



SMR rapport

VANNKRAFT OG FJORDER

FYSISKE OG BIOLOGISKE KONSEKVENSER

AV ULLA - FØRRE UTBYGGINGEN

UNIVERSITETET I BERGEN
SENTER FOR MILJØ- OG RESSURSTUDIER



ISSN 0803-7132

**SENTER FOR MILJØ- OG RESSURSTUDIER**

Universitetet i Bergen

Rapport nr.

4/92

Tilgjengelighet

Åpen

Høyteknologisenteret, N-5020 BERGEN, Norway Tel.: (475) 54 42 40 Fax.: (475) 32 48 01

Rapportens tittel VANNKRAFT OG FJORDER FYSISKE OG BIOLOGISKE KONSEKVENSER AV ULLA - FØRRE UTBYGGINGEN	Dato 31.08.1992
	Antall sider og bilag 89 sider
Forfatter Ulf Lie, Harald Svendsen, Stein Kaartvedt, Susanne Mikki, Torbjørn M. Johnsen, Dag L. Aksnes, Randi Pytte Asvall og Lars G. Golmen	Prosjektleder Ulf Lie
	Prosjektnummer

Oppdragsgiver Norges vassdrags- og energiverk Konsesjonsavgiftsfondet	Oppdragsgivers ref.
---	---------------------

Abstrakt (maksimum 150 ord)

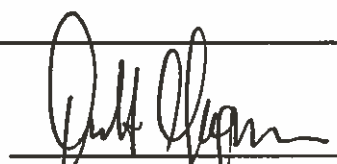
Undersøkelser av effekter av Ulla-Førre utbyggingen på vannmasser, plante- og dyreliv i Ryfylke-fjordene ble utført i tiden 1987-89 av Universitetet i Bergen. Store utslipp fra kraftverket i Hylen gir en kraftig vertikal blanding i det øvre vannlaget, som medfører øket saltholdighet i overflaten og et tykkere brakkvannslag. Kjøring av kraftverket om sommeren fører til nedsatt temperatur i overflate-laget, mens det om vinteren blir omvendt. Disse endringene er særlig markerte i Hylsfjorden, men kan også spores i andre deler av Sandsfjordsystemet. Utslipp fra kraftverket fører også til en sterk utgående strøm i overflaten som kompenseres av en dypere inngående strøm (*estuarin sirkulasjon*).

Ferskvannstilførselen gir et stort tilskudd av plantenæringsstoffer, særlig nitrat og silikat, men planteveksten inne i Hylsfjorden begrenses av mangel på fosfat og dessuten av turbulens og sterk strøm, som fører alger ut av fjorden. Vann som strømmer ut fra Sandsfjordsystemet er rikt på silikat og nitrat, og i møtet med fosfatrikt vann utenfor fjordsystemet dannes frontsoner med høy produksjon av planter. Strømsystemet som kjøring av kraftverket setter igang øker mengden av marint plankton inne i Hylsfjorden, men fører også til stor dødelighet av planktonet ved kontakten med brakkvann.

Emneord

Kraftutbygging, fjordforskning, konsekvensanalyse


Prosjektleder


For administrasjonen

VANNKRAFT OG FJORDER

FYSISKE OG BIOLOGISKE KONSEKVENSER

AV ULLA - FØRRE UTBYGGINGEN

**Ulf Lie, Harald Svendsen, Stein Kaartvedt,
Susanne Mikki, Torbjørn M. Johnsen, Dag L. Aksnes,
Randi Pytte Asvall og Lars G. Golmen**

FORORD

Konsesjonsavgiftsfondet bevilget i 1987 midler til oppstart av "Etterundersøkelser i Ryfylkefjordene" etter søknad fra Universitetet i Bergen. Fram til og med 1991 ble det gitt årlig bevilgning. Universitetet har dessuten bidratt med betydelig egeninnsats.

Universitetet i Bergen har vært hovedansvarlig for gjennomføringen av programmet med Ulf Lie, Senter for miljø- og ressursstudier som programleder.

Bevilgende myndighet oppnevnte følgende programråd:

Randi Pytte Asvall	Norges vassdrags- og energiverk (leder)
Per Einar Faugli	Norges vassdrags- og energiverk
Erling Bakken	Havforskningsinstituttet
Tom McClimans	Norsk hydroteknisk laboratorium
Ulf Lie	Universitetet i Bergen
Harald Svendsen	Universitetet i Bergen

Programrådet skulle "uttale seg om og overvåke gjennomføringen av programmet".

Det er å håpe at programmets sluttrapport, som nå foreligger, vil bli til nytte for forvaltningen, regulantene og andre brukergrupper og for forskere. Feltdatamaterialet er tilgjengelig ved henvendelse til Geofysisk institutt eller Institutt for fiskeri- og marinbiologi, Universitetet i Bergen.

Undersøkelsen har også bidratt til hovedoppgaver, doktoroppgaver, seminar- og konferanseinnlegg og til publikasjoner i nasjonale og internasjonale fagtidsskrifter.

Bergen, september 1992

Randi Pytte Asvall

INNHold

	SAMMENDRAG	1
1.	INNLEDNING	3
1.1	Rådgivende utvalg for fjordundersøkelser	3
1.2	Kort oversikt over Ulla-Førre utbyggingen	4
1.3	Undersøkelser i Ryfylkefjordene	4
2.	FJORDBESKRIVELSE	7
2.1	Generelt om fjorder	7
2.1.1	Fysisk oseanografi	7
2.1.2	Marinbiologi	9
2.2	Ryfylkefjordene	10
2.2.1	Beliggenhet og topografi	10
2.2.2	Hydrologi	10
2.2.3	Meteorologi	12
2.2.4	Luftovermetning	14
2.2.5	Isforhold	14
3.	FORUNDERSØKELSER 1972 - 1975	15
3.1	Fysisk oseanografi	15
3.2	Planteplankton	16
3.3	Dyreplankton	17
4.	DATAMATERIALE OG METODER	17
4.1	Datamaterialet	17
4.2	Metodikk	18
4.2.1	Hydrografi, næringssalter og strømmålinger	18
4.2.2	Vannstandsregistreringer, vindmålinger og ferskvannstilførsel	19
4.2.3	Lysmålinger	19
4.2.4	Algemengde, artssammensetning og produksjon	19
4.2.5	Dyreplankton	19

5.	RESULTATER: FYSISK OSEANOGRAFI	20
5.1	Hydrografi	20
5.1.1	Sandsfjordsystemet	20
5.1.2	Jøsenfjorden	22
5.1.3	Ytre fjordområder og kysten	22
5.2	Strømforhold	23
5.2.1	Sandsfjordsystemet	23
5.3	Fysisk oseanografisk modell	25
5.3.1	Formulering av modellen	25
5.3.2	Numerisk løsningsmetode	26
5.3.3	Simuleringer	27
5.3.4	Strømmens respons på vinden	29
5.4	Diskusjon av fysisk oseanografi	30
5.4.1	Det øvre lag	30
5.4.2	Mellomlag og bassengvann	31
5.4.3	Oppholdstid	32
5.4.4	Modellresultater	34
6.	RESULTATER: MARINBIOLOGI	34
6.1	Planteplankton	34
6.1.1	Vårsituasjonen 1988	34
6.1.2	Tidlig sommersituasjon 1988 og 1989	37
6.1.3	Sen sommersituasjon 1989	42
6.1.3	Høstsituasjon 1988	46
6.2	Dyreplankton	47
6.2.1	Brakkvannsplankton	47
6.2.2	Marint plankton	48
6.2.3	Krill.....	56

6.3	Biologiske modeller	60
6.3.1	Simuleringsresultater - Modell I	61
6.3.2	Simuleringsresultater - Modell II	66
6.4	Diskusjon av marinbiologi	68
6.4.1	Planteplankton	68
6.4.2	Dyreplankton	73
7.	EFFEKTER AV ULLA-FØRRE UTBYGGINGEN	77
7.1	Transportprosesser	77
7.2	Ferskvannsforårsaket dødelighet	80
7.3	Endringer i hydrografi	80
7.4	Endringer i vannkjemi og produksjonsprosesser	81
7.5	Kobling mellom planteplankton og dyreplankton	82
7.6	Vassdragseffekter i bassengvatnet	82
7.7	Ulla-Førre utbyggingens innflytelse på forhold utenfor fjordsystemet	83
8.	GENERELLE MODELLER FOR EFFEKTER AV KRAFTUTBYGGING	83
8.1	Biologien i fjordens vannmasser - eksternt eller lokalt drevet	83
8.2	Data som er nødvendige for modellsimuleringer	85
8.3	Begrensninger i modellene og videre arbeid ved Universitetet i Bergen	85
9.	LITTERATUR	87



SAMMENDRAG

1. Forundersøkelsene i Ryfylkefjordene, som fant sted i tidsrommet 1972 - 1975, la hovedsakelig vekt på en beskrivelse av de hydrografiske og biologiske forholdene, mens etterundersøkelsene ble konsentrert om studier av Ulla-Førre utbyggingens effekter på fysiske og biologiske mekanismer og prosesser.

2. Hovedformålene med etterundersøkelsene var å finne hvilke endringer Ulla-Førre utbyggingen medfører for fjordsystemet, å bestemme hvilke mekanismer som styrer vannmassenes dynamikk i fjordene, å beregne sammenhengen mellom hydrografiske og biologiske forhold, og å utvikle metoder for studier av effekter av vassdragsreguleringer på fjorder.

3. Datamaterialet i etterundersøkelsene ble innsamlet på 10 tokt med M/S HÅKON MOSBY i tiden januar 1987 - august 1989. Det ble målt temperatur, saltholdighet, vannstand, vind og strømforhold, og observasjonene ble benyttet i en fysisk, matematisk modell for beregning av vanntransport. Det ble også målt næringssalter og mengde, produksjon og arts-sammensetning av planteplankton og mengde og artssammensetning av dyreplankton, og disse dataene ble brukt i biologiske, matematiske modeller. De fysiske og biologiske modellene ble koblet sammen og brukt for vurdering av effekter av kraftutbyggingen.

4. Etterundersøkelsene viste at Ulla-Førre utbyggingen har ført til store endringer i vanntransporten i Hylsfjordens øvre lag. Før etableringen av Hylen kraftverk var denne fjordarmen tildels en bakevje i forhold til resten av fjordsystemet, mens kraftige ferskvannsdrevne strømmer nå fører til en betydelig vannutveksling med fjordene utenfor. Avhengig av overflatelagets saltholdighet og blandingsforholdene ved kraftverkutslippet, dannes enten en utgående overflatestrøm og en underliggende kompensasjonsstrøm (*estuarin sirkulasjon*), eller en utgående strøm kompensasjonsstrømmer av henholdsvis ferskt i noen meters dyp, mens det er inngående

overflatevann og underliggende salt vann ("*reversert*" *estuarin sirkulasjon*).

5. Store ferskvannsutslipp fra Hylen fører til kraftigere vertikal blanding og en høyere saltholdighet i overflatevannet enn i perioder uten utslipp fra kraftverket, men saltholdigheten reduseres på noen meters dyp (tykkere brakkvannslag). Utslipp fra kraftverket kan også ha en markert effekt på temperaturforholdene i fjordvannet. Sommeren 1989 ble fjorden tilført store mengder ferskvann. Overflatetemperaturen sank med 8 °C innerst i Hylsfjorden, og en kaldtvannskile (temperaturfall på opptil 4 °C) av kraftverksvann kunne registreres gjennom Hylsfjorden og Sandsfjorden. I vinterhalvåret har kraftverksvannet en noe høyere temperatur enn vann fra andre kilder, noe som sammen med den høyere saltholdigheten ved kjøring av kraftverket fører til mindre isdannelse i Hylsfjorden enn før utbyggingen.

6. Det er ikke markerte forandringer i mellomlaget og dypvannet i Sandsfjordsystemet som følge av reguleringene. Sammenliknet med forundersøkelsen kan det spores en svak avtakende saltholdighet i øvre del av mellomlaget, men hvorvidt dette skyldes reguleringene eller naturlige årsaker er ikke klart.

7. Ferskvannet som slippes ut i Hylen har også stor virkning på algeveksten i fjordene. Utslippsvannet inneholder store mengder nitrat og silikat, men er fattig på fosfat. Kjøring av kraftverket kan tidvis også gi et næringssalttilskudd via medrivningsprosesser fra underliggende saltvann. Dette er viktigst for fosfat som er det begrensende næringssaltet for algeveksten.

8. Artsprøvene av planteplanktonet tyder på at kiselalger nå er mer fremtredende i Sandsfjordsystemet i forhold til forundersøkelsen, mens den relative betydningen av kiselalger er redusert i Jøsenfjorden. Dette kan henge sammen med at silikattilførselen til Sandsfjordsystemet har økt, mens overføringen av ferskvann fra Ulla og Førre til Hylen har fjernet en betydelig silikatkilde fra Jøsenfjorden.

9. De ferskvannsdrevne strømmene er også av avgjørende betydning for biologiske forhold. Kjøring av kraftverket førte gjennomgående til en utvasking av alger fra Hylsfjorden og tildels fra områdene utenfor. Brakkvannsstrømmen fra Hylen dreier dels inn i Sauda-fjorden, hvor det ble registrert effekter i algefordeling og -sammensetning. Ved store ferskvannsutslipp fra Hylen og andre ferskvannskilder sommeren 1989 ble giftalgen *Prymnesium parvum* spredd fra Hylsfjorden og videre ut i betydelig avstand fra Sandsfjord-systemet.

10. Dyreplankton ble også i vesentlig grad påvirket av kraftverkskjøringen. Brakkvannsplanktonet, som i hovedsak finnes i de øvre 2-5 m, blir "vasket" ut av Hylsfjorden via den estuarine sirkulasjonen, men den "reverserte" estuarine sirkulasjonen fører til oppkonsentrering av brakkvannsplankton tett ved kraftverket. Slik oppkonsentrering fant en også for rent marint plankton og vi har altså fått den paradoksale situasjonen at større ferskvannsmengder har gitt faunaen mer preg av marine former. Et resultat er imidlertid at det marine planktonet kommer i kontakt med ferskvann som forårsaker dødelighet, og det ble observert store mengder dødt plankton i Hylsfjorden i perioder med stor ferskvannstilførsel.

11. Kraftverket har også en vesentlig virkning på transporten av krill i Sandsfjord-systemet. Høst og vinter utgjør krill den dominerende biomassekomponenten i øvre lag om natten. Maksimal kjøring av kraftverket om vinteren har derfor en avgjørende betydning for fordelingen av krill i Sandsfjordssystemet, men effekten synes å være mindre for utvekslingen mellom fjordsystemet og områdene utenfor. Endret avrenning fra Ulla og Førre elvene har ikke hatt vesentlig effekt på planktonet i Jøsenfjorden, fordi transportforholdene i denne mer åpne fjorden i større grad er styrt av forholdene på kysten.

12. Næringssalter fra ferskvannsutslipp i Hylen kan påvirke produksjonen av organisk materiale utenfor fjordsystemet. Ferskvannet representerer et stort tilskudd av nitrat og silikat (ved maksimalutslipp i Hylen tilføres ca 3 tonn nitrat i døgnet). Betydelige mengder av dette næringsstoffet eksporteres fra Sandsfjorden, bl.a. fordi algeveksten i det ferskvannspåvirkete fjordsystemet er fosfatbegrenset, noe som hindrer utnyttelse av de store nitratmengdene. Utenfor fjorden er derimot algeveksten gjennomgående nitratbegrenset, og fosfatrike og nitratrike vannmasser møtes der ved i produktive blandingsområder (fronter).

13. Våroppblomstringen i det ferskvannspåvirkete fjordsystemet starter flere uker tidligere enn i områdene utenfor. Utstrømming av betydelige brakkvannsmengder om våren påvirker blomstringsforløpet utenfor fjordene via ulike mekanismer. Brakkvannet vil til en viss grad stabilisere vannmassene også i ytre områder, og dessuten blir det tilført "fjordplankton" som kan være av betydning for blomstringsforløpet også utenfor fjorden.

1. INNLEDNING

1.1 Rådgivende utvalg for fjordundersøkelser

De konsekvenser som en vassdragsregulering gir for andre brukerinteresser har alltid vært vurdert før konsesjon har blitt gitt. Hvilke brukerinteresser som har vært ansett som viktige, og den vekt som er lagt på andre brukerinteresser sammenliknet med vassdragsutbygging og kraftverksproduksjon har forandret seg gjennom tidene. Som kjent av alle som har med regulering og utbygging av vassdrag å gjøre, er det et vidt spekter brukerinteresser og konsekvenser for naturforholdene som må vurderes før konsesjon kan bli gitt. Når det gjelder fjordområder som berøres ved vassdragsregulering har det stort sett vært mulige endringer i isforholdene og de direkte følger dette kan ha på brukerinteressene som tas hensyn til ved konsesjonsbehandlingen. Intensjonen nå er imidlertid at også virkninger på biologiske forhold skal vurderes.

Rådgivende utvalg for fjordundersøkelser ble opprettet for å koordinere generelle undersøkelser med sikte på å belyse mulige virkninger av vassdragsreguleringer på fysiske og biologiske forhold i våre fjorder. Bakgrunnen for å sette i gang slike undersøkelser var at en i 1950- og 60-årene flere steder hadde erfart at det kunne bli tildels alvorlige isvansker i berørte fjorder i forbindelse med vassdragsreguleringer. Problemet ble diskutert i flere sammenhenger, og i januar 1968 ble det holdt et kollokvium om isproblemer i forbindelse med kraftverksutslipp i fjorder. Her deltok bl a representanter for universitet, vassdragsregulanter, Vassdrags- og Havnelaboratoriet og NVE. Det ble fremhevet et sterkt behov blant kraftverksutbyggere for å få kyndig veiledning i problemer som kunne oppstå med slike kraftverksutslipp, spesielt de undersøkelser som må gå forut for en regulering, slik som måling av temperatur, saltinnhold, meteorologiske forhold osv. Det ble presisert at de innsamlede data måtte sammenstilles og behandles av fagfolk og stilles tilgjengelig for regulantene på samme måte som det hydro-

logiske materialet. Mulige virkninger på de biologiske forhold, og da i siste ledd fiskeriressursene, ble også tatt opp. Man fant det rimelig at den generelle forskning på dette området og systematisering av et slikt materiale måtte være et offentlig anliggende og bekostes av det offentlige. Det ble fra flere interesserte institusjoner søkt om midler fra Konsesjonsavgiftsfondet til undersøkelser innen disse fagområdene.

I brev til Hovedstyret i NVE tok den daværende Reguleringsforeningens Landssammenlutning, nå Vassdragsregulantenenes forening, i mars 1968 opp nødvendigheten av slike undersøkelser og at undersøkelsene måtte koordineres. Et koordinerende organ burde legges til NVEs Iskantor som i samarbeid med daværende Vassdrags- og Havnelaboratoriet, nå Norsk Hydrotekniske Laboratorium, tidligere hadde utført undersøkelser om isforhold i vassdrag og også noen steder i fjorder.

De interesserte institusjoner ble anmodet om å koordinere sine planer og i 1970 ble det sendt en felles søknad til Konsesjonsavgiftsfondet. I Stortingsvedtak av 20. november 1970 ble det bestemt at virkninger av økt vintervassføring på de fysiske og biologiske forhold i våre fjorder skulle undersøkes, og at det skulle opprettes et koordinerende organ for disse undersøkelsene som skulle ligge ved Iskantoret i NVE. Det koordinerende organ ble kalt *Rådgivende utvalg for fjordundersøkelser* og fikk medlemmer fra de institusjoner som deltok i undersøkelsene.

Undersøkelsene skulle bestå i kartlegging av hydrofysiske og biologiske forhold tre år før og tre år etter utbygging og skulle konsentreres om to fjorder, Hardangerfjorden i Sør-Norge og Skjomenfjorden i Nord-Norge. Det var begge steder påtenkt større vannkraftutbygginger. Resultatene av undersøkelsene av utbyggingens virkninger i Skjomenfjorden er behandlet i en egen rapport.

I 1972, ett år etter at undersøkelsene i Hardangerfjorden var satt igang, ble det klart at

Eidfjord utbyggingen ikke ble så omfattende som opprinnelig antatt. Da en gjerne ville ha undersøkelsene utført i et område hvor en kunne vente størst mulige endringer, ble undersøkelsene flyttet til Ryfylkefjordene i forbindelse med Ulla-Førre utbyggingen. Konsesjon til Ulla-Førre utbyggingen ble gitt 13. september 1974 og Hylen kraftstasjon ble igangsatt i 1980.

1.2 Kort oversikt over Ulla-Førre utbyggingen

Ulla-Førre prosjektet utnytter vannkraften i vassdragene Ulladalsåna og Førreåna som drenerer til Jøsenfjorden, og Suldalslågen som drenerer til Sandsfjorden, samt en del mindre sidevassdrag. Området preges av et høyfjellsplatå i øst som er dannet av grunnfjellsbergarter gneis og granitt. Mot vest er grunnfjellet overlagret av vekslende bergarter.

Prosjektet utnytter vannkraften i tre trinn gjennom Saurdal pumpekraftstasjon, Kvilldal kraftstasjon og Hylen kraftstasjon med utløp innerst i Hylsfjorden (Fig. 1.). Et forgreinet tunnelsystem fanger opp avløpet over ca. 600 meter over havet (moh) ved ialt 39 bekke- og elveinntak etter takrenneprinsippet. På nivå 600 moh er Sandsavatn den eneste magasinmulighet av betydning.

I 1000-1100 moh ligger derimot forholdene til rette for et stort magasin - Blåsjø - med en overflate på 82 km². Dette er landets største kraftverksmagasin. Blåsjømagasinet fylles dels opp ved tilsig fra eget felt og dels ved pumping fra 600 moh-nivået gjennom Saurdal pumpekraftstasjon. Pumpingen foregår i vannrike perioder, vesentlig om sommeren og høsten. I tappeperioder opereres Saurdal som et vanlig kraftverk.

Ved siden av å være sesongmagasin for Ulla-Førre er Blåsjø et flerårsmagasin og en betydelig tørrårssikring for landets vannkraftsystem som helhet. Virkningen av Ulla-Førre for landets fastkraftproduksjon er derfor langt større enn det kraftverkenes egenproduksjon tilsier.

Avløpet fra Saurdal går direkte inn i tilløpet til Kvilldal kraftstasjon, det mellomste trinn i systemet. Mellom Saurdal og Kvilldal er det et mindre magasin, Lauvastølvatn. Da Saurdal i lengre perioder skal kjøres med grunnlast, mens Kvilldal også skal ta topplast, tjener Lauvastølvatn som korttidsmagasin og utjevner lastvariasjonene.

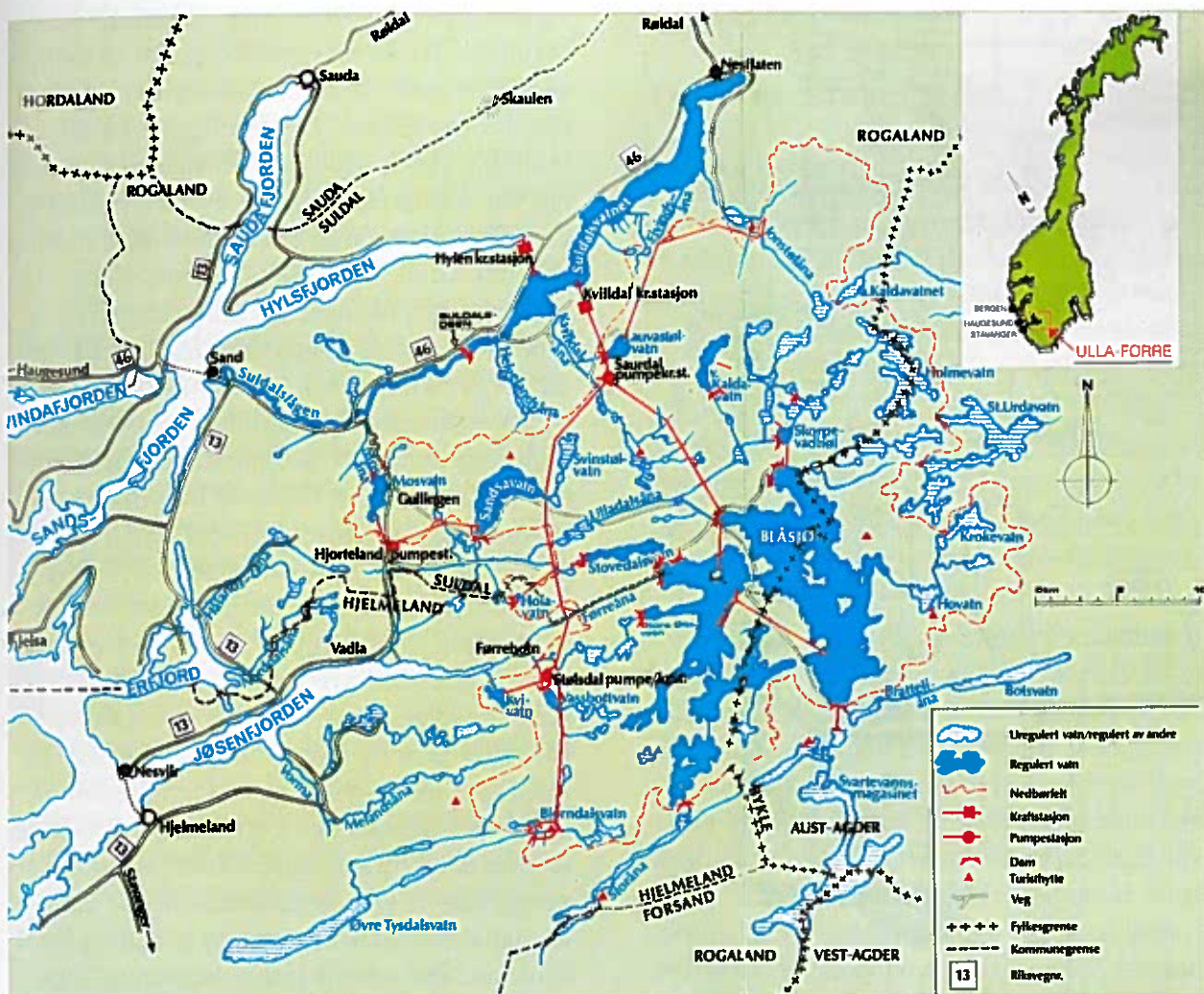
Kvilldal utnytter fallhøyden ned til Suldalsvatn som ligger 67,5 moh. Herfra og til havets nivå utgjør Hylen kraftstasjon det siste av de tre trinnene.

Hylen kraftstasjon har utløp innerst i Hylsfjorden og et maksimalt vannforbruk på 273 m³/s. Det er innstallert to turbiner, og av tekniske grunner kjøres stasjonen helst med ca 120 m³/s eller 240 m³/s for å oppnå størst mulig utnyttelsesgrad av vannet. Under planleggingen ble mulige virkninger av isforholdene i Hylsfjorden og Sandsfjorden vurdert, og utløpet fra kraftstasjonen ble utformet med hensyn til dette. Utløpet har et tverrsnitt på 200 m² med såle 12 m under normalvannstand.

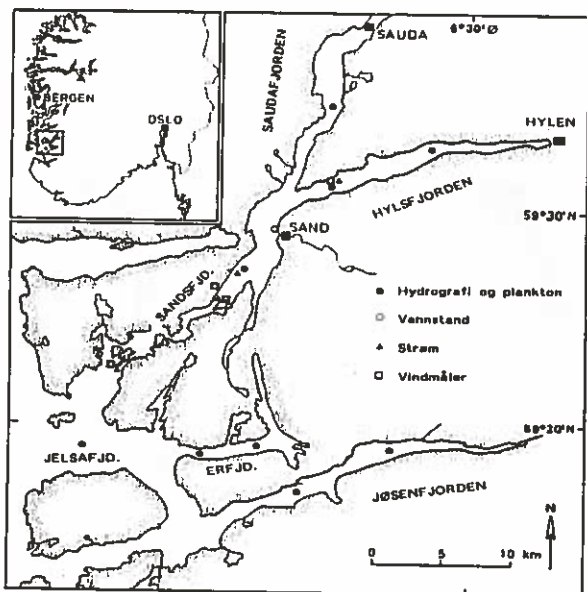
I et gjennomsnittsår er Ulla-Førres produksjon begrenset til ca 4500 GWh. Kraftverkenes bidrag til landets produksjonsevne for fastkraft er beregnet til 5660 GWh.

1.3 Undersøkelser i Ryfylkefjordene

Forundersøkelsene i Ryfylkefjordene begynte i september 1972 og ble avsluttet i november 1975. Forskningen ble konsentrert om 9 faste observasjonsstasjoner i Sandsfjorden, Hylsfjorden, Saudafjorden (samlet kalt Sandsfjordsystemet), Erfjorden, Jelsafjorden og Jøsenfjorden (Fig. 2). På disse stasjonene ble det en gang pr måned utført målinger av saltholdighet, temperatur og oksygen, og det ble tatt prøver av planteplankton og dyreplankton. I tillegg ble det utført vind-, strøm- og vannstandsmålinger og tatt prøver av bunndyr, blåskjell og annen strandfauna. Resultatene av disse undersøkelsene er oppsummert i egne rapporter (Fosshagen 1979, Svendsen & Utne 1979, Nygaard 1979, Hovgaard 1984).



Figur 1. Ulla - Førre reguleringen.



Figur 2. Stasjonsnett for forundersøkelsene i Ryfylkefjordene, 1972-1975 (basert på Svendsen og Utne 1979)

Resultatene fra forundersøkelsene og de senere års undersøkelser i andre norske fjorder og på vestkysten av USA/Canada, viser at korttidsvariasjoner (perioder på noen få dager) i de hydrofysiske forholdene kan være av samme størrelsesorden som de sesongmessige variasjonene. Slike korttidsvariasjoner har meget store biologiske konsekvenser ved at vekstforholdene for planteplankton kan endres drastisk, eller ved at plankton knyttet til tilførte vannmasser kan utgjøre en stor del av totalmengden.

De observerte, store korttidsvariasjonene medfører at datamaterialet fra forundersøkelsene, som var basert på tre-års månedlige observasjoner, ikke kan gi et pålitelig grunnlag for å kvantifisere endringer som skyldes vassdragsreguleringer. Det hydrografiske og biologiske materialet sammen med de strøm-, vind- og avrenningsdata som ble samlet inn i samme tidsrom, er imidlertid så omfattende at de gir et godt grunnlag for modellstudier til sammenligning av forholdene før og etter reguleringene.

Den kjennskap en idag har om fjorders hydrografi gjør det mulig å anvende metoder som

bygger på inngående kjennskap til fjorddynamikk. Ved denne metoden kan en foreta feltundersøkelser etter at reguleringene er blitt effektive og på grunnlag av disse dataene og numeriske modeller, kan en søke å skille virkningene av den ene "kraften" som reguleres, ferskvannstilførselen, fra virkningene av de andre kreftene som styrer de hydrofysiske prosessene. Det foreligger derved en mulighet for å regne seg tilbake til forholdene før reguleringen da ferskvannsavrenningen er kjent. Dataene fra forundersøkelsene, spesielt vind- og strømbobservasjoner, vil i denne sammenhengen komme til god nytte. Siden forundersøkelsene ble utført har det vært en stor utvikling innen både feltundersøkelser og analysemetoder i marinbiologi. Ved kontinuerlige målinger av innstråling og fluorescens kan en få øyeblikkelig informasjon om lysforhold og klorofyllfordeling i vannmassene, og derved bli istand til å utføre fornuftige *in situ* målinger av planteproduksjon. En har også til rådighet en type prøvetakere for dyreplankton som gir anledning til å ta et sett av prøver horisontalt, vertikalt eller skrått i sjøen. Disse metodene har ført til en vesentlig reduksjon i feltprogrammet og en økt nøyaktighet i observasjonene. Den største utviklingen innen marinbiologi har sannsynligvis vært innen data-analyse. En har nå statistiske metoder som gir grunnlag for å skille mellom signifikante prosesser og "støy", og det er utviklet numeriske modeller som kan brukes i styring av forskningsinnsats, testing av hypoteser og forhåpentligvis til prognoser. I denne sammenhengen er materialet fra forundersøkelsene av stor betydning for modelltesting.

Den nære sammenhengen mellom vannutvekslingen i mellomlaget og dypvannsfornyelse i Ryfylkefjordene og prosesser i tilstøtende vannmasser, er godt dokumentert både i resultatene fra feltundersøkelsene og ved en numerisk modell. En vet idag også hvilke som er de viktigste prosessene som styrer den hydrografiske utviklingen i fjorder. Betydningen av hver enkelt prosess og samspillet mellom disse vies idag stor oppmerksomhet innen fjordforskning.

De grundige floristiske og faunistiske undersøkelser i forprosjektet har medført at en idag har et godt kjennskap til hvilke arter som forekommer i Ryfylkefjordene, deres vertikale og horisontale utbredelse, og de viktigste storskala fenomenene. I etterundersøkelsene kunne en derfor sterkt redusere den store og tidkrevende innsatsen som ligger i telling og identifisering av plante- og dyresamfunnene, og heller konsentrere innsatsen om produktjonsforhold og kvantifisering av det dynamiske spillet mellom vannmasser, planter og dyr. Derved blir det mulig å anvende metoder som bygger på inngående kjennskap til dynamikken i fysiske og biologiske forhold i fjorder. Formålet er å finne hvilke prosesser som styrer fjordenes dynamikk, og hvordan prosessene påvirkes av drivkrefter som f. eks. ferskvannstilførsel. Denne metoden er basert på feltundersøkelser for å bestemme grensebetingelser og startverdier av både biologiske og fysiske parametre, og modellstudier for å beregne hvordan disse prosessene virker enkeltvis og i samspill med hverandre. Ved modellsimuleringer kan derved effekten av vasskraftreguleringer på det naturlige systemet beregnes. Selv om modellene i denne undersøkelsen er beregnet for Ryfylkefjordene, kan de betraktes som en generell metode for tilsvarende undersøkelser i andre fjorder.

Målsettingen med etterundersøkelsene i Ryfylkefjordene:

- å kvantifisere de hydrofysiske endringene, særlig i Sandsfjordsystemet, som følge av Ulla-Førre utbyggingen, og å skille disse endringene fra naturlige kortidsvariasjoner,
- å identifisere de viktigste topografiske, meteorologiske, hydrologiske og hydrografiske parametre som styrer vannmassenes dynamikk i indre fjordstrøk,
- å beregne sammenhengen mellom de hydrografiske og biologiske prosessene i de frie vannmassene,

- å utvikle en generell metode for studier av vassdragsreguleringers innvirkning på fjorder.

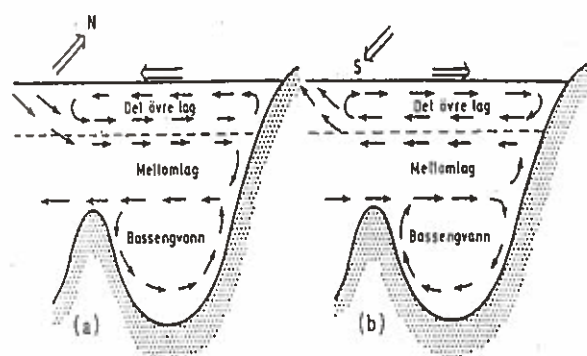
2. FJORDBESKRIVELSE

2.1 Generelt om fjorder

2.1.1. Fysisk oseanografi

De fleste fjorder har en terskel i eller i nærheten av fjordmunningen. I løpet av istiden gravde breene dype bassenger i daværende elvedaler. På vei mot havet mistet breene graveffekten, da de ved den lave kystregionen kunne bre seg fritt ut til sidene, og etterlot dermed en terskel ved fjordmunningen (Fig. 3). De største fjordene på vestkysten av Norge har terskler dypere enn 100 meter, mens f. eks. Oslofjorden og en del andre fjorder har terskler grunnere enn 20 meter. Det vesentligste som skiller denne type fjorder fra fjorder uten terskler er at vannmassene under terskelnivået inne i fjorden (bassengvannet) er forhindret fra fri utveksling med vann utenfor terskelen.

Vannmassene i en fjord kan deles i tre lag: Et øvre lag, et mellomlag og bassengvannet under terskelnivået (Fig. 3).



Figur 3. Eksempler på lagdeling og midlere sirkulasjonsmønstre i terskelfjorder med dyp terskel. a) vinddrevet transport inn mot kysten og vind ut fjorden, b) vinddrevet transport ut fra kysten og vind inn fjorden.

I det øvre lag er det en overgangssone der det størstedelen av året er en markert tetthetsgradient (kalt sprangsjikt eller pyknoklin), som

skiller et overflatelag fra den nedre delen av det øvre lag. Det er ikke noe markert overgang mellom det øvre lag og mellomlaget.

Ferskvannstilførsel, vind og tidevann er de viktigste drivkreftene for strømmer i øvre lag. Da kreftene har korte og langperiodiske variasjoner av forskjellig styrke og fase, er sirkulasjonen sterkt variabel. Sirkulasjonsforholdene kompliseres ytterligere ved topografisk innvirkning, og bare små variasjoner av strandlinjen kan medføre virveldannelser og tilbakestrømming.

De fleste norske fjorder får størstedelen av sin ferskvannstilførsel fra elver som munner ut i de indre deler av fjordene. Ferskvannstilførselen resulterer i en heving av overflaten som søkes utlignet av tyngdekraften. Det oppstår dermed en tyngdedrevet strøm ut fjorden i overflatelaget, som ved medrivning av sjøvann får karakter av brakkvannsstrøm. Medrivningen fører til at det oppstår et sjøvannsunderskudd som kompenseres av en innoverrettet strøm under overflatestrømmen, *kompensasjonstrømmen*. Sirkulasjonen som dannes av brakkvannsstrømmen, medrivningen og kompensasjonsstrømmen kalles *den estuarine sirkulasjon* (estuarie er møtested mellom elv og sjø).

Når tidevannsbølgen langs kysten passerer en fjordmunning tvinges vannmasser inn fjorden (høyvannsfasen) for deretter å strømme ut igjen (lavvannsfasen). Tidevannet medfører liten nettotransport i fjorden og har derfor mye mindre betydning for vannutvekslingen i det øvre lag enn den estuarine sirkulasjon og den vinddrevne sirkulasjonen.

Vindenergien går blant annet med til blandingsprosesser og til å drive en strøm i overflatelaget. Ved sterk lagdeling passerer bare en liten del av energien sprangsjiktet, og vindens virkning på strømforholdene under overflatelaget avtar med økende vertikal tetthetsgradient. Da tetthetsfordelingen også påvirkes av vinden, blir forholdet mellom vind og strøm meget komplisert. Vinden er vanligvis sterkt varierende i fjorden. Når vinden har retning ut fjorden

vil den vinddrevne sirkulasjonen følgelig ha samme retning som den estuarine sirkulasjonen og dermed øke strømhastigheten i det øvre lag.

Strømkomponenter på tvers av fjordene er vanligvis ubetydelige i rette smale deler av fjordene. I brede fjorder vil effekten av jordrotasjonen medføre dannelse av strømkomponenter på tvers av fjorden. Også i områder med store retningsendringer vil det kunne dannes slike strømkomponenter. I brede fjorder med store retningsendringer kan strømmene på tvers av fjorden ha samme hastighet som strømmene langs fjordens lengdeakse.

I mellomlaget består vannbevegelsene for en stor del av tidevannsdannede strømmer og av strøm dannet av horisontale tetthetsgradienter. Slike tetthetsgradienter kan oppstå ved flere mekanismer. Lokalt i fjordene er de mest vanlige mekanismene vinddrevne opp- og nedstrømninger samt vertikale turbulente blandingsprosesser. Mange fjordundersøkelser (Cannon 1972, Svendsen 1977, Holbrook et al. 1980, Klinck et al. 1981) har vist at de viktigste årsakene til vannutveksling i mellomlaget er de tetthetsforskjeller som oppstår mellom fjord- og kystvann når tetthetsfordelingen i kystvannet forandres som følge av vinddrevne opp- og nedstrømninger. Denne vannutvekslingen opptrer overveiende som en to-lags sirkulasjon. Det er innstrømning i øvre del og kompenserende utstrømning i nedre del av mellomlaget når vindretningen på kysten resulterer i transport inn mot kysten (nedstrømning), mens sirkulasjonen er motsatt rettet ved vindretninger som medfører transport ut fra kysten (oppstrømning). Denne to-lags strukturen brytes ned, ved økning av vindretning, og i en kortere periode opptrer vanligvis en flerlag struktur i fjorden før vannutvekslingen igjen tar form av en to-lags sirkulasjon i mellomlaget.

Andre årsaker til at vannutveksling finner sted er indre bølger som passerer forbi fjordmunningen. Videre kan vannutveksling finne sted i fjordene på sørvestlandet etter perioder med sørlige vinder som har stuert vann inn Skagerrak. Når vinden avtar eller skifter retning

strømmer dette vannet ut av Skagerrak, nordover langs kysten og inn i fjordene.

Bassengvannet. Hel eller delvis fornyelse av bassengvannet finner sted når det tilføres vann over terskelnivå som har større tetthet enn vann i bassenget. Slike hendelser er hovedsakelig forårsaket av vinddreven oppstrømning eller indre bølger i tilstøtende vannmasser. De største fornyelsene i norske fjorder finner sted i vårmånedene når vindforholdene på kysten domineres av fremherskende nordlige vinder som fører til oppstrømning av tungt vann.

Total fornyelse av bassengvannet kan foregå årlig, men er i andre terskelfjorder en forholdsvis sjelden begivenhet. Perioder på 5-10 år mellom to vannutskiftninger som omfatter alt bassengvannet er ikke uvanlig (Gade 1973).

I terskelfjorder med grunne terskler skjer fornyingen av de dypere deler av bassengvannet for en stor del ved vertikal diffusjon. I disse vannmassene dannes hydrogensulfid (H_2S) som følge av oksygenforbrukende bakteriell nedbryting av organisk stoff som tilføres fra land og gjennom planktonproduksjon.

2.1.2. Marinbiologi

De fysiske forutsetningene setter rammebetingelsene for fjordøkosystemene, og biologiske forhold vil variere mellom fjordene i samspill med fysiske variasjoner. Det er tildels en systematisk forskjell i topografiske forhold mellom fjordene i Sør- og Nord-Norge. De store fjordene i nord har mer karakter av åpne havbukter og er dermed under sterkere oseanisk påvirkning enn fjordene i sør. Også en økende tidevannsamplityde med breddegrad bedrer vannutskiftingen i nordnorske fjorder.

Vannutveksling innebærer bl a tilførsel av plankton fra kysten og transport av plankton fra fjordene og til kysten. Plankton er definert som organismer som ikke har sterk nok egenbevegelse til å svømme mot strømretningen og omfatter både alger og dyr. Effekter av vannutskiftninger både på planteplankton og dyre-

planktonsammensetning er dokumentert fra en rekke fjorder.

Siden dyreplankton formerer seg langsommere (har en lengre generasjonstid) enn planteplankton vil utveksling med kystområdene være viktigst for dyreplankton. Algene formerer seg ved todeling, og det kan være en dobling av plantemengden i døgnet. Dyreplankton lever betydelig lenger, og dette innebærer at mens mengden planteplankton i en tilført vannmasse kanskje bare representerer en dags produksjon, kan mengden dyreplankton i samme vannmasse f eks representere en måneds produksjon. Dette betyr at lokale vekstbetingelser i fjorden kan bestemme algemengdene samtidig som tilførsel av dyreplankton er bestemmende for mengden av disse formene. Ut fra samme argumentasjon blir utvekslingsprosesser stadig viktigere dess lenger livssyklus dyreplanktonet har.

For Gulmarfjorden i Sverige fant Lindahl (1987) at utveksling av plankton med kystområdene tidvis var langt viktigere enn reproduksjon, vekst og dødelighet inne i fjorden. I de innelukkede Lindåspollene er biologiske forhold derimot styrt av lokale drivkrefter (Aksnes & Lie 1990). De store vestnorske fjordene har gjennomgående lavere dyreplanktonmengder (biomasse) enn kystområdene, og det synes også å være en avtagende dyreplanktonmengde innover i fjordsystemene. I enkelte mindre fjorder kan imidlertid transportprosesser føre til en oppsamling av plankton innerst i fjordene.

Ferskvannstilførselen kan ha en markert effekt på overflatelagene i fjorder. Den påvirker saltholdighet, lagdeling, næringstilførsel, horisontal transport, sedimentering, lysforhold og temperatur, og alle disse forholdene er viktige for f eks planteproduksjonen. Ferskvannstilførselen er imidlertid bare en av mange faktorer av betydning for plante- og dyreplanktonet i et fjordsystem. Klimatiske forhold styrer biologiske prosesser innen fjorden og utvekslingsprosesser mellom fjordene og kystområdene. Når virkningene av vassdragsutbygginger skal vurderes må endringene i ferskvannstilførsel derfor holdes opp mot betydningen av de andre

kreftene som styrer mengde, sammensetning og fordeling av plankton i fjordsystemet.

2.2 Ryfylkefjordene

2.2.1 Beliggenhet og topografi

Ryfylkefjordene ligger nord og øst for Stavanger og forgrener seg innover i landet fra et større basseng, Boknafjorden (Fig. 2). De nordøstlige fjordene som består av Sands-, fjorden, Saudafjorden og Hylsfjorden (i denne rapporten kalt Sandsfjordsystemet), skjærer seg ca 50 km innover landet. Lenger sør ligger Jøsenfjorden. Disse fjordene har mer eller mindre markerte terskler. Den mest markerte terskelen i Sandsfjordsystemet er ca 120 m dyp og ligger ved Sandsfjordmunningen. Maksimaldybden av fjordsystemet er ca 500 m.

