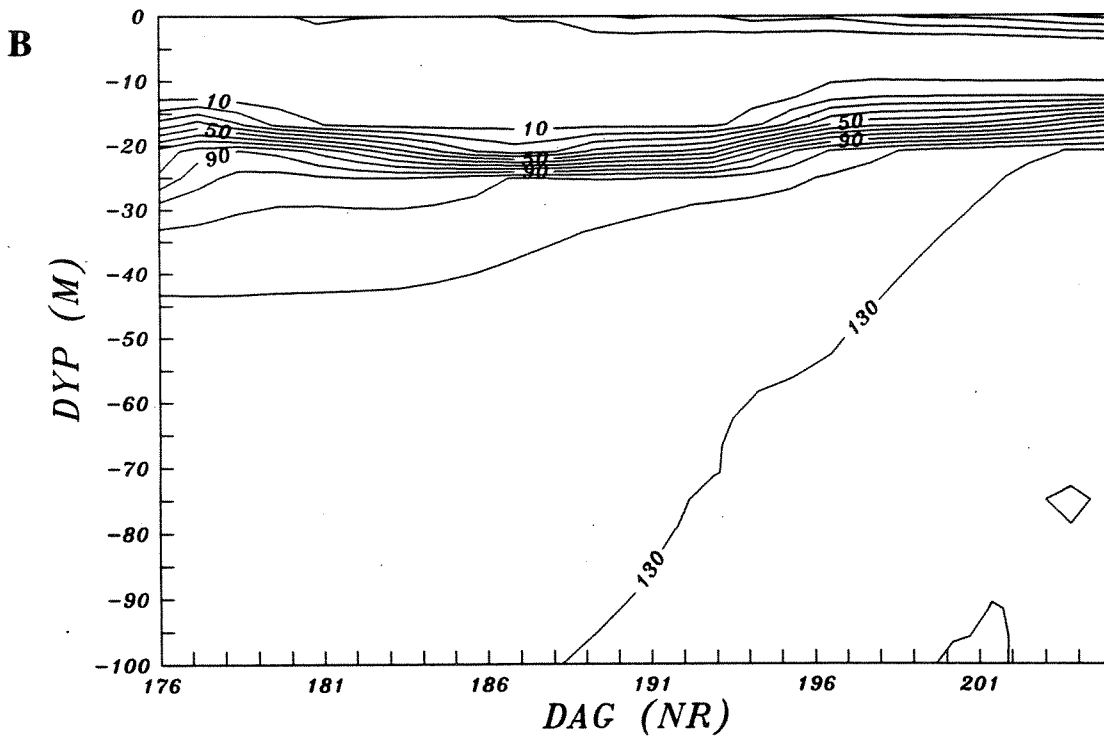
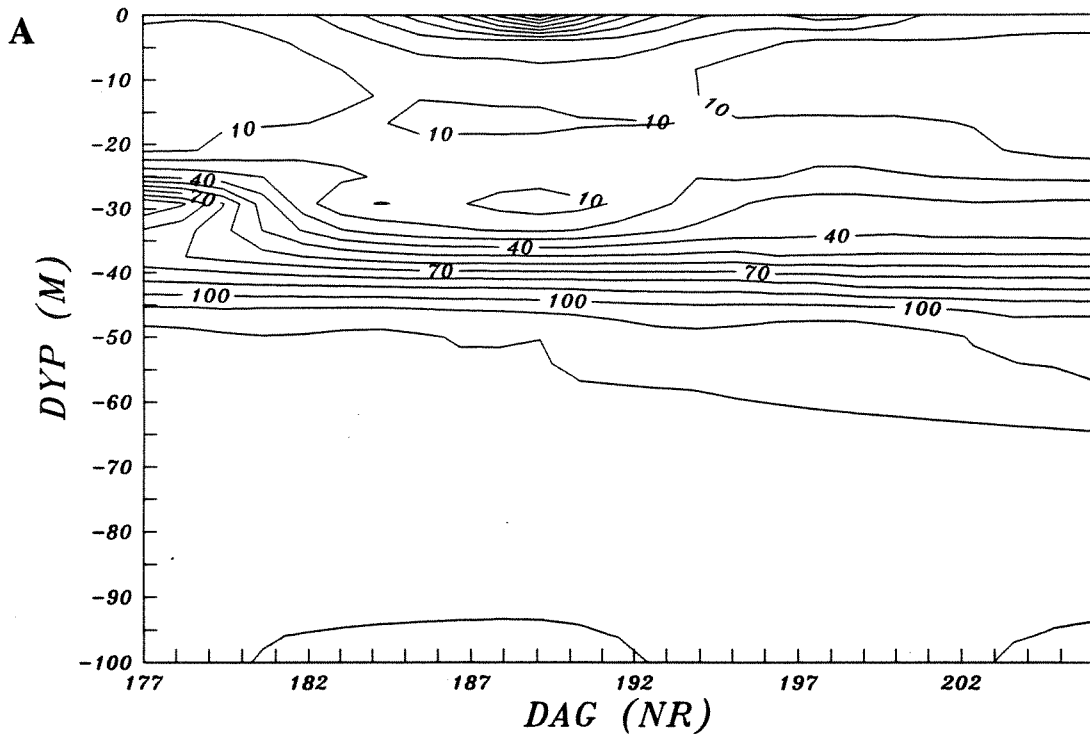


Fig. 5.12 Utvikling av nitratkonsentrasjonene (mg N/m^3) i Holandsfjorden (utenfor Enganeset) under intensivperioden, a) observert og b) beregnet fra modellen.

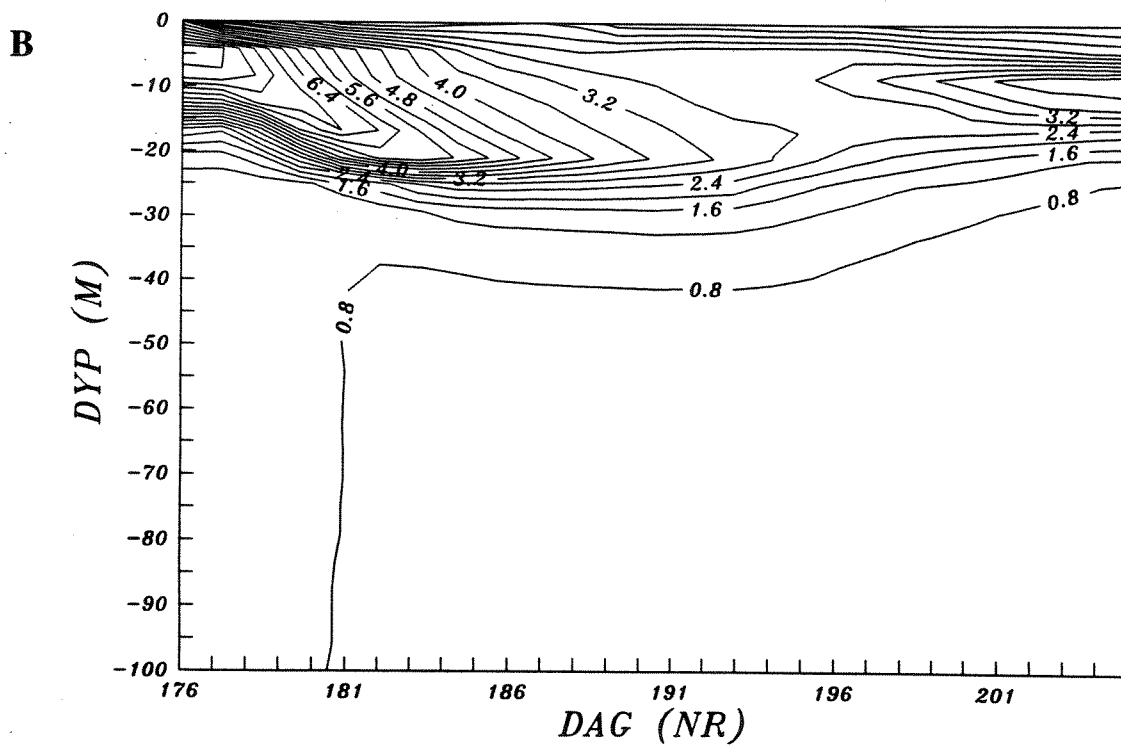
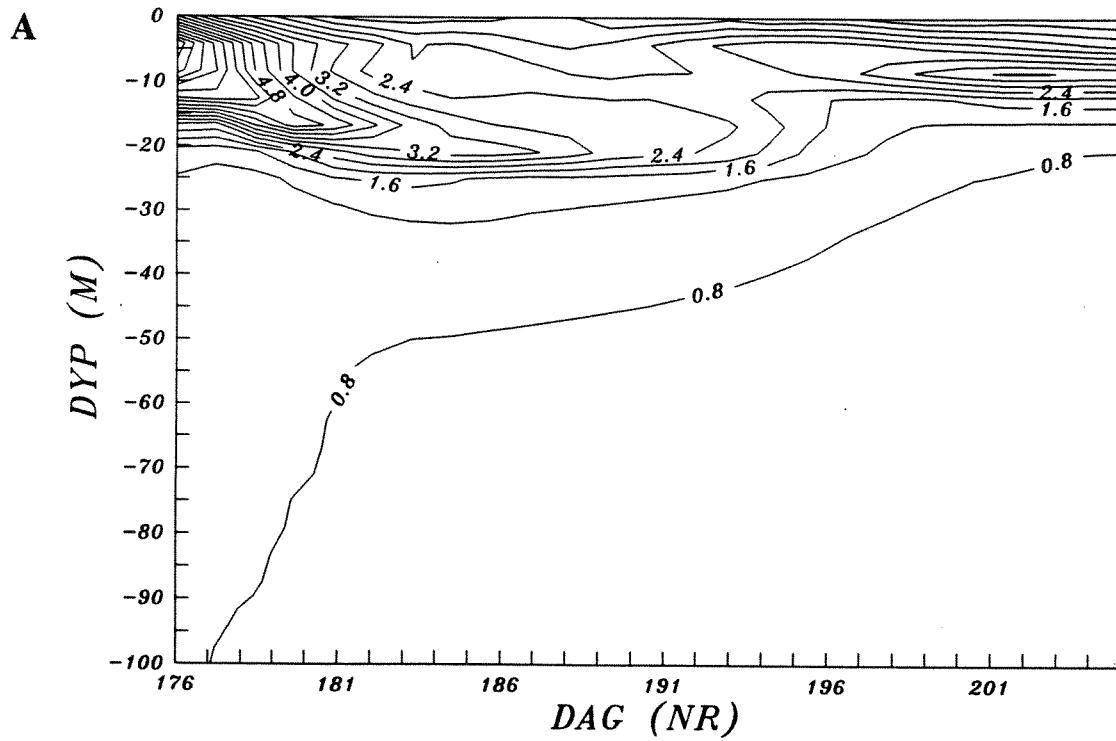


Fig. 5.13 Beregnet planktonkonsentrasjon (mg P/m^3) i a) Holandsfjord og b) Nordfjord (innenfor Enganeset).