Bredden av Sandsfjordsystemet varierer mellom 300 og 3000 m. Litt innenfor Sandsfjordens munning er fjorden smal, så vider den seg ut i et større basseng ved Sand, der Suldalslågen renner ut. Saudafjorden har en trang åpning og er bredest lengst inne, mens det motsatte er tilfelle for Hylsfjorden, som smalner innover mot Hylen.

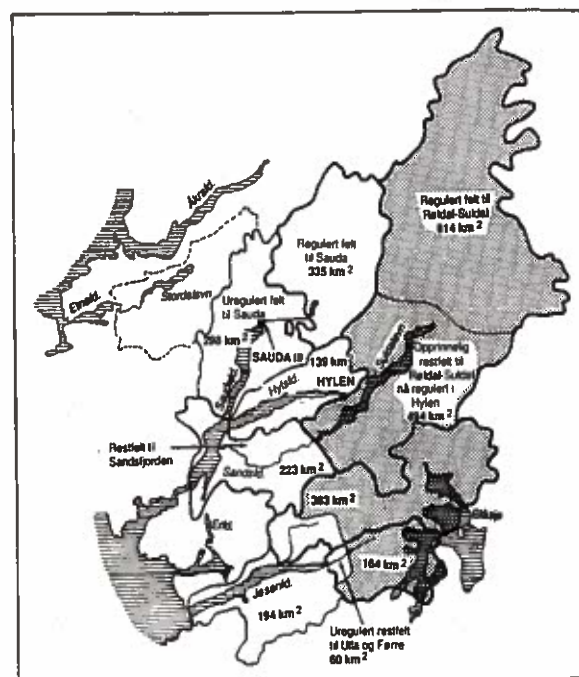
Jøsenfjorden har ingen terskel ved munningen, men et undersjøisk platå i ca 80 m dybde mellom øyene utenfor. Dette platået fungerer som barriere til fjordbassenget innenfor, som har en maksimal dybde på ca 700 m.

2.2.2. Hydrologi

For å beregne ferskvannstilførselen til fjordområdene er det nødvendig å se på de hydrologiske forhold i de nedslagsfelt som drenerer til de aktuelle fjordområdene, og de virkninger som Ulla-Førre reguleringen har på avrenningsforholdene i disse feltene.

Ulla-Førre reguleringen påvirker ferskvannstilførselen til Jøsenfjorden og Sandsfjordsystemet. Overflateavrenningen registreres ved målestasjoner for avløp som finnes forskjellige steder i feltene. På grunnlag av en samlet vurdering av avrenningsforholdene som

registreres ved alle målestasjoner i et større område konstrueres det spesielle kart. Dette kalles *isohydatkart*. Det er bare for enkelte felt og enkelte årrekker det foreligger registreringer direkte fra et målested i elva nær utløpet i fjorden. For felt uten direkte målinger eller hvor bare deler av feltet er dekket opp av målinger må derfor avrenningen beregnes på grunnlag av isohydatkart og ved bruk av sammenlignbare felt.



Figur 4. Oversikt over nedslagsfeltene til fjordsystemet, beliggenhet av hovedmagasinet Blåsjø og kraftstasjonene Hylen og Sauda med utløp direkte i fjorden.

Hovedmagasinet i Ulla-Førre reguleringen, Blåsjø, er et flerårsmagasin. Dette ligger i nedslagsfeltet til Jøsenfjorden. Ved pumping fylles Blåsjø opp i nedbørrike perioder med vann både fra lavereliggende deler av Jøsenfjordens nedslagsfelt og fra feltet som naturlig drenerer til Sandsfjordsystemet. Vannet utnyttes i flere kraftstasjoner, og til slutt i Hylen kraftstasjon som har utløp innerst i Hylsfjorden. Dette betyr at store vannmengder som naturlig drenerte til Jøsenfjorden nå føres til Hylsfjorden og Sandsfjordsystemet via Hylen kraftstasjon (Fig. 4).

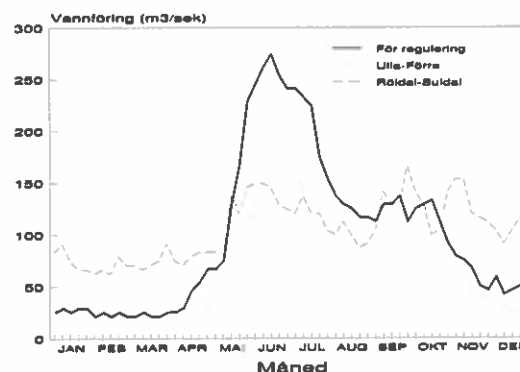
Nedslagsfelt

I Sandsfjordsystemet var Suldalslågen den største vannkilden før regulering, og er fortsatt den største enkeltkilde til ytre del av Sandsfjordsystemet.

Øvre del av Suldalslågens felt (814 km²) er tidligere regulert i Røldal-Suldal reguleringen. Ved Ulla-Førre reguleringen er dessuten feltet videre ned til utløpet av Suldalsvatn (494 km²) regulert ved at det ble bygd dam ved utløpet av Suldalsvatn. Vannet herfra utnyttes i Hylen kraftstasjon. Vannføringen i restfeltet til Suldalslågen nedenfor Suldalsvatn registreres ved en målestasjon i elva ved utløpet i fjorden, og eventuelt overløp eller tapping fra Suldalsvatn registreres direkte. Avløpet fra det øvrige restfelt til Sandsfjorden må beregnes. Totalt restfelt nedstrøms Suldalsosen utgjør 223 km².

Både ved Røldal-Suldal reguleringen og Ulla-Førre reguleringen er vannføringen i Suldalslågen bestemt ved manøvreringsreglement for elva. Fem-døgns middelerverdier (pentader) av vannføringen ved utløpet av Suldalslågen for uregulerte forhold (1921-60), Røldal-Suldal reguleringen (1968-78) og Ulla-Førre reguleringen (1981-89) er vist i Fig. 5. Det fremgår at vintervannføringen i Suldalslågen nå er omtrent som uregulert og vesentlig mindre enn med Røldal-Suldal-reguleringen. Den naturlige vårflommen magasineres.

Det naturlige feltet til Hylsfjorden utgjør 139 km². Hylen kraftverk har utløp innerst i Hylsfjorden, og driftsvannføringen herfra vil komme i tillegg til det naturlige tilsig og dominere ferskvannstilførselen til Hylsfjorden når kraftstasjonen er i drift. Maksimal driftsvannføring ved Hylen kraftstasjon er 270 m³/s, og manøvreringsreglementet setter ingen begrensninger for driften om vinteren. Om sommeren er det stans i driften i juni og juli av hensyn til fiskevandringen i området. Visse justeringer av reglementet er under diskusjon. Kraftstasjonens utløp er utformet slik at driftsvannet ved de aktuelle vannføringer blandes godt med fjordvannet.



Figur 5. Vannføringen i Suldalslågen beregnet som 5-døgnsmidler før regulering, etter Røldal-Suldal reguleringen og etter Ulla-Førre utbyggingen.

I nedslagsfeltet til Saudafjorden er øvre del av feltet (335 km²) regulert av Saudareguleringen. Det foreligger registreringer av avløpet herfra (driftsvannføring og overløp). Det uregulerte restfeltet til Saudafjorden utgjør 298 km². Ulla-Førre reguleringen har ikke medført noen endringer i ferskvannstilførselen til Saudafjorden.

Feltene til elvene Ulla (383 km²) og Førre (164 km²) drenerte naturlig til Jøsenfjorden. Hovedmengden av avløpet herfra magasineres nå i Blåsjø, og restfeltene til disse to elvene er 60 km². Det uregulerte restfelt direkte til Jøsenfjorden utgjør i tillegg 194 km². Tilsammen blir da feltet til Jøsenfjorden etter Ulla-Førre reguleringen 254 km². I tillegg kan det forekomme tapping eller overløp fra Blåsjø til Jøsenfjorden. Dette var tilfelle i 1989.

Ferskvannstilførsel til fjordene

På grunnlag av det som foreligger av hydrologisk informasjon for området er det beregnet middelerverdier for ferskvannstilførselen til de enkelte fjordområder. Ferskvannstilførselen er beregnet for undersøkelsesperioden før regulering, 1972-75, og etter regulering, 1987-89. Resultatene er vist som middelerverdier for de to periodene. Ved bruk av Blåsjø overføres avløp fra Jøsenfjorden til Sandsfjordsystemet. Blåsjø som er et flerårsmagasin gir også mulighet til å magasinere vann til fremtidige år og bruke det når behovet er der. Dette medfører

at avløpet kan forskyves over lange tidsperioder.

Ved sammenlikning av to korte perioder for beregnet tilsig, må en regne med at det kan bli forskjeller på grunn av naturlige variasjoner i avløpet fra år til år. Sammenliknes perioden 1972-75 og 1987-89 er vårflommen mindre og vinteravløpet større i den siste perioden enn i den første (Fig. 6). Dette vises også i beregnet ferskvannstilførsel til Hylsfjorden fra det naturlige nedslagsfeltet til fjorden (som ikke påvirkes av reguleringen) for de to periodene.

Etter Ulla-Førre reguleringen domineres ferskvannstilførselen til Hylsfjorden og Sandsfjordsystemet av driftsvannføringen fra Hylen kraftverk med utløp innerst i Hylsfjorden når kraftstasjonen er i drift. Av driftsmessige årsaker kjøres Hylen kraftstasjon helst med en vannføring på 120 m³/s eller 240 m³/s, og ofte med full stans i perioder. Det kan derfor være store variasjoner i ferskvannstilførselen til Hylsfjorden over kort tid. Dette er illustrert for driftsåret 1988, gjengitt som døgnmidler av vannføringen.

I Sandsfjorden har ikke Ulla-Førre reguleringen medført endringer i de hydrologiske forhold. Forskjellene på de to periodene i Saudafjorden skyldes derfor naturlige variasjoner og eventuelle driftsvariasjoner i Sauda kraftverk. Også her er vinteravløpet større i perioden 1972-75 enn i 1987-89.

Endringene i ferskvannstilførselen til Sandsfjorden har direkte sammenheng med reguleringen og gjenspeiler vannføringen i Suldalslågen som er bestemt av manøvreringsreglementet. I perioden 1987-89 har det i tillegg blitt sluppet vann fra Suldalsvatn om sommeren og høsten på grunn av store flommer.

Som følge av at størstedelen av nedslagsfeltet til Jøsenfjorden er overført til Blåsjø og videre til Hylen, er tilsiget til Jøsenfjorden betydelig redusert, og årstidsvariasjonene meget små etter reguleringen. Pentademidler (gjennomsnitt for 5 døgn) for ferskvannstilførselen til Jøsenfjorden er gjengitt for de to periodene. Det

har forekommet kortvarige store tilsig til Jøsenfjorden etter regulering, men dette har sammenheng med ekstreme værforhold og tapping fra Blåsjø. Det er beregnet at tapping fra Blåsjø vil forekomme meget sjeldent i normal drift.

2.2.3 Meteorologi

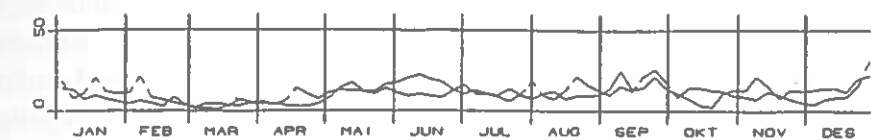
Vinden i fjordene kanaliseres langs fjordaksen. Ved spesielle retninger av vindfeltet over fjordområdet kan vinden i perioder blåse inn Hylsfjorden samtidig som den blåser ut Saudafjorden (eller omvendt). Dette skyldes at lengdeaksene er orientert forskjellig (Svendsen 1981). Et generelt vindmønster for Sandsfjordsystemet i sommerhalvåret er solgangsbris med vind inn fjordene når luften over land oppvarmes om dagen og vind ut fjordene når luften avkjøles om natten.

Fremherskende vind ut fjordene opptrer vanligvis i forbindelse med vind mot nord på kysten (overveiende i vinterhalvåret) mens vind inn fjorden vanligvis er knyttet til vind mot sør på kysten (overveiende i sommerhalvåret).

Den månedlige middeltemperaturen ved Sauda, midlet over 30 år, varierer mellom 16 °C om sommeren og -2 °C om vinteren. Forholdene i det ytre fjordområdet og på kysten viser et tilsvarende mønster, men temperaturintervallet er mindre på grunn av nærheten til havet.

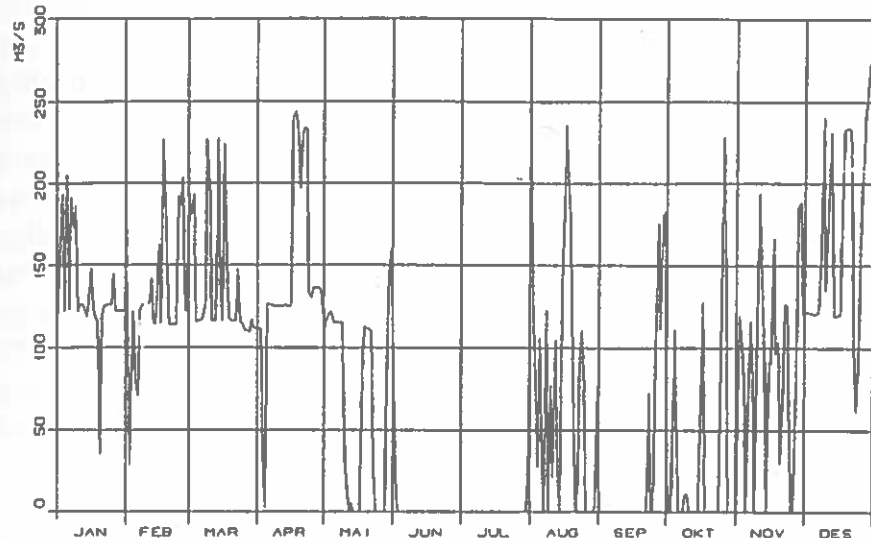
Om høsten ligger den månedlige nedbørmengden i Sauda på over 200 mm med et maksimum på 250 mm i desember. Med fallende temperaturer går regnet over til snø og blir dermed lagret til snøsmeltingen om våren. Utover våren er nedbørmengden gjennomsnittlig 120 mm med et minimum i mai på 80 mm. Nedbørmengden i det ytre fjordområdet (ved Fister) og på kysten (Utsira) er rundt halvparten av nedbøren i Sauda.

SANDSFJORDSYSTEMET



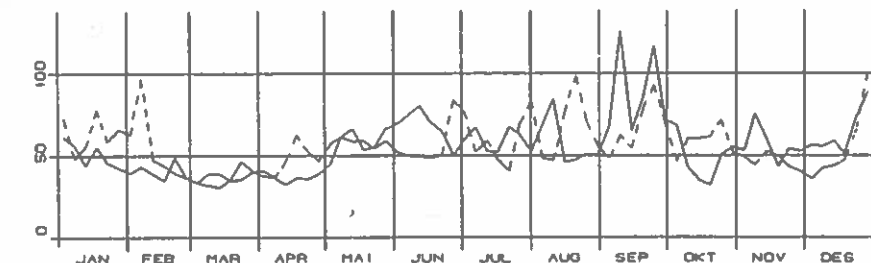
Hylsfjorden

pentademidler
— 1972 - 75
- - - 1987 - 89



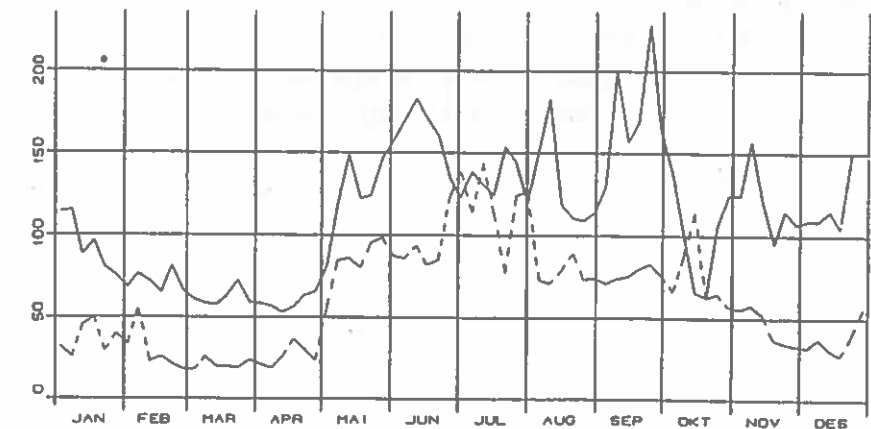
Hylen kr.verk

døgnmidler
— 1988



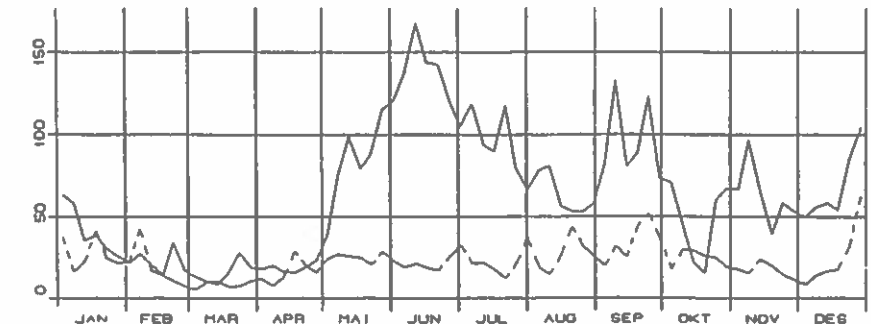
Saudafjorden

pentademidler
— 1972 - 75
- - - 1987 - 89



Sandsfjorden

pentademidler
— 1972 - 75
- - - 1987 - 89



Jøsefjorden

pentademidler
— 1972 - 75
- - - 1987 - 89

JØSENFJORDEN

Figur 6. Beregnet ferskvannstilførsel til Sandsfjordsystemet og Jøsefjorden før og etter Ulla-Førre reguleringen. Avløpet fra Hylen kraftverk er vist som døgnmidler for et enkelt år, 1988, for å illustrere de daglige variasjonene.

2.2.4 Luftovermetning

Luftovermetning i sjøen er spesielt knyttet til utslipp fra kraftverk som har bekkeinntak, noe som ikke er tilfelle for Hylen kraftverk. Det er derfor ikke ventet dramatiske effekter i Sandsfjordsystemet. Endrede forhold for tilrenning, hydrografi og sirkulasjon kan likevel medføre endrede betingelser for gassoppløselighet i fjordvannet.

Oksygenovermetning, som ofte kan forekomme i sjøvann, er etter det en vet ikke skadelig. Det er nitrogenovermetningen som medfører fare. Langtidseksposering for nitrogenovermetning av størrelsesorden 10-15 % er farlig for laks (Dawley og Ebel 1975, Nebeker *et al.* 1976). Litteraturen gir få holdepunkter for å vurdere effekt av korttidseksposering.

Faren for gassovermetting er størst i perioder med kaldt ferskvann og varmt fjordvann, evt. kombinert med soloppvarming. I månedsskiftet juli-august 1989 var eksempelvis temperaturen i utslippsvannet ved Hylen ca. 9 °C, mens fjordvannet holdt 17-18°C. Ferskvannet i de viktigste kildene Suldalslågen og Hylen kraftverk har en noenlunde lik temperaturutvikling gjennom året, ifølge måledata stilt til rådighet av NVE. I Suldalslågen kan vintertemperaturen komme ned i 0 °C, mens minimum i Hylen ligger rundt 2-3 °C. Maksimumstemperaturene ligger rundt 12-14 °C (juli-august), og er noe høyere i Suldalslågen enn i Hylen. Temperaturer under 5-6 °C kan ved-vare til helt ut i juni.

2.2.5 Isforhold

For brakkvann, inklusive ferskvann, er frysepunktet lavere enn temperaturen for maksimal tetthet. Brakkvann som er homogent med hensyn til saltholdighet vil derfor oppføre seg på samme måte som ferskvann ved avkjøling. Det vil foregå en vertikal sirkulasjon på grunn av tetthetsvariasjoner for vann av forskjellig temperatur inntil hele vannmassen har fått den temperatur som gir vannets maksimale tetthet. Deretter vil det bli en avkjøling av overflatevannet inntil frysepunktet nås. Fortsetter avkjølingen uten vesentlig omrøring i overflaten vil

isdannelse begynne. Brakkvann må avkjøles mer enn ferskvann før isdannelse kan finne sted fordi frysepunktet er lavere. Et tykt homogent brakkvannslag kan derfor sinke isdannelsen betydelig eller helt hindre denne.

De omtalte sirkulasjoner kan bare foregå innen de lag som har tilfredsstillende homogenitet. I naturen vil vannet sjelden være homogent. Det vil alltid være en viss saltholdighetsgradient med dypet. Er gradienten tilstrekkelig stor, vil tetthetsøkningen som skyldes temperatursenkning være mindre enn den som skyldes økning i saltholdighet. Dette fører til at tykkelsen av det laget som blir med i avkjølingssirkulasjonen kan bli meget begrenset og isdannelse kan begynne raskt.

I naturen vil avkjølingen foregå i meget tynne lag. Samtidig som vannmassen avkjøles vil saltholdigheten i overflatelaget kunne øke på grunn av oppblanding med saltere underliggende vann. Dette medfører at hvis det er en liten saltholdighetsgradient vil avkjølingen nå dypere enn hvis gradienten er større, og en større vannmasse må avkjøles før frysing kan inntreffe. Laget er derved mer motstandsdyktig mot avkjøling. En minsteverdi for den avkjøling en vannmasse kan tåle uten å fryse kan beregnes når temperatur- og saltholdighetsprofilene er kjent. Da kan også tetthetsprofil beregnes. Varmekapasiteten er avhengig av vannets temperatur, saltholdighet og det vannvolum som er med i avkjølingsprosessen, det vil si direkte avhengig av tykkelsen av laget som kan delta i en sirkulasjon.

Disse vurderinger forutsetter at det foregår blanding av vannmasser bare på grunn av tetthetsendringer som skyldes varmetap fra overflaten. Det er dessuten molekylær diffusjon mellom lag av forskjellig temperatur, men kvantitativt er virkningen av denne praktisk talt uten betydning i denne sammenheng. Langt større rolle spiller ytre forhold. Spesielt vil vinden og annen mekanisk påvirkning forårsake bølger og føre til strømmer som bidrar til å utjevne saltholdighetsgradienter i de øvre lag slik at sirkulasjonen trenger dypere ned. På den annen side kan stille vær med

nedbør føre til at det dannes et tynt, ferskt og lett overflatelag som raskt kan avkjøles til frysepunktet. Dersom nedbøren faller som snø trengs det også varme til å smelte snøen. Dette medfører at overflatelaget avkjøles, og spesielt dersom temperaturen fra før er nær frysepunktet, kan is dannes meget raskt.

Fjordene tilføres ferskvann ved tilsig fra landområdene omkring, konsentrert i større og mindre elver. Når elva renner ut i fjorden med lav hastighet vil det ferske og lettere elvevannet legge seg oppå det saltere og tyngre fjordvannet. Når elvevannet har større hastighet vil ferskvannet i større grad blandes med det salte fjordvannet, bevegelsen overføres til et større vannvolum og hastigheten reduseres. Det blir dannet en utgående brakkvannsstrøm. Denne første blandingen, initialblanding, er bestemt av elvevannets hastighet og topografiske forhold i overgangen mellom elv og fjord.

Dersom ferskvannstilførselen øker om vinteren vil dette vanligvis øke isdannelsen et eller annet sted i fjorden. I fjorder med uregulert tilsig er det ofte hyppigere islegging ved moderat enn ved sterk kulde. Dette kan skyldes at ferskvannstilførselen vanligvis er meget liten under sterk kulde, men kan også ha sammenheng med at det da også ofte er fralandsvind. Et tynt, ferskt overflatelag vil da lett blåse ut fjorden, og bevirke at varmere og saltere dypvann kommer opp samtidig som omrøringen øker. Dersom det hele vinteren er et stabilt ferskvannslag i fjorden vil isdannelsen øke i sterk kulde. I denne sammenheng er mektigheten og stabiliteten av det brakke overflatelaget av stor betydning for hvor tykk isen skal bli.

Isforholdene i Sandsfjordsystemet er kartlagt fra 1970. Før Ulla-Førre-utbyggingen var hele Hylsfjorden og ytre del av Saudafjorden normalt islagt hver vinter, og drivis har ikke vært uvanlig i deler av Sandsfjorden. I ekstreme isår har også hele Saudafjorden og Sandsfjorden tidvis vært islagt.

Hylen kraftstasjon ble satt i drift i august 1980. Foreliggende observasjoner viser klart at indre del av Hylsfjorden ikke islegges selv under ekstreme kuldeperioder så lenge Hylen kraftstasjon er i drift. Sterk innblanding av ferskt driftsvann i det saltere fjordvannet gjør at det dannes et markert brakkvannslag som strømmer utover fjorden. Det avhenger av lagets tykkelse, homogenitet og temperatur hvor stor varmekapasitet laget har og hvor stor del av fjorden som islegges. Det er sjelden is lenger enn omtrent halvveis inn til Hylen. I det islagte området er isen ofte av ujevn kvalitet og tykkelse, og den går lett opp. Med det relativt store åpne området i indre del av fjorden blir også isen særlig utsatt for oppbrekking, særlig i østavær, som er en vanlig værtype i kuldeperioder. Det ser også ut som isen i de islagte områdene er av kortere varighet enn før reguleringen.

De fysiske forhold ved utslippet har stor betydning for virkningen på isforholdene, og dette ble også undersøkt nærmere under planleggingen. Driftsvannet slippes ut i et 14 m bredt rektangulært utløp med såle ca. 12 m under havets nivå. Utløpet ble søkt konstruert for å gi en best mulig innblanding av driftsvann med hensyn til issituasjonen i fjorden. Vanlig driftsvannføring er 120 eller 240 m³/s, og dette medfører at det dannes et tykt brakkvannslag som strømmer utover fjorden. Det dannes ikke is før i ytre del av Hylsfjorden når kraftstasjonen er i drift, selv med meget sterk og langvarig kulde. Når kraftstasjonen står avtar hastigheten, og oppholdstiden for brakkvannet i fjorden kan bli tilstrekkelig lang i kuldeperioder til at også indre del av fjorden fryser.

3. FORUNDERSØKELSER 1972-1975

3.1 Fysisk oseanografi

Det hydrofysiske undersøkelsesprogrammet ble utført i Sandsfjordsystemet, Jøsenfjorden, Erfjorden og Jelsafjorden med tilstøtende kystfarvann. I alt ble det gjennomført 30 tokt i perioden 1973-75. I størstedelen av undersøk-markerte øvre lag, mellomlag og bassengvann.

elsesperioden hadde terskelfjordene en karakteristisk hydrografisk tre-lags struktur, med Temperaturen i overflatevannet fulgte variasjonene i lufttemperaturen. Blandingsprosesser, hovedsakelig vinddannede, forårsaket samme utviklingsmønster nedover i det øvre lag, men amplitudene avtok og tidsforskyvningen økte i forhold til variasjonene i overflaten.

Det var en nær sammenheng mellom sesongvariasjonene i ferskvannstilførselen og variasjonene i saltholdigheten i det øvre lag. Korttidsvariasjonene var imidlertid hovedsakelig forårsaket av vinden.

Sandsfjordsystemet fikk omtrent dobbelt så mye ferskvann tilført som Jøsenfjorden. Ferskvannspåvirkningen i Sandsfjordsystemet var også større på grunn av den smalere munningen av Sandsfjorden, og brakkvannslaget var derfor dypere her enn i Jøsenfjorden. Ferskvannsavrenning til Erfjorden og Jelsafjorden var ubetydelig, men tilførsel av brakkvann fra de andre fjordene i området resulterte i et markert brakkvannslag også i disse to fjordene i perioden mai-september.

Den vinddrevne strømkomponenten dominerte, men vertikalstrukturen av strømmen var sterkt preget av den vertikale tetthetsfordelingen. Dette gav seg blant annet utslag i at tidsforskyvningen mellom vindstress på overflaten og den korresponderende vinddrevne strømkomponenten i et bestemt dyp varierte med tetthetsfordelingen.

Strømforholdene var meget kompliserte i grenseområdet mellom Hylsfjorden, Saudafjorden og Sandsfjorden. Vannutveksling mellom de tre fjordarmene, horisontale medrivningsprosesser og ferskvannstilførselen fra Suldalslågen dannet virvler som i perioder dekket hele området mellom munningene av Hylsfjorden og Saudafjorden og noen få kilometer sør for Sand.

Forundersøkelsene i Ryfylkefjordene viste at sirkulasjonen i mellomlaget i fjordene hovedsakelig styres av vinddrevne opp- og nedstrøm-

ninger i tilstøtende vannmasser. Vannutvekslingen fant sted gjennom frontområder i det tilstøtende ytre fjordområdet.

Bassengvannet i Jelsafjorden ble fornyet med kystvann hvert år i undersøkelsesperioden. I de indre fjordene fant total fornyelse av bassengvannet sted i 1974 og 1975, mens det kun ble delvis fornyet i 1973.

I forbindelse med forundersøkelsen ble det utviklet en to-dimensjonal numerisk koblet fjord-kyst modell. Modellen bygger opp under antagelsene som ble gjort på grunnlag av data-analysene, om at sirkulasjonen i mellomlaget styres av prosesser i tilstøtende kystvann.

3.2 Planteplankton

I forundersøkelsen var det lagt vekt på kvalitative og kvantitative undersøkelser av planteplanktonet i Jøsenfjorden, Erfjorden, Jelsafjorden og Sandsfjordsystemet. Resultatene fra de omfattende og grundige undersøkelsene av planteplanktonets sesongmessige variasjoner er jamført med hydrografiske data fra samme tidsrom (Nygaard 1979).

I begge fjordområdene startet våroppblomstringen i februar-mars. Denne oppblomstringen var dominert av diatomeer (kiselalger) med *Skeletonema costatum* som den dominerende arten tidlig i oppblomstringen. Senere ble den avløst av *Chaetoceros compressus*. Midtsommers var bestanden av *Thalassionema nitzschioides* forholdsvis stor i Sandsfjordsystemet, mens arter som *C. compressus*, *S. costatum*, *Nitzschia actydropbila* og *Emiliania huxleyi* var vanligst i Jøsenfjordområdet. *E. huxleyi* var imidlertid en vanlig kalkflagellat også i Sandsfjordsystemet. Om høsten var planteplanktonsamfunnene variable, mens vinteren ble betegnet som meget fattig.

En av konklusjonene fra forundersøkelsen var at planteplanktonets sesongmønster både i Sandsfjordsystemet og i Jøsenfjorden varierte fra år til år. For de to fjordområdene ble det imidlertid funnet at artssammensetningen stort sett var den samme selv om mengden av de

ulike artene kunne variere nokså mye fra det ene fjordområdet til det andre.

3.3 Dyreplankton

Forundersøkelsen avdekket klare forskjeller i dyreplanktonmengde og -sammensetning mellom Sandsfjordsystemet og områdene utenfor, inkludert Jøsenfjorden. De ytre områdene var kjennetegnet av høyere biomasse og et større innslag av store oseaniske planktonformer som f.eks. raudåte (*Calanus finmarchicus*). Som et årlig gjennomsnitt var planktonmengdene (biomasse) 4 ganger høyere i Jøsenfjorden enn i Hylsfjorden. Den større planktonbiomassen i Jøsenfjorden var i hovedsak knyttet til forskjeller i mengden av *Calanus finmarchicus*. Dyreplanktonet i Sandsfjordsystemet besto gjennomgående av mindre planktonarter. Grovt syntes det å være to ulike næringskjeder i fjordene. I Jøsenfjorden og øvrige ytre områder syntes store diatomeer -> copepoder -> fisk å være en fremtredende næringskjede, mens små planteplankton -> små copepoder -> maneter syntes å dominere i Hylsfjorden. Det var her også et karakteristisk brakkvannssamfunn i de øverste 3-5 m bestående av copepoden *Eurytemora affinis*, samt cladocerene (vannloppene) *Evadne nordmanni* og *Podon* spp.

I Jøsenfjorden ble det i perioder med sterk utgående vind funnet store konsentrasjoner av dyreplankton (bl.a. *Calanus finmarchicus*) innerst i fjordbunnen. Tilsvarende oppsamlinger ble ikke funnet innerst i Hylsfjorden. Fosshagen (1979) knyttet forskjellen mellom fjordene til topografi og brakkvannslagets tykkelse. I Jøsenfjorden var brakkvannslaget tynt (1-2 m), og stammet fra elver inne i fjorden. Pga det åpne utløpet i Jøsenfjorden ble det en rask uttransport av brakkvannslaget, og Fosshagen (1979) antok at en resulterende kompensasjonsstrøm brakte planktonrike vannmasser inn til fjordbunnen. Vind ut fjorden påskyndet denne transporten.

I motsetning til Jøsenfjorden stammet hoveddelen av brakkvannslaget i Hylsfjorden fra kilder utenfor fjorden, i det vesentlige fra Suldalslågen. Det ble dermed ikke dannet en brakkvannsstrøm ut denne fjordarmen og følg-

elig heller ikke en kompensasjonsstrøm som kunne bringe plankton inn på tilsvarende måte som i Jøsenfjorden. Samtidig hindrer det smale innløpet til Sandsfjorden utveksling med kystområdene. Det ble imidlertid også innerst i Hylsfjorden tidvis registrert faunaendringer som et resultat av dypvanns- eller mellomlagsinnstrømminger.

Fosshagen (1979) antok at den lavere dyreplanktonbiomassen i Sandsfjordsystemet også tildels var forårsaket av matmangel. Denne var begrunnet med det tykke brakkvannslaget som øker stabiliteten i vannmassene. Dette reduserer den vertikale omrøringen og kan hindre næringssalter i å nå øvre produktive lag, noe som innebærer redusert planteproduksjon. Dessuten kan den markerte saltgradienten hindre marine arter i å svømme opp i de øverste metrene og dra nytte av fødeorganismer i disse produktive vannlagene.

4. DATAMATERIALE OG METODER

4.1 Datamaterialet

Det ble gjennomført i alt 10 tokt med M/S HÅKON MOSBY til Ryfylkefjordene.

- | | | | | |
|-----|--------------|---|--------------|------|
| 1) | 19. januar | - | 24. januar | 1987 |
| 2) | 1. oktober | - | 12. oktober | " |
| 3) | 16. november | - | 21. november | " |
| 4) | 20. februar | - | 2. mars | 1988 |
| 5) | 20. mai | - | 24. mai | " |
| 6) | 4. juni | - | 12. juni | " |
| 7) | 21. oktober | - | 1. november | " |
| 8) | 25. januar | - | 30. januar | 1989 |
| 9) | 26. april | - | 7. mai | " |
| 10) | 25. juli | - | 7. august | " |

På tokt 6 og 10 var det leid et hjelpefartøy, M/K FREIDIG, til undersøkelser i utvalgte deler av Sandsfjordsystemet. Toktene 1 og 8 var undervisningstokt arrangert av Geofysisk institutt. Tokt 3 var undervisningstokt arrangert av Institutt for marinbiologi. Data fra disse toktene er stilt til disposisjon for Ryfylkeprosjektet.

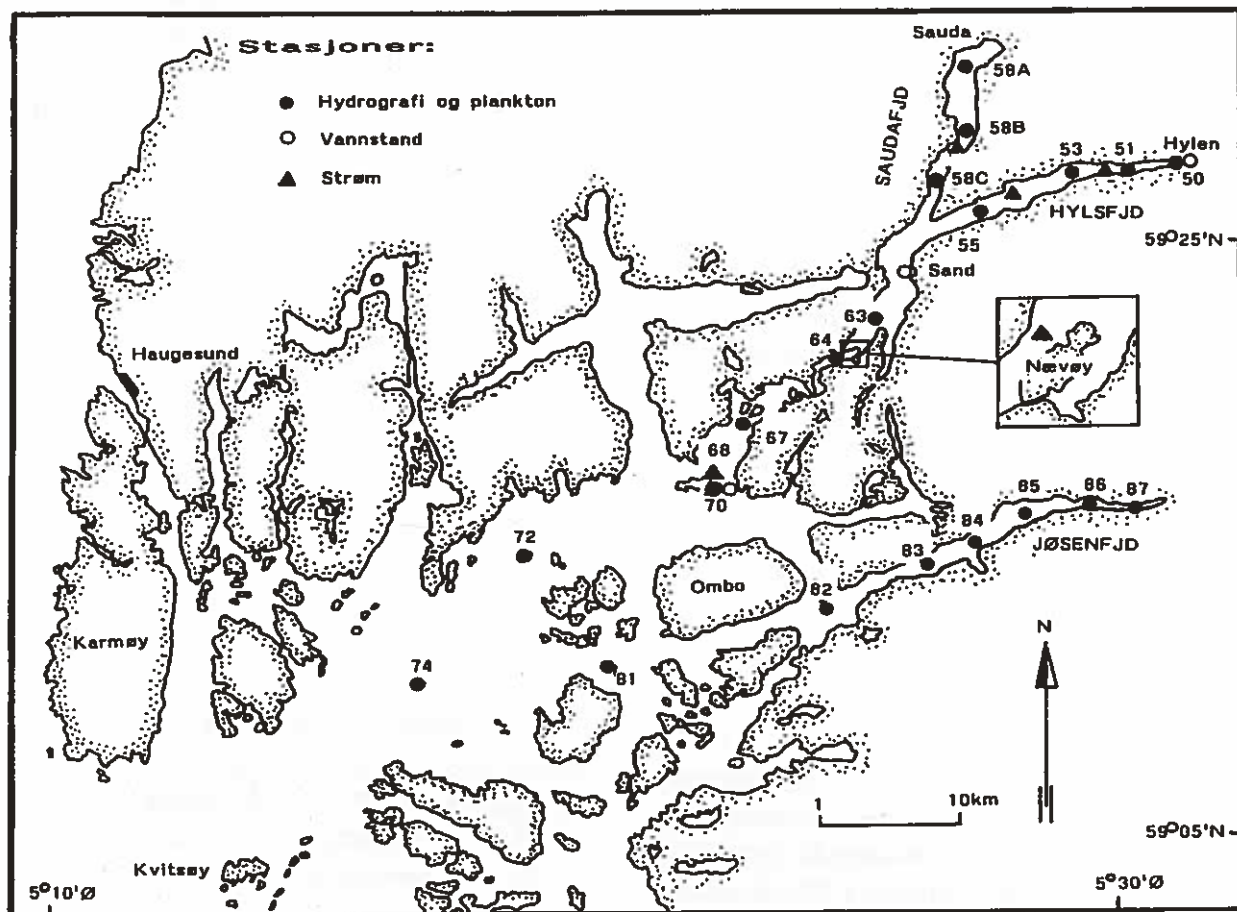
4.2 Metodikk

4.2.1. Hydrografi, næringssalter og strømmålinger

Det er i etterundersøkelsen tatt ca. 1000 CTD-stasjoner (vertikalprofiler av saltholdighet og temperatur) fordelt på lengdesnitt i Sandsfjord-systemet, ytre fjordområder til noen kilometer vest av Karmøy og i Jøsenfjorden (Fig. 7).

På alle toktene ble det målt strømfart, strømrøtning, sjøvannstemperatur og saltholdighet (konduktivitet) med Aanderaa strømmålere, fra faste installasjoner (bøyerigger). Målingene ble utført i utvalgte dyp på stasjonene 51, 55, 58C, 64 og 68 (Fig. 7).

Noen korte måleserier av strømfart, strømrøtning og temperatur ble i tillegg gjennomført



Figur 7. Stasjonsnett i Ryfylkefjordene

Til hydrografisk kartlegging av overflatelaget i Sandsfjordsystemet ble en mini CTD festet til en gummiått eller slede og slept i transekt snitt i fjordsystemet.

Konsentrasjoner av næringssaltene silikat, fosfat og nitrat (nitratverdiene inkluderer nitritt) ble undersøkt både i ferskvann og sjøvann. Analysene er gjort ved bruk av auto-analysator med standardløsninger som referanser. Næringssaltene oppgis i mikromolar (μM).

med målere av type SD 1000/SD 2000 i utvalgte dyp mellom 0 og 10 meter på stasjoner i indre og ytre del av Hylsfjorden (toktene 1, 5, 9, 10) og i munningsområdet av Sandsfjorden (toktene 6 og 8). På tokt nr. 10 ble det foretatt vertikalprofilering med ultralyd strømmåler UCM-40 fra ått. På fire tokt (6, 7, 9 og 10) ble det også gjort strømkorsforsøk, med undersøkelse av strømt i øvre lag både i Hylsfjorden, Saudafjorden og i fjordmunningen utenfor Nævvøy. Resultatene fra disse undersøkelsene er vurdert og plottet manuelt.

4.2.2 Vannstandsregistreringer, vindmålinger og ferskvannstilførsel

Vannstandsregistreringene er utført av NVE og bearbeidet av Norges Sjøkartverk. Målingene består av timesverdier av absolutt vannstand ved stasjoner i Hylen Stn. 50), Sand og Jelsa (Stn. 70) (Fig. 7). Vindmåling ble utført med Aanderaa værstasjoner plassert på strømmålerbøyene. I tillegg er det innhentet meteorologiske observasjoner (hver 6. time) fra Fister og Utsira, samt fra en Aanderaa værstasjon (timesverdier) i Vannvik i Hylsfjorden. Målingene fra værstasjonen er noe påvirket av den lokale topografien. Tilleggsdataene er fra Meteorologisk institutt.

Data for målt ferskvannstilførsel fra de tre hovedkildene i Sandsfjordsystemet, Hylen kraftstasjon, Sauda III og Suldalslågen og temperatur i driftsvannet ved Hylen kraftstasjon, er fremskaffet av NVE, Hydrologisk avdeling.

4.2.3. Lysmålinger

Det innstrålte lyset er målt i bølgelengdeområdet 400-700 nm og angis i mikro-einstein pr flateenhet og tidsenhet ($\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$). Lyset ble målt både ved overflaten og nedover i vannsøylen for beregning av lys-svekkingen nedover i vannmassene (ekstinksjonskoeffisienten) og for å finne 1 % lysdyp.

Ekstinksjonskoeffisienten er beregnet ut fra følgende ligning:

$$k = (\ln I_A - \ln I_B)/(B-A)$$

hvor k er ekstinksjonskoeffisienten, I_A og I_B er lysstyrken på henholdsvis dyp A og B . Lysmålingene ble fram til 1988 utført med plan sensor (Lambda lysmålerutstyr). Fra 1989 ble det benyttet nytt lysmålerutstyr med kuleformete sensorer (Biospherical Instruments). Dette medførte blant annet at de innstrålte lysverdiene for overflatelystet ble ca 1.8 ganger høyere enn tidligere. I resultatene er det korrigert for dette slik at alle lysverdier som oppgis, angir lyset som om målingene var foretatt med plan sensor.

4.2.4. Algemengde, artssammensetning og produksjon

Algemengden er angitt som klorofyll a pr. volumenhet ($\text{mg kl f}/\text{m}^3$). Analysene følger metoden beskrevet av Holm-Hansen et al. (1965), men med modifisering beskrevet av Holm-Hansen & Riemann (1978).

Algenes produksjon er målt ved å tilsette radioaktivt merket uorganisk karbon til vannprøver som så er lyseksonerte i en temperatur-regulert inkubator. Deres produksjonseffektivitet (dvs hvor effektivt de kan utnytte ulike lysintensiteter) og produksjonskapasitet (dvs den maksimale produksjonen de kan oppnå) er beregnet ut fra radioaktivt karbonopptak ved 6 ulike lysintensiteter i inkubatoren.

På utvalgte dyp ble det tatt to parallelle vannprøver til telling av alger. Den ene prøven ble tilsatt det jodbaserte fikseringsmiddelet Lugol, som er skånsomt ved fiksering av flagellater, og den andre ble tilsatt formalin.

På hver stasjon er det også tatt håvtrekk (maskevidde 30 μm) fra ca 20 m til overflaten. Prøvene ble fiksert med formalin.

4.2.5. Dyreplankton

Dyreplankton ble innsamlet med Juday-håv, pumpe og MOCNESS-trål (Multiple Opening Closing Net Environmental Sampling System). Juday-håven var også hovedredskap i forundersøkelsen og resultatene er dermed direkte sammenliknbare. Planktonpumpen er best egnet for å fange småformer, og ble benyttet til prøvetaking med svært fin dybdeoppløsning (ned til 1 m dybdeintervall). MOCNESS-trålen gir noe grovere dybdeoppløsning (50-5 m dybdeintervall ble vanligvis benyttet i denne undersøkelsen), men er bedre egnet til å fange større planktonformer som unnviker pumpen og kan også benyttes på større dyp.

Dyreplanktonet ble skilt på størrelsen. I fangstene fra MOCNESS-trålen er dyr som passerte en 2 mm sikt karakterisert som *mesoplankton* og større individer som *makroplankton*. Av makroplanktonet er bare krill behandlet i detalj. Dyr som ble fanget i planktonpumpen og i

Juday-håven regnes som mesoplankton. Forundersøkelsen omfattet bare studier av mesoplankton. Det ble gjennomført innsamlinger både i dagslys og i mørke.

Stasjonsnettet fra forundersøkelsen dannet utgangspunkt for prøvetakingen. Dette ble imidlertid supplert med et økende antall stasjoner i løpet av undersøkelsesperioden, samtidig som en stasjon fra forundersøkelsen (Erfjorden) ikke var inkludert i etterundersøkelsen.