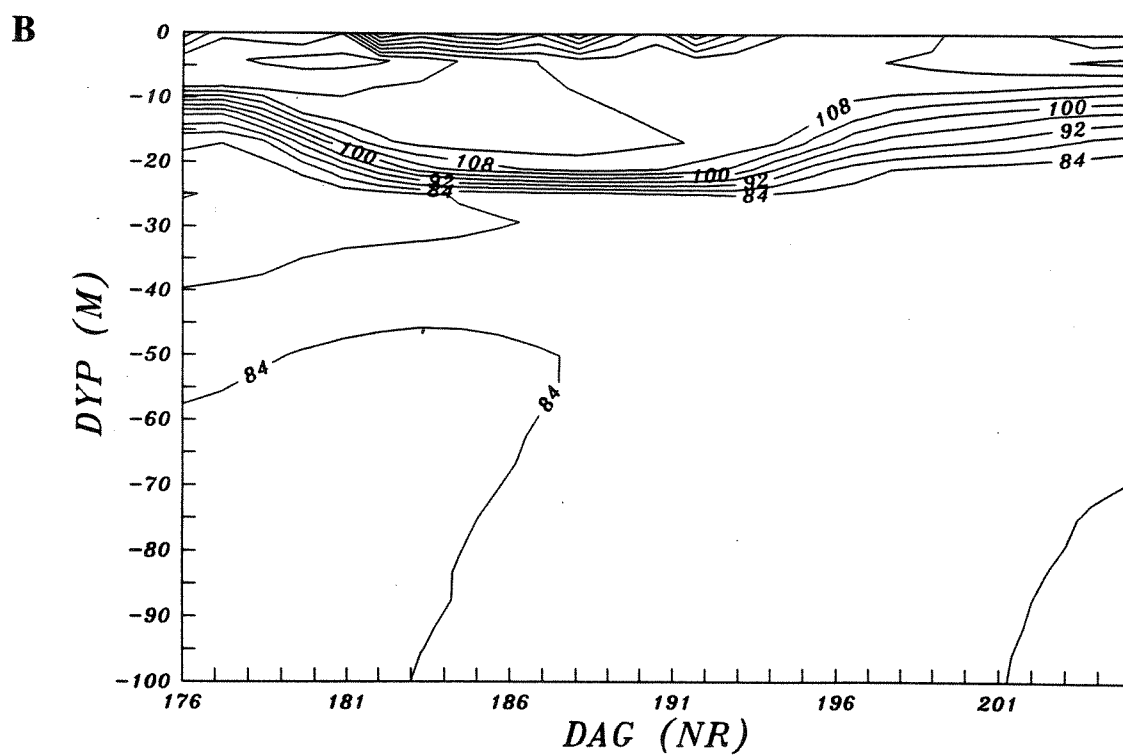
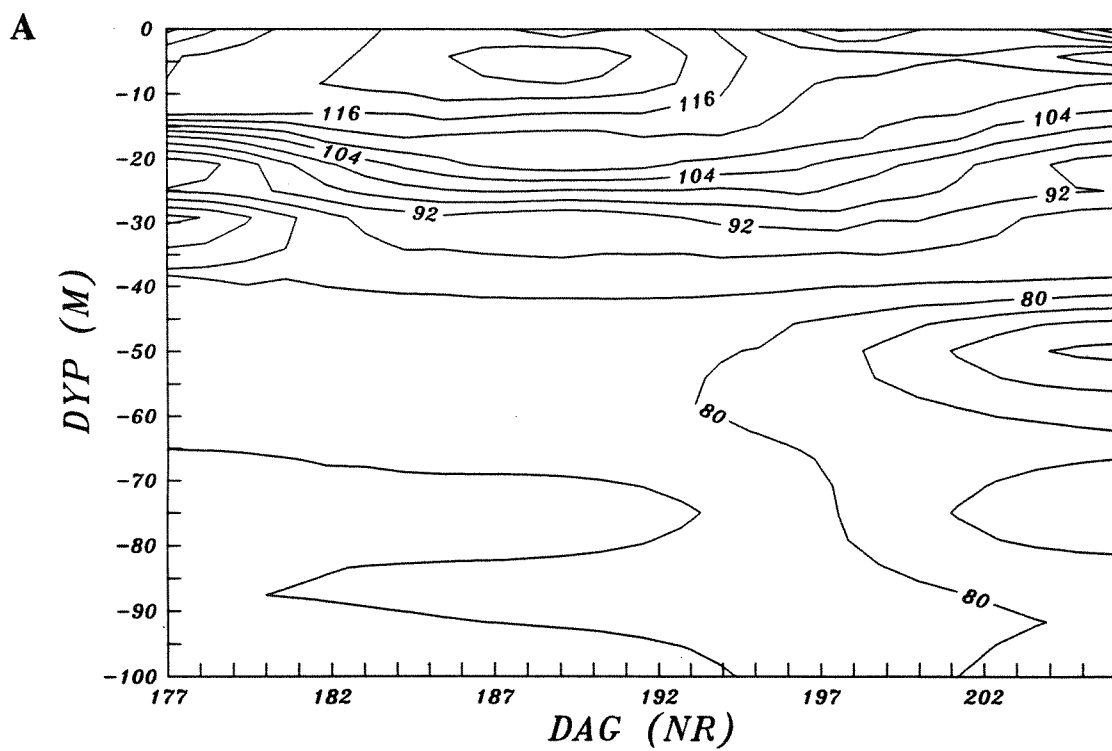


Fig. 5.14 Oksygenmetning (%) i Nordfjord under intensivperioden. a) observert og b) beregnet fra modellen.

5.3 Modellprognoser for tilstandforandringer ved forandret ferskvannstilførsel

Beskrivelse av scenariene:

For å simulere tilstandsforandringer forårsaket av reguleringen av ferskvannet har vi kjørt modellen for to scenarier med ferskvannstilførselen til Nordfjord lik henholdsvis 60 (scenario 2) og 120 m³/s (scenario 3). Den direkte tilførselen til Holandsfjord er i begge scenariene redusert med 67%, jf. kap. 3.1. Scenario 1 er modellsimuleringen av tilstanden under intensivperioden presentert ovenfor. I samtlige scenarier er som tidligere ferskvannet ved utløpene i fjorden blandet med tre ganger så mye vann tatt fra et fire meter tykt lag med saltholdighet større enn 20 psu. Vi regner med samme konsentrasjoner av næringssalter som før reguleringen.

Lysforholdene i vannet og siktedypet vil forandres hvis mengden partikler tilført med ferskvannet forandres. Vann som reguleres vil til vanlig få lavere partikkelinnhold enn tidligere på grunn av sedimentering av partikler i vannmagasin. Det "nye" vannet som overføres til fjorden fra bl.a. Glomfjords nedslagsfelt vil også ha relativt lav partikkelinnhold. For å studere effekter av forandret tilførsel av partikler har vi kjørt to alternativer for scenariene 2 og 3. I alternativ a er bidraget til svekningskoeffisienten fra partikler 0.14 og i alternativ b er bidraget satt til 0.20 (m⁻¹), samme verdi som er brukt i scenario 1. Den valgte forandringen som tilsvarer en reduksjon av partikkeltilførselen med 30% er ikke basert på viten, men er ment å demonstrere systemets følsomhet for tilførsel av mineralpartikler. De fem scenariene er sammenfattet i tabell 5.1.

Tabell 5.1. Scenarier for modellkjøringene.

Scenario nr.	Ferskvannstilførsel	Tilførsel av partikler
1	Som sommeren 1991	Som sommeren 1991
2a	60 m ³ /s	70% av mengden sommeren 1991
2b	60 m ³ /s	Som sommeren 1991
3a	120 m ³ /s	70% av mengden sommeren 1991
3b	120 m ³ /s	Som sommeren 1991

Resultater for saltholdighet, næringssalter, planteplankton og siktedyp:

For å sammenligne de ulike scenariene har vi i Tabellene 5.2 og 5.3 satt opp noen nøkkelresultater fra modellkjøringene for henholdsvis Nordfjord og Holandsfjord. Med overflatelaget menes i tabellene det øverste velblandede laget ved havoverflaten hvilket vanligvis er 0.5-2 m tykt. Med det øvre intermediære laget menes her dybdeintervallet 5-15 m hvilket representerer hoveddelen av fotisk sone. Vi kompletterer informasjonen gitt i tabellene med presentasjon av noen isopletdiagrammer.

I følge modellen vil innstrømmingen til Nordfjord fra Holandsfjord øke med ferskvannstilførselen (Tabell 5.2). Innstrømmingen fra kystvannet til Holandsfjord er derimot den samme for alle scenariene (Tabell 5.3). Saltholdighetsfordelingen i øverste 20 m i Nordfjord for scenariene 1, 2a og 3a er vist i Fig. 5.15. Det framgår at det blir stor forskjell i lagdelingen i Nordfjord mellom scenariene med mye tykkere brakkvannslag i scenariene 2 og 3. I Holandsfjord derimot blir forskjellen betydelig mindre, noe som også framgår av teorien for brakkvannet i kap. 4. Kraftig omblending i forbindelse med tilførsel av store mengder av relativ kaldt vann medfører at overflatetemperaturen i Nordfjord, men også i Holandsfjord, blir lavere i scenariene 2 og 3 enn i scenario 1.

Modellberegningene viser at konsentrasjonen av næringssalter (nitrogen og fosfor) i overflatelaget i Nordfjord (Tab. 5.2) øker med økende ferskvannstilførsel til Nordfjord, mens fosforinnholdet i Holandsfjordens overflatelag vil avta (Tab. 5.3).

I det øvre intermediære laget gir økt ferskvannstilførsel en tendens til økt konsentrasjon av næringssalter på grunn av økt oppumping av sjøvann med høyere konsentrasjoner ved initialblanding (scenariene 2b og 3b). En mye større effekt på konsentrasjonen av næringssalter i det øvre intermediære laget fås imidlertid av forandringer i lysforholdene på grunn av forandrete utslipp av partikler. Med færre partikler i vannet (scenariene 1, 2a, 3a) vil lyset være sterkere i dette laget hvorfor planktonproduksjonen blir større og derved blir konsentrasjonen av næringssalter lavere (Tabell 5.2 og 5.3).

Ved økede utslipp av ferskvann fås høyere konsentrasjoner av plankton i overflatelaget både i Nordfjord og Holandsfjord. Hovedårsaken til dette er at den økte blandingen mellom ferskvann og sjøvann leder til generelt tykkere overflatelag, noe som er gunstig for planktonets muligheter å forbli i laget. I det intermediære laget derimot gir selve økningen av ferskvannsutslipp til Nordfjord (scenariene 2b og 3b) en ubetydelig minskning av planktonkonsentrasjonen. Denne minskningen kan skyldes en økt konsentrasjonen av plankton i overflatelaget hvilken gir en liten reduksjon av lyset lenger