Det er gjort biomassebestemmelser for alle prøver. Disse gir en grov, men rask oversikt over mengden (vekten av) biologisk materiale. Halve prøven er tørket, veid og deretter brent. Etter veiing av asken er resultatene fremstilt som askefri tørrvekt (AFTV). Den andre halvdelene er oppbevart på formalin, og senere er artssammensetningen undersøkt i et utvalg av prøvene.

5. RESULTATER: FYSISK OSEANOGRAPHI

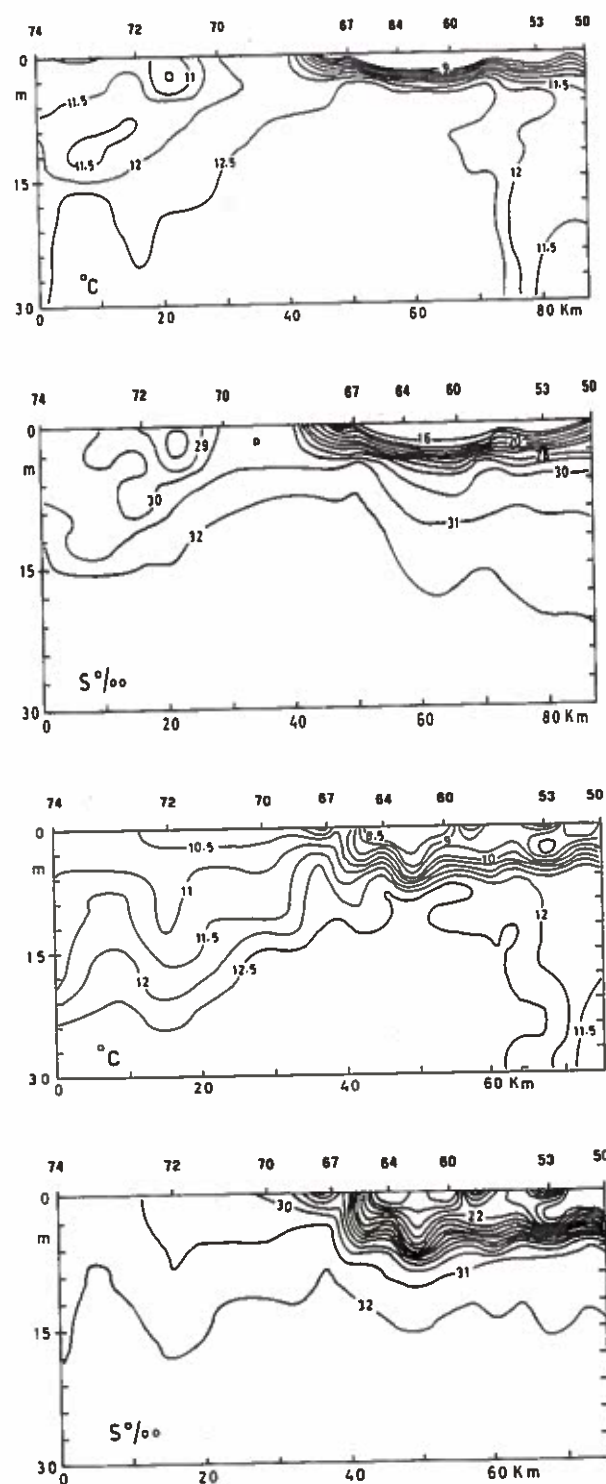
5.1 Hydrografi

5.1.1 Sandsfjordsystemet

Det øvre lag

Ferskvannstilførselen til Sandsfjordsystemet er av avgjørende betydning for saltholdighet og temperatur i øvre lag. Det var et markert brakkvannslag i alle observasjonsperiodene, med lavest saltholdighet om sommeren (4-5 ved toktet i juli/august der vannmassene var preget av snøsmelting i fjellene), og høyeste saltholdighet i vinterhalvåret (ca 19 i månedskiftet februar/mars). I tillegg til sesongvariasjonene forekom store korttidsvariasjoner styrt av vindforholdene og ferskvannsutslipp fra Hylen. I oktober 1987 steg f.eks. overflatesaltholdigheten innerst i Hylsfjorden fra < 10 til 29 etter at kraftig utgående vind førte til oppstrømning av dypere liggende vann. I oktober året etter førte blandingsprosesser i nærsone ved kraftverksutslippet til at overflatesaltholdigheten steg fra 16 til > 20 etter utslipp av 230 m³/s (Fig. 8), mens saltholdigheten avtok fra

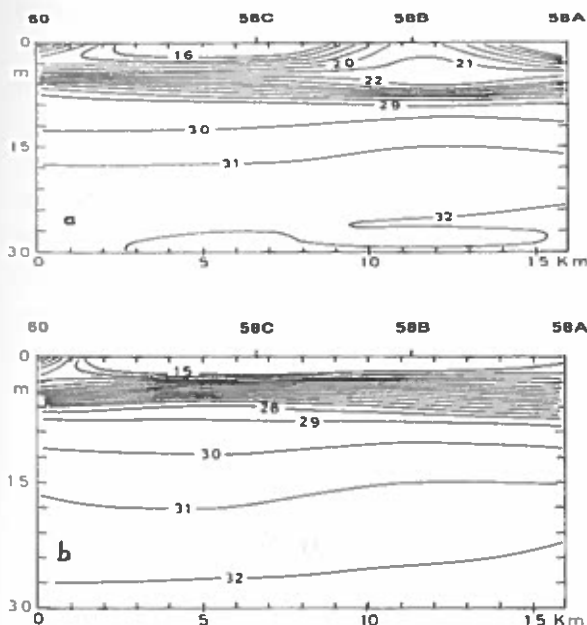
et par meters dyp og ned til ca 10m.



Figur 8. Temperatur- og saltholdighetsfordeling i Sandsfjordsystemet før (22. - 23. oktober 1988, øverst) og etter (28. - 29. oktober 1988, nederst) utslipp av 230 m³/sek fra kraftverket i Hylen.

Ved utslipp fra Hylen i juli 1989 ble det registrert spesielt kraftige blandingsprosesser. Det var på denne tiden svært store ferskvannsutslipp som i vesentlig grad ble sluppet ut gjennom en overløpstunnel plassert over vannivå. Dette vannet traff fjordoverflaten med stor hastighet, og den medfølgende vertikale blandingen førte til betydelig økning i overflatesaltholdigheten i blandingssonen (fra ca 4 til 18), og redusert saltholdighet i dypere lag. Vannet som ble dannet i blandingssonen var følgelig tyngre enn det eksisterende overflatelaget i fjorden og dukket derfor under dette. Brakkvannslaget ble dermed tykkere, et stykke ute i fjorden falt f.eks saltholdigheten i 5 m dyp fra ca 25 til 15. Et tykkere brakkvannslag kunne også registreres i Saudafjorden, der dybden for maksimal saltholdighetsgradient økte med ca 4 m.

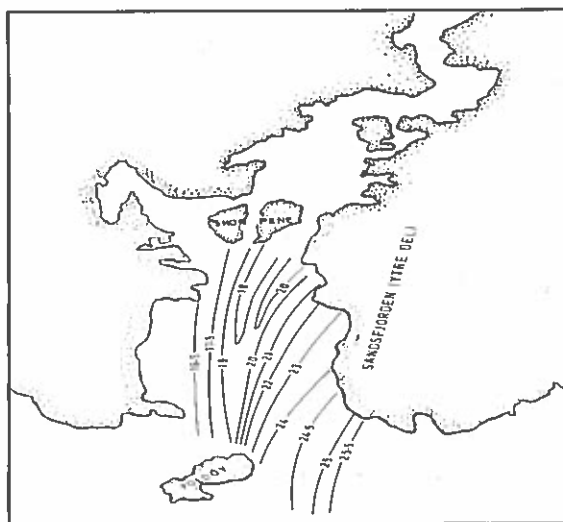
Ved alle toktene ble det funnet markerte frontområder nær munningen av Sandsfjorden, med store endringer i saltholdighet og tildels også i temperatur over korte avstander (eks. i Fig. 8). Slike småskala fronter opptrer også inne i selve Sandsfjordsystemet. Mellom disse frontene danner isopletene i overflatelaget et linsemønster. Linsene er pakker med brakkvann som skiller seg fra de øvrige vannmassene i det øvre laget ved store gradienter i de hydrografiske egenskaper.



Figur 9. Lengdesnitt av saltholdighet i Saudafjorden, a) 21. februar 1988, b) 24. februar 1988.

Når kraftverket kjøres øker antallet frontsoner og det karakteristiske linsemønsteret utvikles. Brakkvannslaget i Saudafjorden var omtrent like tykt som i Hylsfjorden. Også her var det mindre fronter med linser i overflatelaget (Fig. 9).

Fronter kunne forflytte seg flere kilometer i løpet av noen få timer, både på langs og tvers av fjorden. Dette var mest fremtredende i munningsområdet (Fig. 10). Her kunne frontene ligge nesten parallelt med lengdeaksen for så noen timer senere å ha dreid på tvers av fjorden. Dette innebærer at de frontene som registreres i hydrografiske lengdesnitt av fjordene kan være betydelig mer markert enn det snittene viser.



Figur 10. Saltholdighet i overflaten ved munningsområdet i Sandsfjorden.

I det relativt grunne brakkvannslaget (et homogent vannlag skilt fra underliggende vannmasser med en kraftig tetthetsgradient som hindrer vertikal blanding) foregår oppvarming og nedkjøling hurtig. Høst og vinter var det derfor gjennomgående lavere temperaturer i øvre lag i Sandsfjordsystemet enn i vannmasser uten en tilsvarende lagdeling (eks. Fig. 8), mens temperaturen tildels var høyere sommerstid. Imidlertid har også temperaturen i ferskvannet en tydelig effekt for fjordvannet i nærområdene rundt ferskvannsutslippene. I slutten av juli 1989, da kraftverket i Hylen hadde vært ute av drift i en måned, var det ca 18 °C i brakk-

vannslaget i indre deler av Hylsfjorden, mens temperaturen i Sauda og nær Sand var 13-14 °C (Kaartvedt et al. 1990). Hylsfjorden representerte på denne tiden en "bakevje" med relativt lang oppholdstid for brakkvannslaget. Nær ferskvannskildene, derimot, ble det stadig tilført nytt, kaldt vann, og overflatelaget ble fornyet før det ble særlig oppvarmet. Lignende forskjeller mellom fjordarmene ble observert ved stopp av kraftverket i juni 1988.

Ved drift av Hylen ble de laveste temperaturene i sommerhalvåret funnet innerst i Hylsfjorden. Ved oppstartning av kraftverket i juli 1989 (svært store utslipp) sank overflate-temperaturen innerst i fjordarmen med ca 8 °C, og vannmassen fra blandingssonen utenfor kraftverksutslippet kunne spores som en kald kile som spredte seg ut gjennom fjordsystemet (Kaartvedt et al. 1990). Ved vårtoktene i 1988 og 1989 var temperaturfallet inn mot Hylen på ca 2.5 °C.

Mellomlag og bassengvann

Selv om det i etterundersøkelsen var forholdsvis lang tid mellom toktene kunne det spores karakteristiske sesongmessige variasjoner i temperatur og saltholdighet. Data fra vår- og sommertoktene viser således forholdsvis høy saltholdighet og lav temperatur i mellomlaget, mens avsaltingen og temperaturøkningen som finner sted i mellomlaget på ettersommeren og høsten ble registrert i data fra høsttoktene.

I det øvre lag og øvre del av mellomlaget var det ofte markerte gradienter både i temperatur og saltholdighet. I nedre del av mellomlaget og i vannmassene under terskelnivået var de vertikale gradientene i temperatur og saltholdighet svake. Under terskelnivået er vannmassene tilnærmet homogene hele året, med en svak økning i saltholdigheten og avtagende i temperatur utover våren.

5.1.2. Jøsenfjorden

Vertikalstrukturen av vannmassene i Jøsenfjorden var i undersøkelsesperioden 1987-89 vesentlig forskjellig fra forholdene i Sands-

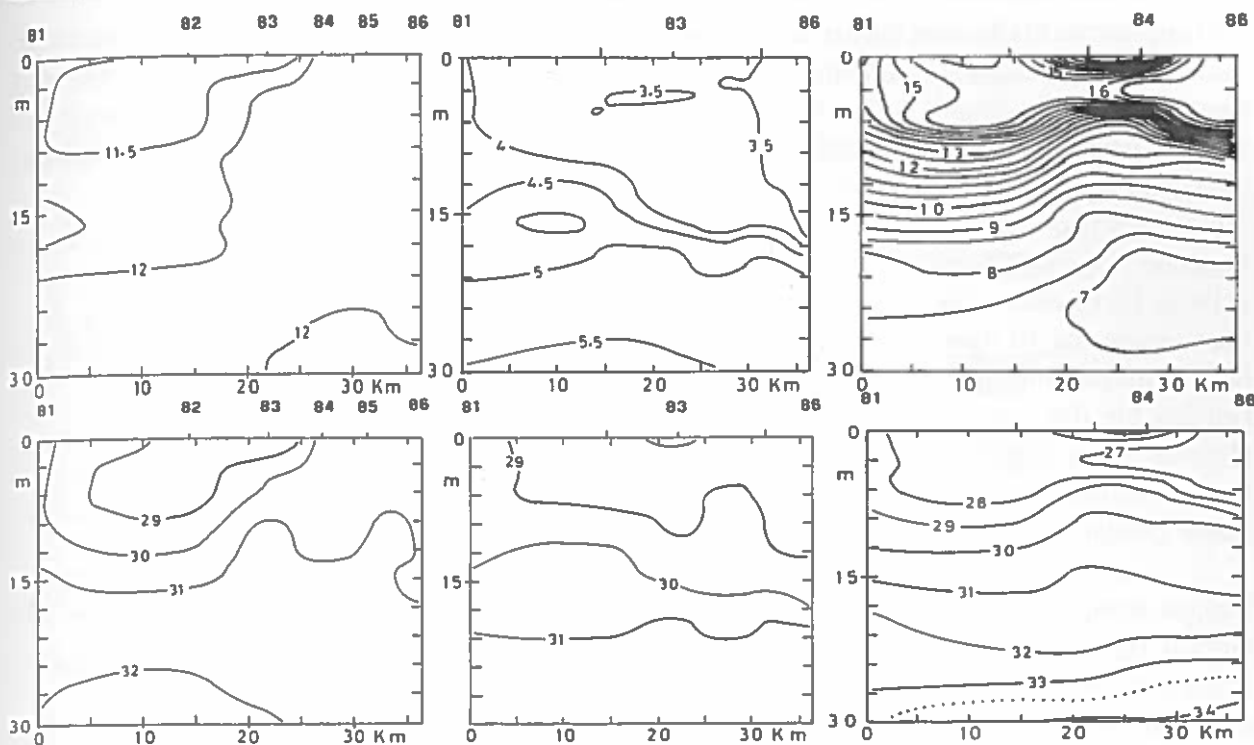
fjordsystemet. De hydrografiske målingene fra denne fjorden viser små vertikale gradienter i saltholdighet og temperatur (Fig. 11). Et unntak var juli/august 1988 hvor det var et forholdsvis tykt brakkvannslag med saltholdighet på ca 12 ved overflaten og ca 30 på 8 m dyp.

Det ble ikke observert småskala fronter eller "linser" i de øvre metrene inne i selve fjorden. I området ved munningen av fjorden var det imidlertid tendens til frontdannelse. I alle tre lagene var det også utpregete sesongmessige variasjoner tilsvarende dem som ble observert i Sandsfjordsystemet. Avsaltingen utover høsten var imidlertid noe mindre i mellomlaget og temperaturøkningen så ut til å nå noe dypere.

5.1.3. Ytre fjordområder og kysten

Med økende avstand fra det indre fjordområdet fikk vannmassene mer og mer karakter av kystvann. Hydrografiske lengdesnitt gjennom det ytre fjordområdet viste et svakere frontområde enn det som ligger i munningsområdet til Sandsfjorden. Frontene er markert av de hydrografiske isopletene som fortsetter ut av Sandsfjorden fra nedre del av det øvre lag og øvre del av mellomlaget og går opp til overflaten i det ytre fjordområdet (Fig. 8). Beliggenheten av denne ytre frontsonen varierte fra noen få kilometer utenfor utløpet av Sandsfjorden til området sør-sørvest av Karmøy. Frontsonen var vanligvis forholdsvis bred, ca. 10-15 kilometer.

Vannmassene i mellomlaget utover mot frontsonen var av samme karakter som i de indre fjordene (blanding mellom fjord og kystvann) mens de fikk mer og mer karakter av kystvann utover mot Karmøy. De samme sesongmessige variasjonene i saltholdighet og temperatur som fant sted i de indre fjordene preget også utviklingen i mellomlaget i de ytre fjordene. I dypere lag av de ytre fjordområdene er det Atlanterhavsvann hele året (saltholdighet over 35).



Figur 11. Lengdesnitt av temperatur og saltholdighet i Jøsenfjorden, 7. oktober 1987 (til venstre), 29. februar 1988 (i midten) og 11. juni 1988 (til høyre).

5.2 Strømforhold

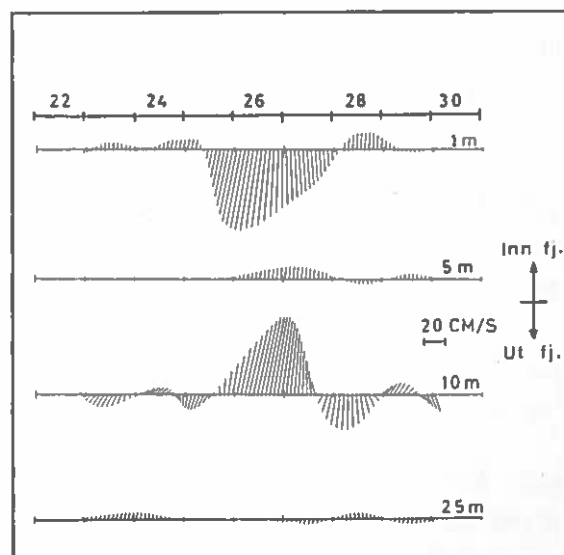
5.2.1 Sandsfjordsystemet

Øvre lag

Sirkulasjonen i øvre lag er i hovedsak styrt av ferskvannstilførsel, vind og tidevann. Strømmene varierte sterkt både i tid og rom, men det var likevel en gjennomgående utstrømming av overflatevann fra alle tre fjordene i systemet, med en kompenserende underliggende innstrømming. I Hylsfjorden og Saudafjorden var dybden av to-lag sirkulasjonen vanligvis noe mindre enn i Sandsfjorden hvor to-lag strukturen i perioder kunne omfatte hele vannsøylen over terskelnivået.

Ferskvannsdrevne strømmer er fremtredende i perioder når kraftverket kjøres. Kraftverkets innflytelse på strømforholdene kan demonstreres med to eksempler. I oktober 1988 ble det gjennomført et eksperiment med oppstart og stenging av kraftverket i løpet av toktperioden. Før ferskvannsutslippene tok til, var

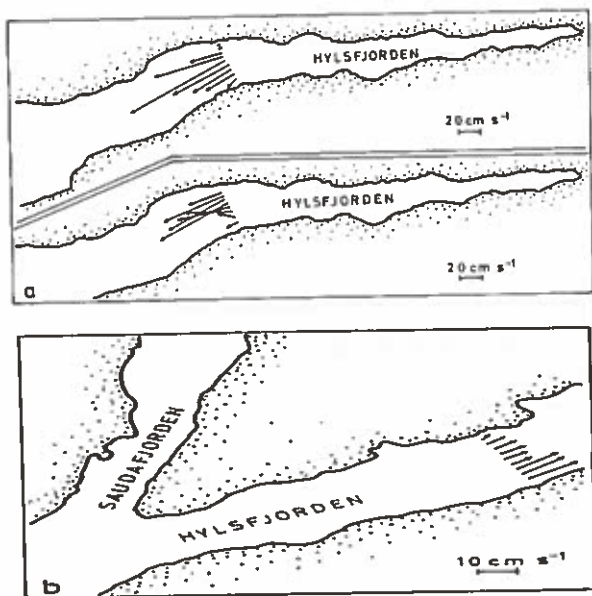
strømmene relativt svake både i indre og ytre deler av Hylsfjorden (Fig. 12)



Figur 12. Strømshastighet (positiv inn fjorden) på stasjon 51 i Hylsfjorden, 23 - 30 oktober 1988.

Ved oppstart av kraftverket ble det raskt igangsatt en to-lags sirkulasjon. I indre deler av Hylsfjorden (Stn. 51) nådde utgående overflatestrøm hastigheter på opp i 65 cm/s, mens den inngående kompensasjonsstrømmen målt på 10 m dyp nådde hastigheter på 60 cm/s. En lignende respons ble registrert i ytre bredere deler av Hylsfjorden (Stn. 55), men responsen kom senere (ca 10 timer) og hastigheten var lavere (maksimum på ca 20 cm/s). I Saudafjorden ble det dannet en inngående overflatestrøm, og dette indikerer at deler av det utstrømmende vannet fra Hylen ble dreid inn i denne fjordarmen.

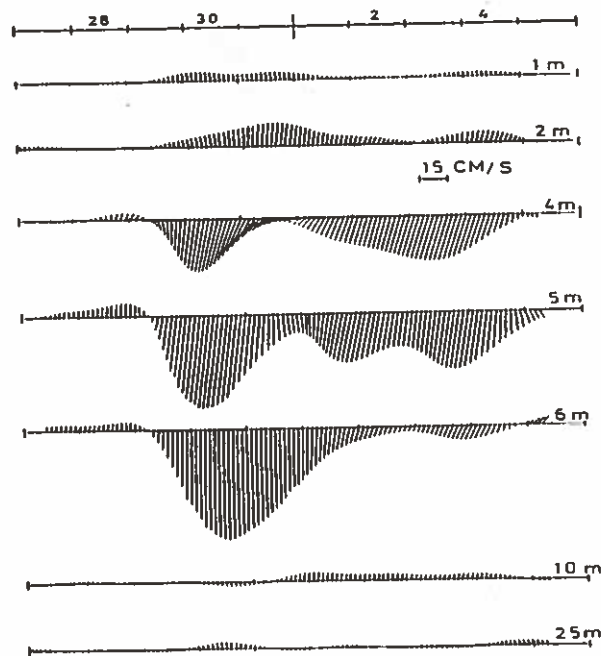
Det var store gradienter i strømforholdene på tvers av Hylsfjorden, og brakkvannsstrømmen fulgte i hovedsak fjordens midtakse. Hastighetene langs fjordsidene var lavere, og strømmene her var også tildels innoverrettede selv ved maksimale utslipp fra kraftverket (Figur 13).



Figur 13. Overflatestrømmer i Hylsfjorden på Stn. 53 (a) og på Stn. 55 (b).

Også i juli 1989 ble strømforholdene studert ved oppstart av kraftverket. Den kraftige vertikale blandingen i forbindelse med de store utslippene gjennom overløpet førte som tidligere nevnt til en saltere vannmasse enn det eksisterende brakke overflatelaget i fjorden. Det ble derfor ikke dannet en normal estuarin sirkulasjon. Kraftverketsvannet (med innblandet

sjøvann) dukket istedet under det eksisterende overflatelaget og gikk som en sterk utoverrettet strøm mellom ca 3-8 m dyp som i indre Hylsfjorden (Stn. 51) nådde strømmens hastigheter på 75 cm/s (Fig. 14).



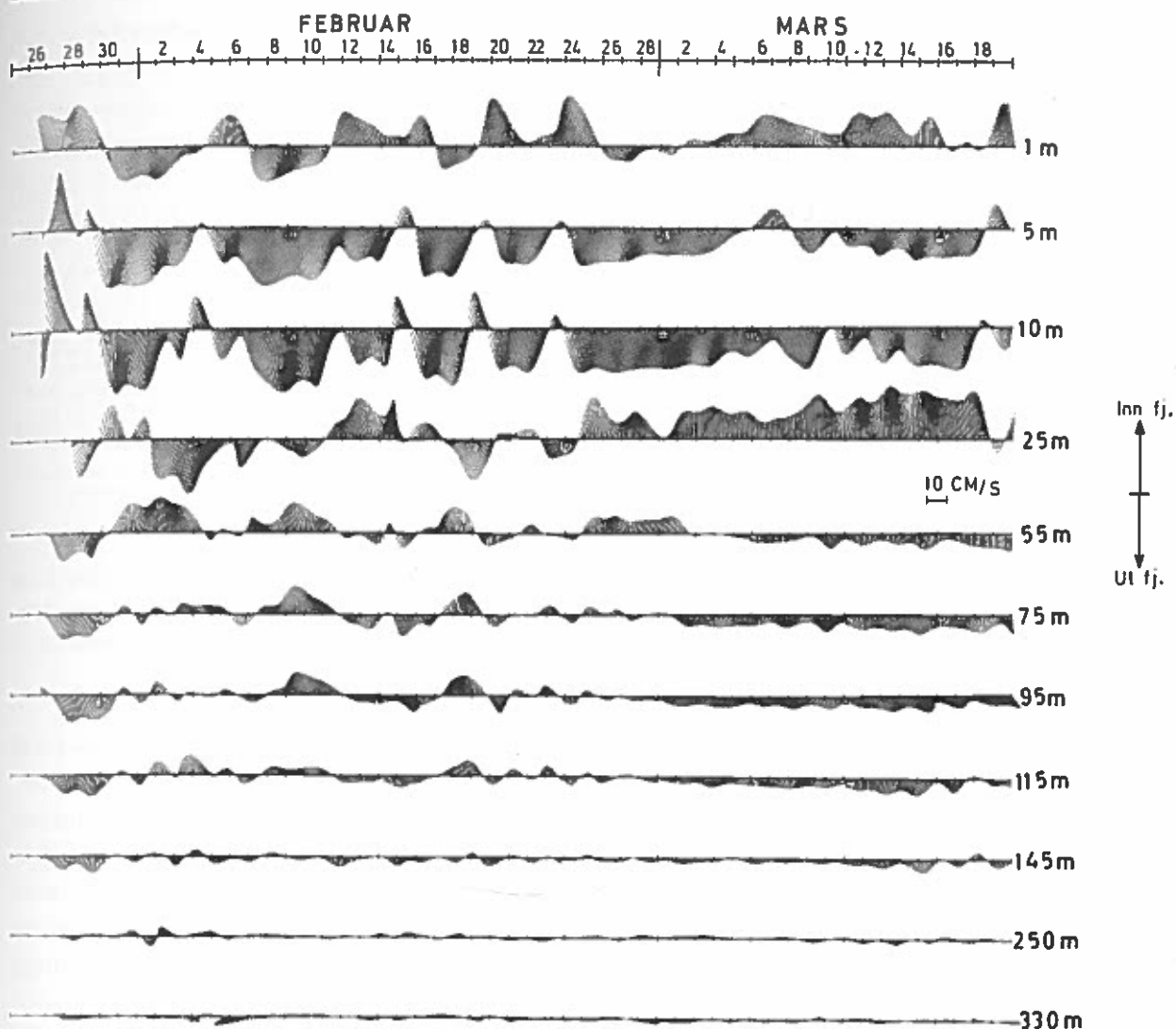
Figur 14. Strømhastigheter på stasjon 51 i Hylsfjorden, 28. juli - 4. august 1988 (positiv akse: strøm inn fjorden)

Ved utløpet av Hylsfjorden (Stn. 55) ble den utgående strømmen registrert i 5 m dyp ca 10 timer senere enn på Stn. 51. Dette gir en gjennomsnittshastighet gjennom Hylsfjorden på ca 40 cm/s. Overflatestrømmen var hele tiden innoverrettet, og det ble også dannet en inngående underliggende kompensasjonsstrøm som var mest fremtredende mellom 10-15 m.

I Saudafjorden, hvor det også var stor ferskvannstilførsel, var det i begynnelsen av perioden en overflatestrøm ut fjorden. Hastigheten i denne overflatestrømmen ble etterhvert redusert, og 3. august gikk strømmen inn fjorden.

Mellomlag og bassengvann

I likhet med det øvre lag er sirkulasjonen i mellomlaget sterkt varierende, men en overveiende del av tiden opprettholdes også i dette laget en to-lag struktur. Sirkulasjonsmønsteret veksler mellom transport inn fjorden i øvre del av laget med utstrømning i nedre del og motsatt.



Figur 15. Strømhastigheter på stasjon 64 ved Nærvøy, 26. januar - 18. mars 1989 (positiv strømrøtning inn fjorden).

To-lags sirkulasjonen kan omfatte hele vannmassen over terskelnivået når transporten er rettet ut av fjordsystemet samtidig i øvre del av mellomlaget og overflatelaget. Dette bildet kom tydeligst frem i observasjonene fra det smale området ved Nærvøy (Stn. 64) (Fig. 15), mens observasjonene fra de bredere områdene i fjordsystemet ga et noe mer sammensatt bilde.

Det var ikke noe markert vertikalt skille i strømforholdene inne i fjordsystemet rundt terskeldypet. Nedre del av mellomlaget og det øvre bassengvannet hadde stort sett samme strømrøtning. I de dypere delene av bassenget var det svake strømmar, ofte med en flerlags struk-

tur (Fig. 15). De sterkeste strømmene ble observert fra ettervinteren og ut over våren da vannstrømmet ned i bassenget fra de tilstøtende vannmassene utenfor fjordsystemet.

5.3 Fysisk oseanografisk modell

5.3.1 Formulering av modellen

Den to-dimensjonale modellen som inkluderer fjordens lengdeakse og dybdeakse simulerer fjord-dynamikken ved et sett av ligninger. Foå kunne gjengi et tilfredsstillende sirkulasjonsbilde må ligningene inneholde trykkgradienter

knyttet til overflatehellingen (barotrop gradient) og det indre tetthetsfeltet (baroklin gradient), turbulent blanding og vinddraget. Følgende ligningssystem med syv ukjente er benyttet:

$$\frac{\delta u}{\delta t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\delta p}{\delta x} - g \frac{\delta \zeta}{\delta x} + \frac{A_v}{b} \frac{\delta}{\delta z} \left(b \frac{\delta u}{\delta z} \right) - R u$$

$$A_v \frac{\delta u}{\delta z} \Big|_{\zeta} = \tau_{ov} = \rho_{atm} C_D u_{vind} \Big| u_{vind} \Big|$$

$$\rho_{atm} C_D = \lambda = 3.2 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$$

$$\frac{\delta p}{\delta z} = -\rho g$$

$$\frac{\delta b w}{\delta z} + \frac{\delta b u}{\delta x} = 0$$

$$\frac{\delta S}{\delta t} + \frac{u}{b} \frac{\delta b S}{\delta x} + \frac{w}{b} \frac{\delta b S}{\delta z} = \frac{K_v}{b} \frac{\delta}{\delta z} \left(b \frac{\delta S}{\delta z} \right)$$

$$\frac{\delta \zeta}{\delta t} = -\frac{1}{b_{z=0}} \frac{\delta}{\delta x} \int_{-H}^{\zeta} b u \, dz$$

$$\rho = \rho_0 (1 - \alpha S)$$

$$\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\alpha = 7.8 \cdot 10^{-4}$$

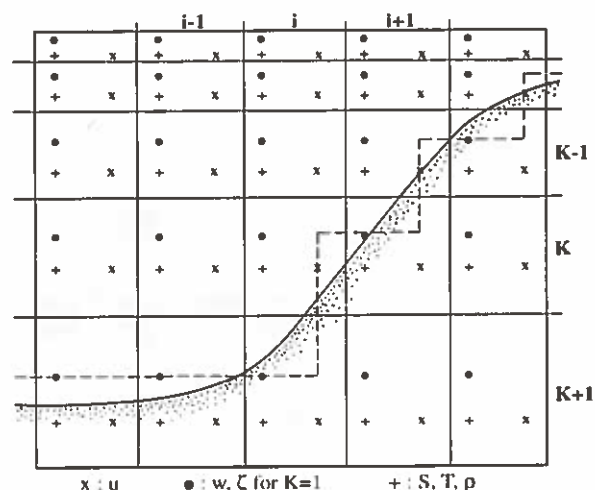
hvor ζ er vannstand, u er horisontalhastighet, w er vertikal hastighet, S er saltholdighet, T er temperatur, ρ er tetthet og p er trykk.

Modellen simulerer prosesser i alle tre fjordene i Sandsfjordsystemet og fjordenes gjensidige påvirkning. Ferskvannstilførselen ble lagt inn på tre forskjellige lokaliteter i modellen: Hylen, Sand og Sauda.

Ligningene er midlet på tvers av fjorden, men er i grove trekk antatt å simulere de viktigste hydrofysiske prosessene tilfredsstillende. Modellen er hovedsakelig benyttet til hjelp i tolkningen av felldataene, beregning av oppholdstid for vannmassene i fjordene samt simulering av fjordenes respons på varierende vindforhold og ferskvannstilførsel.

5.3.2 Numerisk løsningsmetode

Differensialligningene omskrives i endelig differanse form. Anordningen av gitterpunktene er vist i Fig. 16.



Figur 16. Gittermettet for den numeriske modellen hvor ζ er vannstand, u er horisontalhastighet, w er vertikal hastighet, S er saltholdighet, T er temperatur og ρ er tetthet.

Den horisontale gitteravstanden (Δx) er 1000 m og tidsskrittet (Δt) er valgt til 10 minutter. Salt- og varmetransportligningene diskretiseres etter en metode som demper korttidsvariasjoner. Gitterpunktene er ordnet på en slik måte at de vertikale veggene går gjennom u -punkter (randverdier av horisontalhastighet) og de horisontale veggene gjennom w -punkter (randverdier for vertikal hastighet) (Fig. 16). Hastighetene på randen blir dermed lik null. U -punktene ved fjordenden er gitt gjennom ferskvannstilførselen. Vannstanden ved fjordmunningen er også gitt. Saltholdigheten, alternativt temperaturen ved randen, er beregnet delvis av initialverdiene og delvis av en transport ut fjorden:

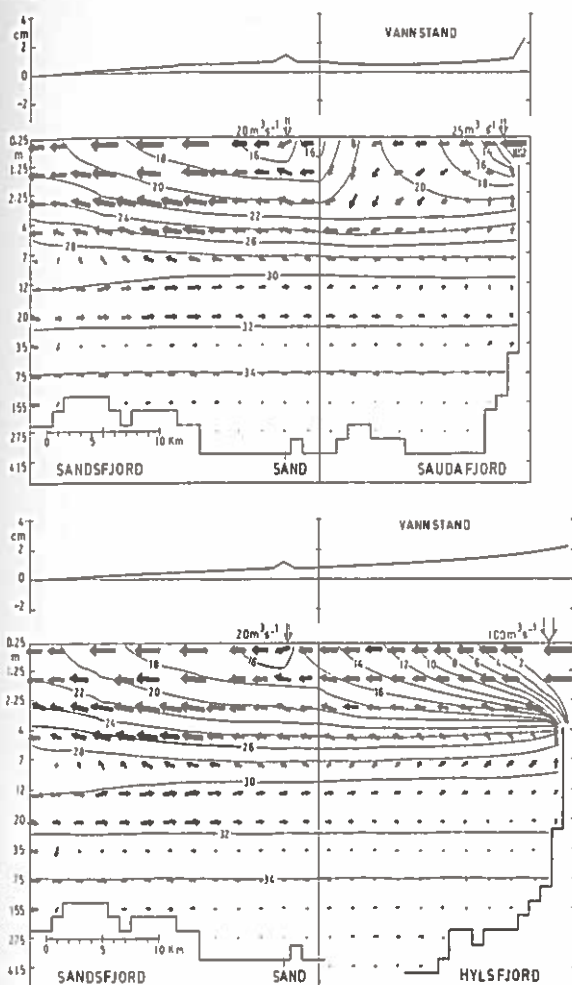
$$S^{n+1} = \alpha S^0 - \beta u \Delta t (\Delta S^n / \Delta x),$$

hvor $\alpha + \beta = 1$

Initialverdiene for hastighetsfeltet og vannstanden er satt lik null. For saltholdighet og temperatur er initialverdiene observerte vertikalfordelinger ved munningen. Fra initialtilstanden der alt er i ro, er modellen integrert for 100 dager for å oppnå en tilnærmet stasjonær tilstand. Ut fra denne simuleres utvalgte perioder med vinddrag og ferskvannstilførsel som varierer med tiden (se Mikki 1988 for øvrige detaljer om modellen).

5.3.3 Simuleringer

Fig. 17 gjengir en ikke-tidsvarierende tilstand (februar 1988), der modellen ble kjørt uten vinddrag og med følgende ferskvannstilførsler: Hylen 106 m³/s, Sand 20 m³/s, Sauda 25 m³/s.

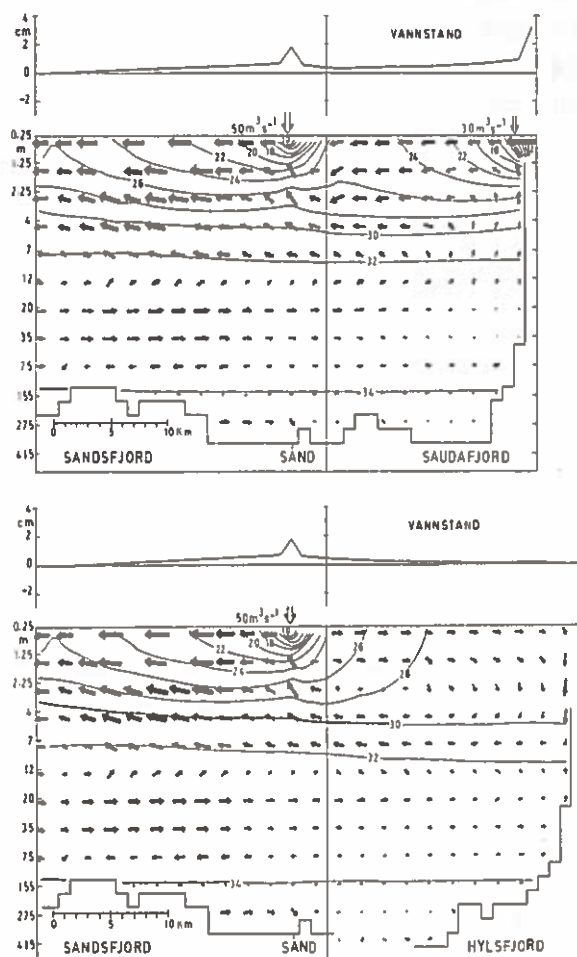


Figur 17. Stasjonært sirkulasjonstrekk og saltholdighetsfordeling uten vinddrag og med følgende ferskvannstilførsler: Hylen 106 m³/s, Sand 20 m³/s og Sauda 25 m³/s.

Som følge av ferskvannstilførselen øker vannstanden jevnt innover til Hylen. Overflatehevingen gir et kraftbidrag (*barotrop* trykkgradient) utover fjorden som resulterer i et utgående strømfelt i overflatelaget (6 m dyp). Saltholdigheten, som minker innover fjorden, gir et kraftbidrag innover (*baroklin* trykkgradient). Dette bidraget dominerer over den barotrope trykkgradienten i et 30 meter tykt lag (10-40 m).

Det er store strømhastigheter i det smale området like innenfor Sandsfjordterskelen. Ytterst i Saudafjorden er det en markert konver-

genssone. Overflatevann fra Hylsfjorden strømmer inn i Saudafjorden og møter overflatevann som strømmer ut denne fjorden. I konvergenssonen som dannes i møteområdet tvinges vannet ned for så å strømme ut igjen i ca 2 m dybde.

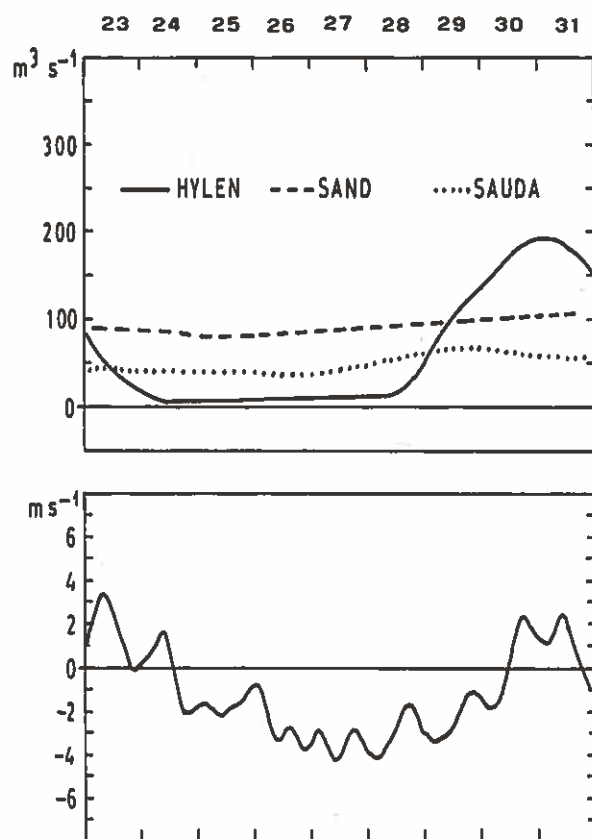


Figur 18. Stasjonært sirkulasjonstrekk og saltholdighetsfordeling uten vinddrag og med følgende ferskvannstilførsler: Sand 50 m³/s og Sauda 30 m³/s.

Det ikke-tidsvarierende feltet for simulering av perioden oktober 1988 (Fig. 18), viser at tilførselen ved Hylen er lik null, ved Sand 50 m³/s og ved Sauda 30 m³/s.

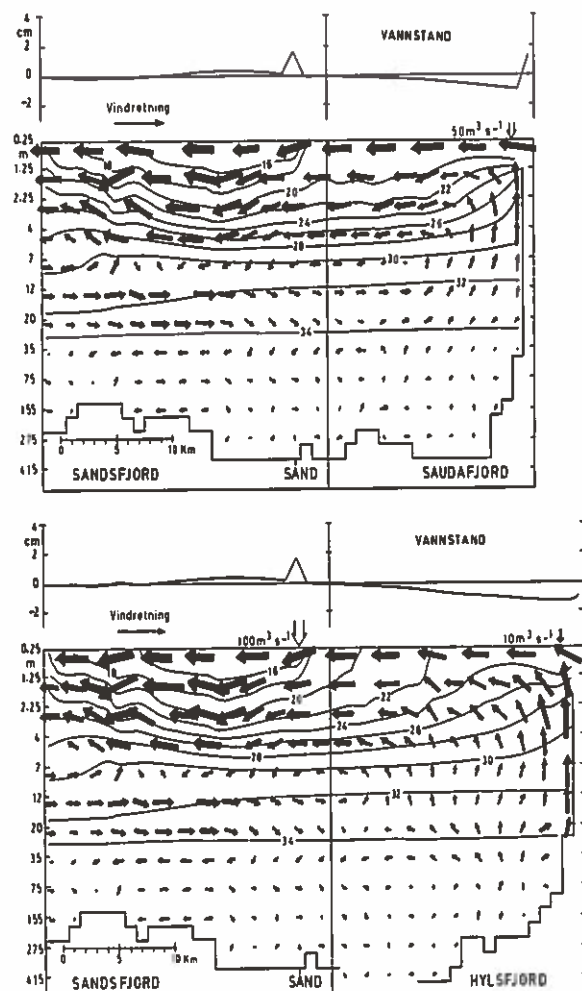
Snittet gjennom Sandsfjorden og Saudafjorden viser den typiske estuarine sirkulasjonen, mens snittet gjennom Hylsfjorden viser et omvendt sirkulasjonsmønster med innstrømming av overflatevann med lav saltholdighet fra både Sandsfjorden og Saudafjorden og utstrømming i et tynt lag under.

I perioden 22.-31. mai 1988 var det betydelige variasjoner i ferskvannstilførselen og vinden i Sandsfjordssystemet (Fig. 19). Denne perioden er derfor valgt for simulering av tidsvarierende sirkulasjonstrekk. Ferskvannstilførslen til Sandsfjordssystemet var forholdsvis konstant i ca 4 døgn; Sand $100 \text{ m}^3/\text{s}$, $50 \text{ m}^3/\text{s}$ i Sauda og $10 \text{ m}^3/\text{s}$ i Hylen (Fig. 19). I det samme tidsrommet hadde vinden retning ut fjorden med en maksimal styrke på 4 ms.



Figur 19. Ferskvannstilførsel fra hovedkildene i Sandsfjordssystemet (øverst) og vindhastighet på stasjon 51 i Hylsfjorden (nederst) i tiden 22. - 31. mai 1988.

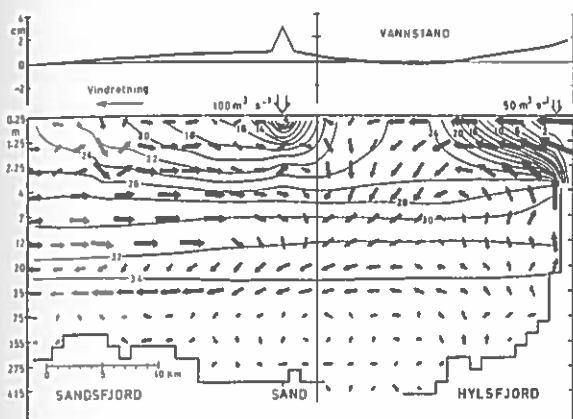
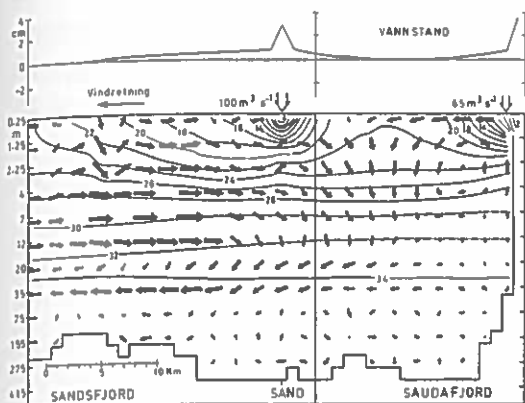
Simuleringene viser at vannstanden som vanligvis øker mot fjordendene, synker i dette tilfellet (Fig. 20) fordi vinden driver overflatevannet ut og "tømmer" fjorden for ferskvann. Til kompensasjon for dette vannet strømmer saltvann opp ved fjordendene.