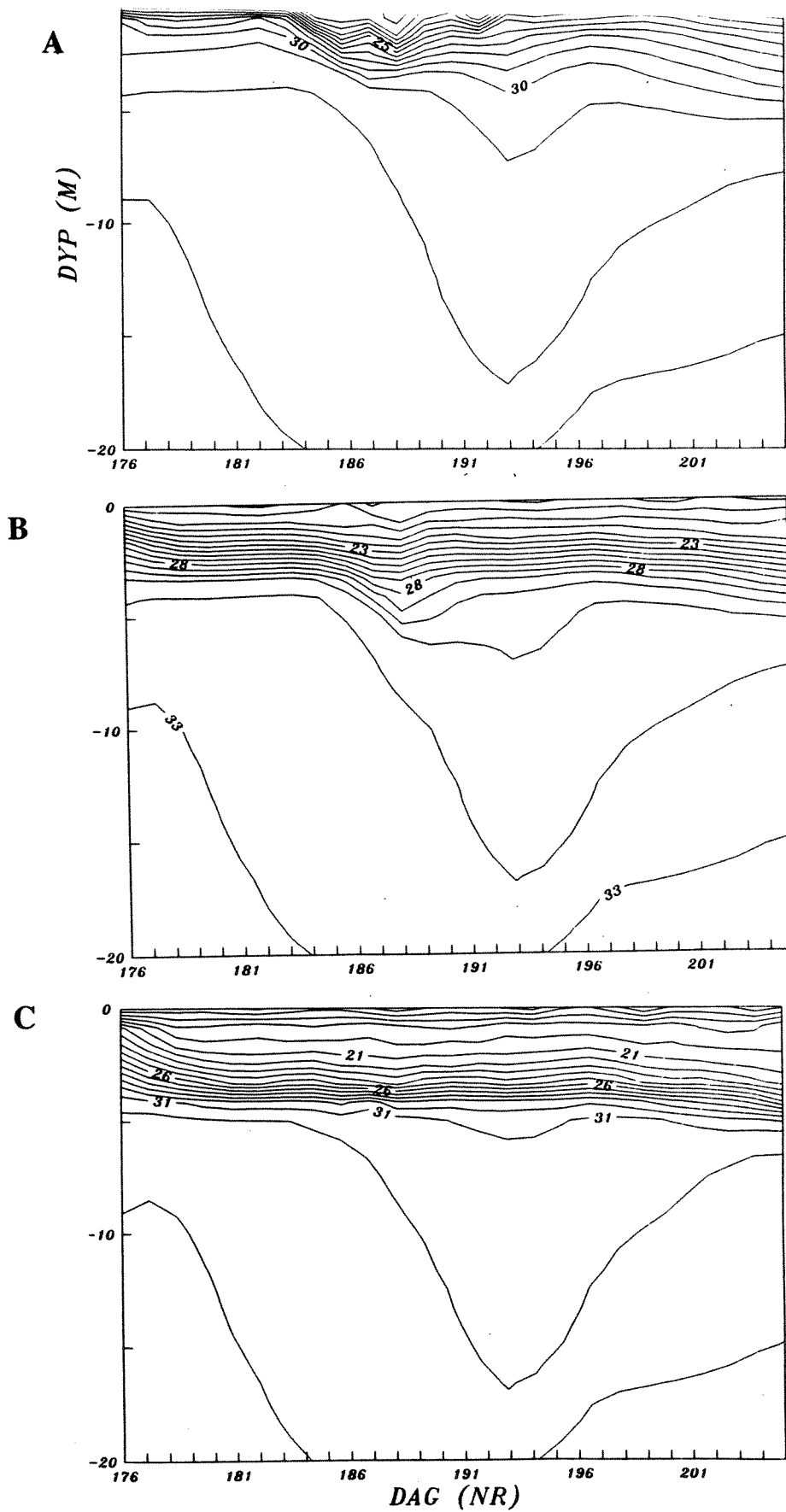


Fig. 5.15 Beregnet saltholdighet (psu) i Nordfjord (innenfor Enganeset) for a) scenario 1, b) scenario 2 og c) scenario 3.

ned i vannsøylen. Reduksjon av utslippet av mineralpartikler (scenariene 2a og 3a), derimot, gir bedre lysforhold i øvre intermediære laget og dermed en noe høyere konsentrasjon av plankton i dette laget.

Modellberegningene for økt ferskvannstilførsel viser relativt små effekter på planktonkonsentrasjonen i fotisk sone i fjorden. Man kan med temmelig stor sikkerhet konkludere at virkningen på oksygenforbruket i bassengvannet av en noe økt produksjonen i fjorden vil bli ubetydelig. Oksygenforholdene i bassengvannet vil være gode også etter ferskvannsreguleringen. Denne konklusjonen er også i tråd med den generelle viten om slike fjordsystemer med relativt dype ytre terskler, og som kommer til uttrykk bl.a. i vannkvalitetsmodellen Fjordmiljø (Stigebrandt, 1992).

TABELL 5.2 Resultat av modellberegningene: NORDFJORD.

Variabel	Scenario nr				
	1	2a	2b	3a	3b
Sirkulasjon					
inn (m ³ /s)	643	686	686	731	731
ut (m ³ /s)	655	746	746	851	851
Siktedyp					
midlere (m)	4.6	5.5	4.5	5.4	4.5
maksimum (m)	4.9	5.8	4.7	5.7	4.6
minimum (m)	3.9	4.6	3.9	4.6	3.9
OVERFLATELAGET:					
Plankton					
midlere (mg Klf/m ³)	1.7	2.7	2.7	2.9	3.0
maksimum (mg Klf/m ³)	7.3	5.8	5.8	5.9	5.9
Fosfat (mg P/m ³)	0.8	1.4	1.4	1.9	1.9
Nitrat (mg N/m ³)	23.1	43.8	43.7	54.6	54.2
ØVRE INTERMEDIÆRT LAG (5-15 M):					
Plankton					
midlere (mg Klf/m ³)	5.7	6.2	5.7	6.2	5.7
maksimum (mg Klf/m ³)	10.2	10.2	10.0	10.0	10.0
Fosfat (mg P/m ³)	3.6	3.2	3.6	3.3	3.7
Nitrat (mg N/m ³)	7.1	4.5	7.2	5.1	8.2

TABELL 5.3 Resultat av modellberegningene: HOLLANDSFJORD

Variabel	Scenario nr				
	1	2a	2b	3a	3b
Sirkulasjon					
inn (m ³ /s)	1681	1692	1692	1692	1692
ut (m ³ /s)	1716	1760	1760	1820	1820
Siktedyp					
midlere (m)	4.7	5.6	4.6	5.5	4.5
maksimum (m)	4.9	5.9	4.8	5.8	4.7
minimum (m)	3.9	4.6	3.9	4.6	3.9

OVERFLATELAGET:

Plankton					
midlere (mg Klf/m ³)	1.5	3.1	3.1	4.0	4.0
maksimum (mg Klf/m ³)	6.2	9.0	9.0	9.8	9.9
Fosfat (mg P/m ³)	0.8	0.5	0.5	0.5	0.5
Nitrat (mg N/m ³)	21.0	19.0	19.2	22.9	23.0

ØVRE INTERMEDIÆRT LAG (5-15 M):

Plankton					
midlere (mg Klf/m ³)	4.0	4.5	4.0	4.3	3.8
maksimum (mg Klf/m ³)	9.1	9.4	9.1	9.4	9.2
Fosfat (mg P/m ³)	2.8	2.5	2.9	2.5	2.9
Nitrat (mg N/m ³)	7.8	6.5	8.2	6.9	8.6

Isforhold etter forandret ferskvannstilførsel:

Som følge av økt ferskvannstilførsel vinterstid vil isforholdene i fjorden bli forandret i kuldeperioder. Modellen er ikke kjørt for vinterforhold, men fra tidligere erfaringer med islegging i fjorder kan vi gjøre noen overslagsberegninger for å belyse problematikken.

Før ferskvannsreguleringen ble gjennomført forekom is innerst i Nordfjord i kalde perioder. Etter reguleringen blir ferskvannet Q_f (m/s) ved utløpet fra Svartisen kraftverk blandet med sjøvann Q_2 (m/s) fra de øverste ca. 10 m av vannsøylen (utslippsdyp 7 m). Vinterstid har dette sjøvannet temperaturen T_2 . Før reguleringen var T_2 3°C eller høyere,

se Fig. 4.2. Blandingen av sjøvann og ferskvann vil ha en temperatur som er godt over frysetemperaturen T_{is} for brakkvannet (T_{is} er avhengig av saltholdigheten). Hvis varmetapet til atmosfæren er H (W/m^2), kan den oppumpede varmen fra sjøvannet holde arealet A (m^2) fritt for is. Med $Q_2 = x \cdot Q_f$, hvor initialblandingen x er forholdet mellom sjøvann og ferskvann, får man

$$A = \frac{\rho c_p x Q_f (T_2 - T_{is})}{H}$$

Denne formelen kan brukes for å grovt anslå hvor stor initialblandingen x må være for å skape en råk med arealet A . Med $Q_f = 60$, $H = 300$, $T_2 = 3$, $T_{is} = -1$, $\rho = 1000$ (kg/m^3) og $c_p = 4200$ $kJ/kg/^\circ C$, fåes $A/x = 2.5 \cdot 10^6$. Med $x = 3$ vil råken bli omtrent like stor som fjordarealet innenfor Enganeset. For å holde hele Holandsfjord (areal ca. 32 km^2) isfri med angitte størrelser på parametrene trenges en initialblanding på ca. 13. En slik initialblanding vil gi et relativt tykt brakkvannslag og forutsetter et større utslippsdyp enn det som nå brukes.

5.3.2 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 Holandsfjord har vi tilpasset initialblandingen av ferskvann, planteplanktonets synkehastighet og vannets optiske egenskaper.

For simulering av endret tilførsel av ferskvann (forandret drivning) har vi som starttilstand i fjorden brukt målte og beregnede data fra dag 176 (25.6.91), hvilken i seg på alle stasjoner er beheftet med en viss usikkerhet. Hadde tilførselen av ferskvann og næringssalter vært annerledes ville naturligvis tilstanden i fjorden på denne startdagen vært annerledes. Med kort oppholdstid for fjordvannet (~ 1 uke) sammenlignet med simuleringsperiodens lengde (4 uker), blir usikkerheten i beregningsresultatet på grunn av usikre startverdier liten. Opprinnelig var det tenkt at simuleringsperioden skulle være to måneder, noe som ikke var gjennomførbart pga. manglende data. Selv om den forkortede simuleringsperioden øker betydningen av startverdiene og usikkerheten forbundet med disse. Dette gjør at de estimerte effektene generelt blir litt underestimert, men neppe mer enn 15-20%.

5.4 Konklusjoner

Beregningene viser at det er god vannutveksling mellom Holandsfjord og kystvannet. Midlere oppholdstid for vannet mellom overflaten og 45 m dyp (terskeldyp) er beregnet til ca ti døgn. Denne blir helt ubetydelig påvirket av den økte ferskvannstilførselen.

Brakkvannets tykkelse i Holandsfjord er bestemt av en såkalt indre hydraulisk kontroll, trolig ved Kopskjær, og av blandingen mellom ferskvann og sjøvann. Brakkvannets tykkelse i Nordfjord (Holandsfjord innenfor Enganeset) var innen driftstarten ved Svartisen kraftverk bestemt av lagdelingen i Holandsfjord utenfor Enganeset. Etter driftstarten med store ferskvannsutslipp til Nordfjord har sannsynligvis en indre hydraulisk kontroll blitt etablert ved Enganeset.