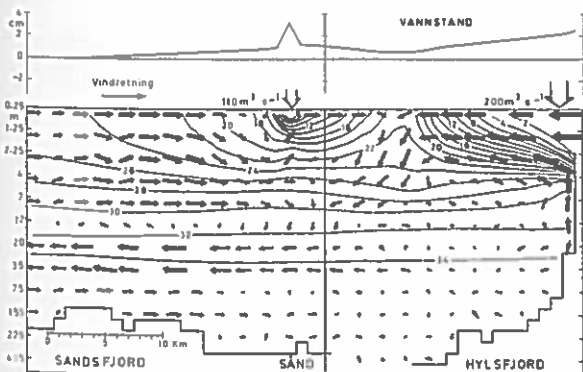
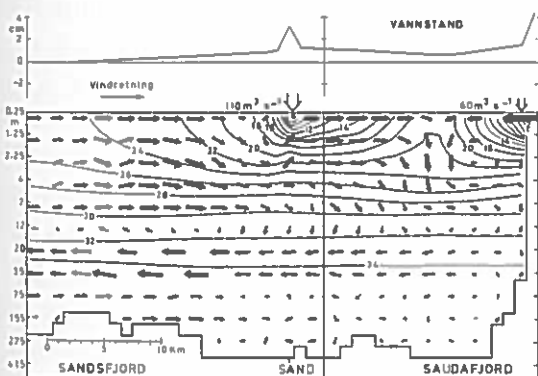
Figur 20. Ikke-stasjonært sirkulasjonstrekk og salt-holdighetsfordeling i Saudafjorden-Sandsfjorden og i Hylsfjorden-Sandsfjorden, 28. mai 1988.

Den typiske innstrømningen i fjordarmene fra Sand finnes heller ikke lenger fordi vindstresset dominerer over effekten av ferskvannstilførselen. Men straks vindstresset blir svakere, slik det skjedde den 30. mai 1988, dominerer den barotrope trykkgradienten igjen. Det betyr at overflatevannet i hele fjordsystemet strømmer innover for å gjenopprette vannstanden (Fig. 21).

Nå dannes det igjen ferskvannskiler ved kildene, og linsestrukturen utvikles. Mens ferskvannstilførselen ved Sand og Sauda holder seg konstant, øker den i Hylen. Vinden, som snur den 31. mai 1988 og blåser inn fjorden hindrer imidlertid en utgående overflatestrøm, og vindstresset snur den estuarine sirkulasjonen (Fig. 22).



Stasjon 21. Ikke-stasjonært sirkulasjonstrekk og salt-holdighetsfordeling i Saudafjorden - Sandsfjorden og i Hylsfjorden - Sandsfjorden, 30. mai 1988.



Stasjon 22. Ikke-stasjonært sirkulasjonstrekk og salt-holdighetsfordeling i Saudafjorden - Sandsfjorden og i Hylsfjorden - Sandsfjorden, 31. mai 1988.

Hylen stues det mye ferskvann opp i fjord-armene. Det dannes dermed en frontzone i midtre Hylsfjorden, hvor ferskvannet fra Hylen og Sand møtes, synker ned og strømmer først inn Saudafjorden og deretter ut Sandsfjord-systemet i ca 30 m dybde.

5.3.4 Strømmens respons på vinden

Dersom vinder vekselvis blåser 6 timer inn og 6 timer ut fjorden (12 timers periode) med en amplitude på 4 m/s, svarer overflatestrømmen ned til 1 m dybde med en hastighet som er ca 7% av vindens hastighet i gjennomsnitt, det vil si 27 cm/s. Tabell 1. viser strømmens amplitude på forskjellige posisjoner og dybder i fjorden. Det fremgår at vindresponsen i ytre Sandsfjorden er langt mindre enn ved de to andre posisjonene.

Tabell 1. Strømhastighet både absolutt og prosentvis i forhold til vinden.

	1 m dyp		2 m dyp		4.5 m dyp	
	cm/s	%	cm/s	%	cm/s	%
Ytre Sandsfjorden	18	4.5	16	4	13	3.3
Ytre Saudafjorden	32	8	29	7.3	19	3.5
Ytre Hylsfjorden	29	7.3	25	6.3	16	4

Vannstandsdifferansen mellom Sand og Hylen skifter med vinden med en amplitude på 1 cm. Tidsforsinkelsen mellom vind og strøm vokser mot fjordmunningen og med økende dyp (Tabell 2.).

Tabell 2. Faseforskyvningen i timer (t) mellom vind og strøm og mellom vind og vannstand.

	Dyp		
	1 m	2 m	4.5 m
Strøm i ytre Sandsfjorden	6.1 t	7.5 t	9.5 t
Strøm i ytre Saudafjorden	3.1 t	3.6 t	4.5 t
Strøm i ytre Hylsfjorden	2.8 t	3.4 t	4.4 t
Strøm i indre Hylsfjorden	0.9 t	1.1 t	5.5 t
Vannstand i Hylen		6.2 t	

Den store tidsforsinkelsen i 4.5 m dybde i ytre Sandsfjorden skiller seg fra de øvrige resultatene (se drøfting i kap. 5.4).

Endringer i vannstanden har en forholdsvis stor tidsforskyvning i forhold til endringer i vinden. Dette skyldes at den ikke er direkte påvirket av vinden, men indirekte gjennom forflytning av vannmassene.

5.4 Diskusjon av fysisk oseanografi

5.4.1 Det øvre lag

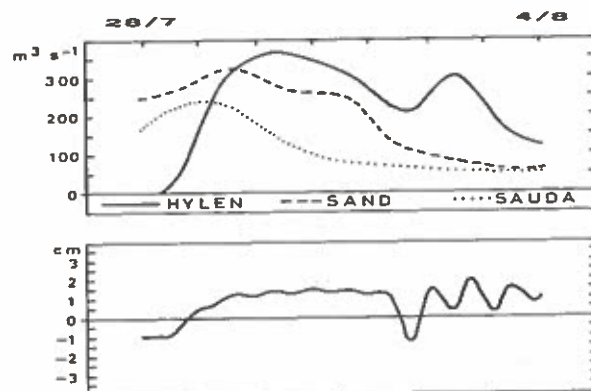
Sirkulasjon og blandingsprosesser i det øvre lag er i hovedsak styrt av samspillet mellom de ytre kreftene; ferskvannstilførselen, vinddrag og tidevann. I største delen av Sandsfjordsystemet kan strømkomponenten knyttet til ferskvannstilførselen dominere i de periodene kraftstasjonen kjøres. Dette er demonstrert i Fig. 12 som viser sterk sirøm ut fjorden i overflatelaget i en periode med stor ferskvannstilførsel, vind inn fjorden og vind mot nord på kysten (vindoppstuvning).

Dominans av ferskvannsdrevne strømmer skiller Sandsfjordsystemet fra de fleste andre norske fjorder, der det med unntak av nærsoneene til ferskvannskildene er den vinddrevne strømkomponenten som for en stor del styrer den midlere sirkulasjonen.

I Sandsfjordsystemet avtar effekten av vinddraget sterkt når stabiliteten øker på grunn av det ferske overflatelaget. Den store tidsforsinkelsen (9.5 timer) mellom strøm i 4,5 m dyp og vind i ytre Sandsfjorden i forhold til tidsforsinkelsen i resten av fjordsystemet skyldes det sterkt markerte grenselaget over denne dybden i munningsområdet. Resultatene fra en feltundersøkelse og modellstudie i Jøsenfjorden (Svendsen & Thompson 1978) viste samme tendens. I ytre del av Jøsenfjorden var de observerte og beregnede tidsforsinkelser henholdsvis 3 og 6 ganger høyere enn verdier i indre del av fjorden.

Det midlere sirkulasjonsmønsteret som er knyttet til ferskvannstilførselen bestemmes i

hovedsak av de to store kildene ved Sand og Hylen. I nærsonen til disse kildene bygges det opp et høyere overflatenivå enn i resten av fjordsystemet. Fig. 23 viser et eksempel på nivåforskjeller i vannstand som oppstår som følge av stor avrenning i Hylen.



Figur 23. Ferskvannsavrenning i Hylen (øverst) og nivåforskjell i vannstand mellom Hylen og Sand.

Trykkgradienten som dermed oppstår driver en forholdsvis grunn overflatestrøm ut Hylsfjorden samt ut og inn Sandsfjorden fra området utenfor Sand. Også i Saudafjorden er det en strømkomponent i tilknytning til avrenning fra kraftstasjonen Sauda III.

I områdene der de ferskvannsdrevne strømmene møtes, dannes konvergenssoner hvor det lette overflatevannet presses ned og blandes med tyngre vannmasser. Blandingsproduktet strømmer ut fra området som kompensasjonsstrømmer for overflatestrømmene. Det dannes dermed halvlukkede celler, linser, som vist i de hydrografiske lengdesnittene (Fig. 8) og i modellsimuleringene (Fig. 17, 18 og 20-22). Posisjonene til sonene bestemmes av tilførselen fra den enkelte kilde, vindforholdene og tidevannet.

Når Hylen kraftstasjon stanses, blir konvergenssonene i Hylsfjorden gradvis mindre markerte og forsvinner til slutt helt. Brakkvannet som dannes i nærsonen til munningen av Suldalslågen kan i slike perioder trenge inn til de innerste deler av Hylsfjorden hvis ikke strømkomponenter knyttet til andre krefter,

vind og tidevann hindrer dette (Fig. 12). Vann strømmer inn fjorden i overflatelaget både før og etter at Hylen kraftstasjon ble kjørt.

Denne "reverserte" estuarine sirkulasjon kan opptre i en forsterket form når det slippes ut mye ferskvann i Hylen og det på forhånd er et lett overflatelag i Hylsfjorden-Sandsfjorden. En slik situasjon inntraff i månedskiftet juli-august i 1989 (Fig. 14). Kraftverket i Hylen var ikke i drift i juli, mens det etter oppstartingen den 29. juli ble tilført ca 350 m³/s i mer enn 2 døgn (Fig. 23). Av dette kom 130 m³/s fra det ordinære utløpet fra kraftstasjonen, og det øvrige gjennom overløpstunnelen plassert over vannivået.

En del av den turbulente energien som går med til blandingsprosessene i det indre fjordområdet tilføres av jetstrømmen som trenger inn i det øvre lag fra utløpet til kraftstasjonen. Tverrsnittet av jetstrømmen er 32 m². Med en volumtransport lik 130 m³/s (avløp fra ett aggregat) blir hastigheten ca 4 m/s. Ellison & Turner (1959) konkluderte at blanding finner sted i en to-lags kanalstrøm når det densimetriske Froudetallet (Fr_d) er > 0.9 i fravær av andre turbulensilder. En vanlig antagelse er at turbulens dannes når Fr_d (to-lag) er større enn 2.

$$Fr_d = \frac{U}{(g(\Delta\rho/\rho)H)}$$

hvor ρ = tetthet i det øvre lag, $\Delta\rho$ = tetthets-sprang gjennom pyknoklinen og U er hastighet av strømmen med dybde H .

I næsonen til utløpet fra kraftstasjonen var det en klar to-lags struktur med en redusert tyngdeakselerasjon ($g(\Delta\rho/\rho)$) varierende mellom 0.1-0.2 m/s². Basert på informasjonen ovenfor ($U = 4$ m/s, $H = 4$ m) gir dette et Fr_d mellom 4.5 og 6 noe som indikerer sterk turbulensdannelse. Sammen med virvelstrukturen i selve flommen og blandingsprosesser knyttet til overløpsvann som styrter rett ned i fjorden, førte dette til at store mengder fjordvann ble blandet inn i ferskvannet. Dette tyngre blandingsvannet strømmet ut Hylsfjorden under et

lettere overflatelag med vann som trolig i vesentlig grad er dannet i næsonen til Suldalslågen.

I Saudafjorden, der det også var stor ferskvannstilførsel men hvor blandingsprosessene var mindre omfattende i det brede elveutløpet enn utenfor kraftstasjonen i Hylen, gikk det i slutten av juli en utgående overflatestrøm som etterhvert ble redusert, og den 3. august gikk strømmen inn fjorden. De store brakkvannsmengdene som opptrer i området hvor fjordarmene møtes danner et trykkfelt med retning inn Saudafjorden. Trykkgradienten overviner kreftene som driver vannmassene i det øvre lag ut av Saudafjorden og snur strømmen innover. Årsaken til at overflatevannet trenger inn i Saudafjorden er følgende:

- a) Ferskvannstilførselen er liten i Sauda i forhold til den samlede ferskvannstilførselen ved Sand og Hylen, og
- b) Saudafjorden har en bred bukt innerst, slik at vannstanden forårsaket av kilden aldri vil kunne bli så høy som den kan bli i den trange indre del av Hylsfjorden.

Når kraftverket kjøres vil stabiliteten i overflatelaget ofte avta som følge av at blandingsproduktet som strømmer ut fjorden har lavere temperatur og høyere saltholdighet enn det vannet som var i fjorden før start av kraftverket.

5.4.2 Mellomlag og bassengvann

Det er lokale drivkrefter som styrer prosessene i øvre lag, mens de hydrofysiske prosessene i mellomlaget er sterkt preget av samspillet med de tilstøtende vannmassene utenfor fjordsystemet (Svendsen 1981). Dette ble også tydelig demonstrert i datamaterialet fra etterundersøkelsene. I 25 m dyp (øvre del av mellomlaget) var det f.eks overveiende innstrømning i perioder med fremherskende sørlig vind langs kysten og utstrømning ved motsatt vindretning. De store variasjonene i styrke og retning av drivkreftene førte til et sterkt varierende sirkulasjonsmønster i hele vannsøylen over terskelnivået. Samspillet mellom drivkreftene lokalt i fjorden og på kysten bestemmer sirkulasjons-

mønsteret. Grovt sett kan en si at når vind ut fjordene og/eller stor ferskvannsavrenning faller sammen med fremherskende nordlige vinder på kysten blir sirkulasjonsmønsteret i fjorden karakterisert av en to-lag struktur, utstrømming i de øvre 25-30 m og innstrømming under. Det motsatte sirkulasjonsmønsteret opptrer vanligvis når det er liten ferskvannsavrenning, vind inn fjordene og samtidig fremherskende sørlig vind på kysten. Imidlertid var det i lange perioder en karakteristisk fler-lags struktur som skyldes at kreftene i fjorden og på kysten ikke "arbeider sammen", men driver vannmasser mot hverandre og sannsynligvis danner konvergenssoner i det ytre fjordområdet.

I Hylsfjorden og Saudafjorden er forholdene noe mer kompliserte enn i ytre deler av Sandsfjorden, og i disse fjordene var det vanligvis en fler-lag struktur i strømbildet. Sirkulasjonen i mellomlaget var her mer uavhengig av sirkulasjonen i det øvre lag enn tilfellet var i ytre del av Sandsfjordsystemet der overflatelaget var dypere på grunn av medrivning og turbulente blandingsprosesser og tidvis gikk i ett med øvre del av mellomlaget. Strømmene under terskelnivået var vanligvis betydelig svakere enn i vannmassene over (Fig. 15), med unntak av perioder når vannutskifting under terskelnivå fant sted, vesentlig om våren og forsommeren. I de dypere deler av bassenget er strømhastighetene sjelden over 5 cm/s.

5.4.3 Oppholdstid

Korteste oppholdstid for vann i Hylsfjordens overflatelag (2-3 m) opptrer vanligvis i forbindelse med kjøring av kraftverket i Hylen. En periode representativ for en slik situasjon er 25.-27. oktober 1988. Dersom vi antar at overflatestrømmen i middel over fjordbredden hadde en hastighet på 35 cm/s i indre halvdel av Hylsfjorden og 20 cm/s i ytre halvdel, blir oppholdstiden ca 20 timer. Ved blandingsprosesser vil noe av dette vannet bli transportert nedover og følge med kompensasjonstrømmen inn fjorden igjen. Denne resirkuleringen kan ha et betydelig omfang og medføre at oppholdstiden for en del av vannmassen i det øvre

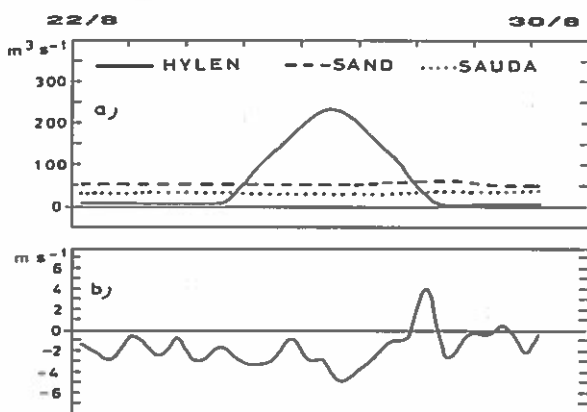
lag, spesielt den som er nærmest strømskjæret, kan være flere døgn. Samme type resirkulering finner ventelig sted i overgangen mellom det øvre lag og mellomlaget, og kan være forklaringen på et karakteristisk temperaturmaksimum som opprettholdes i første halvdel av vinterhalvåret i mange fjorder. Utvikling av celler med resirkulering innenfor hver celle vil ytterligere forlenge oppholdstiden for deler av vannmassen i det øvre lag.

Virveldannelser er en annen faktor som kan forlenge oppholdstiden. I fjorder med store breddevariasjoner (nes og bukter) og retningsendringer er virvler et hyppig fenomen (Buckley & Pond, 1976, Røed et al. 1989). I Sandsfjordsystemet er det spesielt der de tre fjordarmene møtes at virvler opptrer.

I det smale området ved Nævøy tyder strømkorsforsøk fra forundersøkelsen på at strømmålingene midtfjords er tilnærmet representative for tverrsnittet. Et overslag over oppholdstiden til vannmassen i mellomlaget kan gjøres når en antar følgende: dybdeintervallet hvor innstrømming finner sted er 30 m (15-45 m), dybdeintervallet hvor utstrømming finner sted er 80 m (45-125 m), volum av fjord-systemet i det øvre intervallet er ca 2.7 km³ og i det nedre er 7.2 km³, hastigheten til det innstrømmende vannet er 0.2 m/s og til det utstrømmende 0.08 m/s. Dette gir en oppholdstid av mellomlaget på ca 12 døgn. Sannsynligvis er utskiftningsraten i perioder betydelig mindre. I dette eksempelet er det antatt at hele volumet i dybdeintervallene deltar i utvekslingen. Dette er lite sannsynlig. Hvis bare en del av fjordsystemet, f.eks. Sandsfjorden, deltar direkte i utvekslingsprosessen vil oppholdstiden i Hylsfjorden og Saudafjorden kunne bli betydelig lengre. Videre er det ikke tatt hensyn til turbulente blandingsprosesser, og disse kan som nevnt foran forlenge oppholdstiden, spesielt i skjærsone.

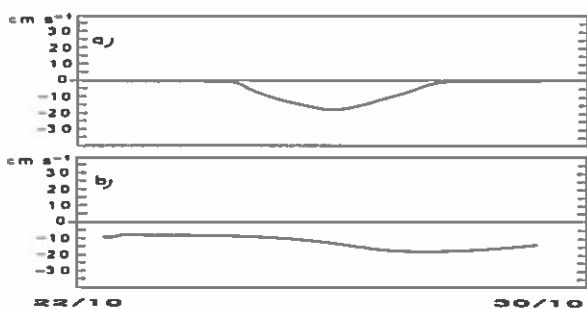
Beregninger av vannets oppholdstid i fjorden ved modellsimuleringer er utført for perioden 22.-30. oktober 1988. I denne perioden var ferskvannstilføreselen i Sauda og Sand nesten konstant. I Hylen var det ingen ferskvanns-

tilførsel i begynnelsen og slutten av perioden, mens det ble tilført betydelige mengder ($230 \text{ m}^3/\text{s}$) i midten av perioden (Fig. 24).

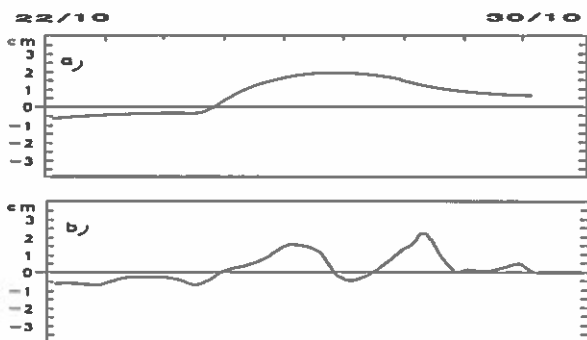


Figur 24. Ferskvannstilførsel fra tre kilder i Sandsfjordsystemet (a) og vindhastighet på stasjon 51 i Hylsfjorden (b).

Strømmen i indre del av Hylsfjorden reagerer spontant på variasjoner i ferskvannstilførselen (Fig. 25). I følge modellen når strømpulsen Nævøy etter ca 1.5 døgn. Etter ca 2 døgn, som tilsvarer oppholdstiden for overflatelaget, når den munningen av fjorden.



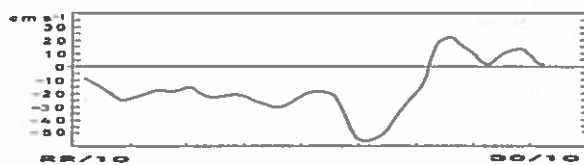
Figur 25. Strømhastighet i 2 m dyp på stasjon 51 i Hylsfjorden (a) og på stasjon 58B i Saudafjorden.



Figur 26. Vannstandsforskjell mellom Hyleen og Sand uten vind (a) og med vind (b).

Vannstanden i Hyleen, som i begynnelsen er lavere enn ved Sand, stiger med økende ferskvannstilførsel, men faller ikke i takt med avtagende tilførsel (Fig. 26), noe som skyldes treghet i sirkulasjonssystemet.

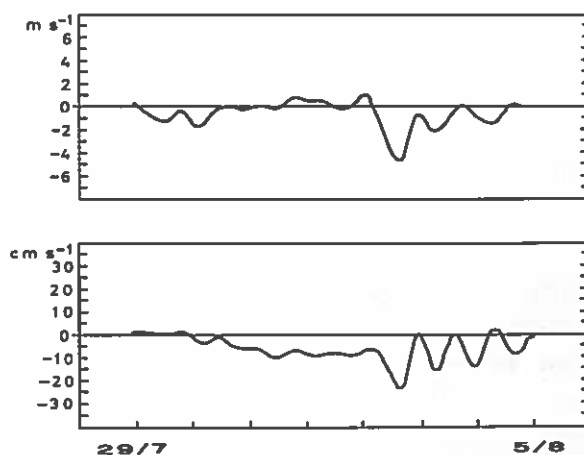
Hvis det i den samme simuleringsperioden legges et vindfelt på fjorden (vinden målt på stn. S i Saudafjorden) (Fig. 24), blir overflate-sirkulasjonen markert forandret (Fig. 27).



Figur 27. Strømhastighet i 2 m dyp på stasjon 58B i Saudafjorden.

Vindens virkning ser man også tydelig i vannstandsutviklingen. Vannstanden stiger ikke lenger i takt med tilførselen av ferskvann (Fig. 26), men får en markert reduksjon på grunn av vindstresset som har retning ut fjorden, (Fig. 24). Vinden blåser ut fjorden mens kraftverket kjøres. Vannet når derfor hurtigere frem til Nævøy, og oppholdstiden forkortes til ca 1 døgn, (Fig. 27).

I månedsskiftet juli/august 1989 var situasjonen omvendt. Det var svak vind inn fjorden i noen døgn, (Fig. 28), og brakkevannet ble holdt litt tilbake. Først idet vinden gir en kraftig impuls ut fjorden etter ca 4 døgn frigjøres brakkevannet, og etter ca 2 døgn har disse vannmassene forlatt Sandsfjordsystemet.



Figur 28. Vindhastighet på stasjon 51 (øverst) og strømhastighet på stasjon 55 i Hylsfjorden (nederst).

5.4.4 Modellresultater

Den to-dimensjonale versjonen av modellen simulerer tilfredsstillende det observerte sirkulasjonsmønsteret og vertikalfordeling av saltholdighet og temperatur. Simuleringene uten vinddrag viser at overflatelaget reagerer raskt på endringer i ferskvannstilførselen fra hovedkildene.

Kildene i Sand og Sauda har ikke fått vesentlige endringer i det sesongmessige avrenningsmønsteret. Når det bare er avrenning fra disse to kildene er strømrretningen hovedsakelig inn Hylsfjorden og ut Saudafjorden. Simuleringer med det endrede avrenningsmønsteret fra Suldalslågen viser variasjoner i de hydrofysiske forhold i overflatelaget som ligger innenfor de naturlige variasjonene før reguleringene.

Simuleringer med avrenning fra også den tredje hovedkilden, Hylen, endrer sirkulasjonsmønsteret og stabiliteten i overflatelaget i Hylsfjorden totalt. Bare få timer etter at kraftverket er startet har overflatestrømmen snudd ut fjorden. Der strømmene fra nærsone til ferskvannskildene møtes dannes konvergensoner.

Simuleringene viste ikke den reverserte overflatestrømmen som ble registrert i forbindelse med den store avrenningen som fant sted i månedsskiftet juli/august 1989.

Er avrenningen fra kraftverket stor kan også Saudafjorden bli berørt med den følge at overflatevann strømmer inn fjorden og konvergerer mot overflatevann som strømmer ut Saudafjorden.

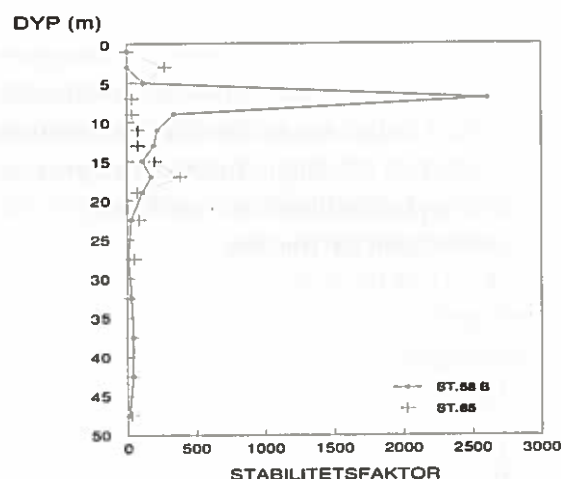
Simuleringer av oppholdstiden for brakkvannet i fjordsystemet viser at den er avhengig både av ferskvannstilførselen og vindforholdene. Oppholdstiden ligger mellom en og fire dager. Generelt viser simuleringene at oppholdstiden avtar med økende avrenning fra Hylen.

6. RESULTATER: MARINBIOLOGI

6.1 Planteplankton

6.1.1 Vårsituasjonen 1988

Toktet fra 20. februar til 2. mars 1988 falt sammen med planteplanktonets våroppblomstring inne i Sandsfjordsystemet. På denne tiden var brakkvannslagetets tykkelse ca 4 m, temperaturen var 4-6 °C og saltholdigheten ca 19. Allerede på 6 m dyp var saltholdigheten økt til ca 30. En slik lagdeling gir høy stabilitet for brakkvannslaget (Fig. 29).



Figur 29. Stabilitet i Sandsfjordsystemet (stasjon 58B) og i Jøsenfjorden (stasjon 85).

Utenfor Sandsfjordområdet og i Jøsenfjorden, der stabiliteten i øvre lag var klart lavere enn innenfor (Fig. 29), var det ingen tegn til våroppblomstring. Denne forskjellen mellom de to fjordområdene kan knyttes til forskjellen i stabilitet. Vannmassene i Jøsenfjorden ble blandet så dypt at algene ikke fikk tilstrekkelig lys til oppblomstring, mens omrøringen i Sandsfjordsystemet ble begrenset til de øverste, lysrike metrene.

Næringssalter

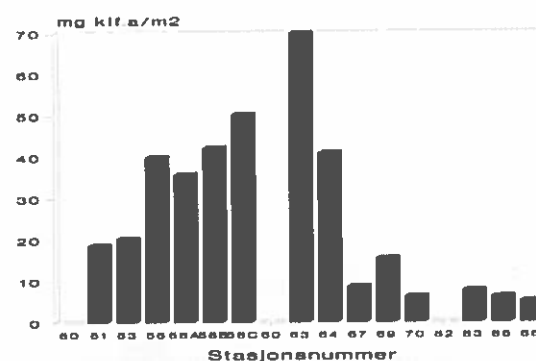
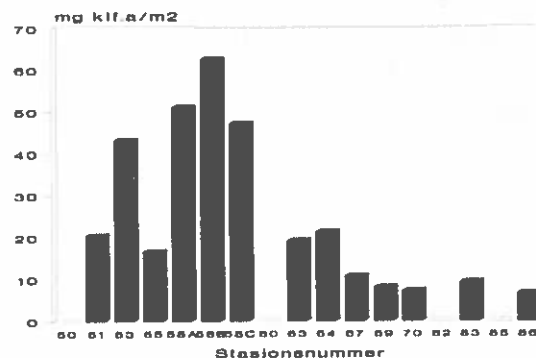
Det var høye konsentrasjoner av både silikat og nitrat (7-11 μM) med de høyeste verdiene utenfor Sandsfjorden 21.-22. februar. Fosfatverdiene i brakkevannslaget inne i fjordsystemet var derimot forholdsvis lave (0,1-0,2 μM), noe som skyldes lavt fosfatinnhold i innblandet ferskvann. I Nedstrandsfjorden og Jøsenfjorden var fosfatverdiene relativt høye i de øvre metrene (0,5-0,8 μM).

Som et resultat av næringsforbruk under våroppblomstringen var nitrat- og silikatkonsentrasjonen i Sandsfjordsystemet betydelig redusert 5 dager senere. Silikatreduksjonen kom som en følge av at våroppblomstringen var dominert av diatomeer som benytter silikat til skalldannelsen. I oppblomstringens sentrum hadde begge næringssaltene blitt forbrukt slik at konsentrasjonene her lå rundt 1 μM . Noen dager senere ble det igjen påvist høyere næringsverdier. I forbindelse med våroppblomstringen er det et samspill mellom forbruk fra algevekst og tilførsel av stadig nye næringsstoffer fra ferskvann (som inneholder store mengder nitrat og silikat) og fra underliggende vannmasser. Utenfor fjordsystemet var det ingen store endringer i næringssaltkonsentrasjonene i løpet av toktperioden.

Algemengde

Ved målingene 21. februar ble de største algemengdene (ca 45-60 mg klf.a/ m^2) funnet i Saudafjorden (Fig. 30). Maksimumsverdiene (ca 10-13 mg klf.a/ m^3) ble funnet i dybdesjiktet 4-6 m, dvs. i underkant av det øvre brakkevannslaget, og ca 75% fantes i de øvre 6 m.

I løpet av påfølgende uke beveget biomasse-toppen seg fra Saudafjorden og ut i Sandsfjorden, samtidig som den integrerte algemengden fra 0-20 m økte noe (Fig. 30). Denne forflytningen kan tilskrives utoverstrømmende vann fra Saudafjorden.



Figur 30. Algebiomasse (mg klorofyll-a/ m^2) i Ryfylkefjordene 21. - 22. februar 1988 (øverst) og 28. - 29. februar 1988 (nederst).

Artssammensetning

Oppblomstringen var dominert av diatoméen *Skeletonema costatum* med nesten 20 millioner celler pr. liter i Saudafjorden. Også andre diatomeer som *Chaetoceros wighamii*, *Nitzschia "delicatissima"*, *Thalassionema nitzschioides* og ulike *Thalassiosira*-arter var tilstede. Dessuten ble flagellatene *Phaeocystis pouchetii*, *Chrysochromulina* spp., ulike cryptophyceer og dinoflagellater observert, men ingen av disse forekom i stort antall. Innerst i Hylsfjorden (Stn. 51) ble det funnet forholdsvis mye ceratier i håvtrekk. Totalt sett var det et artsrikt plankton.

Lysforhold

Den totale lysinnstrålingen en skyfri dag i månedsskiftet februar/mars var ca 8 E/ m^2 som tilsvarer ca 1/6 av totalt lys en tilsvarende

Næringssalter

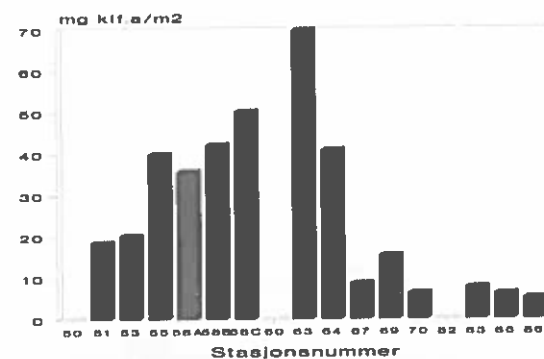
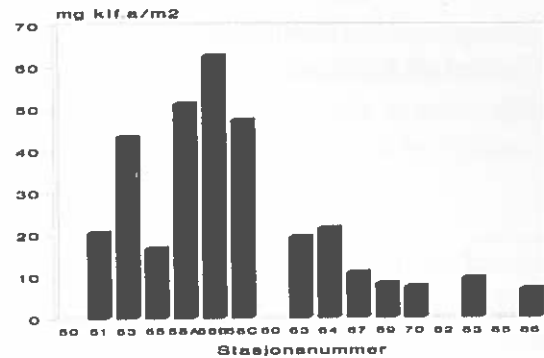
Det var høye konsentrasjoner av både silikat og nitrat (7-11 μM) med de høyeste verdiene utenfor Sandsfjorden 21.-22. februar. Fosfatverdiene i brakkevannslaget inne i fjordsystemet var derimot forholdsvis lave (0,1-0,2 μM), noe som skyldes lavt fosfatinnhold i innblandet ferskvann. I Nedstrandsfjorden og Jøsenfjorden var fosfatverdiene relativt høye i de øvre metrene (0,5-0,8 μM).

Som et resultat av næringsforbruk under vår-oppblomstringen var nitrat- og silikatkonsentrasjonen i Sandsfjordsystemet betydelig redusert 5 dager senere. Silikatreduksjonen kom som en følge av at vår-oppblomstringen var dominert av diatomeer som benytter silikat til skalldannelsen. I oppblomstringens sentrum hadde begge næringssaltene blitt forbrukt slik at konsentrasjonene her lå rundt 1 μM . Noen dager senere ble det igjen påvist høyere næringsverdier. I forbindelse med vår-oppblomstringen er det et samspill mellom forbruk fra algevekst og tilførsel av stadig nye næringsstoffer fra ferskvann (som inneholder store mengder nitrat og silikat) og fra underliggende vannmasser. Utenfor fjordsystemet var det ingen store endringer i næringssaltkonsentrasjonene i løpet av toktperioden.

Algemengde

Ved målingene 21. februar ble de største algemengdene (ca 45-60 mg klf.a/ m^2) funnet i Saudafjorden (Fig. 30). Maksimumsverdiene (ca 10-13 mg klf.a/ m^3) ble funnet i dybdesjiktet 4-6 m, dvs. i underkant av det øvre brakkevannslaget, og ca 75% fantes i de øvre 6 m.

I løpet av påfølgende uke beveget biomasse-toppen seg fra Saudafjorden og ut i Sandsfjorden, samtidig som den integrerte algemengden fra 0-20 m økte noe (Fig. 30). Denne forflytningen kan tilskrives utoverstrømmende vann fra Saudafjorden.



Figur 30. Algebiomasse (mg klorofyll-a/ m^2) i Ryfylkefjordene 21. - 22. februar 1988 (øverst) og 28. - 29. februar 1988 (nederst).

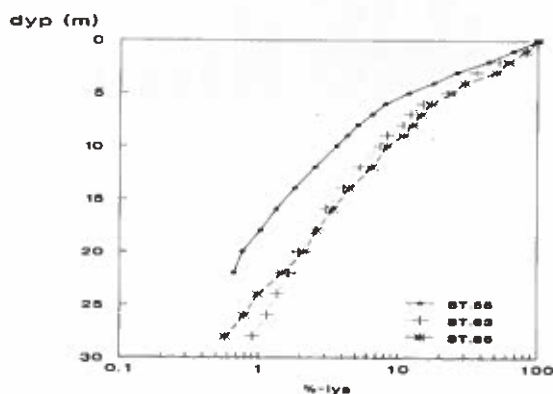
Artssammensetning

Oppblomstringen var dominert av diatoméen *Skeletonema costatum* med nesten 20 millioner celler pr. liter i Saudafjorden. Også andre diatomeer som *Chaetoceros wighamii*, *Nitzschia "delicatissima"*, *Thalassionema nitzschioides* og ulike *Thalassiosira*-arter var tilstede. Dessuten ble flagellatene *Phaeocystis pouchetii*, *Chrysochromulina* spp., ulike cryptophyceer og dinoflagellater observert, men ingen av disse forekom i stort antall. Innerst i Hylsfjorden (Stn. 51) ble det funnet forholdsvis mye ceratier i håvtrekk. Totalt sett var det et artsrikt plankton.

Lysforhold

Den totale lysinnstrålingen en skyfri dag i månedsskiftet februar/mars var ca 8 E/m^2 som tilsvarer ca 1/6 av totalt lys en tilsvarende

dag i juli. Fig. 31 viser lysabsorpsjonen i ytre del av Hylsfjorden (Stn. 55), i Sandsfjorden (Stn. 63) og i Jøsenfjorden (Stn. 85). Kompensasjonsdypet (1% lysdyp) ble på disse stasjonene funnet på henholdsvis 18.2, 27.2 og 24.0 m dyp.

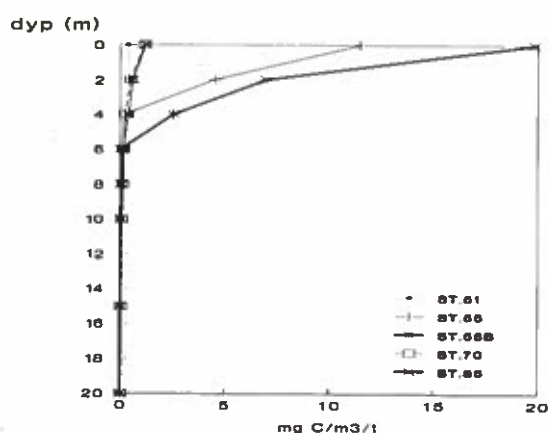


Figur 31. Lysreduksjon nedover i dypet (% av overflatelys) målt i februar 1988.

Ekstinksjonskoeffisientene viser at lyssvekingen var størst i de øvre 6 m. Det var spesielt stor lyssveking i brakkvannslaget på stasjoner med stor algemengde.

Planteproduksjon

Lysmengden i overflaten er satt til $100 \mu\text{E}/\text{m}^2\text{s}$ under beregning av planteproduksjonen. Dette tilsvarer omtrent lyset målt like under overflaten en dag med sol tidlig på våren i Ryfylke.



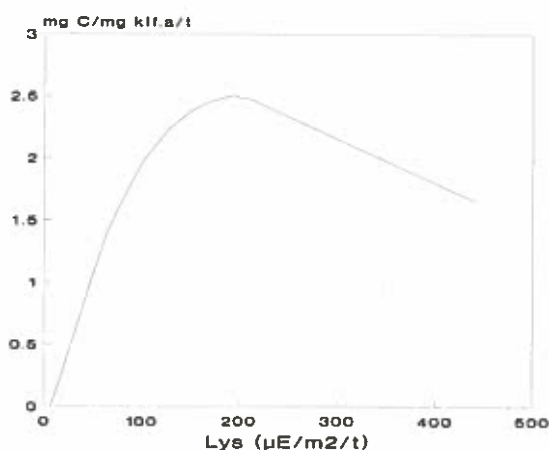
Figur 32. Vertikalfordeling av planteproduksjon i Ryfylkefjordene, februar 1988

Planteproduksjonen var størst i Saudafjorden (Stn. 58 B) og ytterst i Hylsfjorden (Stn. 55), med maksimal produksjon i overflaten (henholdsvis 19.9 og 11.5 $\text{mg C}/\text{m}^3/\text{t}$) (Fig. 32). På dette tidspunktet var produksjonen også kommet godt i gang i Sandsfjorden, men produksjonsmålingene herfra gikk tapt. Innerst i Hylsfjorden (Stn. 51) og utenfor fjordsystemet var produksjonen lav.

Produksjonskapasitet og produksjonseffektivitet

Maksimal produksjon ved ubegrenset lys-tilgang i laboratoriet (produksjonskapasiteten) ble målt i prøver tatt i 0, 4, 6 og 20 m dyp. Høyeste verdier for potensiell produksjon ble funnet for fytoplankton fra overflatesjiktet i Jelsafjorden, hvor våroppblomstringen imidlertid ikke var kommet i gang. Generelt avtok den maksimale produksjonskapasiteten mot dypet.

Kurvener for produksjonen ved ulike lysmengder viser at planktonsamfunnene både i og utenfor Sandsfjordsystemet generelt var lysbegrensede selv like under overflaten (Fig. 33). Det vil si at algenes maksimale produksjonskapasitet på denne årstiden ikke ble utnyttet på grunn av for lite lys.



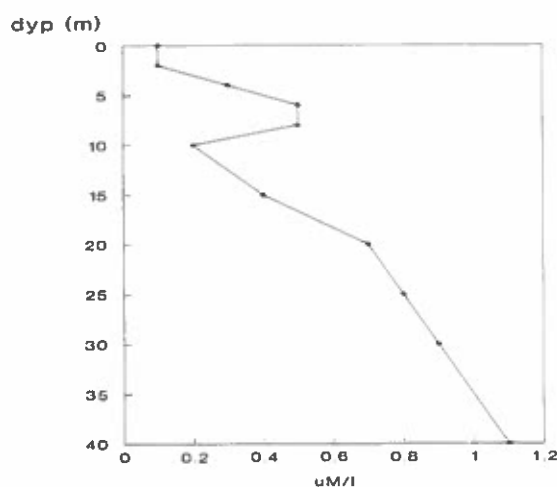
Figur 33. Eksempel på planteproduksjon ved ulike lysintensiteter målt i inkubator på naturlige planteplanktonprøver i februar 1988

6.1.2 Tidlig sommersituasjon 1988 og 1989

Stabiliteten i de øvre meterne av vannsøylen var høy på denne tiden av året både inne i Sandsfjordområdet og i Jelsafjorden. I april/mai gjaldt det samme for Jøsenfjorden, men her var stabiliteten noe redusert i juni slik at de øvre 6-7 meterne utgjorde en gjennomblandet vannmasse.

Næringssalter

I det øvre brakkvannslaget i Sandsfjord-systemet skjer det en stadig fornying av nitrat og silikat med ferskvannstilførselen. Konsentrasjonen av disse næringssaltene var derfor relativt høy i brakkvannslaget. Fosfatverdiene var derimot gjennomgående lave ($0.05\text{--}0.2\ \mu\text{M}$), bortsett fra indre deler av Hylsfjorden der innblanding av næringsrikt vann ved kraftverksutløpet resulterte i en "lomme" av fosfatrikt brakkvann (Fig. 34).



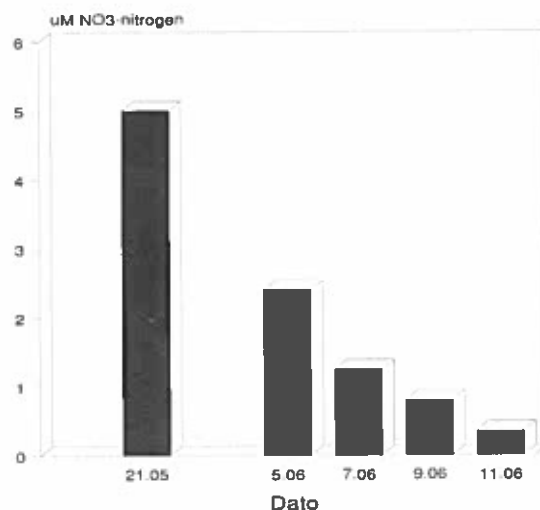
Figur 34. Fosfatkonsentrasjonen innerst i Hylsfjorden (Stasjon 50) i april/mai 1989.

I april/mai 1989 ble det målt fosfatkonsentrasjoner opp i $0.5\ \mu\text{M}$ nær kraftverket, mens konsentrasjonen lenger ute i Hylsfjorden (Stn. 53) nådde maksimalverdier på $0.3\ \mu\text{M}$. Det ble ikke registrert forhøyete fosfatkonsentrasjoner ved utløpet av Hylsfjorden. Fosforinnblanding ved kraftverksutslippet tilsvarte på denne

tiden en døgnlig tilførsel på $100\ \text{kg PO}_4$ ved maksimale ferskvannsutslipp.

Like under det øvre brakkvannslaget førte algevekst til at vannmassene ble tømt for næringssalter i løpet av mai slik at dette vannet tidlig i juni var preget av meget lave nitrat- og silikatverdier.

Nitrat- og silikattilførselen fra Hylen kan være av avgjørende betydning for næringsbudsjettet i Hylsfjorden. Dette ble klart demonstrert i juni 1988, da næringsmengden i Hylsfjordens brakkvannslag avtok raskt etter stans av kraftverket (Fig. 35).