Etter ferskvannsreguleringen vil brakkvannslaget i Nordfjord over hele året ha en tykkelse på 3-5 m, noe som vinterstid er mye tykkere enn tidligere. Brakkvannslaget i Holandsfjord vil over hele året ha en tykkelse på 2-3 m, noe som er litt tykkere enn det var sommerstid før reguleringen ble gjennomført. Utpumpingen av relativt varmt sjøvann til brakkvannslaget ved utløpet fra Svartisen kraftverk vil motvirke islegging innerst i fjorden. Utenfor Enganeset kan brakkvannet i kalde perioder bli avkjølt tilstrekkelig til at det blir økt risiko for islegging.

Fjordens overflatevann blir kaldere sommerstid etter reguleringen av ferskvannet. Dette gjelder spesielt Nordfjord men også Holandsfjord.

Som følge av økt ferskvannstilførsel og dermed økt omblending og tykkere brakkvannslag vil konsentrasjonen av plankton i brakkvannslaget ved havoverflaten øke uten å nå særlig høye maksimalverdier.

Hvis partikkeltilførselen til fjorden avtar vil siktedypet øke og dermed blir det også litt høyere konsentrasjoner av plankton i fotisk sone under brakkvannslaget (ned til ca. 20 m dyp).

På grunn av den relativ dype ytre terskelen og kort oppholdstid for vannmassene over terskelen, vil reguleringen bare ha en ubetydelig effekt på oksygenforholdene i bassengvannet, selv om planktonproduksjonen øker litt som følge av redusert tilførsel av mineralpartikler.

6. LITTERATUR

- Holte, B., Johnsen, T., Molvær, J., Næs, K., Pedersen, A. og Walday, M., 1994: Undersøkelser av miljøforhold i Glomfjord og Holandsfjord 1991-92. Delrapport 1: Vannkjemiske, biologiske og sedimentkjemiske forhold i Holandsfjord. NIVA rapp. nr. 3058. Oslo.
- Johnsen, T., Knutzen, J., Molvær, J., Pedersen, A. og Walday, M., 1994: Undersøkelser av miljøforhold i Glomfjord og Holandsfjord i 1991-92. Delrapport 3. Næringsalter, algebiomasse, oksygenforhold og gruntvannssamfunn i Glomfjord. NIVA rapp. nr. 3061. Oslo.
- Magnell, J.P., 1994: Usikkerheter i beregnet ferskvannstilførsel til Glomfjorden og Holandsfjorden. Statkraft Engineering, Notat 25.02.94.
- Sivertsen, B., 1982: Meteorologi og luftkvalitet i Glomfjord 1980-82. NILU, Lillestrøm. Oppdragsrapport nr. 42/82. 39 sider.
- Smith, R., Steen, J.E., Rye, H., 1979: Fortrukket modell av Enganaset, Svartisutbyggingen. Vassdrags og Havnelaboratoriet, Trondheim, Rapport nr. STF60 F78103.
- Stigebrandt, A., 1975: Stasjonær tvålagersirkulasjon i fjordar. Vassdrags- og Havnelaboratoriet, Trondheim. Rapp. nr STF60 A75120. 68 sid.
- Stigebrandt, A., 1987: Computations of the flow of dense water into the Baltic from hydrographical measurements in the Arkona Basin. *Tellus*, 39A, 170-177.
- Stigebrandt, A., 1990: Kompendium i marin systemanalys: 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 næringsalter, 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 4: Modellsimulering av effekter av endret tilførsel av ferskvann og næringsalter til Glomfjord. NIVA rapp. nr 3062. Göteborg/Oslo.

APPENDIKS 1

Dagnr. og datoer for sommeren 1991

<i>Dag nr.</i>	<i>Dato</i>	<i>Dag nr.</i>	<i>Dato</i>	<i>Dag nr.</i>	<i>Dato</i>	<i>Dag nr.</i>	<i>Dato</i>
121	01.05	152	01.06	182	01.07	213	01.08
122	02.05	153	02.06	183	02.07	214	02.08
123	03.05	154	03.06	184	03.07	215	03.08
124	04.05	155	04.06	185	04.07	216	04.08
125	05.05	156	05.06	186	05.07	217	05.08
126	06.05	157	06.06	187	06.07	218	06.08
127	07.05	158	07.06	188	07.07	219	07.08
128	08.05	159	08.06	189	08.07	220	08.08
129	09.05	160	09.06	190	09.07	221	09.08
130	10.05	161	10.06	191	10.07	222	10.08
131	11.05	162	11.06	192	11.07	223	11.08
132	12.05	163	12.06	193	12.07	224	12.08
133	13.05	164	13.06	194	13.07	225	13.08
134	14.05	165	14.06	195	14.07	226	14.08
135	15.05	166	15.06	196	15.07	227	15.08
136	16.05	167	16.06	197	16.07	228	16.08
137	17.05	168	17.06	198	17.07	229	17.08
138	18.05	169	18.06	199	18.07	230	18.08
139	19.05	170	19.06	200	19.07	231	19.08
140	20.05	171	20.06	201	20.07	232	20.08
141	21.05	172	21.06	202	21.07	233	21.08
142	22.05	173	22.06	203	22.07	234	22.08
143	23.05	174	23.06	204	23.07	235	23.08
144	24.05	175	24.06	205	24.07	236	24.08
145	25.05	176	25.06	206	25.07	237	25.08
146	26.05	177	26.06	207	26.07	238	26.08
147	27.05	178	27.06	208	27.07	239	27.08
148	28.05	179	28.06	209	28.07	240	28.08
149	29.05	180	29.06	210	29.07	241	29.08
150	30.05	181	30.06	211	30.07	242	30.08
151	31.05			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 elvevann 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 tidevannsvariasjoner 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 siste inngår som en del også estuarin sirkulasjon drevet av ferskvannstilførsel. 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.