Figur 35. Reduksjon i nitratkonsentrasjoner i Hylsfjordens brakkvannslag ved stopp av kraftverket 1. juni 1988.

Brakkvannet som strømmer ut fra Sandsfjorden preger til tider de øverste 2-3 metrene i den utenforliggende Jelsafjorden. Dette ga seg utslag i forholdsvis høye nitrat- og silikatverdier for overflatevannet i juni 1988.

Jøsenfjorden var preget av avtagende nærings-saltkonsentrasjoner fra mai til juni. Forbruket av næringssalter kunne sees i hele den eufotiske sonen (området for netto algevekst), og i juni 1988 resulterte dette i nitratverdier under deteksjonsgrensen fra 0-15 m dyp.

Artssammensetning

Fra slutten av april til begynnelsen av juni ble det registrert en endring i artssammensetningen i Sandsfjordsystemet. I april/mai 1989 fantes det ennå rester av en *Skeletonema costatum*-oppblomstring med 6.8 millioner celler pr. liter i ytre Hylsfjorden. Cellene var nå imidlertid tildels i dårlig forfatning. I indre Hylsfjorden var det derimot lite *S. costatum* og håvtrekkene var dominert av ceratier (spesielt *Ceratium furca*). *Chaetoceros wighamii* dominerte i Sandsfjorden. I håvtrekkene fra Jelsafjorden ble det funnet *S. costatum* i forholdsvis god forfatning. I Jøsenfjorden var det på dette tidspunktet svært lite diatomeer, og flagellatene var de helt dominerende med cryptophyceer som den viktigste algeklassen.

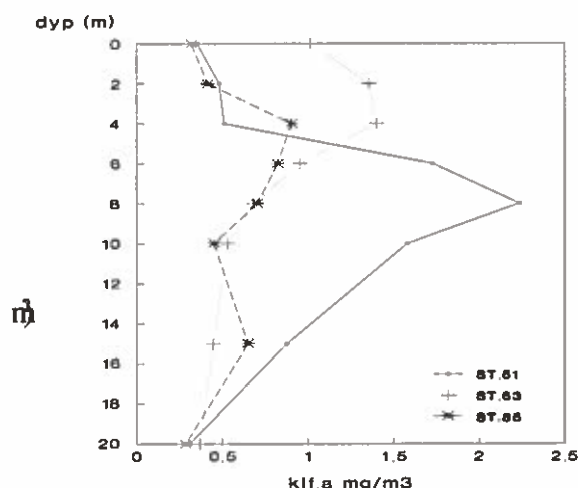
I mai og juni 1988 dominerte *C. wighamii* i håvtrekkene fra hele Sandsfjordssystemet. Celletellinger fra vannprøver ga i juni rundt 10 millioner celler pr liter både i ytre Hylsfjorden og i Saudafjorden. I Jelsafjorden dominerte *C. wighamii* i håvtrekkene fra mai, men celledetellinger viste ikke mer enn 2900 celler pr liter på 6 m dyp. I juni var det svært lite diatomeer i håvtrekkene både fra Jelsa- og Jøsenfjorden.

Ceratier ble funnet i alle de tre fjordområdene, og i Jelsafjorden og Jøsenfjorden dominerte *C. tripos* i begynnelsen av juni. Også *Dinophysis*-artene var nå et vanlig innslag i håvtrekkene fra Jelsafjorden og Sandsfjordsystemet. *Ebria tripartita* ble funnet inne i Sandsfjordsystemet og økte i forekomst fra mai til juni.

Algemengde

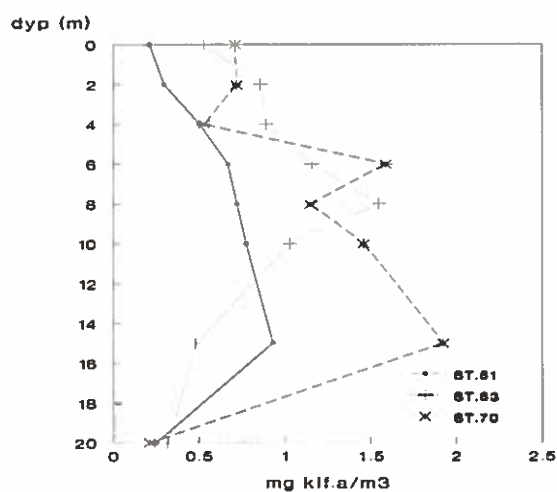
Den vertikale fordelingen av alger var i månedsskiftet april/mai 1989 forskjellig i Hylsfjorden i forhold til Saudafjorden og Sandsfjorden. Minimumsverdiene for klorofyll a i brakkvannslaget ble funnet i Hylsfjordens indre del (Stn. 51). Størst algemengde på denne stasjonen (ca. 2 mg klf.a/m³) ble funnet på 6-10 m dyp (Fig. 36).

I Hylsfjordens ytre del (Stn. 55) fantes et maksimum på samme dyp, men i tillegg var det en klorofyll a-topp i det øvre brakkvanns-



Figur 36. Biomasseprofiler i Ryfylkefjordene fra april/mai 1989.

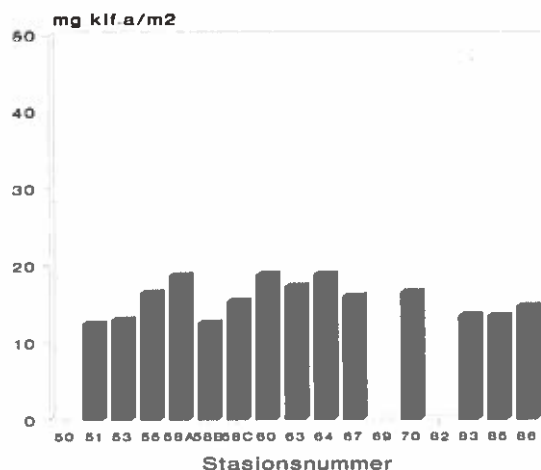
laget. I Saudafjorden og Sandsfjorden var det derimot algemaksima i 2-4 m sjiktet. Det generelle bildet med maksimale algemengder liggende under overflatelaget fantes også i Jelsafjorden og Jøsenfjorden. Den totale algemengden var lav i hele undersøkelsesområdet med maksimum i Jelsafjorden (21 mg klf.a/m²) og minimum i Jøsenfjorden (12 mg klf.a/m²).



Figur 37. Biomasseprofiler fra Ryfylkefjordene i mai 1988.

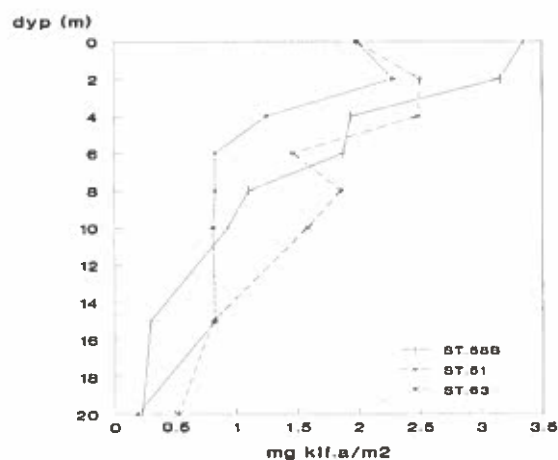
I mai 1988, da kraftverket i Hylen var i gang, fantes klorofyll *a* toppene, som forøvrig var lave (ca 1-1.5 mg klf.a/m³), under det øvre brakkvannslaget (Fig. 37).

De integrerte klorofyll *a* verdiene i fjordene var mellom 12.5 og 18.9 mg klf.a/m² (Fig. 38).



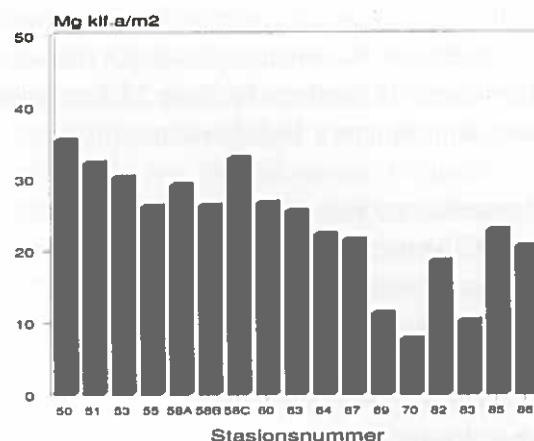
Figur 38 Integrert biomasse i Ryfylkefjordene, 21. - 22. mai 1988.

Like etter at kraftverket hadde stanset i juni, var det en betydelig oppbygging av alger i det øvre brakkvannslaget i hele Sandsfjordsystemet (Fig. 39).



Figur 39. Biomasseprofiler i Sandsfjordsystemet i juni 1988.

Oppbyggingen kom sannsynligvis som et resultat av at det øvre brakkvannslaget fikk en adskillig lengre oppholdstid i fjordsystemet, og at algene dermed fikk bedre tid til å utnytte næringssaltene før vannmassene forsvant ut av Sandsfjorden. En uke senere var imidlertid algemengdene igjen redusert i indre deler av fjordsystemet (fra 35 til 23 mg klf.a/m² på Stn. 51), mens det var en øking utenfor Sandsfjordsystemet (Fig. 40).



Figur 40. Integrert biomasse i Ryfylkefjordene, 4. - 5. juni 1988 (øverst) og 11. juni 1988 (nederst).

Reduksjonen i indre deler er trolig et resultat av at næringssaltene i dette området ble forbrukt uten å bli erstattet, økingen i de mer gjennomblandete vannmassene i ytre områder (ogå dypere eufotisk sone) kan ha sammenheng med en lengre godværsperiode (bedre lysforhold). Den høyeste målte integrerte planteproduksjonen i etterundersøkelsen ble registrert i Jøsenfjorden i denne perioden.

Lysforhold

I mai 1988 var været tildels strålende i toktperioden, og maksimal lysinnstråling ble målt til $1570 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$. Kompensasjonsdypet i Sandsfjordsystemet lå mellom 16.3 og 23.1 m med klare vann innerst i Hylsfjorden.

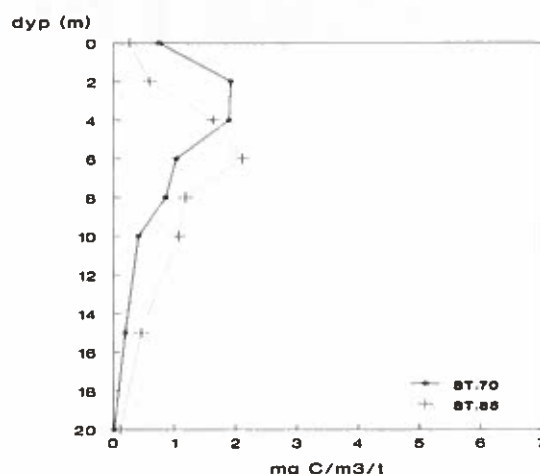
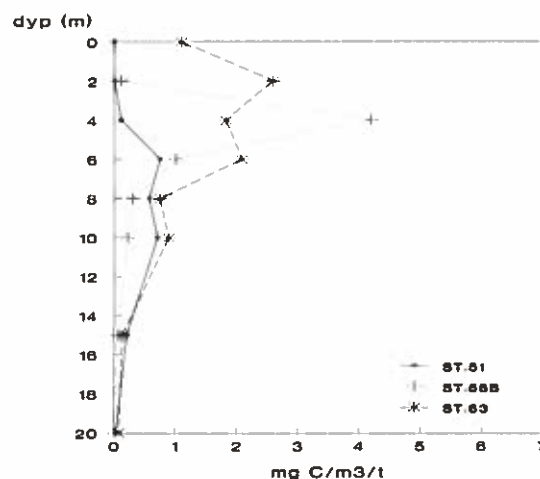
I begynnelsen av juni samme år var værforholdene adskillig mer varierende (på en regnværsdag kunne lysinnstråling komme ned i $225 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$). Kompensasjonsdypet var redusert til mellom 14.4 og 17.6 m inne i fjordsystemet med høyest gjennomskinnelighet i Sandsfjorden. I Jelsafjorden og Jøsenfjorden lå 1%-lysdyp mellom 20.9 og 21.8 m.

I april/mai 1989 vekslet værforholdene i løpet av toktperioden fra skyfri himmel til tungt skydekke med regn. Det innstrålte lyset varierte da også fra ca 55 til $1455 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$. Kompensasjonsdypet varierte fra 19.3 til 25.2 m inne i Sandsfjordsystemet, mens det i Jøsenfjorden var 28.8 m.

Planteproduksjon

Under produksjonsberegningene er lysmengden like under overflaten i månedsskiftet april/mai, slutten av mai og begynnelsen av juni satt til henholdsvis 1100, 1250 og $1300 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$. Det vil si at ved alle produksjonsberegninger er det antatt lysinnstråling tilsvarende en skyfri dag.

Produksjonsberegningene fra april/mai 1989 viste ingen planteproduksjon ved overflaten i Hylsfjorden og Saudafjorden (Fig. 41).

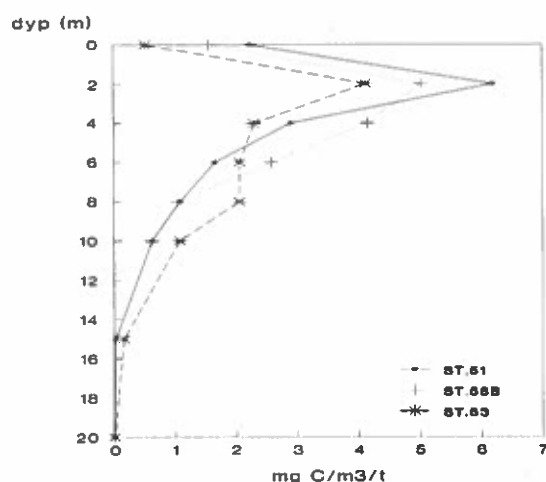
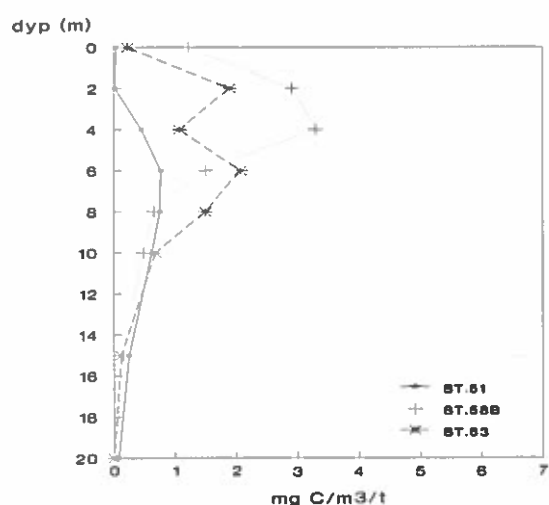


Figur 41. Planteproduksjon i Sandsfjordsystemet (øverst) og i Jelsafjorden og Jøsenfjorden (nederst), april/mai 1989.

Det var svært lave verdier for totalt uorganisk karbon i det øvre vannsjiktet og dermed ikke tilgjengelig CO_2 . I Hylsfjorden var planteproduksjonen lav med integrert produksjon mellom 6.5 og $7.0 \text{ mg C}/\text{m}^2/\text{t}$. Produksjonstoppene i Sandsfjordsystemet lå mellom 2-6 m dyp. Maksimal produksjon (4 m dyp) i Saudafjorden og ved Nævvøy i Sandsfjorden (Stn. 64) var henholdsvis 4.2 og $5.4 \text{ mg C}/\text{m}^3/\text{t}$. Produksjonsmaksimum i Saudafjorden falt sammen med et biomassemaksimum. Den samlede produksjonen i den eufotiske sonen var størst i

Sandsfjorden med (ca. 20 mg C/m²/t). Dette er ca. 50% av den maksimale integrerte planteproduksjonen som ble målt under våroppblomstringen. Total planteproduksjon i Jøsenfjorden ble målt til 17.6 mg C/m²/t, og kurven for produksjon mot dyp var nesten sammenfallende med den vertikale biomassefordelingen.

Bildet av planteproduksjonen for mai 1988 (Fig.42) liknet på situasjonen fra april/mai 1989, men det var enkelte unntak.



Figur 42. Planteproduksjon i Sandsfjordsystemet i mai 1988 (øverst) og i juni 1988 (nederst)..

For det første var den målte produksjonen nær overflaten i mai 1988 høyere pga. av tilgjengelig CO₂. For det andre var den integrerte produksjonen i den eufotiske sonen i ytre del av Hylsfjorden ca. dobbelt så høy (14.7 mg C/m²/t). Her må det imidlertid legges til at totalt sett var planteproduksjonen i den eufotiske sonen ca 30% høyere enn i april/mai 1989.

Like etter stans av kraftverket i Hylen i juni 1988, ble produksjonen på 2 m innerst i Hylsfjorden beregnet til 6.2 mg C/m³/t (Fig. 42). Produksjonen integrert fra 0 til 20 m ga 28.2 mg C/m²/t. Dette er samme planteproduksjonsnivå som for resten av Sandsfjordsystemet, mens planteproduksjonen i indre Hylsfjord tidligere i sesongen var målt til maksimalt 50% av produksjonen i Saudafjorden og Sandsfjorden. Totalt sett økte planteproduksjonen i Sandsfjordsystemet med 74% fra slutten av mai til begynnelsen av juni. Beregningene er basert på produksjonsmålinger gjennomført på 4 stasjoner i fjordområdet. Høyeste totalproduksjon i de øvre 20 m ble målt i Jøsenfjord. En solskinnsdag ble produksjonen beregnet til 44.4 mg C/m²/t, som er den høyeste produksjonsverdi pr. flateenhet under etterundersøkelsene.

Produksjonskapasitet og produksjonseffektivitet

Den lave alkaliniteten i Hylsfjordens og Saudafjordens overflatesjikt i april/mai 1989 gjorde at det her ikke kunne beregnes produksjonskapasitet og -effektivitet. I Sandsfjorden (Stn. 63) derimot, hvor målingene viste tilgjengelig CO₂, ble det registrert produksjon i overflaten. Ellers var produksjonskapasiteten på 20 m i Sandsfjordsystemet lavere enn i nedre del av brakk-vannslaget. En tilsvarende reduksjon i produksjonskapasiteten ble ikke funnet på 20 m i Jelsafjorden og Jøsenfjorden.

Produksjonseffektiviteten viste svært variende verdier for hele undersøkelsesområdet. Et gjennomgående trekk både for Sandsfjordområdet og Jøsenfjorden var lave verdier for produksjonseffektiviteten på 20 m dyp.

Beregninger av produksjonskapasitet og -effektivitet i mai 1988 ga lave verdier i indre Hylsfjorden (Stn. 51), mens det ble funnet forholdsvis høye verdier i det øvre brakkvannslaget i ytre Hylsfjorden og i Sauda- og Sandsfjorden.

Stans av kraftverket medfører lenger oppholdstid for algene i brakkvannslaget, og målingene i juni ga derfor adskillig jevnere verdier for produksjonskapasiteten i Sandsfjordsystemet og med høyeste verdi innerst i Hylsfjorden. Produksjonseffektiviteten etter at kraftverket hadde stått en uke, viste klart lavere verdier enn mens kraftverket gikk. Dessuten viste verdiene en fallende tendens fra Hylsfjorden via Saudafjorden til Sandsfjorden, sannsynligvis som et resultat av økende lystilpasning.

Like under det brakke overflatelaget førte stopp i kjøringen av kraftverket til en svak økning av produksjonskapasiteten, men endringene var på langt nær av samme størrelse som i overflatelaget. Endringene i produksjonseffektiviteten var små for algene under brakkvannslaget.

I Jelsafjorden var det ingen betydelige endringer verken i produksjonskapasitet eller -effektivitet fra slutten av mai til tidlig i juni. I Jøsenfjorden var produksjonspotensialet i de øvre 6 metrene i juni ca. dobbelt så høyt som i Sandsfjordsystemet.

6.1.3 Sen sommersituasjon 1989

Programmet for toktet fra 25. juli til 6. august som var planlagt for å studere effekten av oppstartingen av Hylen kraftverk etter sommerstans, ble delvis endret som følge av oppblomstring av den skadelige algen *Prymnesium parvum* (Johnsen et al. 1989, Kaartvedt et al. 1990). Det ble likevel samlet mye nyttig informasjon. I Sandsfjordsystemet var stabiliteten god i de øvre 10 metrene og oppstarten av kraftverket endret ikke vesentlig på dette bildet. Også i Jøsenfjorden var vannmassene stabile ned til 10 m dyp. I Nedstrandfjorden derimot var stabiliteten forholdsvis lav.

Næringssalter

Før vannutslipp startet fra Hylen 29. juli inneholdt vannmassene innerst i Hylsfjorden (Stn. 51) fosfatmengder under deteksjonsgrensen ($0.05 \mu\text{M}$). Nitrat- og silikatverdiene var også meget lave i de øvre 15 m, henholdsvis mellom 0.05 og $0.9 \mu\text{M}$ nitrat og mellom 0.05 og $0.7 \mu\text{M}$ silikat. Alle næringssaltene kan dermed betraktes som begrensende for algevekst i de øvre 15 m hvis en benytter de vanlige grensene på $0.1 \mu\text{M}$ for fosfat og $1.0 \mu\text{M}$ for nitrat og silikat.

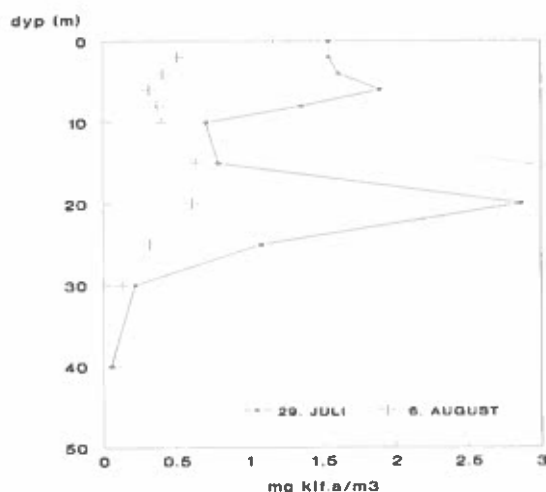
Dagen etter vannutslippene fra Hylen hadde både nitrat- og silikatkonsentrasjonene i indre Hylsfjorden økt betraktelig (maksimalverdier i brakkvannslaget på $4 \mu\text{M}$ for begge nærings-saltene på Stn. 51). Målinger ca en uke senere viste at det øvre brakkvannslaget (0-2 m) i indre Hylsfjorden nå hadde tilsvarende sammensetning av næringssalter som brakkvannslaget i det øvrige fjordsystemet. I de underliggende vannmassene i Hylsfjorden ned til 40 m hadde næringssaltverdiene økt noe, men i vannsjiktet 4-10 m var nitrat- og silikatmengdene fremdeles under $1.0 \mu\text{M}$. Det samme nærings-saltbildet ble i store trekk funnet i hele Sandsfjordsystemet fra Nævøy og innover.

I Saudafjorden var nitrat- og silikatverdiene i slutten av juli over grenseverdiene på $1.0 \mu\text{M}$ i hele vannsøylen, mens fosfat lå på grenseverdien $0.1 \mu\text{M}$ fra overflaten og ned til 8 m. Også her var det tydelige endringer i løpet av toktperioden, som trolig skyldes et samspill mellom økt ferskvannstilførsel til denne fjordarmen og inntrenging av vann fra Hylsfjorden. Økningen i ferskvannstilførsel til fjordsystemet endret næringssaltprofilene. Høye nitrat- og silikatverdier ble funnet ned til 4 m som et resultat av at brakkvannslagets tykkelse hadde økt. Under dette laget (8-15 m) sank derimot nitratmengden fra gjennom-snittlig 7.6 til $0.2 \mu\text{M}$ og silikatmengden fra et gjennomsnitt på 3.6 til $1.1 \mu\text{M}$. På grunnlag av sammensetningen av næringssalter syntes det sannsynlig at vannet har sin opprinnelse i Hylsfjorden.

Nitrat var det begrensende næringssaltet i Jelsafjorden, med verdier under deteksjonsgrensen ($0.05 \mu\text{M}$) helt ned til 30 m. Også silikatverdiene var lave ($1.0\text{--}0.7 \mu\text{M}$) og virket begrensende for diatomeveksten. Også i Jøsenfjorden var næringssaltverdiene lave i de øvre 20 m, men med forholdsvis høye nitrat- og silikatk mengder nær overflaten pga. brakkvann i et tynt overflatesjikt.

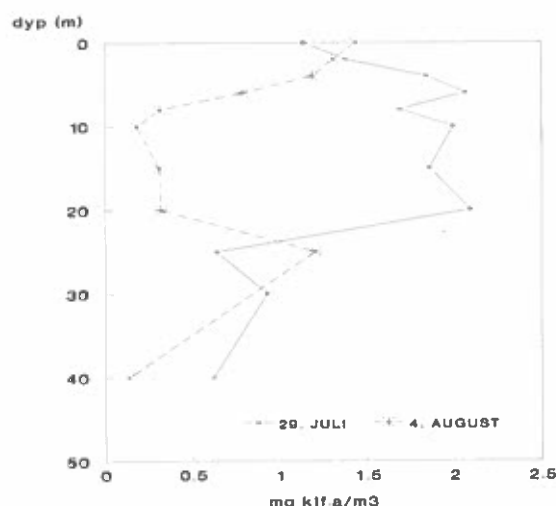
Algemengde

29. juli ble det innerst i Hylsfjorden (Stn. 51) registrert klorofyll a-verdier mellom 1.6 og 1.9 mg klf. a / m^3 i de øvre 6 m, mens høyeste algemengde på $2.9 \text{ mg klf.a /m}^3$ ble funnet på 20 m dyp (Fig. 43).



Figur 43. Plantebiomasseprofiler innerst i Hylsfjorden (Stn. 51) før (29. juli 1989) og etter (6. august 1989) oppstart av kraftverket i Hylen.

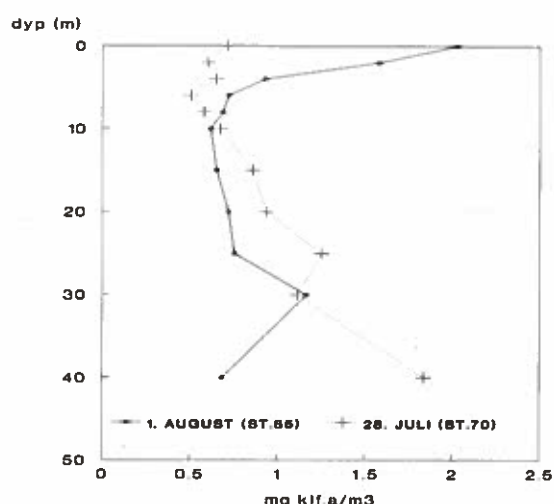
I ytre del av Hylsfjorden fantes de høyeste klorofyll-a verdiene i vannlaget 4-20 m med gjennomsnittlig 1.9 mg/m^3 . Oppstartingen av vannutslipp i Hylen førte til en rask reduksjon av algemengden og en endring av den vertikale fordelingen. På Stn. 55 (ytre Hylsfjord) forsvant algene i 4-20 m sjiktet (Fig. 44), og den integrerte klorofyll a mengden fra 0-20 m ble redusert med ca. 70 % til $11.6 \text{ mg klf.a/m}^2$.



Figur 44. Plantebiomasseprofiler ytterst i Hylsfjorden (Stn 55) før (29. juli 1989) og etter (4. august 1989) oppstart av kraftverket i Hylen

Tilsvarende endringer ble funnet i Sands- og Saudafjorden. I Sandsfjorden ble klorofyll a mengden mellom 6-20 m redusert med 74% fra 27. juli til 2.august. Dessuten forsvant algene nær overflaten, sannsynligvis som et resultat av økt vannføring i Suldalslågen. Likevel var det en svak økning i algemengden fra 0-6 m i løpet av denne uken. Nedgangen i total klorofyll-a mengde for de øvre 20 m var 52%. I Saudafjorden var reduksjonen i den integrerte klorofyll-a mengden fra 0-20 m noe mindre (42%) enn for Sandsfjorden og Hylsfjorden.

De vertikale klorofyll-a profilene i Jelsa- og Jøsenfjorden avvek noe fra profilene i Sandsfjordsystemet (Fig.45). I Jelsafjorden økte algemengden mot dypet med maksimumsverdi på 1.8 mg klf.a/m^3 på 40 m. I Jøsenfjorden fantes to maksima - et i overflaten på 2.0 mg klf.a/m^3 og et på 30 m dyp på 1.2 mg klf.a/m^3 . De integrerte verdiene for klorofyll-a for vannskiktet 0-20 m i de to fjordene lå på henholdsvis 14.4 og $17.1 \text{ mg klf.a/m}^2$, dvs. ca 50% av verdiene for Sandsfjordsystemet før kraftverket startet.



Figur 45. Plantebiomasseprofiler i Jelsafjorden (Stn 70) og Jøsenfjorden (Stn. 85), juli - august 1989.

Artssammensetning

Innerst i Hylsfjorden (Stn. 51) var det gjennomgående lite diatoméer i slutten av juli, mens ceratiene dominerte med *Ceratium furca* som den vanligste arten. Diatomé-mengden økte utover i fjordsystemet og i Sandsfjorden, som forøvrig hadde den høyeste artsdiversiteten, var *C. simplex* var. *calcitrans* den tallmessig dominante arten. Også *N. "delicatissima"* forekom i forholdsvis høyt antall. Dino-flagellatene var også godt representert med *C. fusus* og *Oblea baculifera* som de mest framtrepende artene. I tillegg ble mange *Protoperdinium*-arter registrert.

I Saudafjorden utgjorde diatomeene den vanligste algegruppen med *Diatoma* sp. som dominerende art. I tillegg var *C. wighamii* og *N. "delicatissima"* tallrike. *Prymnesium parvum* ble funnet i hele fjordsystemet, men var ingen dominerende art. Det samme gjaldt *Chrysochromulina hirta* som blomstret opp i etterkant av *Prymnesium*. Begge disse artene tilhører algeklassen *Prymnesiophyceae*.

Håvtrekk fra Jelsafjorden viste et svært fattig plankton hvor *C. simplex* var. *calcitrans* var mest tallrik. Ellers var ceratier og *Dinophysis*-arter vanligst.

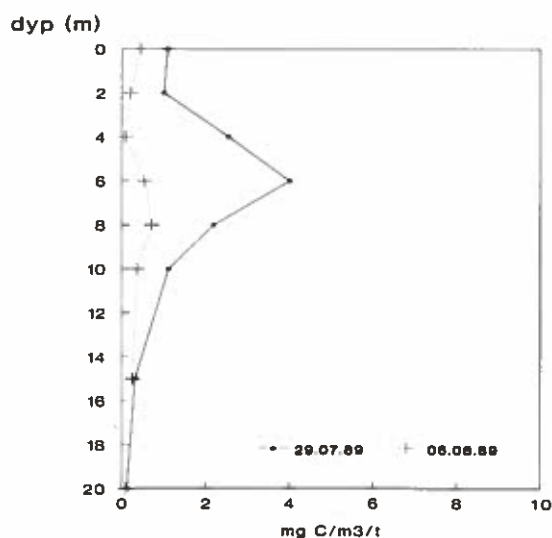
Lysforhold

Lysinnstrålingene i juli/august 1989 var meget variable med lysintensiteter mellom ca 100-1490 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$. Vannets lysabsorpsjon i den produktive delen av vannsøylen var høyest i Saudafjorden hvor 1%-lysdyp i slutten av juli var 17.1 m, mens det ved de andre stasjonene i Sandsfjordsystemet lå mellom 20.9 og 27.7 m. De klareste vannmassene ble registrert i Jelsafjorden hvor 1%-lysdyp var på 35.7 m.

Start av kraftverket 29. juli kombinert med kraftig regnvær samme dag forandret lysmiljøet i Sandsfjordområdet. Lysgjennomtrengningen i de øvre 2-4 m avtok samtidig som vannmassene under 6 m fikk øket gjennomskinnelighet. Resultatet ble at 1%-lysdyp ble funnet dypere i vannsøylen.

Planteproduksjon

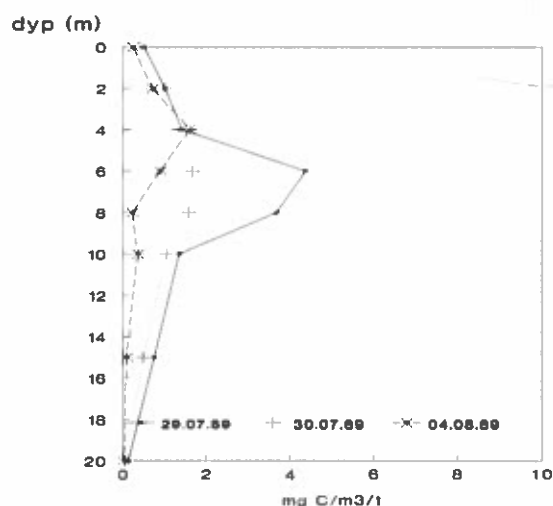
Den innstrålte lysmengden like under overflaten er satt til 1100 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ (tilsvarer en solskinsdag) ved beregningene av produksjon for juli/august. I Hylsfjorden ble produksjonsforholdene endret vesentlig etter at kraftverket ble satt i gang om formiddagen 29. juli (Fig. 46).



Figur 46. Planteproduksjonsprofiler innerst i Hylsfjorden før (29. juli 1989) og etter (6. august) oppstart av kraft-verket i Hylen.

Produksjonstoppen på Stn. 51 ($4.0 \text{ mg C/m}^3/\text{t}$) lå på 6 m dyp, dvs under brakkvannslaget, og falt sammen med et biomassemaksimum i dette dypet (jfr. Fig. 43). Biomassetoppen på 20 m dyp ga ingen utslag på produksjonen pga. liten lystilgang, men også på grunn av liten produksjonskapasitet. Et nytt produksjonsforsøk 6. august ga lave verdier for planteproduksjonen slik at den beregnede integrerte produksjonen sank fra 26.4 til $6.3 \text{ mg C/m}^2/\text{t}$. Reduksjonen kom som et resultat av en omtrent tilsvarende biomassereduksjon i de øvre 10 meter.

I ytre Hylsfjorden (Stn. 55) ble det gjennomført planteproduksjonsforsøk 29. juli, 30. juli og 4. august. Det var små variasjoner i det øvre brakkvannslaget, mens det var betydelige forandringer i vannsjiktet mellom 4 og 10 m (Fig. 47).

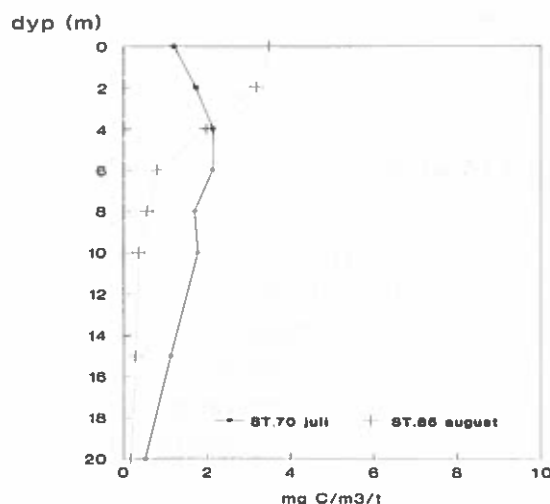


Figur 47. Planteproduksjonsprofiler ytterst i Hylsfjorden (Stn. 55) før (29. juli 1989) og etter (30. juli og 4. august 1989) oppstart av kraftverket i Hylen.

Dette vannet besto av utstrømmende blandingsvann dannet ved nærsoneblanding ved Hylen. Overflatevannet strømmet derimot sakte inn fjorden, slik at vannutslippet i Hylen ikke ga nevneverdige utslag på miljøet i dette vannsjiktet så langt ute i fjorden. 29. juli ble den integrerte produksjon fra 0-20 m beregnet til $30,3 \text{ mg C/m}^2/\text{t}$, men i løpet av en uke sank denne produksjonen med ca 70%.

Oppstartingen av kraftverket hadde også innvirkning på planteproduksjonen i Sandsfjorden (Stn.63). Produksjonsreduksjonen kom også her i vannmassene under det øvre brakkvannslaget (jfr. Fig. 47), hovedsaklig som et resultat av en reduksjon i biomassen. I Saudafjorden skjedde det også en endring i produksjonsmiljøet i løpet av toktperioden, blant annet ved at brakkvannslaget økte med 3-4 m. Generelt ble det målt lav produksjon like under overflaten som et resultat av liten tilgang på uorganisk CO_2 og lyshemming. Det ble likevel målt en markert topp i planteproduksjonen på 2 m ($8.1 \text{ mg C/m}^3/\text{t}$) 27. juli. Denne produksjonstoppen var helt forsvunnet 5. august og den integrerte produksjonen var redusert fra 28.3 til $14.2 \text{ mg C/m}^2/\text{t}$. Forholdene i Saudafjordens overflatelag var påvirket av kraftig ferskvannsavrenning innerst i fjorden, mens det synes å ha vært en innstrømming av vann fra Hylsfjorden under det ferskeste brakkvannslaget.

Produksjonsprofilen for Jøsenfjorden viste at vannsjiktet fra 0-6 m sto for 74% av den totale planteproduksjonen i dette fjordområdet (Fig. 48).



Figur 48. Produksjonsprofiler i Jøsenfjorden (Stn. 70) og i Jøsenfjorden (Stn. 85) i juli-august 1989.

I Jøsenfjorden representerte derimot produksjon i samme del av vannsøylen kun 37% av den totale produksjonen fra 0 til 20 m. Det var

her en økning av algemengden mot dypet og god gjennomskinnelighet i vannmassene. Den relativt høye mengden klorofyll a (1.8 mg/m^3) på 40 m (jfr. Fig. 45) vil imidlertid ikke gi noe bidrag til totalproduksjonen da lysmengden som trenger ned til dette dypet er for lav til å gi netto planteproduksjon.

Produksjonskapasitet og produksjonseffektivitet

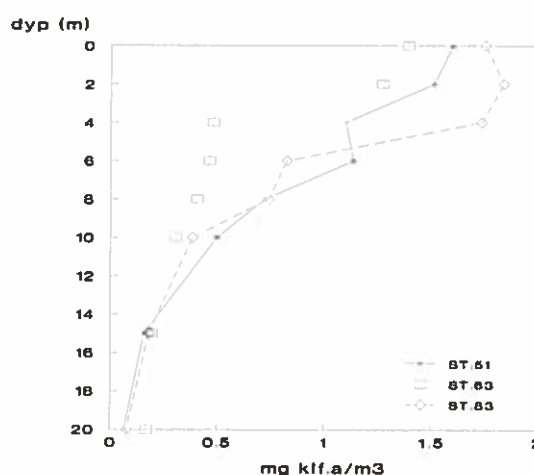
I Hylsfjordens overflatelag avtok produksjonskapasiteten i måleperioden både i ytre (Stn. 55) og indre (Stn. 51) del. Produksjonseffektiviteten var forholdsvis lav i dette øvre vannsjiktet, og vannutslippet i Hylen forsterket bildet. Før kraftverket startet var den potensielle produksjonen og dens effektivitet i vannsjiktet 6-20 m forholdsvis lik i hele fjorden, mens ferskvannsutslippene i Hylen førte til et mer kaotisk bilde. I Sandsfjorden kom de store endringene som følge av vannutslippene i Hylen, til uttrykk i målingene både fra 6 og 20 m. På 6 m dyp sank f.eks. produksjonskapasiteten til $1/8$ i løpet av 6 dager. En kraftig økning i den potensielle produksjonen og i effektiviteten i overflatelaget må antas å ha sammenheng med økt vannføring i Suldalslågen.

Både produksjonskapasiteten og -effektiviteten i Saudafjordens øvre brakkvannslag var høyere enn i de to andre fjordene.

6.1.4 Høstsituasjon 1988

I slutten av oktober 1988 var det i alle tre fjordsystemene en normal næringssaltsituasjon for årstiden. Både nitrat, fosfat og silikat var kommet tilbake i vannsøylen, men spesielt fosfat hadde ikke nådd vinternivået. Likevel er det klart at det ikke lenger var næringssaltene, men lystilgangen som begrenset planteproduksjonen.

Klorofyll-a kurvene bar preg av at det var sen høst og liten planteproduksjon. På nesten samtlige målestasjoner i Jøsenfjorden, Sandsfjorden og Hylsfjorden var det kun fra overflaten og ned til 4 m at klorofyll-a verdier nådde over 1 mg/m^3 (Fig. 49).



Figur 49. Plantebiomasseprofiler i Hylsfjorden (Stn. 51), Sandsfjorden (Stn. 63) og Jøsenfjorden (Stn. 83) i oktober 1988.

Dessuten var den vertikale fordeling svært lik i de tre fjordområdene. Kraftverket hadde vært stengt gjennom de siste to ukene forut for toktet, noe som trolig var en betingelse for etableringen av overflatemaksima i Hylsfjorden. Den totale algemengden varierte mellom 6.5 og $14.5 \text{ mg klf.a/m}^2$ med laveste verdi i Saudafjorden og høyeste verdi i Jøsenfjorden.

Oppstartingen av kraftstasjonen i Hylen førte til en ut-transport av alger i Hylsfjordens øvre lag, og algemengden i Hylsfjorden sank fra 12.5 til 8.2 mg klf.a/m^2 . Også ytre del av Saudafjorden ble påvirket.

Håvtrekkene fra oktober inneholdt generelt lite planteplankton. I Sandsfjordssystemet var det *C. wighamii* som var helt dominerende blant diatoméene. Blant dinoflagellatene forekom *Prorocentrum balticum* hyppig i Saudafjorden sammen med *Dinophysis acuminata*. I Jøsenfjorden kan ingen arter sies å være dominerende, men det kan nevnes at det ble sett *Skeletonema costatum* i fin form. Dinoflagellatene var likevel den algeklassen som forekom hyppigst.

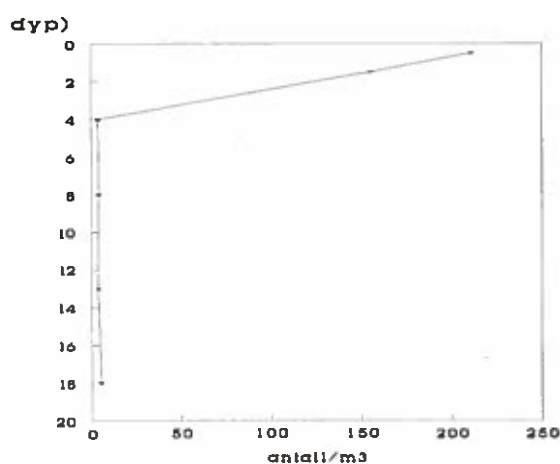
6.2 Dyreplankton

6.2.1 Brakkvannsplankton

De fleste dyreplanktonartene i Sandsfjord-systemet unnviker det øvre brakkvannslaget, hvor det imidlertid finnes en egen fauna av brakkvannsplankton. Som i forundersøkelsen besto denne i hovedsak av tre arter, copepoden *Eurytemora affinis* samt cladocerene *Evadne nordmanni* og *Podon* spp. Alle disse artene er kjent fra estuarier (dvs møtestedet mellom ferskvann og sjø) andre steder i verden. Imidlertid er det bare *E. affinis* som nesten utelukkende forekommer i estuarier, der den ofte er den dominerende copepoden i vannmasser med lav saltholdighet.

I trekk med Juday-håv fra april ble det bare tatt enkelte *Evadne*. I pumpeprøver fra slutten av mai ble det fanget relativt store mengder *Evadne* i brakkvannslaget, men nesten ingen *Eurytemora* eller *Podon*. Brakkvannsfaunaen var mest utviklet sommer og høst.

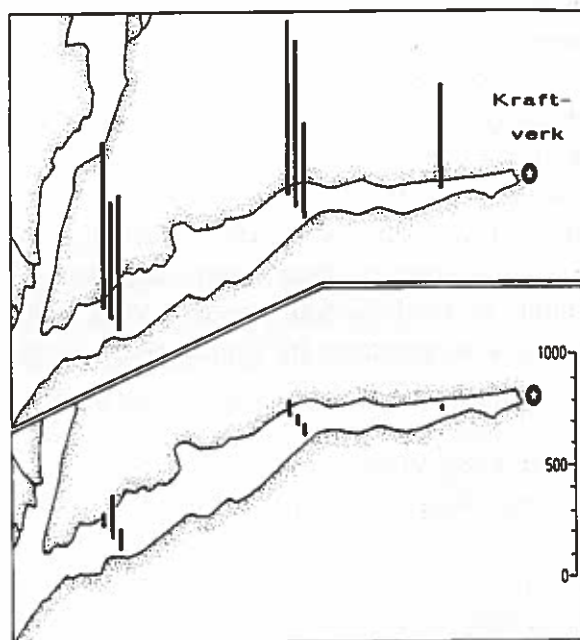
Brakkvannsplanktonet var vanligvis knyttet til de øverste 2-5 m avhengig av brakkvannslagets tykkelse. (Et eksempel er gitt i Fig. 50.)



Figur 50. Vertikalfordeling av *Eurytemora affinis*, oktober 1988.

I juli/august 1989 fantes imidlertid artene også tildels noe dypere, med fangster mellom ca. 10 og 15 m som var det dypeste intervallet der artssammensetningen ble undersøkt.