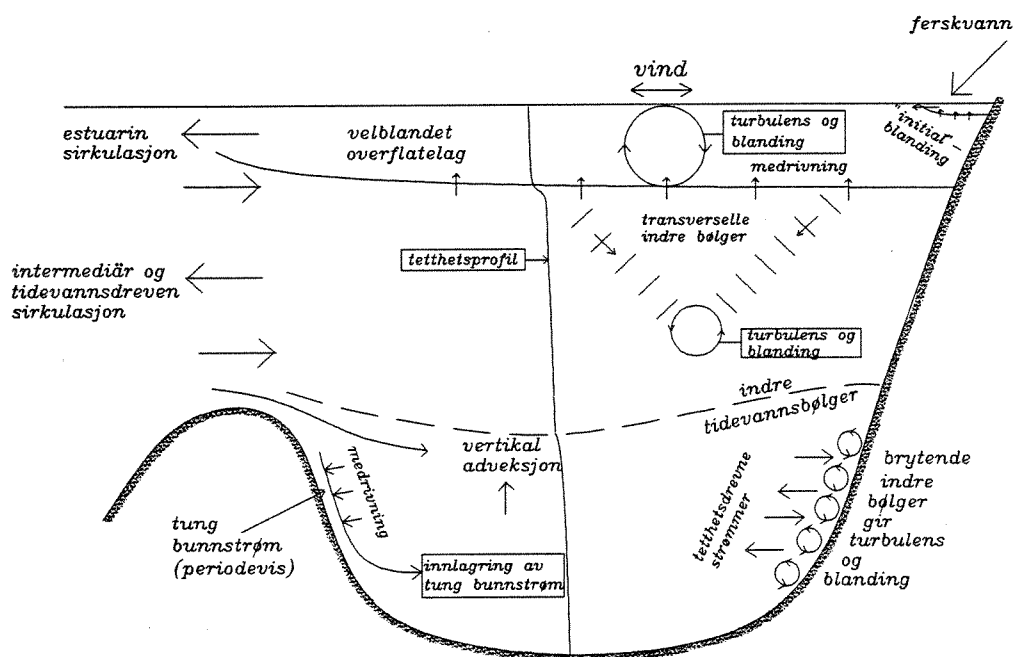


Fig. A1 Fysiske prosesser i fjordmodellen.

Modellen inneholder matematiske beskrivelser av biologiske/kjemiske prosesser hvilke omdanner materiale mellom organiske og uorganiske former. Bl.a. finns beskrivelser av planteplanktons 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 nitrogen-gass (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.

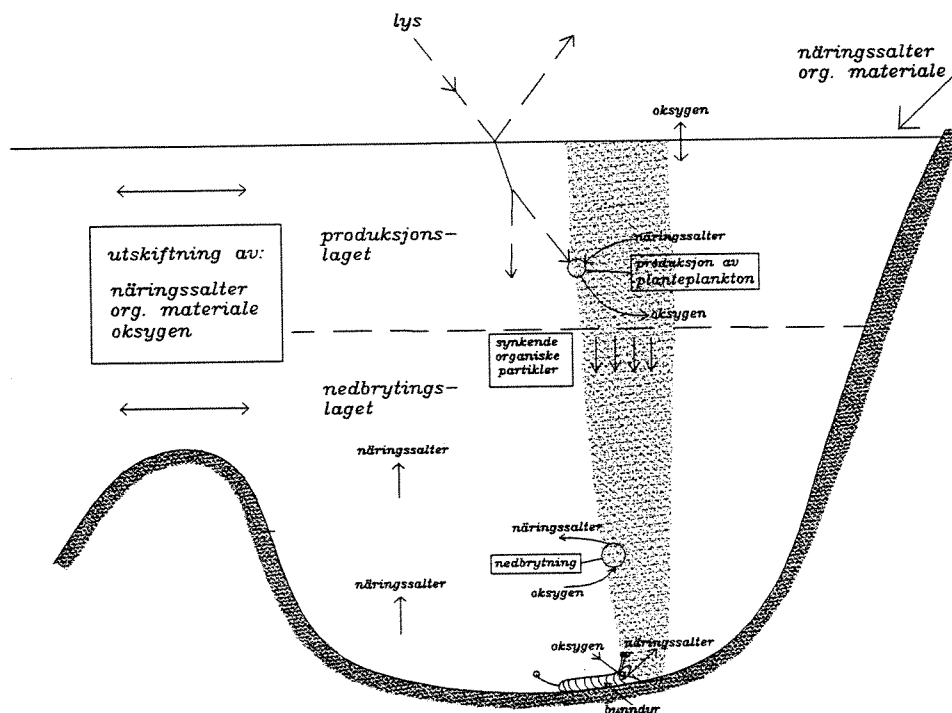


Fig. A2 Biologiske prosesser i fjordmodellen.

A 2. Fysiske prosesser.

Modellens struktur er komplisert fordi tykkelsen av det omblandede 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. Energioverføringen fra vinden er proporsjonal med vindstyrken opphøyd i 3. potens, den såkalte blandingsvinden.

Tidevannstrømmer i sund genererer indre tidevannsbølger i tilgrensende 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 κ , under det velblandede overflatelaget brukes metoden å beregne κ 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, pga. av ulike vertikale 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 α 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. Blandingen 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 næringssaltbegrensning 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 ($2 \text{ ml O}_2 \text{ l}^{-1}$), 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 døgn^{-1} ved temperaturen 0°C . I overflatelaget har vi redusert ratekonstanten til en tiendedel 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, 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 nedbrytingsraten av organisk materiale og dels med kvoten $\text{NO}_3/(\text{NO}_3 + \text{O}_2)$. 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.



Norsk institutt for vannforskning

Postboks 173 Kjelsås, 0411 Oslo

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

ISBN 82-577-2561-7