Tilknytningen til brakkvannslaget gjør at faunakomponenten påvirkes direkte av ferskvannsdrevne strømmer. Ved oppstartingen av kraftverket i oktober 1988 ble brakkvannsformene i Hylsfjorden transportert ut av fjordarmen med de kraftige strømmene som ble generert ved ferskvannsutslippene (se kap. 5.2.1). I løpet av to døgns utslipp forsvant de fleste *Eurytemora* (Fig. 51) og *Podon* fra fjordarmen, mens *Evadne* fortsatt var vanlig ved utløpet (Tabell 3.).



Figur 51. *Eurytemora affinis* i Hylsfjorden før (øverst) og 1-2 dager etter (nederst) oppstart av kraftverket i Hylen. Søylene representerer antall individer pr m^2

I hovedsak syntes altså disse planktonformene å fraktes som passive partikler med brakkvannsstrømmen ut av Hylsfjorden når kraftverket var i drift.

Tabell 3. Gjennomsnittlig antall av brakkvannsplankton (pr. m² i de øvre 20 m) i indre deler (Stn. 51 og 53) og ytre deler (Stn. 55) av Hylsfjorden før og etter utslipp fra Hylen i oktober 1988. (Enveis ANOVA på log transformerte data, **: p<0.01, ***: p<0.001)

Taxon	Indre deler		Ytre deler	
	før	etter	før	etter
<i>Eurytemora affinis</i>	587	30***	613	113**
<i>Podon</i> spp.	94	7***	114	39**
<i>Evadne nordmanni</i>	563	97 **	362	460

I oktober 1987 ble alle brakkvannsartene fanget i størst antall i Saudafjorden. Dette var mest fremtredende for *Eurytemora*, som forekom i 100 ganger høyere konsentrasjoner i denne fjordarmen enn i Hylsfjorden, der de laveste fangstene ble tatt. Mengden av *Podon* og *Evadne* var henholdsvis rundt 20 ganger og 2-10 ganger høyere i Saudafjorden enn på andre stasjoner. De sammenfallende høye fangstene i Saudafjorden tyder på at en felles fysisk faktor (trolig strømforholdene) styrer fordelingen. Alle artene forekom i brakkvannsstrømmen ved utløpet av Sandsfjorden, noe som viser at det foregikk en transport fra fjordsystemet og til områdene utenfor.

I mai 1988 viste relativt høye fangster av *Evadne* i brakkvannsstrømmen ved utløpet av Sandsfjorden at det også da foregikk en uttransport av brakkvannsplankton. De laveste mengdene fantes innerst i Hylsfjorden, mens de høyeste fangstene ble tatt i Saudafjorden. Gjentatte prøver viste kraftige variasjoner i mengden ved utløpet av Hylsfjorden, trolig grunnet oppsamling av *Evadne* i frontområder som forflyttet seg horisontalt mellom ulike prøvetidspunkter (Jfr. kap. 5.1.1).

I juli/august 1989, da både dyrenes vertikalfordeling og det ferskvannsdrevne strømmønsteret avvek fra det som ble funnet på andre tokt, avvek følgelig også det horisontale transportmønsteret. Ferskvannsutslippene fra Hylen førte på denne tiden ikke til en utarming av brakkvannsfaunaen i Hylsfjorden, tvert imot økte konsentrasjonene tett ved kraftverket (Tabell 4.).

Tabell 4. Konsentrasjoner av brakkvannsplankton i håvtrekk tatt i de øverste 15 m tett ved kraftverket før og etter utslipp fra Hylen sommeren 1989.

Art	Antall pr. m ³	
	26. juli	3. august
<i>Eurytemora affinis</i>	1	1349
<i>Evadne nordmanni</i>	6	1696
<i>Podon</i> spp	4	320

Som tidligere beskrevet dukket kraftverksvannet under brakkvannslaget, og det var en kontinuerlig inntransport av overflatevann. Siden artene på denne tiden tildels også fantes i noe dypere vannlag foregikk det i tillegg en inntransport i en underliggende kompensasjonsstrøm.

6.2.2 Marint plankton

Hovedtrekk i vertikal biomassefordeling gjennom året

Ved å kombinere alle Juday-trekkene for hvert tokt kan vi få et grovt uttrykk for vertikalfordelingen av planktonbiomassen i fjordsystemet (Tabell 5.). Dataene er dermed representative for utbredelsen av marint plankton, da brakkvannsplanktonet er uvesentlig for totalbiomassen.

Resultatene i tabellen antyder at de største planktonmengdene (pr m² overflate) gjennom størstedelen av året finnes i bassengvannet. Dette henger tildels sammen med at den største delen av vannsøylen er under terskeldyp. Planktonkonsentrasjonene (pr m³) var derimot gjennomgående høyest i øvre lag. Den dypeste fordelingen ble registrert i november, da ca 85 % av fangstene ble tatt under terskeldypet. Toktet i slutten av februar falt sammen med at overvintrende plankton igjen søkte mot overflaten (se nedenfor). I den etterfølgende 3-4 måneders perioden står planktonet relativt høyt i vannmassene, og om våren kunne over halvparten fanges over terskeldypet. Også ved å se på den relative fordelingen i de to strataene som ble undersøkt over terskeldypet fremgår det at planktonet sto høyest i vannsøylen i

vårmånedene, med en gjennomsnittlig andel i de øverste 50 m på 80-90 %. Ut på sommeren fikk planktonet igjen en noe dypere fordeling.

Tabell 5. Gjennomsnittlig prosent av totalfangst i Judayhåv tatt over terskeldypet (110 m), og prosent av denne andelen som ble tatt i de øvre 50 m.

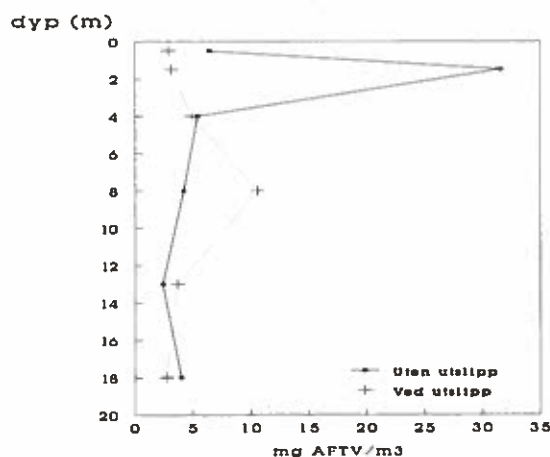
	% over terskel	% øvre 50 m
<i>Høst</i>		
Oktober 1987	36	55
November 1987	15	42
Oktober 1988	20	59
<i>Vinter/tidlig vår</i>		
Februar 1988	32	69
<i>Vårlforsommer</i>		
Mai 1988	66	86
Juni 1988	48	84
April 1989	61	90
<i>Ettersommer</i>		
Juli/august 1989	34	68

Vertikalfordeling om høsten

Planktonet var i hovedsak relativt jevnt fordelt i vannmassene over terskeldyp om høsten (Tabell 5.), men det var enkelte klare forskjeller mellom de ulike fjordarmene. I Saudafjorden var det f.eks. et markert planktonmaksimum mellom 110-50 m både i oktober og november 1987, mens det i ytre fjordområder ble funnet maksimum i de øverste 50 metrene.

MOCNESS og pumpeprøvene viste at de høyeste planktonmengdene gjennomgående fantes i de øvre 10 m, hvor det gjerne var et maksimum sammenfallende med sprangsjiktet. Det var lave fangster i den øverste meteren.

Ved det kontrollerte forsøket med utslipp fra Hylen i oktober 1988 sto planktonet i øvre lag dypere under kjøringen av kraftverket enn før oppstartingen (eks Fig. 52). Reduksjonen i øvre lag i perioden med ferskvannstilførsel kan skyldes at dyr ble transportert utover, slik det tidligere er vist for brakkevannsplanktonet, eller at dyrene svømte ned, f.eks. for å unngåe brakkevannsstrømmen.

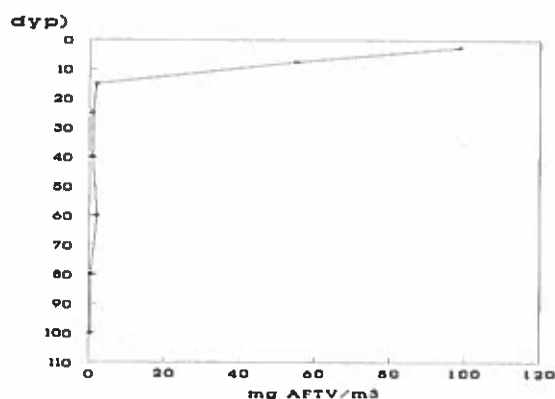


Figur 52. Vertikalfordeling av mesoplanktonbiomasse i Hylsfjorden, oktober 1988 (dagprøver) før og etter ferskvannsutslipp fra Hylen kraftverk.

Tilsvarende kan økningen i dypere lag skyldes at dyr svømte ned fra overliggende vannlag, eller at det var høyere konsentrasjoner av plankton i de ytre områdene som de inngående vannmassene stammet fra. Trolig vil ulike forklaringsmodeller gjelde for ulike arter. Det ble funnet små, men viktige forskjeller artene imellom både i vertikalfordeling før kraftverksutslippene og i responser på disse. Mens f.eks. *Pseudocalanus elongatus* både dag og natt i hovedsak var knyttet til de øverste 5 metrene både før og etter utslippet, noe som eksponerte denne copepoden for uttransport med brakkevannsstrømmen, var det om dagen klare maksima av *Calanus finmarchicus* og *Acartia clausii* i kompensasjonsstrømmen. Disse copepodene svømte imidlertid opp i øvre lag om natten. For *Paracalanus parvus* var det derimot høye fangster i kompensasjonsstrømmen også i mørke.

Vertikalfordeling vinter og tidlig vår

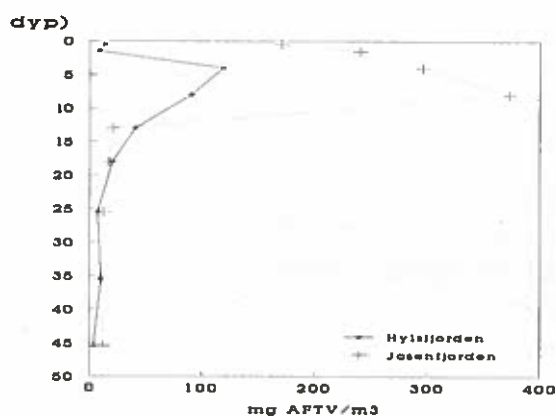
I månedsskiftet februar/mars hadde planktonet begynt å søke oppover i vannsøylen etter overvintring i dypet. Det var klare planktonmaksima, bestående av *Calanus finmarchicus*, i de øverste 10-20 m. Et eksempel fra Jøsenfjorden er gitt i Fig. 53. I øvre lag dominerte modne hunner og nesten voksne individer, noe som viser at gyting var nær forestående.



Figur 53. Vertikalfordeling av planktonbiomasse i Jøsenfjorden, februar 1988 (dagprøver)

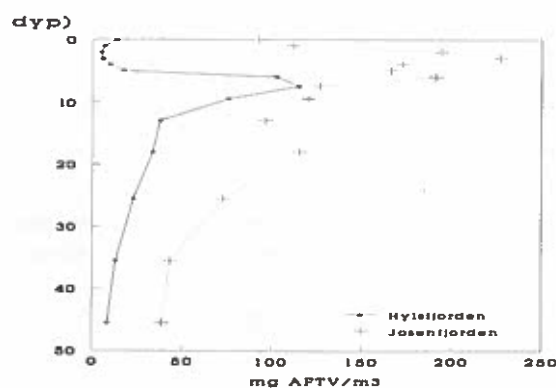
Vertikalfordeling vår og forsommer

I mai/juni 1988 og april/mai 1989 var planktonet i vesentlig grad knyttet til øvre lag (Tabell 5.) med størst konsentrasjon i de øverste 10-20 metrene (Fig. 54).



Figur 54. Vertikalfordeling av mesoplanktonbiomasse i Hylsfjorden og Jøsenfjorden (dagprøver), juni 1988.

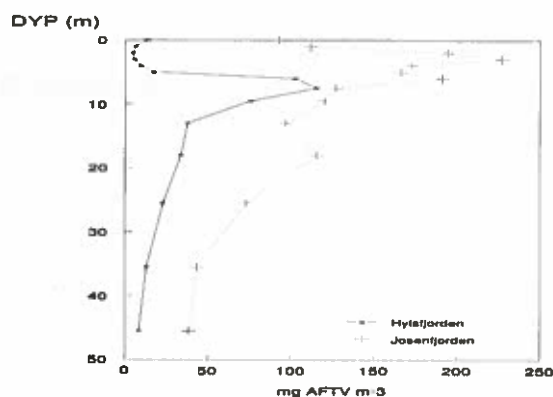
Det var imidlertid gjennomgående en lav biomasse i Sandsfjordsystemets brakkvannslag, og pumpeprøver tatt med fin vertikaloppløsning i april/mai 1989 viste tydelig brakkvannslagets innflytelse på Sandsfjordsystemet. Det var her et markert biomassemaksimum i sprangsjiktet, mens planktonet i Jøsenfjorden søkte helt til overflaten om natten (Fig. 55).



Figur 55. Mesoplanktonbiomasse i Hylsfjorden og Jøsenfjorden (pumpeprøver om natten), april-mai 1989.

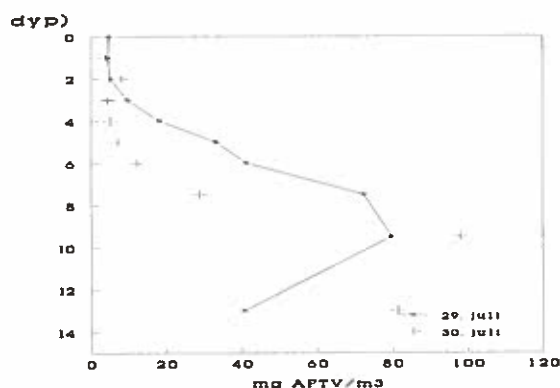
Vertikalfordeling ettersommer

I juli/august 1989 hadde planktonet trukket noe nedover i vannsøylen, og de største mengdene fantes i bassengvannet. Planktonet over terskeldypet var imidlertid fortsatt i vesentlig grad knyttet til de øvre 50 m (Tabell 5.). De største konsentrasjonene fantes i øvre lag, men ferskvannstilførselen til Sandsfjordsystemet førte her til lave konsentrasjoner i de øverste 5-8 m (Fig. 56).



Figur 56. Vertikalfordeling av mesoplanktonbiomasse i Hylsfjorden og Jøsenfjorden, juli-august 1989.

Ferskvannstilførselen til fjordsystemet varierte kraftig gjennom toktperioden i juli/august, og dette påvirket finfordelingen av plankton.



Figur 57. Vertikalfordeling av mesoplanktonbiomasse i Hylsfjorden før (29. juli) og under (30. juli) store utslipp av ferskvann fra kraftverket i Hylen.

Av Fig. 57 fremgår det at den utovergående brakkvannsstrømmen som ble drevet av utslippene fra Hylen fører til en dypere biomassefordeling gjennom Hylsfjorden.

Horisontal fordeling

Ved å kombinere Juday-trekkene fra ulike stasjoner i Sandsfjordsystemet og ytre områder får vi et grovt uttrykk for hvordan planktonmengdene varierer mellom fjordene og over tid (Tabell 6.). Biomassen avhenger av bunn-dypet, og for å redusere denne effekten er stasjoner grunnere enn ca. 300 m utelatt.

Tabell 6. Gjennomsnittlig biomasse pr. m² overflate fra Juday-prøver i Sandsfjordsystemet (Stn. 53, 55, 58, 63 og 64) og i ytre områder (Stn. 70, 83 og 85) ved ulike tokt.

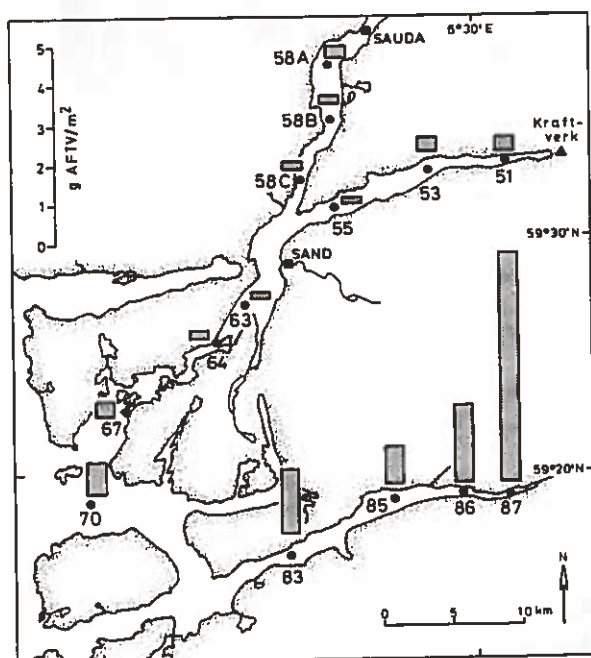
Tøkt	Biomasse (g AFTV/m ²)	
	Sandsfjordsyst.	Ytre omr.
Oktober 1987	6.8	23.5
November "	4.4	13
Februar 1988	1.5	3.7
Juni "	5.8	15
Oktober "	3.8	16
April 1989	3.6	11
Juli "	3.6	13

Som gjennomsnitt for alle prøvene var planktonmengdene i ytre områder ca 3 ganger større enn i Sandsfjordsystemet. Den laveste biomassen ble funnet om vinteren. Mellom de

andre innsamlingsperiodene var det relativt små variasjoner i den totale planktonmengden i fjordbassengene.

Finskala fordeling

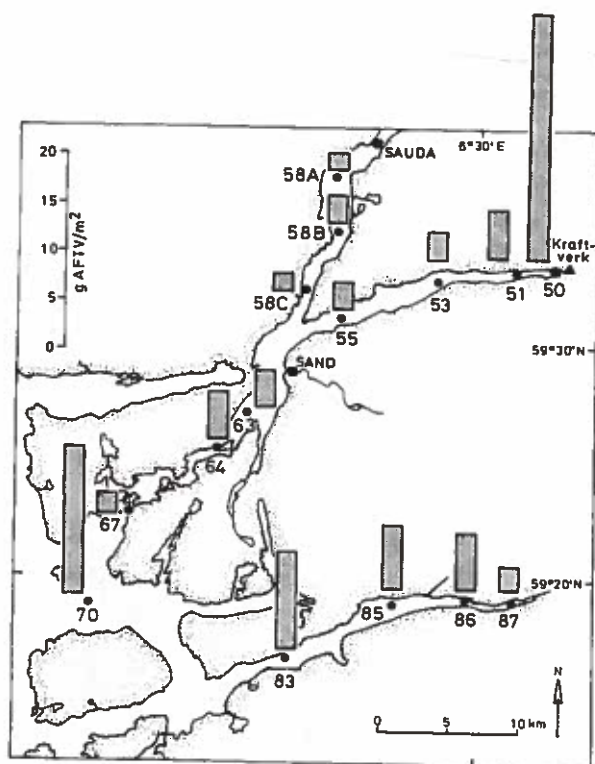
Topografi og strømmer er avgjørende for variasjoner i planktonfordelingen på mindre skala. På grunne stasjoner, der bunn-dypet utelukker overvintrende planktonbestander, kan planktonbiomassen være spesielt lav i perioder der dyrene søker mot dypet for overvintring. Innerst i Jøsenfjorden (stn. 87, 60 m bunn-dyp) var f.eks biomassen i november 1987 ca 5 % av mengden ute i fjordbassenget. Det ble likevel funnet store mengder *Acartia clausi* på denne stasjonen, med konsentrasjoner i de øverste 50 m som var > 100 ganger større enn ute i fjordbassenget. Store mengder *Acartia* ble også funnet innerst i Jøsenfjorden ved de andre toktene. (oktober 1988, april 1989; se Tabell 7., juli 1989). Nettopp det grunne bunn-dypet på denne stasjonen kan være gunstig for denne slekten. I kontrast til forholdene i november ble det funnet høy planktonbiomasse innerst i Jøsenfjorden noen måneder senere (Fig. 58).



Figur 58. Integrert mesoplanktonbiomasse over terskeldyp i Ryfylkefjordene, februar 1988.

I vannmassene over terskelnivå var det i februar 1988 et biomassemaksimum bestående av *Calanus finmarchicus* på Stn. 87. Siden det på denne stasjonen ikke var noen overvintrende *Calanus*-bestand, skyldes konsentrasjonen tilførsel utenfra. Trolig er planktonoppsamlingen knyttet til vinddrevne innstrømninger i øvre del av mellomlaget. Etter Ulla-Førre utbyggingen er det ikke lenger ferskvannstilførsel innerst i Jøsenfjorden, så planktonimporten kan ikke være forårsaket av estuarin sirkulasjon.

Derimot skyldes store planktonkonsentrasjoner som ble funnet innerst i Hylsfjorden i april 1989 (Fig. 59) sirkulasjon drevet av utslippene fra kraftverket, som hadde vært i tilnærmet full drift de foregående månedene. Siden planktonet unnvek det brakke overflatelaget, ble dyrene fanget opp av den inngående kompensasjonsstrømmen.



Figur 59. Integrert mesoplanktonbiomasse over terskeldyp i Ryfylkefjordene, april/mai 1989.

Planktonbiomassen inne ved Hylen var for hele vannsøylen >10 ganger høyere enn ved utløpet av fjordarmen (Fig 59)

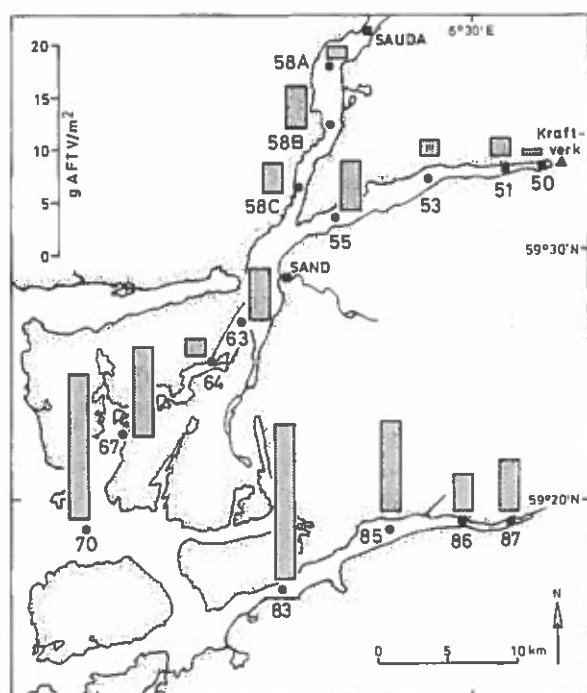
Økningen innover i Hylsfjorden gjaldt alle arter (Tabell 7.), men biomassetoppen kan i hovedsak tilskrives den relativt store *Calanus finmarchicus*. I de øverste 50 m fantes denne arten i ca 50 ganger så store mengder nær kraftverket som lenger ute i Hylsfjorden. Til sammenlikning var det ved dette toktet ingen biomassetopp innerst i Jøsenfjorden (Fig. 59). Dette viser at det i motsetning til i februar ikke foregikk vesentlig vinddrevet inn-transport av plankton. Antallet *C. finmarchicus* var f.eks. lavere innerst i Jøsenfjorden enn lenger ute (Tabell 7.). Imidlertid var det også i Jøsenfjorden enkelte eksempler på betydelig høyere konsentrasjoner inne i fjordbunnen. Dette var mest fremtredende for *Acartia* som ble funnet i store mengder på Stn. 87.

Tabell 7. Planktonfordeling (antall/m³) i Juday-trekk (50-0 m) i Hylsfjorden og Jøsenfjorden i april/mai 1989. Stns. 50 og 87 er lokalisert innerst i fjordene.

Art	Hylsfjorden		Jøsenfjorden	
	Stasjon 53	Stasjon 50	Stasjon 85	Stasjon 87
<i>Calanus finmarchicus</i>	485	24486	1118	784
<i>Pseudocalanus elongatus</i>	16	513	112	38
<i>Paracalanus parvus</i>	8	176	6	22
<i>P-calanus juv</i>	80	641	195	128
<i>Temora</i>	99	7564	42	618
<i>Oithona</i>	1170	3782	634	672
<i>Cyphonautes</i>	2	1026	13	128
<i>Acartia</i>	0	224	91	4701

Noen måneder senere avvek planktonfordelingen i Hylsfjorden markert fra forholdene som ble funnet i april/mai. Ved toktet i juli/august hadde kraftverket vært ute av drift den siste måneden, og de laveste planktonmengdene fantes nå innerst i Hylsfjorden (Fig. 60). Ved oppstartning av kraftverket etter sommerstansen ble det igjen dokumentert at kraftverket kan være en styrende kraft for planktontransporten i Hylsfjorden. Vertikale håvtrekk tatt fra en gummibåt tett inn mot kraftverket før og etter ferskvannsutslippene, viste en kraftig økning i planktonmengden etter noen dagers utslipp fra Hylen (Tabell 8.). Akkumuleringen kan igjen forklares med

planktontilførsel i kompensasjonsstrømmen som ble drevet av utslippene fra Hylen.

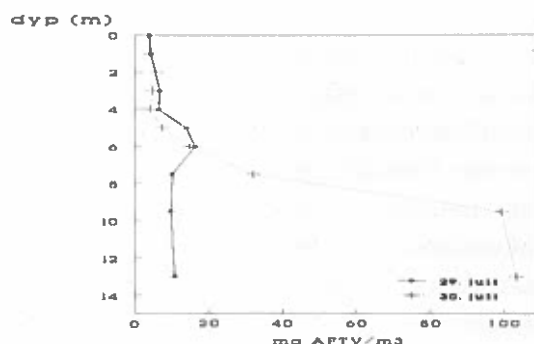


Figur 60. Integrert mesoplanktonbiomasse over terskel-dyp, juli/august 1989.

Tabell 8. Planktonkonsentrasjoner (antall pr. m³) av marine arter i håvtrekk tatt i de øverste 15 m tett ved kraftverket før og etter utslipp fra Hylen sommeren 1989.

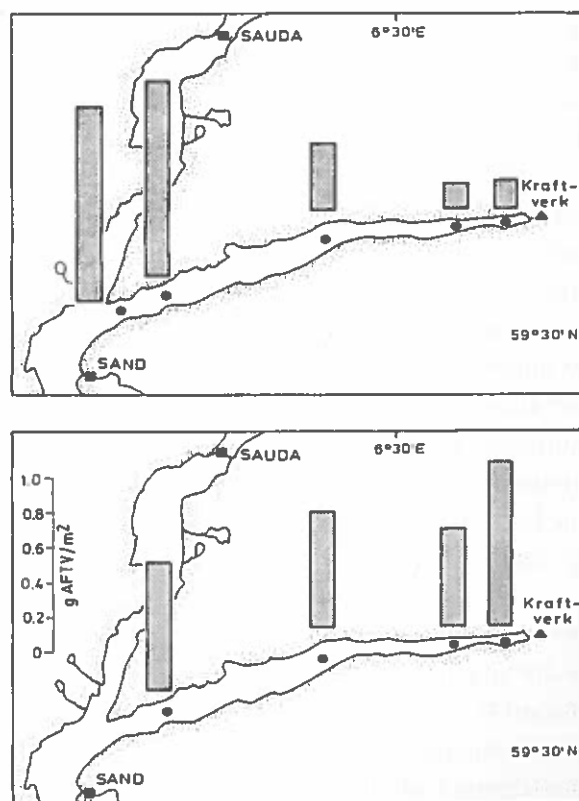
Art	Antall pr. m ³	
	26. juli	3. august
<i>Calanus finmarchicus</i>	1	511
<i>Pseudocalanus elongatus</i>	0	753
<i>Paracalanus parvus</i>	0	1371
<i>Paracalanus juv</i>	0	3446
<i>Microcalanus</i>	0	779
<i>Acartia</i>	41	960
<i>Temora</i>	56	3259
<i>Oithona</i>	150	6208
<i>Oncaea</i>	5	667

Resultatene fra pumpeprøvene, som viste en markert biomasseøkning dypere enn 8 m inne på Stn. 51 døgnet etter oppstartingen av kraftverket (Fig 61), demonstrerer at planktonet ble transportert innover i kompensasjonsstrømmen.



Figur 61. Mesoplanktonbiomasse på Stn. 51 i Hylsfjorden før (29. juli) og etter (30. juli) oppstart av kraftverket i Hylen.

Den ferskvannsdrevne transporten påvirket planktonfordelingen gjennom hele Hylsfjorden. Før oppstart av kraftverket (29. juli) var det nesten 10 ganger større planktonbiomasse i pumpeprøver ved utløpet av Hylsfjorden enn i de indre delene (Fig. 62).



Figur 62. Integrert mesoplanktonbiomasse i Hylsfjorden før (29. juli, øverst) og etter (3. august, nederst) oppstart av kraftverket i Hylen.

Noen dager senere (3. august) var det et maksimum inne i fjorden.

I månedskiftet juli/august var det meget stor ferskvannsavrenning også fra andre kilder enn Hylen (Kaartvedt et al. 1990). Juday-trekk fra de øverste 50 m tatt gjennom hele fjordsystemet i begynnelsen og slutten av toktet viste at planktonbiomassen som et gjennomsnitt for alle stasjonene innenfor terskelen i Sandsfjord-systemet (Stn. 67) var fordoblet etter denne store ferskvannstilførselen. Også denne økingen i fangstene kan skyldes ferskvannsdrevet import fra de større planktonmengdene utenfor fjorden, noe som imidlertid ikke kunne dokumenteres ut fra vertikale biomasse- og strømprofiler ved fjordutløpet.

Kraftverkeksperiment

Ved det eksperimentelle utslippet fra Hylen i oktober 1988 var planktontransporten i Hylsfjorden mindre entydig enn beskrevet ovenfor, og det var indikasjoner på både inntransport og ut-transport. Den vertikale biomassefordelingen på dagtid med maxima sammenfallende med dypet for kompensasjonsstrømmen (Fig. 52) indikerer inntransport, og det ble også observert konsentrasjoner av maneter tett ved kraftverksoverløpet etter kjøringen av kraftverket. Siden det på dette toktet ikke ble tatt prøver innenfor Stn. 51 ble det imidlertid ikke dokumentert hvorvidt det var en akkumulering av andre planktonformer inne i fjordbunnen. For størstedelen av fjordarmen var det ingen biomasseendringer som følge av utslippene. Gjennomsnitt for alle stasjonene var henholdsvis 121 og 132 mg askefri tørrvekt pr. m² før og etter utslippene.

Det var imidlertid endringer i antallet av enkelte av de marine artene som fantes i øvre lag (Tabell 9.), og det ble funnet indikasjoner både på inntransport og ut-transport. Det var f.eks en nedgang i antallet *Pseudocalanus elongatus* (som var knyttet til de øvre metrene gjennom hele forsøket), og det synes å ha vært en netto ut-transport av denne arten med brakkvannsstrømmen. For hele Hylsfjorden ble antallet redusert med ca 40 % i løpet av forsøket.

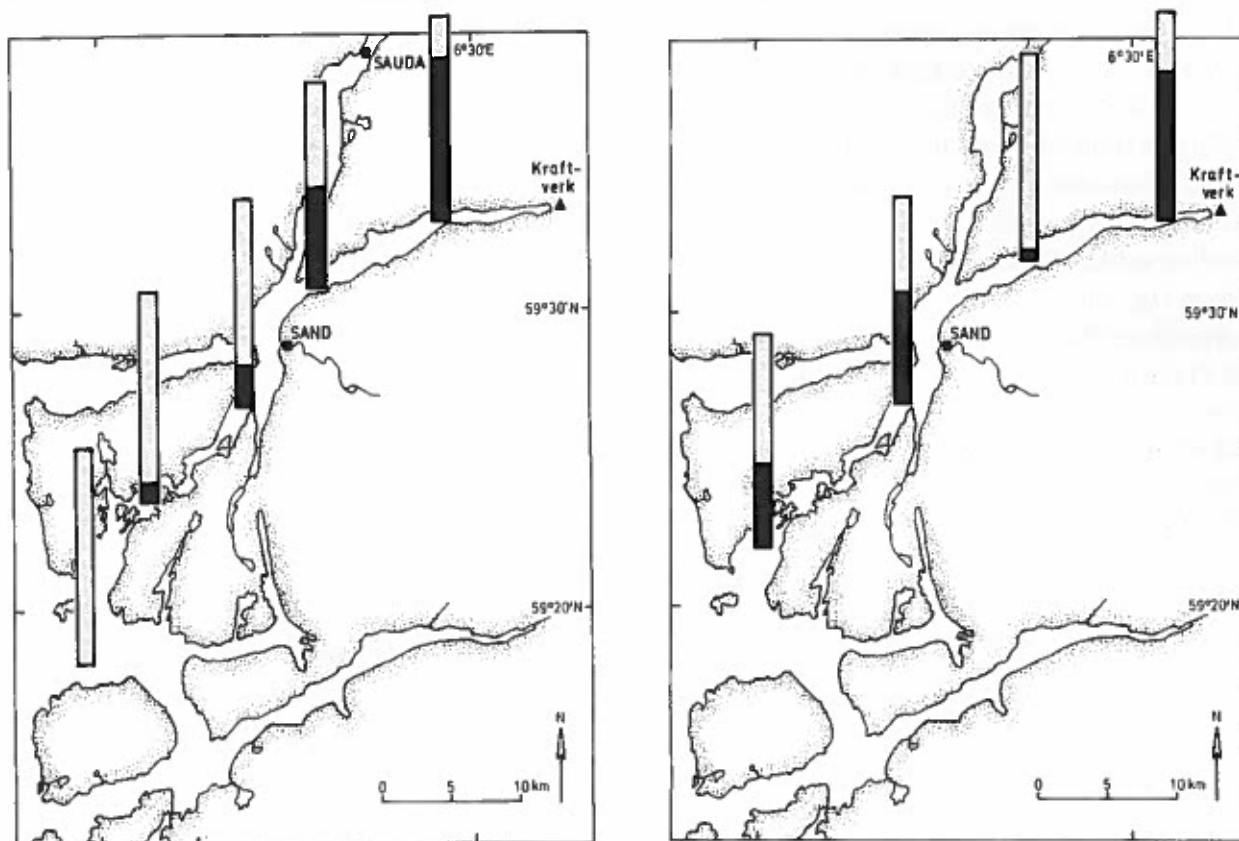
På den annen side syntes det å ha vært en inntransport av *Paracalanus parvus* (som hadde maksimum i kompensasjonsstrømmen), mens antallet av andre arter var relativt konstant. Sammenlignet med vår- og sommerinnsamlingene har ut-transport trolig vært mer fremtredende ved dette høsttoktet, fordi relativt høye saltholdigheter i overflatelaget under kjøringen av kraftverket i oktober har redusert brakkvannslagets betydning som en fysisk barriere mot oppoversvømming. Tildels høye fangster i øvre lag om natten for flere arter (som imidlertid ble tatt da strømmene var svakere etter stopp av kraftverket) kan ha motvirket inntransporten som foregikk i dagslys. Sammen med betydelige konsentrasjoner nær sprangsjiktet, der strømhastighetene er på et minimum, kan dette ha redusert netto transportrater for mange av de marine artene.

Tabell 9. Gjennomsnittlig antall av marint plankton (pr. m² i de øvre 20 m) i indre deler (Stn. 51 og 53) og ytre deler (Stn. 55) av Hylsfjorden før og etter utslipp fra Hylen i oktober 1988 (enveis ANOVA på log-transformerte data, *: p<0.05, **: p<0.01, ***: p<0.001).

Taxon	Indre deler		Ytre deler	
	før	etter	før	etter
<i>Calanus finmarchicus</i>	223	210	412	359
<i>Paracalanus parvus</i>	177	278*	348	416
<i>Pseudocalanus elongatus</i>	133	107	124	34***
<i>Paracalanus</i> juv	5025	478	95	584*
<i>Microcalanus</i> spp	109	98	117	79
<i>Metridia lucens</i>	290	273	136	85
<i>Acartia clausii</i>	2100	2603	2625	2698
<i>Oithona similis</i>	9506	11326	14754	6964***
<i>Microsetella norvegica</i>	402	305	274	552*
Nauplier	281	177	408	281
<i>Cyphonautes</i>	146	119	143	61*
<i>Fritillaria borealis</i>	159	31***	24	69**

Planktondødelighet forårsaket av ferskvannsutslipp?

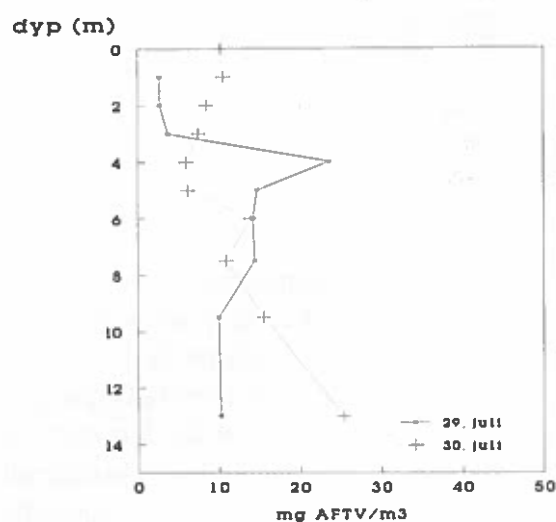
I slutten av juli 1989 ble det funnet mye dødt plankton i Hylsfjorden (Fig. 63), med den høyeste dødeligheten nærmest Hylen. Det ble på denne tiden ikke registrert dødt plankton utenfor fjordsystemet. Observasjonene av dødt plankton falt sammen både med at giftalgen *Prymnesium parvum* forårsaket fiskedød og med store ferskvannsutslipp til fjordsystemet



Figur 63. Prosent dødt dyreplankton (svarte deler av søylene) i de øvre 10-15 m 30. juli (venstre del av figuren) og 15. august (høyre del av figuren)

(Kaartvedt et al. 1990). Det ble antatt at den observerte dødeligheten av plankton enten skyldtes tilstedeværelsen av *P. parvum* eller ferskvannstilførselen. Siden algen forekom i brakkvannet var det vanskelig å skille mellom disse faktorene. Forsøk utført ved varierende saltholdigheter uten alger, viste at de undersøkte copepodene døde i løpet av 6 min. ved saltholdigheter under 12 (Kaartvedt et al. 1990). Det ble dannet utposninger på planktonet ved eksponering for det brakke vannet. Tilsvarende utposninger ble funnet hos mange av de døde individene fra Hylsfjorden.

Neddreping av marint plankton i blandingssonen ved kraftverksutslippet er en mulig forklaring på den observerte dødeligheten. NærsonEBlandingen ved de store ferskvannsutslippene fra Hylen var svært kraftig (Kaartvedt et al. 1990), og blandingen hadde også en markert effekt på den vertikale fordelingen av dyreplankton innerst i Hylsfjorden (Fig. 64).



Figur 64. Vertikalfordeling av mesoplanktonbiomasse i blandingssonen tett ved kraftverket i Hylen før (29. juli) og under (30. juli) drift.

Mens planktonet før utslippene i hovedsak unnvek det brakke overflatelaget samtidig som det var et maksimum i sprangsjiktet, ble denne fordelingen brutt ned ved den kraftige vertikale blandingen som ble satt igang ved ferskvanns Arter som i utgangspunktet fantes i vannmasser med en saltholdighet på ca 30 ble blandet opp i øvre lag, som i blandingsonen utenfor kraftverkstunnelene hadde en saltholdighet på ca 18 (Tabell 10.).

Tabell 10. Planktonsammensetning i den øverste meteren på Stn 50 før og etter utslipp fra Hylen, juli 1989. *Bosmina* og *Cyclops* er ferskvannsarter.

Taxon	29. juli	30. juli
<i>Calanus finmarchicus</i>		125
<i>Pseudocalanus elongatus</i>		193
<i>Paracalanus parvus</i>		136
<i>P-calanus</i> juv		734
<i>Acartia</i>	1	380
<i>Eurytemora affinis</i>	39	25
<i>Temora</i>		229
<i>Oithona</i>	10	1126
<i>Oncaea</i>		50
<i>Podon</i>	4	152
<i>Evadne</i>	2	59
<i>Bosmina</i>		242
<i>Cyclops</i>		226
<i>Harpacticidae</i> cop.		1085
Nauplier	27	351
<i>Oikopleura</i>		52
<i>Centropages</i>		63
Bryozolarver		50
Meduser		11
Sneglelarver		122
Skjelllarver		430
Pigghudlarver		9
Børstemarklarver		20

Vi kan skissere følgende forklaringsmodell: Plankton som unnviker lave saltholdigheter transporteres innover i kompensasjonsstrømmen og blir blandet opp i brakkvannslaget innerst ved kraftverket, hvor det blir drept av osmotisk stress. Dødt plankton vil i varierende grad synke ut av vannsøylen eller transporteres utover med ferskvannsdrevne strømmer.

Vi har beregnet at den døgnlige inntransporten av plankton med kompensasjonsstrømmen i perioden med størst ferskvannstilførsel utgjorde ca 3 tonn askefri tørrvekt, som tilsvarer ca 25% av den totale dyreplanktonmengden i

de øverste 50 metrene i Hylsfjorden før ferskvannsutslippene startet. Denne forklaringsmodellen antyder at ferskvannsforårsaket dødelighet kan spille en avgjørende rolle for planktonodynamikken i fjordsystemet. Store mengder dødt plankton (*Calanus finmarchicus*) er tidligere observert i indre deler av Masfjorden, der det også er betydelige ferskvannsutslipp (Wiborg, upublisert).

6.2.3 Krill

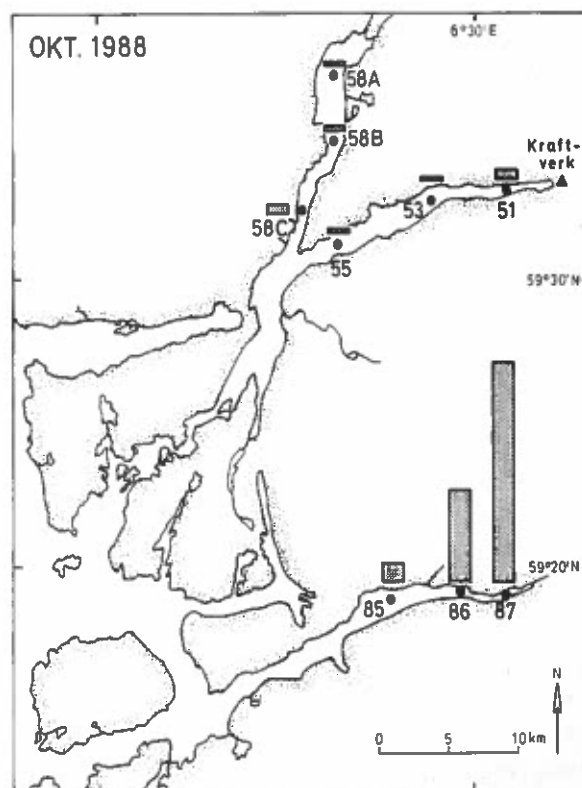
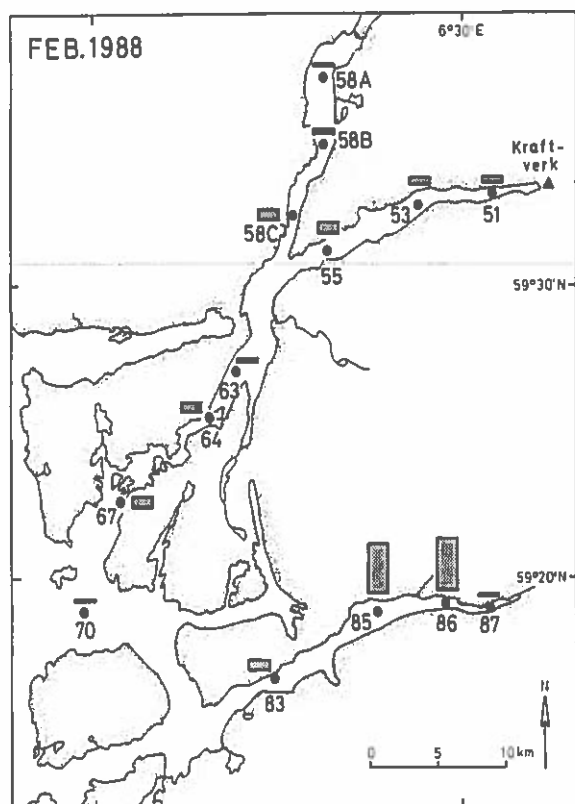
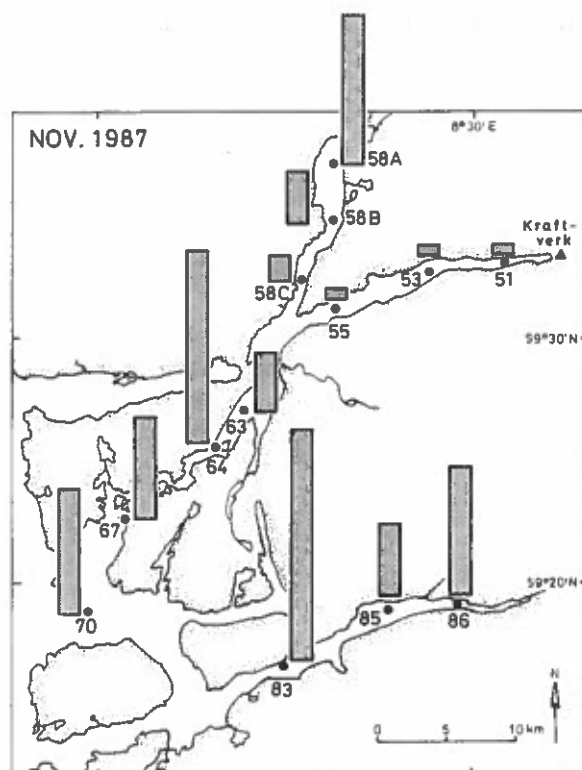
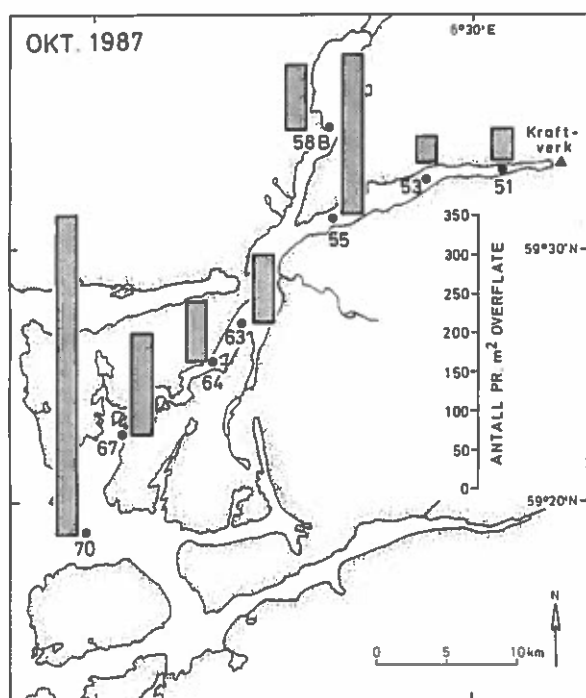
Meganyctiphanes norvegica var den vanligste krillarten. I tillegg forekom en del *Thysanoessa raschii*, hovedsakelig i Jøsenfjorden. Krill er undersøkt i prøvene fra oktober og november 1987, og februar og oktober 1988. Nesten hele populasjonen av de to krillartene ble om natten funnet i de øverste 110 m (Tabell 11.), og beregninger av totalmengde er basert på trekk fra 110-0 m.

Tabell 11. Andel av fangstene av *Meganyctiphanes norvegica* tatt over 110 m (terskeldypet i Sandsfjorden)

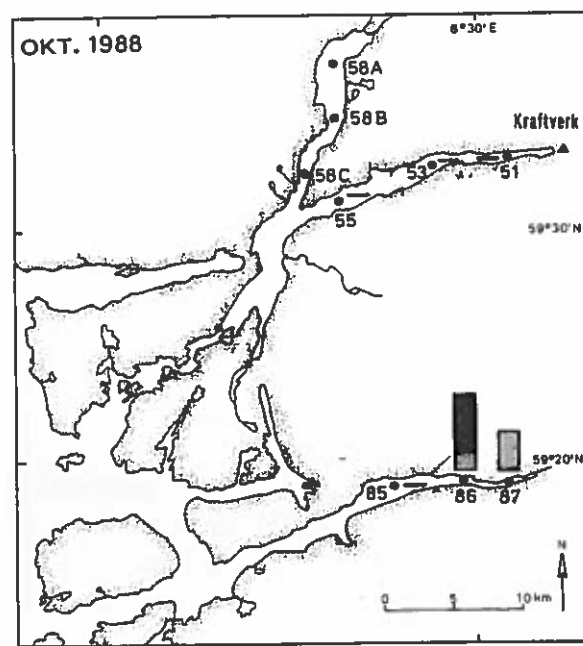
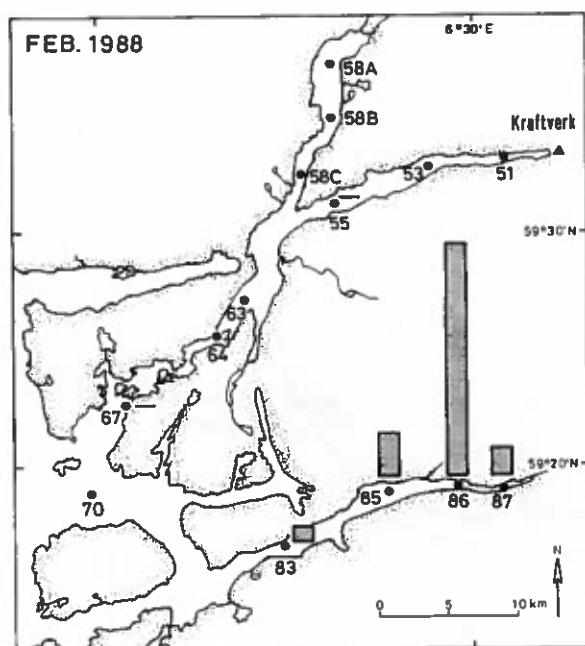
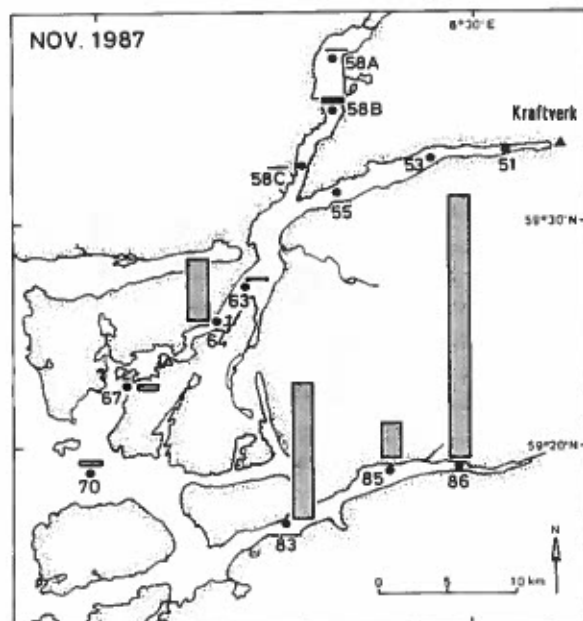
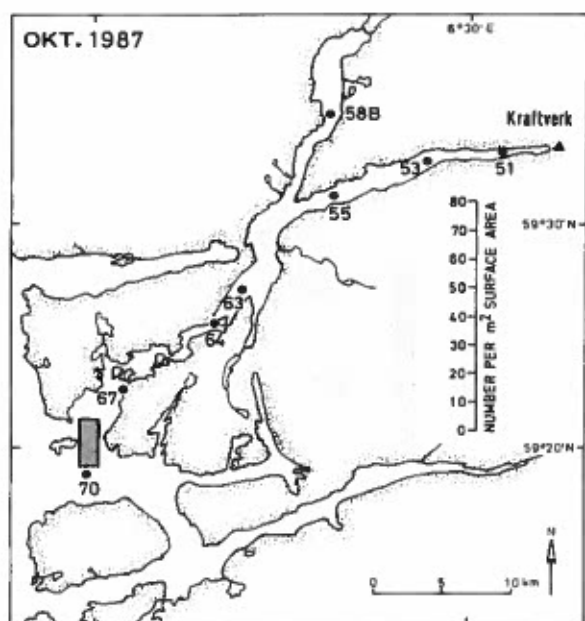
Tøkt		Antall trekk		% over 110 m	
		Dag	Natt	Dag	Natt
Okt.	1987	3	3	88	99
Nov.	1987	0	3	-	87
Feb.	1988	4	3	23	87
Okt.	1988	2	1	17	100

Utbredelse

Begge krillartene fantes i størst mengder i Jøsenfjorden (Fig 65, 66). Dette var mest fremtredende for *T. raschii*, som, nesten ikke ble fanget i Sandsfjordsystemet (ett unntak). *T. raschii* ble alltid funnet i størst mengder på Stn 86 (Fig 66). Det var ikke noe tilsvarende konsistent mønster i fordelingen av *M. norvegica* gjennom de 4 toktene (Fig 65). Maksimum og minimum av denne arten ble funnet på ulike stasjoner, og det var også stor forskjell i mengden i Sandsfjordsystemet mellom høsten 1987 og 1988. Et fremtredende trekk, som trolig kan knyttes til ferskvannsutslippene fra Hylen, var de lave fangstene i Hylsfjorden i november.



Figur 65. Horisontalfordeling av *Meganyctiphanes norvegica*



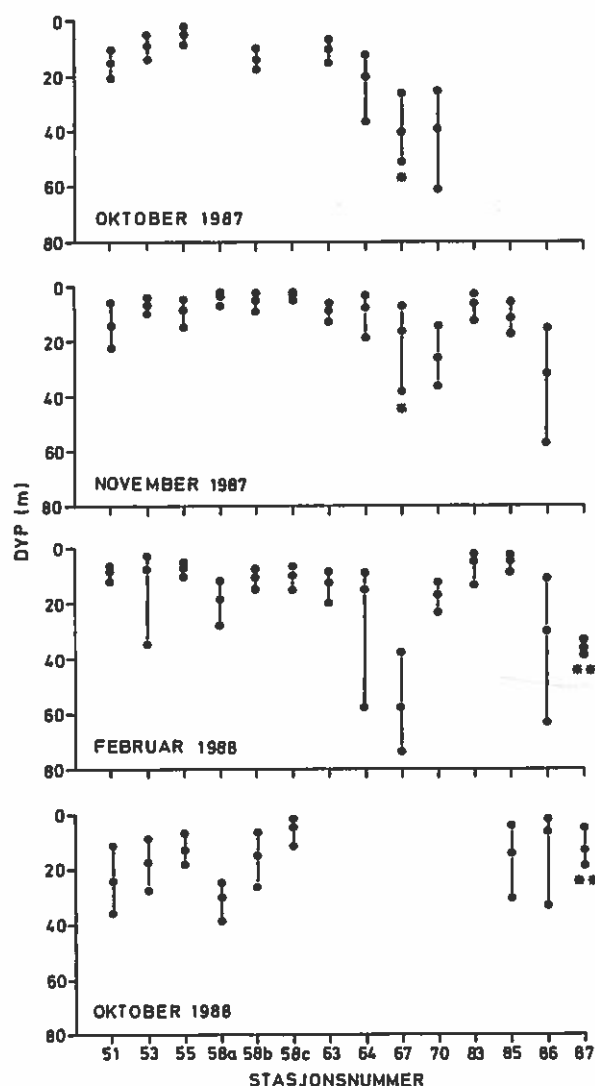
Figur 66. Horisontalfordeling av *Thysanoessa raschii*.

Vertikal fordeling

Om natten ble *M. norvegica* i hovedsak funnet over terskeldyp (87-100 %; Tabell 11.) og gjerne nær overflaten (Fig 67). Grunneste nattfordeling ble funnet i Saudafjorden i november 1987 da 75% av fangstene ble tatt i de øverste 10 m. Ved innløpet til Sandsfjorden og innerst i Jøsenfjorden sto *M. norvegica* noe dypere enn på andre stasjoner.

Selv om *M. norvegica* gjennomgående søkte høyt opp i vannmassene i Sandsfjordsystemet, var det klare indikasjoner på at arten holdt seg under de øverste metrene med brakkvann. I februar 1988 var det lave fangster i 5-0 m intervallet i 7 av 8 tilfeller, mens høye fangster ble tatt i dette intervallet i Jøsenfjorden. Også trekk fra overflaten i oktober 1988 viste at

M. norvegica svømte helt til overflaten i Jøsenfjorden, som ikke hadde et distinkt overflate-lag, men unngikk brakkvannslaget i Sandsfjordsystemet.

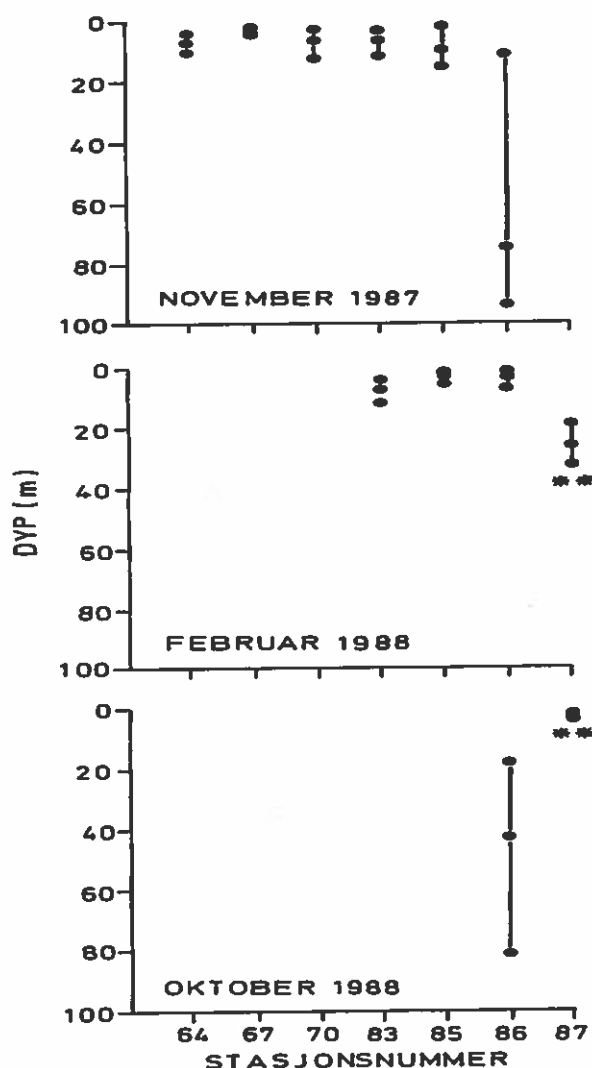


Figur 67. Vertikalfordeling om natten (110 - 0m) for *Meganyctiphanes norvegica*. Henholdsvis 25%, 50% og 75% av fangstene ble fanget over det øverste, det midterste og det nederste punktet.

Krill er i stand til å se og unngå plankton-trålen i dagslys, og det ble tatt relativt lave fangster på dagtid. Hovedtrekkene i dagfordelingen kan imidlertid antydes. I oktober 1987 ble størstedelen av dagfangstene tatt over terskeldypet (Tabell 11.). En forholdsvis grunn fordeling på denne tiden ble også bekreftet fra innsamlinger mellom 110-0 m. Tilsvarende var

det i november 1987 relativt høye dagfangster i prøvetaking over terskeldyp. Det ble ikke tatt dype prøver i dagslys i november 1987. I februar og oktober 1988 tilbrakte *M. norvegica* dagtiden under terskeldypet.

T. raschii svømte vanligvis mot overflaten om natten (Fig. 68). Dette var mest fremtredende i november 1987, da de største fangstene ble tatt i 5-0 m intervallet i 6 av de 10 prøveseriene som inneholdt fangster av arten. Også *T. raschii* endret dybdefordeling og sto dypere innerst i Jøsenfjorden. Fangstene av *T. raschii* var for lave til å fastslå fordelingen i dagslys.



Figur 68. Vertikalfordeling om natten (110 - 0 m) for *Thysanoessa raschii*. Henholdsvis 25%, 50% og 75% av fangstene ble tatt over det øverste, det midterste og det nederste punktet.

6.3 Biologiske modeller

To biologiske modeller er benyttet. Modell I bygger på den fysiske modellen beskrevet i punkt 5.3. I modellen inngår næringssalter og planteplankton som tilstandsvariabler. Den modellerte algeproduksjonen er temperatur-, lys- og næringssaltavhengig. På samme måte som i den fysiske modellen er tilstandsvariablene fordelt i to romlige dimensjoner. Den ene aksen representerer dypet, mens den andre representerer fjorden fra terskelområdet til innerste del av Saudafjorden og Hylsfjorden. En simulering krever at data for temperatur, vertikal og horisontal transport skapes av den fysiske modellen. Modell I er benyttet til å simulere kortere perioder (<20 dager), og den er egnet til å analysere korttidseffekter av ferskvannsutslipp med hensyn på algeproduksjon og romlig fordeling av alger og næringssalter. Resultatene fra to simuleringsperioder er gjen-

gitt. Hensikten med den første simuleringen er å vurdere i hvilken grad modellen gjenskaper virkeligheten, og vi har derfor simulert en periode (22.-29. februar 1988) med relativt god oppløsning i målte data for næringssalter og algebiomasse. Den andre simuleringen representerer en tenkt sommersituasjon hvor et ferskvannsutslipp på 300 m³/s i Hylen startes opp. Denne simuleringen illustrerer hvordan to fiskeoppdrettsanlegg og ferskvannstilførselen innvirker på algeproduksjonen i Hylsfjorden om sommeren.

Modell II er benyttet for å analysere effekten av ferskvannsutslipp på produksjonsforholdene over en lengre tidsskala (ett år). I tillegg til primærprodusenter (planteplankton) omfatter modellen tilstandsvariable som representerer flere sekundærprodusenter (dyreplankton) og flere grupper tertiærprodusenter (dyreplankton-

Tabell 12. Tilstandsligninger i den biologiske modellen. F_{xz} : næringssalttilførsel fra ferskvannsutslipp/ fiskeoppdrettsanlegg, μ : maksimal veksthastighet hos planteplankton ved 0 °C, k_1 : temperaturavhengig veksthastighet, k_2 : halvmetningskonstant for næringssaltopptak, I_{opt} : optimal lysstråling for algevekst, r : ekskresjonshastighet ved 0 °C, k_3 : temperaturavhengig ekskresjonshastighet, s : planktonalgenes synkehastighet, k_4 og k_5 : konstanter som angir lyssvekking fra henholdsvis vann og alger, og I_0 : lysstråling ved overflaten.

$$\frac{\delta N}{\delta t} = -w \frac{\delta N}{\delta z} - u \frac{\delta N}{\delta x} + \frac{\delta}{\delta z} (K_v \frac{\delta N}{\delta z}) + F_{xz} - \mu e^{\frac{k_1 T}{N+k_2}} \frac{I_z}{I_{opt}} e^{(1-I_z/I_{opt})} P + r e^{\frac{k_3 T}{N+k_2}} P$$

$$\frac{\delta P}{\delta t} = -(w+s) \frac{\delta P}{\delta z} - u \frac{\delta P}{\delta x} + \frac{\delta}{\delta z} (K_v \frac{\delta P}{\delta z}) + \mu e^{\frac{k_1 T}{N+k_2}} \frac{I_z}{I_{opt}} e^{(1-I_z/I_{opt})} P - r e^{\frac{k_3 T}{N+k_2}} P$$

$$I_z = I_0 e^{-\int_0^z (k_4 + k_5 P) dz}$$

etende fisk). Modellen er ikke romlig oppløst og simulerer de totale produksjonsforholdene i Sandsfjordsystemet. Resultatene fra tre simuleringer er gjengitt: En med "normal" (før utbygging) ferskvannsavrenning til fjordsystemet, en med økt ferskvannsavrenning (200 m³/s) og en uten ferskvannsavrenning.

I modell I simuleres næringssalt- (N) og planteplanktonkonsentrasjonene (P) av tilstandsligningene i Tabell 12..

Horisontal hastighet, vertikal hastighet og temperatur overføres fra den fysiske modellen for hver simulerte time. Overflateløst kan enten leses inn som målte verdier eller genereres av en rutine som beregner lys på bakgrunn av lengde- og breddegrad og statistiske data for skydekke.

Transporten av næringssalter og planteplankton er numerisk behandlet på samme måte som transporten av salt og varme (se s. 26).

I simuleringen som representerer perioden 22.-29. februar 1988 er initialverdier og grenseverdier for næringssalt og planteplankton (terskelområdet og ferskvannskilder) basert på målte data. Da modellens romlige grid inneholder langt flere punkter enn vi har målepunkt ble lineær interpolering benyttet i punktene uten målinger. I den andre simuleringen (hvor ferskvannsutslippet startes om sommeren) er modellen, i perioden før utslipp, integrert inntil en stasjonær tilstand i fordeling av næringssalt- og planteplanktonkonsentrasjoner ble fremskaffet.

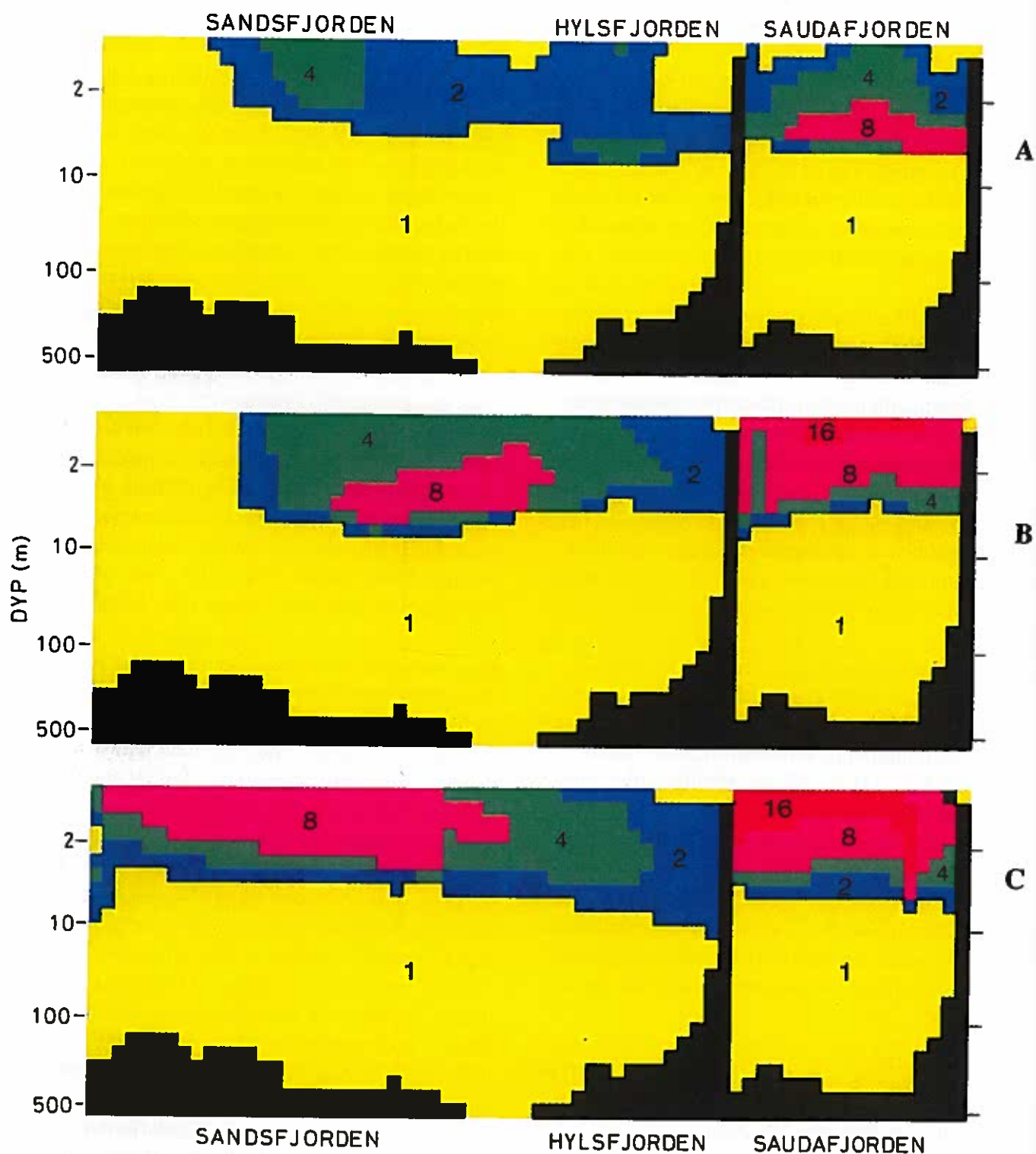
Modell II er beskrevet av Giske et al. (1991) og Aksnes & Giske (1989). Modellen er opprinnelig utviklet for Masfjorden i Nordhordland, men den er generell og kan rent teknisk tilpasses en hvilken som helst fjord. Drivkreftene i modellen er lys, ferskvannsavrenning og transport over fjordterskelen. Disse størrelsene må oppgis for simuleringsperioden. Sentrale topografiske størrelser i modellen er tverrsnittsarealet over terskelen (fjordens åpning) og vannvolum over og under terskeldyp. Disse størrelsene er avgjørende

for fjordens vannfornyingsgrad og i hvilken grad prosessene og produksjonen i fjorden er styrt lokalt eller av ytre faktorer. Ytre faktorer er foruten mellomlagstransport representert av grenseverdier (fjordterskelverdier og elveavrenningsverdier) fornæringssalt, planteplankton og dyreplankton. I de tre ettårssimuleringene som er presentert er ferskvannsavrenningen variert. Komplette datasett for de øvrige drivkreftene og grensebetingelsene er ikke mulige å frambringe, og disse er derfor representert ved "typiske" verdier basert på enkeltstående målinger i vestnorsk kystfarvann (Aksnes et al. 1988).

6.3.1 Simuleringsresultater - Modell I

Den første simuleringsperioden representerer tidsrommet 22. februar - 29. februar 1988. Figur 69A viser målte algemengder i Sandsfjorden, Hylsfjorden og Saudafjorden den 22. februar 1988, mens figur 69B viser målte algemengder seks døgn senere (28. februar).

De observerte næringssaltmengdene og algemengdene den 22. februar ble benyttet som startverdier for simuleringsmodellen. Resultatet av seks døgns simulering med realistiske drivkrefter (vind, vannstand, ferskvannstilførsel og lys) er vist (Fig. 69C). Ved å sammenligne de simulerte verdiene (Fig. 69C) med de observerte verdiene (69C) får en et inntrykk av realismen i simuleringen. Vi ser at både målte og simulerte verdier angir at de høyeste algekonsentrasjonene i Saudafjorden har "flyttet" seg opp til overflaten i løpet av seks døgns perioden. I Hylsfjorden er det også relativt godt samsvar mellom målte og simulerte verdier. Algekonsentrasjonene er sammenlignbare og konsentrasjonsmaksimum strekker seg som en tunge fra Sandsfjorden og inn i Hylsfjorden i begge tilfeller. Både simuleringen og målingen angir at blomstringen i Sandsfjorden er kommet godt i gang, men de simulerte maksimumskonsentrasjonene finnes 2-3 m grunnere enn måldataene indikerer. Videre strekker det simulerte algebeltet seg lenger ut i fjordsystemet enn målingene viser.



Figur 69. Sandsfjordssystemet: målt algebiomasse (mg kl. a/m^3) 22. februar (A) og 28. februar (B) 1988, og simulert algebiomasse for 28. februar 1988 (C). Merk ikke-lineær dybdeskala.

Den gjennomsnittlige simulerte bruttoproduksjonen i fjordsystemet varierte mellom 280 og 500 mg C/m²/d i simuleringsperioden. ¹⁴C-målingene som ble utført ytterst i Hylsfjorden (Stn. 55) og i Saudafjorden (Stn. 58B) ga en produksjon på henholdsvis 200 og 352 mg C/m²/d.

Det mest påfallende avviket mellom simulerte og målte data var de relativt høye algemengdene som ble simulert nær overflaten ytterst i Sandsfjorden, mens algemengdene i Saudafjorden, Hylsfjorden og indre deler av Sandsfjorden må sies å være tilfredstillende gjengitt av modellen. Avviket ytterst i Sandsfjorden har sannsynligvis sammenheng med at modellens representasjon av fjordens utløp og grensebetingelser (mot Boknafjorden) ikke er tilfredsstillende. De simulerte resultatene er ikke forsøkt tilpasset de målte dataene ved "tuning" eller annen form for tilpasning. Simulerte produksjonsverdier og algekonsentrasjoner kan betraktes som en transformering av de innleste dataene (drivkreftene) for ferskvannsavrenning, vind, vannstand og lysinnstråling. Det må også nevnes at en rekke forhold omkring måledataene kan påvirke uoverensstemmelsene mellom simulerte og målte data. De viktigste er:

a) Algemengdene er målt i klorofyll, mens modellens egentlige biomasseenhet er nitrogen. Et fast nitrogen klorofyll-forhold må antas for målingene. Dette forholdet kan være sterkt lysavhengig (lite lys stimulerer klorofylløkning i cellene). Ideelt sett skulle derfor biomassemålingene vært utført i form av atomært nitrogen (eller fosfor), men denne analysemetoden er kostbar og tidkrevende i forhold til klorofyll-målinger.

b) Mens modellens simuleringsverdier (Fig. 69C) representerer et bestemt tidspunkt (kl. 12) er målingene (Fig. 69A og 69B) utført i løpet av ett døgn. Den romlige oppløseligheten av målingene er langt dårligere enn den som inngår i simuleringsmodellen (de øverste 6

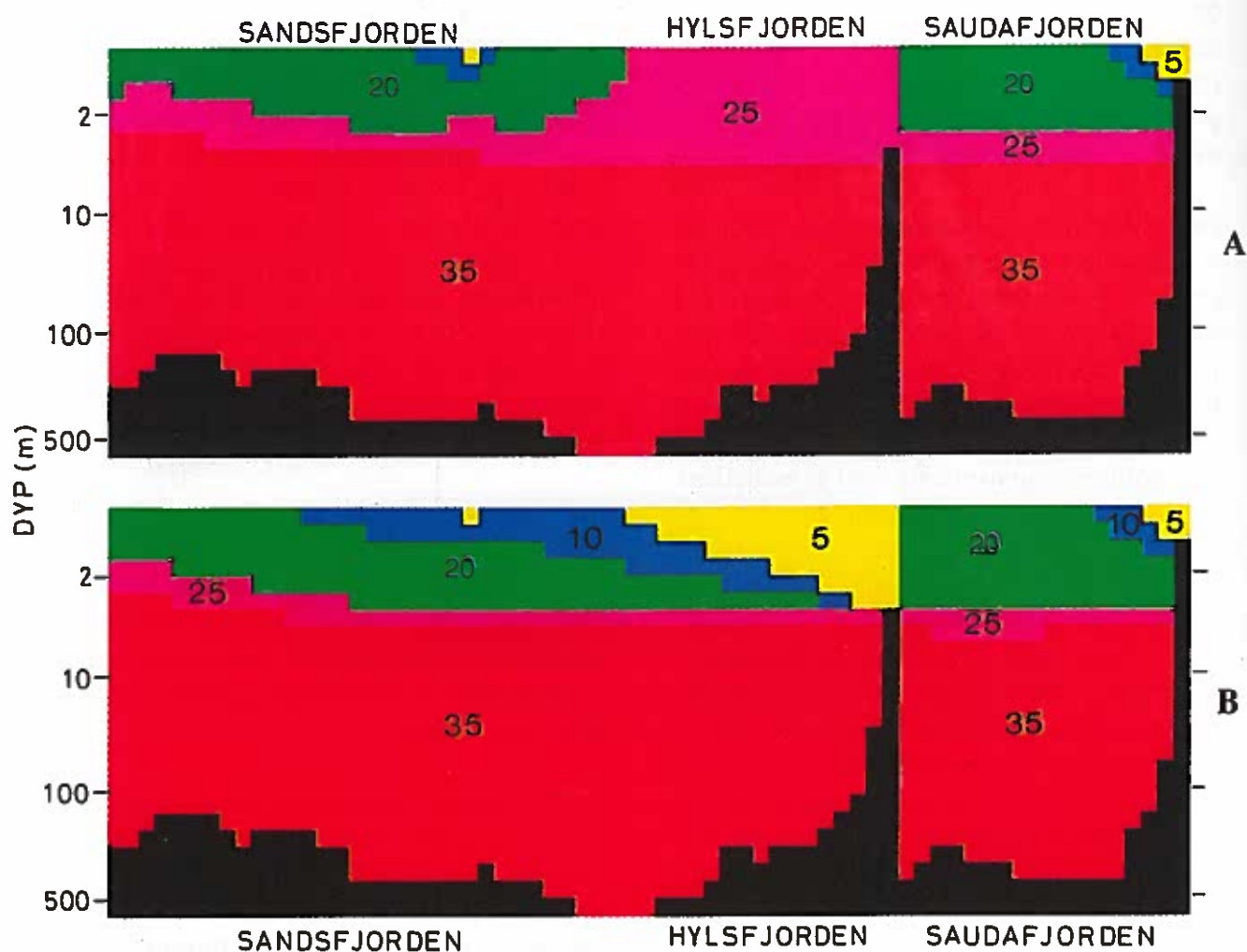
cellene i Fig. 69 representerer de øverste tre meterne), og måledataene måtte interpoleres både vertikalt og horisontalt for at Fig. 69A og 69B kunne produseres.

Den andre simuleringsperioden representerer en sommersituasjon når et utslipp på 200 m³/s startes opp i Hylen. Modellen gir saltholdigheter i Hylsfjordens overflatelag mellom 20 og 25 før utslippene i Hylen startes, mens saltholdigheten i Saudafjorden og Sandsfjorden er lavere som følge av ferskvannstilførselen i Sauda (60 m³/s) og Sand (100 m³/s). Disse ferskvannskildene sees som gule felter på Fig. 70A (saltholdighet < 5).

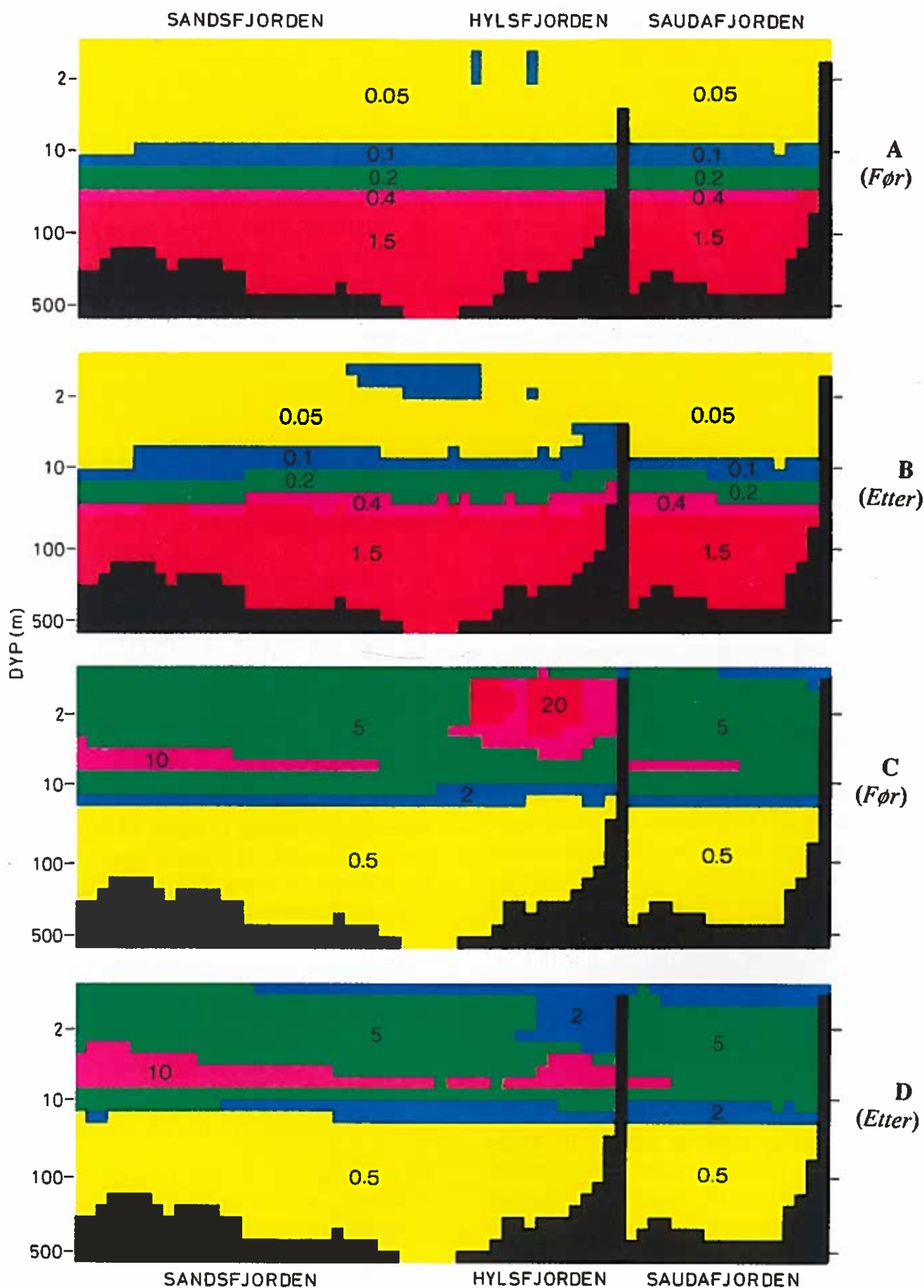
Etter at utslippene i Hylen (300 m³/s) har pågått i en uke har Hylsfjorden den laveste overflatesaltholdigheten (Fig. 70B). Utslippene har også berørt Sandsfjorden som har fått et noe tykkere og ferskere brakkvannslag. Saltholdigheten i Saudafjorden er imidlertid upåvirket av utslippene i Hylen.

Fosfatkonsentrasjonene er lave i hele den eufotiske sonen (Fig. 71A). Saudaelven og Suldalslågen inneholder relativt mye nitrat men er fattige på fosfat. Vannet fra disse kildene kan derfor ikke spores som forhøyete fosfatverdier i Sandsfjordsystemet. Hylsfjorden inneholder to områder (0.5-2 m) med fosfatverdier som er høyere enn omkringliggende vann (blå felter i Fig. 71A og 71B). Dette skyldes to punktutslipp av fosfat (5 kg pr. dag) som er antatt å tilsvare fosforbelastningen fra to fiskeoppdrettsanlegg. Etter at utslippet i Hylen har pågått i en uke (Fig. 71B) er områdene med forhøyete fosfatverdier økt i størrelse. Dette skyldes vanntransporten som settes opp som følge av utslippene i Hylen. Denne transporten bidrar til spredning av fosfat og utvasking av alger, noe som igjen gir mindre algeproduksjon i Hylsfjorden (Fig. 71D).

Den simulerte algeproduksjonen gjenspeiler fosfat-tilgangen. I situasjonen før utslippet er produksjonen høyest i Hylsfjorden (Fig. 71C). Området med forhøyet produksjon (røde felter i Fig. 71C) skyldes de simulerte fosfatutslippene fra fiskeoppdrettsanleggene. Vi ser



Figur 70. Sandsfjordssystemet: simulert saltholdighet med (A) og uten ferskvannsutslipp (B) fra Hylen. Utslippet fra Hylen er satt til $200 \text{ m}^3/\text{s}$, fra Suldalslågen $100 \text{ m}^3/\text{s}$ og fra Saudaelven $60 \text{ m}^3/\text{s}$.



Figur 71. Sandsfjordsystemet: simulert fosfatkonsentrasjon i μM før (A) og en uke etter (B) og algeproduksjon i $\text{mg P/m}^3/\text{m}^2/\text{time}$ før (C) og en uke etter (D) utslipp av $200 \text{ m}^3/\text{s}$ ferskvann i Hylen.

altså at produksjonen er høy selv om fosfatkonsentrasjonene (Fig. 71A) er lave, og at et fosfatutslipp tilsvarende 10 kg pr dag synes å dominere nyproduksjonen av alger i Hylsfjorden om sommeren.

I Sandsfjorden og Saudafjorden er maksimumsproduksjonen (langsgående røde felter) lokalisert dypere enn i Hylsfjorden. Denne produksjonen er basert på fosfat som tilføres nedenfra ved vertikale blandingsprosesser.

Etter at utslippet i Hylen har pågått i en uke er algeproduksjonen i overflatelaget i Hylsfjorden betydelig svekket (Fig. 71D). Dette skyldes at fosfatet fra de simulerte fiskeoppdrettsanleggene og algene selv føres vekk raskere enn de formerer seg. I Sandsfjorden gir imidlertid næringssaltene fra Hylsfjorden opphav til en noe høyere produksjon i 3-4 m dyp. Økt medrivning (som følge av ferskvannsutslippene) av dypereliggende fosfatholdig vann gir opphav til et produksjonsmaksimum i 6-10 m dyp som strekker seg inn i Hylsfjorden (Fig. 71D).

Fig. 72 viser hvordan algekonsentrasjonene i Sandsfjordsystemet utvikler seg fra dagen før utslippet (Dag 0) i Hylen til en uke etter at utslippet startet (Dag 7). I situasjonen før utslippet finner vi, ikke uventet, de høyeste algekonsentrasjonene i Hylsfjorden. Den andre dagen etter utslippet har de høye konsentrasjonene flyttet seg noen kilometer utover i Hylsfjorden og delvis ut i Sandsfjorden. Den femte dagen er overflatelaget i Hylsfjorden nærmest tømt for alger, mens Sandsfjorden har fått økt konsentrasjon. De høyeste konsentrasjonene (røde felt i Fig. 72) er nærmest oppløst og transportert ut av Sandsfjordsystemet den syvende dagen. Etter ca. 10 dager oppstår en ny stasjonær tilstand (ikke vist, men den avviker ikke vesentlig fra dag 7), men nå med et kontinuerlig utslipp på 200 m³/s fra Hylen kraftverk. I denne tilstanden har algeproduksjonen (Fig. 71D) i Hylsfjorden avtatt i forhold til tilstanden uten utslipp (Fig. 71C), og dette gir lavere algemengder i Hylsfjorden (Fig. 72). Algeproduksjonen i Sandsfjorden har økt, men produksjonen eksporteres i stor grad ut av fjordsystemet slik at en ikke får lokal biomasse-

oppbygging tilsvarende den vi ser i Hylsfjorden før utslippet (Fig 72, Dag 0). Forholdene Saudafjorden er stort sett upåvirket av utslippet i Hylen (Fig. 72).

Resultatene fra simuleringene støtter godt opp om konklusjonene som er gitt av Kaartvedt et al. (1990) angående *Prymnesium parvum* blomstringen i juli-august 1989. Det ble her antatt at blomstringen startet i Hylsfjorden i perioden før de store ferskvannsutslippene. Ferskvannsutslippene ble imidlertid antatt å bidra til en spredning av algene. Den simulerte spredningseffekten (Fig. 72) er i god overensstemmelse med tidsforløpet for den observerte spredningen av vannmassene fra Hylsfjorden. Saudafjorden var upåvirket av den simulerte spredningen og også dette faller sammen med observasjonene.

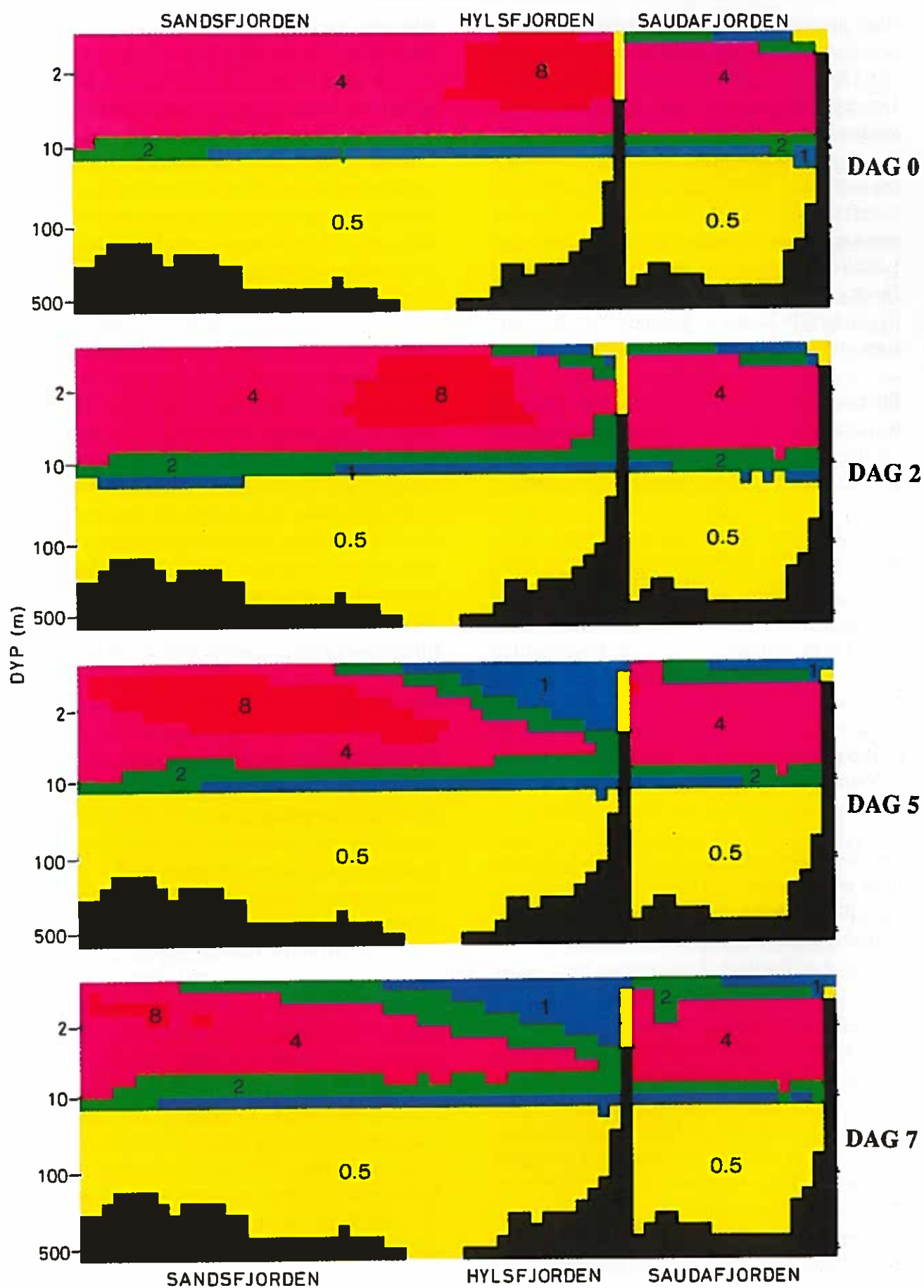
6.3.2 Simuleringsresultater - Modell II

Tre ettårs-simuleringer er utført (Tabell 13. og 14.); en uten ferskvannsavrenning til Sandsfjordsystemet, en med avrenningsverdier som tilsvarer forholdene før vannkraftutbyggingen (II) og en hvor ferskvannstilførselen er økt med 200 m³/s hele året (III).

Næringssaltbudsjettet (i Tabell 13.) tilsier at nitrogentilførselen til eufotisk sone i Sandsfjordsystemet er omkring 2000 tonn nitrogen pr år med naturlig ferskvannsavrenning (II).

Tabell 13. Årlig næringssaltbudsjett (nitrogen) for den eufotiske sonen i Sandsfjordsystemet. I: Ingen ferskvannstilførsel. II: Ferskvannstilførsel som tilsvarer forholdene før vannkraftutbyggingen. III: Ytterligere tilførsel på 200 m³/s.

Kilde	Tonn nitrogen			%		
	I	II	III	I	II	III
Fra ferskvann	0	405	1281	0	100	316
" Boknafjorden	725	725	725	100	100	100
" dypere vann	872	842	756	103	100	90
Total tilførsel	1597	1972	2762	81	100	140



Figur 72. Sandsfjordsystemet: simulert algebiomasse i mg P/m³ før (Dag 0) og de første dagene etter utslipp av 200 m³/s ferskvann fra Hylen.

Med høyeste avrenning (III,) er ferskvannet den dominerende nitrogenkilden (1281 av totalt 2762 tonn nitrogen) for den eufotiske sonen. Det er derfor grunn til å anta at en ekstra ferskvannstilførsel på 200 m³/s vil gripe vesentlig inn i produksjonsstrukturen i fjorden. Næringssaltene i ferskvannet tilføres direkte i overflatelaget der produksjonen finner sted, mens næringssaltene normalt tilføres nedenfra. Lokaliseringen av ny biomasseproduksjon i fjordsystemet vil derfor forflyttes fra dypere-liggende (10-30 m) til grunnere (<5 m) vann som følge av økt ferskvannstilførsel.

Produksjonsøkningen i fjorden som følge av den økte ferskvannstilførselen er omkring 30% i forhold til normal avrenning (Tabell 14.) og 64% i forhold til situasjonen uten avrenning.

Tabell 14.. Årlig simulert totalproduksjon i Sandsfjordsystemet uten ferskvannstilførsel (I), med ferskvannstilførsel som tilsvarer forholdene før vannkraftutbyggingen (II), og med ytterligere tilførsel på 200 m³/s (III).

	Produksjon			%		
	I	II	III	I	II	III
Alger	7260	9170	11969	79	100	131
Dyreplankton	1895	2616	3426	72	100	131
Fisk o.a.	314	437	587	72	100	134

En produksjonsøkning på ca 30% forventes også på de høyere nivåene i næringskjeden (dyreplankton og fisk i Tabell 14.). Det er imidlertid flere ting som sannsynliggjør at dette estimatet er for høyt. Ferskvannet inneholder svært lite fosfat, noe som medfører fosfatbegrenset algevekst i overflatelaget i Sandsfjordsystemet. Dette betyr at det ferskvannstilførte nitrogenet ikke kan nyttes av planteplanktonet før etter en relativt stor innblanding av sjøvann (som har et lavere N/P-forhold), og at deler av nitrattilførselen først kan nyttes utenfor Sandsfjordsystemet. Vi antar derfor at økingen av algeproduksjon i Sandsfjordsystemet som følge av nitratinholdet i ferskvannstilførselen ligger under 30% på årsbasis.

Høyere organismer som fisk vil kunne nyttiggjøre seg økt produksjon på lavere trofiske nivå

slik som modellen beregner, men dette forutsetter at deres livsmiljø ikke forringes. I modellen er miljøet for de høyere organismene upåvirket av ferskvannstilførselen. Ferskvann bidrar imidlertid til miljøforringelse på minst tre måter. Oppvekstvilkårene for en rekke fisk svekkes ved at fastsittende alger (tang og tare), som nyttes som skjulested for småfisk, har dårligere vekstvilkår under forhold med sterk ferskvannspåvirkning. I Masfjorden er det blant annet vist at tangbeltet er svært viktig for produksjonen av ungtorskens fødeorganismer. Ferskvannet hemmer veksten av tang og tare direkte og gir også høy lyssvekkelse, noe som igjen reduserer muligheten for fotosyntese. Det første forholdet gjelder først og fremst overflatelaget hvor ferskvannet er representert, mens lystilgangen vil svekkes i alle dyp både i og under ferskvannslaget. Svekket lys betyr også at fødeinntaket til dyr, som nytter synet (de fleste fisk) til bytte-lokalisering, nedsettes. Et tredje forhold som ikke er innarbeidet i modellen er ferskvannstilførselens mulige neddreping av dyreplankton.

6.4 Diskusjon av marinbiologi

6.4.1 Planteplankton

Brakkvann og våroppblomstring

Sandsfjordsystemet har vært og er et sterkt ferskvannspåvirket fjordområde hvor det hele året ligger et brakt overflatelag av varierende tykkelse og saltholdighet. Dette gir en markert saltholdighetsgradient i det øvre vannlaget mellom 2 og 6 m, noe som medfører at selv om overflatevannet sirkulerer, blander det seg lite med de underliggende vannmassene, dvs. at stabiliteten er høy. Utenfor fjordsystemet og i Jøsenfjorden finns ikke et slikt permanent brakt overflatelag. Tidlig om våren har de øvre 10-15 m der omtrent den samme saltholdighet og hele denne vannsøylen deltar derfor i en sirkulasjonsprosess.

For at alger skal kunne få en netto vekst, krever de i tillegg til ulike næringsstoffer, en viss mengde lys pr. døgn. I følge Parsons et al.

(1977) ligger denne gjennomsnittlige lysstyrken i døgnet på 0.002-0.009 ly/min som tilsvarer 2.8-12.7 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$. En lysstyrke på 100 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ like under overflaten med sol i 7 timer i slutten av februar gir et døgngjennomsnitt på 29.2 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$. Dette medfører at det en solskinnsdag på denne årstiden er tilstrekkelig innstrålt lys like under overflaten til å gi netto produksjon av alger. Næringssalter er heller ikke noen begrensende faktor på denne tiden.

Algene sirkulerer imidlertid med vannmassene. Utenfor fjordsystemet er sirkulasjonen i slutten av februar så dyptgående at planteplanktonet ikke får tilstrekkelig gjennomsnittlig lys i løpet av døgnet til å gi en netto produksjon. Den høye stabiliteten i overflatelaget inne i fjordsystemet medfører imidlertid at planteplanktonet forblir i overflatelaget og blandes ikke ned i de underliggende vannmassene. Det brakke overflatelaget i Sandsfjordsystemet skaper dermed et grunnlag for en tidligere start på vårens oppblomstring av planteplankton enn det som er tilfelle utenfor fjordsystemet.

Næringssalter og algesamfunn i og utenfor Sandfjordsystemet

Forholdet mellom næringssaltene er forskjellig i sjøvann og ferskvann. I fjordvann er forholdet mellom nitrat, fosfat og silikat ca 12:0.8:10 tidlig på våren før algeoppblomstringen har startet. I ferskvannet som tilføres Ryfylkefjordene, er forholdet mellom de samme næringssaltene ca 11:<0.05:14. Brakkvannet i Sandsfjordsystemet påvirkes kraftig av ferskvannstilførselen. Derfor ligger fosfatmengdene i det øvre brakkvannslaget svært lavt (0.1 μM) gjennom store deler av sommerhalvåret. For marint planteplankton er hovedregelen at i vannmasser med fosfatmengder under 0.1 μM er veksten fosfatbegrenset. For silikat og nitrat er hovedregelen at veksten begrenses ved verdier under 1.0 μM . Disse næringssaltene tilføres fjordsystemet fra de ulike ferskvannskildene og blir derfor begrensende kun når ferskvannstilførselen stopper opp.

I første delen av planteplanktonets vekstsesong medfører kjøring av kraftverket i Hylen at næringsrikt vann fra dypere vannlag (kom-

pensasjonsstrømmen) dras opp og blandes sammen med ferskvannet. Spesielt tilføres fosfat på denne måten. Ettersom nærings-saltene under det øvre brakkvannslaget forbrukes av algene, avtar betydningen av næringssaltinnblanding via brakkvannslagets kompensasjonsstrøm.

Om våren domineres algeoppblomstringene av hurtigvoksende diatomeer. Diatomeene krever silisium til dannelsen av kiselskall. Silisium får algene fra silikat i vannmassene. På grunn av store tetthetsgradienter i sprangsjiktet skjer det liten vannutveksling mellom vannmassene over og under dette sjiktet. I kystområdene vil derfor diatomeene i våroppblomstringen tømme vannsøylen over sprangsjiktet for silikat. Dette endrer konkurranseforholdet mellom diatomeer og annet planteplankton i diatomeenes disfavør. Inne i Sandsfjordsystemet forbrukes det også silikat om våren på grunn av diatomevekst, men her fornyes næringssaltet via ferskvann både fra Saudaelven, Suldalslågen og i Hylen. Resultatet er at silikat ikke blir et vekstbegrensende næringssalt så lenge ferskvannstilførselen opprettholdes. I Sandsfjordsystemet er det derfor vanlig å finne et forholdsvis stort antall diatomeer gjennom store deler av vekstsesongen. Når kraftverket i Hylen stanser, blir imidlertid Hylsfjorden en bakevje hvor næringssaltene i vannsøylen, inkludert silikat, raskt forbrukes.

Det næringssaltet som i rent marint miljø normalt blir vekstbegrensende for annet planteplankton enn diatomeer, er nitrat. I Jøsenfjorden og Jelsafjorden fant en da også at vannmassene ovenfor sprangsjiktet var tømt for nitrat ut på sommeren, mens Sandsfjordsystemet hadde rikelig av dette næringssaltet i det øvre brakkvannslaget. Dette har sammenheng med høyt nitratinhold i ferskvannet som tilføres fjordsystemet.

Inne i Sandsfjordsystemet er fosfat det vekstbegrensende næringssaltet for planteplanktonet i det øvre brakkvannslaget, mens utenfor fjordsystemet er det først silikat som begrenser diatomeveksten og deretter nitrat som setter grensen for planteplanktonets vekst.

Artssammensetning

Hyppigheten i prøveinnsamlingen i etterundersøkelsen begrenser muligheten for en vurdering av tidsutviklingen i artssammensetningen gjennom året i de undersøkte Ryfylkefjordene. Likevel er det mulig å sammenligne forekomsten av ulike arter med det som ble funnet i forundersøkelsene i 1972-75.

Våroppblomstringen ble i slutten av februar 1988 dominert av diatomeen *Skeletonema costatum* inne i Sandsfjordområdet. Konsentrasjonen i Saudafjorden var oppe i 19.9 millioner celler pr liter som er over dobbelt så høyt celletall for denne arten i forhold til det som ble funnet maksimalt i Sandsfjordsystemet under forundersøkelsene. I ytre del av Hylsfjorden ble *Skeletonema*-konsentrasjonen i slutten av april 1989 funnet å være 6.8 millioner celler pr liter. I forhold til forundersøkelsene er dette ca 3 ganger så høyt som maksimalkonsentrasjonen i fjordsystemet den gangen. *S. costatum* synes derfor å ha blitt en mer dominerende art om våren nå i forhold til det som var tilfelle innenfor terskelen i 1973-75.

Blant diatomeene er det ellers påfallende at *Chaetoceros compressus* som var en av de viktige artene under forundersøkelsene, ikke ble registrert i etterundersøkelsesperioden hverken i Sandsfjordsystemet eller Jøsen- og Jelsafjorden. I stedet har *C. wighamii* kommet inn som en viktig etterfølger etter *S. costatum* om våren, og som en dominerende art om høsten. At denne arten er å finne i det brakke overflatevannet i fjordsystemet, synes svært naturlig da *C. wighamii* er en vanlig brakkvannsart.

I juli/august 1989 ble det dessuten funnet forholdsvis mye av *C. simplex* var. *calcitrans* og *C. gracilis*. Disse to små *Chaetoceros*-artene er ikke nevnt i artslisten fra forundersøkelsene, mens *C. ceratosporum* angis. Artene er imidlertid vanskelig å skille fra hverandre og for *C. ceratosporum* kreves det at en ser hvilesporer for at en sikker identifikasjon kan foretas. *C. simplex* var. *calcitrans* er imidlertid en art som trives godt i brakkvann.

På samme tid var *Diatoma* sp. en viktig diatome art i Saudafjorden. Slekten *Diatoma* har sin hovedforekomst i ferskvann, men enkelte arter tåler brakkvann med lav saltholdighet. Også *N. "delicatissima"* forekom relativt hyppig. Arten er ikke sjekket i scanning- eller elektronmikroskop, men i forundersøkelsen ble *N. actydropbila* funnet som en vanlig diatome-art i juli, og det er derfor sannsynlig at dette er det riktige artsnavn.

I Jøsenfjorden ble det ikke på noen av toktene i etterundersøkelsen funnet store mengder diatomeer. Tidlig i mai 1989 var det imidlertid 1.2 millioner *Arcocellulus cornucervis* pr liter, men dette er en liten diatome med et lite celle-volum. Det ser derfor ut som om diatome-mengden i dette fjordområdet har avtatt, mens det motsatte har vært tilfelle i Sandsfjord-systemet.

En av de dinoflagellatene som synes å trives bra i det øvre brakkvannslaget i Sandsfjordområdet, er *Katodinium rotundatum*. Arten er da også kjent fra andre brakkvannsområder. I Saudafjorden ble den tidlig i juni 1988 funnet med 1.4 millioner celler pr liter. *K. rotundatum* som er en naken (athecate) dinoflagellat, er ikke nevnt i artslisten fra forundersøkelsen.

I oktober 1988 dominerte den platedekte (thecate) dinoflagellaten *Prorocentrum balticum* i Saudafjorden. I forundersøkelsen ble denne arten funnet i høyt antall både inne i Sandsfjordsystemet og utenfor. Av de store dinoflagellatene er det ceratiene som dominerer. De tallmessig viktigste er *Ceratium furca*, *C. longipes* og *C. tripos*. Det mest påfallende var at ceratiene forekom hyppig ved alle prøveinnsamlingene i Sandsfjordsystemet. Tellingene viste imidlertid at disse algene bare unntaksvis ble funnet i den delen av det øvre vannlaget som hadde mest brakkvann. I Saudafjorden ble det tidlig i august funnet 8600 ceratier pr liter på 4 m dyp, mens det i overflatelaget ikke ble registrert en eneste ceratie. I håvtrekk fra Jelsafjorden og Jøsenfjorden i juni 1988 dominerte ceratiene fullstendig med *C. longipes* og *C. tripos* som de mest framtrædende.

Generelt er dinoflagellatene den algegruppen som forekommer med flest arter i denne undersøkelsen. Men selv om artsantallet er stort, er det bare unntaksvis at dinoflagellatene dominerer tallmessig inne i Sandsfjordområdet. I Jøsenfjorden derimot var denne algegruppen den rådende i håvtrekk på de tidspunkt innsamlinger ble foretatt.

Blant de algeklassene hvor små flagellater dominerer, er det cryptophyceene og prymnesiophyceene som er de viktigste. I Jøsenfjorden utgjorde særlig i april/mai 1989, men også i juni 1988, cryptophyceene en vesentlig del av den totale algebiomassen. Stort sett ser det ut som om denne algeklassen forekommer i et lavere antall innenfor Sandsfjordsystemet enn utenfor.

Prymnesium parvum som er en giftproduserende alge tilhørende algeklassen Prymnesiophyceae, dukket opp sommeren 1989 i Sandsfjordsystemet og resulterte i at 750 tonn laks og regnbueørret døde (Johnsen et al. 1988, Kaartvedt et al. 1990). Maksimalt ble det i de frie vannmassene funnet 2,3 millioner celler pr liter. *P. parvum* viste seg imidlertid å ha et tidligere ubeskrevet levesett ved at den vokste i assosiasjon med makroalger og da spesielt grønnalgen *Cladophora* sp. (Johnsen & Lein 1989). Fjordsystemet ble holdt under oppsikt i 1990 og i begynnelsen av juli dukket *P. parvum* opp igjen. Den maksimale algemengden i vannmassene kom nå opp i 3.75 millioner celler pr liter, og *P. parvum* var også nå i assosiasjon med *Cladophora* sp. Overvåkingen dette året medførte at oppdrettsanleggene inne i fjordområdet ble flyttet før *Prymnesium*-oppblomstringen nådde toppen, og for disse anleggene ble derfor tapene ubetydlige.

Ulike *Chrysochromulina*-arter er vanlige både i og utenfor Sandsfjordområdet. Spesielt synes *C. hirta* å være en art som er interessant fordi den i 1989 og i 1990 viste seg å blomstre opp under *P. parvum*-blomstringen. *C. hirta* fortsatte med høye celletall etter at *P. parvum* var forsvunnet fra vannmassene. Flere *Chrysochromulina*-arter er kjent for å kunne "fortære" bakterier og andre organismer (fagotrofi) i

tillegg til vanlig fotosynteseaktivitet, og dette kan favorisere disse artene ved næringsbegrensning.

En av de vanligste Prymnesiophyceene langs kysten om våren er *Phaeocystis pouchetii*, og i februar 1988 ble den observert inne i fjordsystemet undervåroppblomstringen. Totalt sett ser det ut som om flagellater utgjør en mindre andel av den totale algebiomassen i Sandsfjordområdet enn i Jøsenfjorden.

Algemengde og produksjonsforhold

Våroppblomstringen i Saudafjorden og Sandsfjorden i 1988, som var helt dominert av *S. costatum*, ga klorofyll *a* verdier i på omtrent 10-13 mg/m³. Dette er dobbelt så høyt som det som ble funnet som maksimalverdier under våroppblomstringen utenfor Kårstø i Boknafjorden våren 1981 (Erga 1989). Under våroppblomstringen ble ca 75% av algemengden funnet i de øvre 6 metrene, dvs i det øvre brakkvannslaget eller like under dette. En høy prosentvis andel av den totale algemengden ble funnet i brakkvannslaget gjennom hele vekstsesongen. Under våroppblomstringen og de neste 2-3 månedene ble de høyeste klorofyll *a* verdiene funnet i skjæringen mellom det helt brakke overflatelaget og det saltere underliggende vannet.

Like etter at kraftverket i Høyen stanset 1. juni 1988, økte algemengden i hele det øvre brakkvannslaget i Sandsfjordsystemet. Sannsynligvis hadde dette sammenheng med at oppholdstiden for brakkvannet ble forlenget slik at algene fikk en lengre vekstperiode før de ble transportert ut av fjordsystemet. Dette fører imidlertid til et stort forbruk av næringssalter som pga. stans av kraftverket ikke blir fornyet. Oppbyggingen av algemengden må derfor forventes å være forholdsvis kortvarig med en etterfølgende kulminasjon.

På ettersommeren, etter at kraftverket i Høyen hadde stått en tid, viste klorofyll-*a* profilene i Sandsfjordsystemet at de høyeste verdiene var å finne under det brakke overflatelaget. Innerst i Hylsfjorden (Stn. 51) ble for eksempel høyest klorofyll-*a* mengde funnet på 20 m dyp, mens

det ytterst i fjorden (Stn. 55) var en jevn fordeling av klorofyll-a fra 4-20 m. I Jelsafjorden ble høyeste klorofyll-a verdi funnet på 40 m dyp. Slike dypmaksima er tidligere rapportert fra Boknafjorden i 1981 (Erga 1989), men er også kjent fra andre områder (Harrison et al. 1983).

Produksjonsmålingene om våren ga maksimalt 19.9 mg C/mg kl.f.a/t i det øvre brakkvannslaget inne i Sandsfjordsystemet. Dette er ca 60% høyere enn maksimalproduksjonen under vår-oppblomstringen i Boknafjorden i 1981, hvor høyeste produksjonsverdi ble angitt til 12.5 mg C/mg kl.f.a/t (Erga & Sørensen 1982). Oppblomstringen i Sandsfjordsystemet var helt begrenset til det brakke overflatelaget (0-4 m) hvor 93-94% av den integrerte produksjonen ble funnet.

I månedsskiftet april/mai 1989 ble bare gjennomsnittlig ca 33% av den totale produksjonen funnet i de øvre 4 m. I indre del av Hylsfjorden utgjorde imidlertid produksjonen i dette øvre vannlaget bare ca 2% av den totale planteproduksjonen i vannsøylen. Lave produksjonsverdier nær overflaten i fjordsystemet hadde på dette tidspunktet sammenheng med liten CO₂-tilgang pga svært lav alkalinitet i vannmassene.

For mai og juni 1988 lå den gjennomsnittlige produksjonen i det øvre brakkvannslaget i Sandsfjordsystemet på henholdsvis 45 og 50% av den integrerte produksjonen fra 0-20 m. Effekten av kjøringen av Hylen kraftverk kunne også nå sees tydelig ved at bare 7% av den totale produksjonen ned til 20 m ble målt i de øvre 4 m i mai, mens produksjonen i dette øvre vannlaget utgjorde hele 63% av totalen i juni når kraftverket hadde stoppet. Forklaringen ligger i at når kraftverket går, tilføres litt alger fra de underliggende vannmasser under nærsoneblandingen, men algebiomassen i dette brakkvannslaget blir lav. Dessuten vil algene som føres opp fra salte vannmasser til det brakke overflatelaget, utsettes for et "sjokk" på grunn av saltholdighetsendringen. Dette gir lav produksjonskapasitet som vil si at algebiomassen som føres opp i brakkvannslaget inne

ved Hylen produserer mindre enn tilsvarende mengde lenger ut i fjorden der algene har avklimatisert seg til den lave saltholdigheten. Når kraftverket stanser, opphører innblandingen av alger fra de underliggende vannmassene. Algene transporteres heller ikke ut av Hylsfjorden. Produksjonen i det øvre brakkvannslaget innerst i Hylsfjorden medfører derfor en biomasseoppbygging som først stanser opp når et næringssalt blir begrensende for veksten.

I slutten av juli 1989 etter at kraftverket i Hylen hadde vært stanset en tid, utgjorde produksjonen i de øvre 4 m i Hylsfjorden henholdsvis 13 og 21% av produksjonen fra 0-20 m i indre og ytre del av fjorden. For Saudafjorden var produksjonsandelen hele 68% for samme vannlag. Saudafjorden tilføres imidlertid forholdsvis jevne ferskvannsmengder, og dermed også en nærmest kontinuerlig tilførsel av næringssalter gjennom hele året. Produksjonen i det øvre brakkvannslaget i denne fjorden kan dermed opprettholdes gjennom hele sesongen. De noe bedre produksjonsforholdene i Saudafjorden gjenspeiles også i produksjonskapasiteten som ligger høyere i denne fjorden enn både i Hylsfjorden og Sandsfjorden i tiden før kraftverket i Hylen ble startet.

Etter at kraftverket i Hylen startet 29. juli endret ikke produksjonsforholdene i brakkvannslaget i fjordsystemet seg mye i løpet av en uke. Dette skyldes den spesielle nærsoneblandingen inne ved Hylen som er omtalt tidligere. Under brakkvannslaget avtok imidlertid produksjonen i Sandsfjorden og ytre Hylsfjorden betraktelig slik at selv om produksjonen i brakkvannslaget ikke endret seg vesentlig, økte denne produksjonens prosentvise bidrag. I forhold til den totale produksjonen økte det prosentvise bidraget fra 31 til 45% og fra 13 til 37% for henholdsvis Sandsfjorden og ytre Hylsfjord.

Ut fra de målte produksjonskapasitetene kan en trekke fram en del trender. For det første viser det seg at i de fleste tilfeller er den høyeste potensielle produksjonen tilstede i det øvre vannlaget. En lavere produksjonskapasitet på

20 m dyp i lagdelte vannmasser er naturlig på grunn av at algene her vil inneholde mer klorofyll-a pr. celle enn ved overflaten. Dermed blir produksjonen pr klorofyll-a enhet lavere, dvs en lavere produksjonskapasitet.

Også ut fra verdiene for produksjonskapasitet kan en se at produksjonsforholdene i Hylsfjorden er dårligere enn i resten av fjordsystemet når kraftverket i Hylen ikke har vært i drift en tid. I juli/august 1989 var produksjonskapasiteten i det øvre brakkvannslaget i Hylsfjorden adskillig lavere enn i resten av fjordsystemet.

Produksjonseffektiviteten i Sandsfjordsystemet var generelt høyere i det øvre brakkvannslaget om våren når kraftverket i Hylen var i drift. Når ferskvannstilførselen fra Hylen stanser opp, synker produksjonseffektiviteten i brakkvannslaget. En sannsynlig forklaring på dette er at oppholdstiden for algene i Hyls- og Sandsfjorden øker betraktelig og dermed får algene tid til å tilpasse seg den høye lysintensiteten nær overflaten før de fraktes ut av fjordsystemet. I Jønsfjorden ble det ikke registrert noen klar utvikling i algenes effektive lysutnyttelse i de øvre 4 m fra våren og til sensommeren.

Tilgjengelighet av uorganisk karbon

For å kunne produsere organisk materiale er de fleste planktoniske alger avhengig av tilgang på karbondioksyd (CO_2) som finnes oppløst i vannet. For at algene ikke skal være karbonbegrenset, må CO_2 -innholdet i vannet ligge over 5 mmol CO_2 . Målingene på toktet i april/mai 1989 viste at vannmassene i det øvre brakkvannslaget inneholdt CO_2 -mengder lavere enn grenseverdien. Algenes vekst kan på dette grunnlaget derfor antas å være begrenset av for liten tilgang på uorganisk karbon. Også målingene fra juli/august 1989 viste så lave verdier for CO_2 at karbon kunne være en begrensende vekstfaktor for algene. Tilgjengeligheten av CO_2 synes å være forverret i 1989 i forhold til året før.

6.4.2 Dyreplankton

Brakkvannsplankton

Konsentrasjonene av brakkvannsplanktonet i Sandsfjordsystemet var lave i forhold til hva som er rapportert fra andre estuarier. Tap med utgående brakkvannsstrømmer er en sannsynlig begrensende faktor. Målingene ved utløpet av Sandsfjorden viste også at det foregår en uttransport av brakkvannsfauna.

Reduksjonen i Hylsfjordens brakkvannsfauna etter oppstartingen av kraftverket i oktober 1988 viser at bestandene her tidvis er begrenset av transportprosesser. Det var ikke tilsvarende store ferskvannsutslipp i forkant av, eller under de to andre toktene der brakkvannsfaunaen ble undersøkt, men det ble tildels tatt lave fangster i Hylsfjorden både i oktober 1987 (spesielt for *Eurytemora affinis*) og mai 1988. Lave fangster innerst i Hylsfjorden avviker fra forholdene under forundersøkelsen. For alle tre brakkvannsartene ble det da funnet størst konsentrasjoner innerst i Hylsfjorden, og Foss-hagen (1979) konkluderte at *E. affinis* hadde sin hovedutbredelse i Hylsfjordens brakkvannslag.

Generasjonstiden til f.eks. *E. affinis* ligger i størrelsesorden 1-3 mnd, avhengig av temperaturen. Det synes derfor intuitivt klart at reproduksjonen vil ha problemer med å kompensere for transportprosesser. Selv om adferdsmønstre muligens kan redusere ut-transporten og planktonet kan akkumuleres i frontområder eller bakevjer (jfr. tidvise høye konsentrasjoner i Saudafjorden), synes altså ferskvannstilførselen på samme tid å være både brakkvannsplanktonets betingelse og dets begrensnings.

Dyrenes reproduksjonsbiologi antyder at fjorder er mindre egnet enn andre estuarier, og fjordtopografien kan ha medvirket til lave brakkvannsbestander. Alle tre artene danner hvileegg ved ugunstige livsbetingelser. Disse synker til bunnen, og blir så klekket når forholdene igjen blir gunstige. *E. affinis* finnes ikke i områdene utenfor Sandsfjordsystemet (Foss-hagen 1979), og rekruttering om våren vil trolig være avhengig av klekking av lokalt overvint-

rende hvileegg. Stimuli for klekking kan være lys eller temperaturøkninger. I motsetning til grunne estuarier er bunnarealene i fjordene stort sett lokalisert på store dyp (under terskeldyp) med små svingninger i fysisk miljø. I Sandsfjordsystemet vil trolig bare små arealer være overvintringslokaliteter for hvile-egg.

Marint plankton

Planktonmengde og fordeling i Ryfylkefjordene er nært knyttet til transportprosesser. For mesoplankton er både vinddreven og ferskvannsdreven transport mest fremtredende på vår og forsommeren. Dyrene er på denne tiden sterkt konsentrert mot overflaten, noe som innebærer at deres vertikalfordeling i stor grad overlapper med vertikalfordelingen av ferskvannsdrevne strømmer. En lagdelt planktonfordeling er også vesentlig for nettotransporten med vinddrevne mellomagsutskiftninger, som i stor utstrekning er en to-lagstransport med skjærende strømretninger på ca. 50-30 m dyp. Konsentrasjoner i øvre lag innebærer store forskjeller i planktonmengde i inngående og utgående vannmasser. En jevn fordeling av plankton gjennom vannmassene over terskeldyp, slik det ble funnet om høsten, innebærer på den annen side at tilnærmet like mye plankton går inn som ut. Betydningen av transportprosesser vil også reduseres høst og tidlig vinter siden planktonet på denne tiden i vesentlig grad finnes i bassengvannet der terskelen hindrer utveksling med utenforliggende områder.

Mellomlagsutskiftningene står for de største vannutvekslingene med kystvannmassene og vil være vesentlige for planktontransporten både i Jøsenfjorden og i Sandsfjordsystemet. I Sandsfjordsystemet spiller mellomlagstransportene sammen med (eller imot) ferskvannsdrevne strømmer.

Planktontilførsel med vinddrevne mellomagsinnstrømninger i øvre del av vannsøylen var trolig forklaringen på akkumuleringen av *Calanus finmarchicus* innerst i Jøsenfjorden i februar 1988 (og av *Meganocytiphanes norvegica* i oktober 1988). Akkumulering av plankton innerst i Jøsenfjorden ble i forundersøkelsen forklart med at en kombinasjon av fersk-

vannsavrenning og vind ut fjorden førte planktonet inn i en kompensasjonsstrøm, altså en liknende prosess som vi i denne rapporten har beskrevet for Hylsfjorden etter ferskvannsutslipp fra Hylen. Resultatene fra etterundersøkelsen viser imidlertid at ferskvannsutslipp innerst i fjordbunnen ikke er en forutsetning for akkumulering av plankton innerst i Jøsenfjorden. Vi har altså her ulike forklaringsmodeller for liknende fordelingsmønstre i de to fjordene. Også et tredje forhold kan føre til konsentrasjoner av plankton innerst i fjordene. De gjentatte observasjonene av store mengder *Acartia* innerst i Jøsenfjorden skyldes trolig at denne relativt grunne lokaliteten er spesielt godt egnet for slekten. Undersøkelser andre steder antyder at *Acartia* er den dominerende copepoden i grunne estuarier, mens slekter som *Paracalanus* og *Pseudocalanus* dominerer i dypere fjorder (Smetacek 1986). Smetacek antar at forskjellen mellom ulike typer estuarier ikke skyldes saltholdighetstoleranser, men bunn-dyp. Dette er i overensstemmelse med resultatene fra Jøsenfjorden. *Acartia* dominerte innerst i fjorden både i perioden med ferskvannstilførsel (Fosshagen 1979) og etter Ulla-Førre utbyggingen. Som tidligere nevnt kan *Acartia* spp produsere hvileegg som synker ned på bunnen, og som for brakkvannsartene blir derfor bunndypet på lokaliteten av betydning.

Det er nå presentert tre ulike forklaringsmodeller for høye konsentrasjoner av plankton innerst i fjordsystem (estuarin sirkulasjon, vind-drevet inntransport, bunntopografi). Dette demonstrerer forskjellen i drivkrefter mellom ulike fjorder, og forskjeller i drivkreftenes innvirkning på ulike arter. I den relativt åpne Jøsenfjorden er vinddrevet utveksling mellom kyst og fjord fremtredende, mens de store ferskvannsutslippene innerst i Hylsfjorden er den dominerende drivkraften for planktontransport i denne fjordarmen. Fordelingen av *Acartia* synes derimot ikke å være knyttet til transport (som arten trolig er i stand til å motvirke gjennom spesielle adferdsmønstre), men til økologiske krav denne arten stiller. Denne kompleksiteten viser betydningen av grunnleggende kjennskap til fjordøkosystemene for at forvaltningsmessige konklusjoner kan trekkes på et reelt grunnlag.

Krill

Estuarin sirkulasjon, drevet av utslipp fra Hylen kraftverk, synes å spille en avgjørende rolle for fordelingen av krill innen Sandsfjordsystemet. Ca 50% av fangstene av *M. norvegica* ble her tatt i de øverste 10 m om natten, og utslipp fra kraftverket hadde klare effekter på strømmene ned til minst 10 m dyp. Trolig vil den relative betydning mellom inn- og ut-transport variere. Unnvikelse av den brakke overflatestrømmen favoriserer inntransport. Forward & Fyhn (1983) fant ved gitte forsøksbetingelser at saltholdigheter under 24 var dødelige for *M. norvegica*. Det ble gjennomgående funnet lavere saltholdigheter enn dette i Sandsfjordsystemets overflatelag, men tidvis kunne saltholdigheten bli relativt høy som følge av vindblanding eller kraftig nærsoneblanding ved kraftverksutslippet. Det kan tenkes at *M. norvegica* under slike forhold migrerer helt mot overflaten om natten, som vil resultere i uttransport.

Det var svært varierende horisontale fordelingsmønstre mellom de ulike toktene, som delvis kan knyttes til ulik ferskvannsavrenning. I oktober 1987 var det små utslipp fra kraftverket, og maksimalfangstene ved utløpet av Hylsfjorden kan skyldes akkumulering i dette frontområdet der fjordarmene møtes. De tydeligste indikasjonene på kraftverkspåvirkning ble observert i november 1987, da resultatene på de tre stasjonene i Hylsfjorden avvek fra andre deler av fjordsystemet med lave fangster. Mekanismen er imidlertid ikke klar. De lave fangstene i Hylsfjorden kan muligens tilskrives utvasking fra fjordarmen, men det er også mulig at det har funnet sted en akkumulering nær kraftverket.

Mens driften av Hylen kraftverk synes å ha vesentlig innflytelse på fordelingen av *M. norvegica* innen fjordsystemet, er betydningen mindre for utvekslingen med ytre områder. Ved innløpet til Sandsfjorden var *M. norvegica* i mindre grad knyttet til øvre lag enn inne i fjorden. Dette innebærer at den relative betydningen av overflatestrømmer avtar, og utveksling av *M. norvegica* mellom fjorden og ytre områder vil i vesentlig grad foregå via vinddrevne transportprosesser i mellomlaget.

For å antyde utvekslingsratene er det som et eksempel satt opp et transportbudsjett basert på resultatene fra oktober 1987 (Tabell 15.). Budsjettet er basert på beregninger fra Kaar-
tvedt & Svendsen(1990).

Tabell 15. Beregnede transportrater på Stn. 64 i oktober 1987. - representerer ut-transport; + representerer inntransport.

Dyp (m)	Strøm (100 m ³ /s)	<i>Meganyctiphanes norvegica</i>			
		Ant./100m ³		Ant./s	
		Dag	Natt	Dag	Natt
0 - 5	-5	0	30	0	-150
5 - 10	+3	5	250	+15	+750
10 - 50	+25	70	155	+175	+3875
50 -110	-25	5	5	-125	-125
Netto	-2			+1640	+4350

Transportratene representerer her en import pr natt som tilsvarer 5 % av totalmengden krill i fjorden. I dette tilfellet var det også inn-transport om dagen, men dette vil kunne variere, f.eks. som følge av lysforholdene (som styrer vertikalfordelingen hos krill). De døgnlige transportratene er langt høyere enn vekstraten til *M. norvegica*, og dette indikerer at transportprosesser (og dermed vindforhold som styrer disse) er den viktigste faktoren for rekruttering til fjordene, forutsatt at krill driver passivt med strømmene. Tilsvarende vil transportprosesser føre til netto ut-transport når strømmene snur.

Undersøkelsene viste store forskjeller i krillmengder mellom høsten 1987 og høsten 1988. Dette kan trolig tildels tilskrives forskjeller i transportprosesser som følge av variasjoner i vindforhold mellom de to årene og demonstrerer viktigheten av å avdekke prosesser som styrer fordelingen. De store forskjellene mellom disse to datasettene fra oktober, som begge er fra perioden etter Ulla-Førre utbyggingen, viser at en sammenholding av prøver tatt før og etter en vassdragsregulering, for så å forklare forskjellen med endringer i ferskvannstilførsel, lett kan føre til feilslutninger.

Vinddrevet inntransport kan trolig forklare de høye konsentrasjonene av *Meganyctiphanes norvegica* innerst i Jøsenfjorden i oktober 1988 (som for *Calanus finmarchicus* i februar). Krill ble transportert innover i øvre lag om natten, mens dyrene i hovedsak holdt seg under terskeldyp om dagen. Resultatene antyder at i åpne fjorder, der innvirkninger fra drivkrefter på kysten er fremtredende, vil den relative betydningen av endringer i lokal ferskvannstilførsel reduseres. Betydningen av ytre drivkrefter for biologiske og fysiske forhold i Jøsenfjorden fremgår også av målinger tatt i forbindelse med forundersøkelsen. Svendsen & Thompson (1978) beregnet at hele vannmassen over terskeldyp i Jøsenfjorden ble fornyet i løpet av en uke etter vannmasseforflytninger ("downwelling") på kysten.

De gjentatte maksima av *Thysanoessa raschii* på Stn 86 kan skyldes passiv akkumulering, men kan alternativt knyttes til at dyrene selv "velger" en gunstig lokalitet der de opprettholder sin horisontale fordeling til tross for vannmassebevegelser (som tidligere beskrevet for *Acartia* på stasjonen innenfor). Vi har i så fall et nytt eksempel på at adferd påvirker horisontale transportmønstre (se Kaartvedt & Svendsen 1990), og at fysiske drivkrefter (vannmassetransporter) dermed ikke virker likt på alle arter.

Kobling mellom planteplankton og dyreplankton

Veksten av dyreplankton kan være temperaturbegrenset i vårmånedene, slik at det på denne tiden ikke sees en klar sammenheng mellom variasjoner i næringstilgang og dyreplanktonmengder. Likevel er det klart at næringstilgangen i store deler av året påvirker dyreplanktonproduksjonen. Det er ved tidligere undersøkelser funnet høye samvariasjoner mellom eggproduksjon hos copepoder og algemengde. Kiørboe (1988) fant at den daglige eggproduksjonen hos *Acartia tonsa* økte fra 5 egg pr hunn til 20 egg pr hunn et par dager etter økt primærproduksjon. Responsen i eggproduksjon avhenger også av planteplanktonets arts-sammensetning (Peterson & Bellantoni 1987, Kiørboe et al. 1990).

Det kan imidlertid være vanskelig å spore en sammenheng mellom planteproduksjon og dyreplanktonmengden i naturen. Selv om dyreplanktonets vekstrate reagerer nesten umiddelbart på variasjoner i fødetilgjengelighet (timer/dager), vil endringer i biomasse skje med en tidsforsinkelse knyttet til generasjonstid (uker/månededer), og andre forhold enn lokal produksjon vil ofte bestemme mengden av dyreplankton i et område. De høye konsentrasjonene som i denne undersøkelsen ble funnet ved Hylen er et eksempel på dyreplanktonmengder som ikke har sammenheng med fødetilbudet i Hylsfjorden. I andre tilfeller er det ikke like opplagt hvilke faktorer som i hovedsak styrer mengden av dyreplankton. Både i for- og etterundersøkelsen er det funnet høyere biomasse i Jøsenfjorden enn i Sandsfjordsystemet. Trolig kan dette tildels tilskrives topografiske forhold. Dyreplanktonmengden øker vanligvis fra indre fjordstrøk og utover mot kysten, og åpne fjorder med bedre utveksling vil ha større planktontilførsel enn innelukkete fjorder. I mange fjorder vil import av plankton være viktigere enn lokal produksjon i fjorden. Forholdet mellom transportprosesser og intern produksjon vil imidlertid også variere mellom ulike organismer. For dyr med lang generasjonstid kan transportprosesser være avgjørende, mens mengden av dyr med kort generasjonstid, som raskt kan respondere på endringer i fødetilgang, i større grad vil være bestemt av lokal algevekst.

Calanus finmarchicus og *Meganyctiphanes norvegica*, som er henholdsvis den biomassemessig dominerende meso- og makroplanktonformen i Jøsenfjorden, er eksempler på dyr med lang generasjonstid. Begge artene har i hovedsak en generasjon i året, og vi har tidligere konkludert at høye konsentrasjoner innerst i fjordene er et resultat av transportprosesser. *Acartia* er et eksempel på en organisme med kort generasjonstid, og de store konsentrasjonene innerst i Jøsenfjorden er trolig i vesentlig grad basert på lokal produksjon.

Det er ikke målt produksjonsrater av dyreplankton i denne undersøkelsen. Det er likevel klart at produksjonen vil variere mellom ulike

delar av Ryfylkefjordene som følge av variasjoner i fødetilgangen, og at Ulla-Førre utbyggingen har påvirket samspillet mellom ulike organismer i næringsnettet. Nedenfor trekkes fram enkelte eksempler som belyser aktuelle mekanismer.

Forskjellen i ferskvannstilførsel mellom fjordene er av betydning både for fordelingen av alger i tid og rom og for den totale algeproduksjonen. Vi har i denne undersøkelsen vist hvordan ferskvannstilførselen til Sandsfjordsystemet fører til en tidligere våroppblomstring enn i Jøsenfjorden pga stabilisering av vannmassene. Slike endringer i tidspunktet for våroppblomstringen kan lede til endringer av størrelsesorden i antall egg som *Calanus finmarchicus* produserer (Runge 1988). Hovedmengden *Calanus finmarchicus* stammer fra en gyting om våren. *Calanus*-hunner trenger relativt høye konsentrasjoner av planteplankton for å oppnå maksimal eggproduksjonsrate, og denne kan variere med en faktor på 50 som følge av varierende fødetilgang (Frost 1985). En langsommere planteplanktonvekst i forbindelse med våroppblomstringen kan gi høyere dyreplanktonproduksjon siden dyreplanktonet får tid til å respondere på den økende næringstilgangen. Dermed blir en større andel av planteplanktonet beitet på av dyreplankton og en mindre andel sedimenterer. Dette er altså ikke en effekt som styrer totalproduksjonen, men som påvirker tidsutviklingen og dermed strømmen av organisk materiale i næringsnettet. I Ryfylkefjordene er det imidlertid usikkert hvor viktig slik lokal stabilisering av vannmassene er for *Calanus*-mengdene i fjordsystemet. Stadig nye individer som stammer fra gyting i andre vannmasser driver forbi utenfor fjorden og vil tildels transporteres inn i fjorden. Igjen spiller altså transportprosesser sammen med lokale forhold.

I Sandsfjordsystemet har vi registrert to former for mangel på romlig overlapping mellom plante- og dyreplanktonet. Dyreplanktonet unnviker tildels brakkvannslaget hvor en vesentlig del av algeproduksjonen foregår, og denne produksjonen vil være utilgjengelig for den marine faunaen. Videre skaper kjøringen

av kraftverket kaos i systemet som har klare konsekvenser for dyreplanktonets fødetilgang. Gjennomgående syntes kjøring av kraftverket å føre til en netto uttransport av planteplankton og inntransport av dyreplankton, m.a.o fjernes dyreplanktonet fra sin føde.

Også totalproduksjonen og den kvalitative sammensetningen av alger varierer mellom fjordene og er påvirket av Ulla-Førre utbyggingen. Både ut fra næringsnettinteraksjoner og effekter som tidligere er påvist fra transportprosesser er det altså klart at ferskvannstilførselen, og de endringer som har funnet sted i denne som følge av Ulla-Førre utbyggingen, har en vesentlig innflytelse på dyreplanktonøkologien i Ryfylkefjordene. Effektene er størst i Hylsfjorden. Fjerningen av ferskvannet fra Jøsenfjorden er av mindre betydning siden denne fjorden i vesentlig grad er styrt av forhold på kysten.

7. EFFEKTER AV ULLA-FØRRE UTBYGGINGEN.

7.1. Transportprosesser

Ulla-Førre utbyggingen har ført til store endringer i transportprosesser i Hylsfjordens øvre lag. Før etableringen av Hylen kraftverk var denne fjordarmen tildels en bakevje i forhold til resten av fjordsystemet, mens kraftige ferskvannsdrevne strømmer nå fører til betydelig vannutveksling med områdene utenfor.

To typer ferskvannsdrevne strømsystem er dokumentert gjennom denne undersøkelsen. Avhengig av overflatelagets saltholdighet og blandingsforholdene ved kraftverksutslippet blir det generert enten en estuarin eller en "reversert" estuarin sirkulasjon. Ved den estuarine sirkulasjonen driver ferskvannsutslippene en utgående overflatestrøm knyttet til vannlag grunnere enn 5 m og en underliggende inngående kompensasjonsstrøm som rekker ned til minst 10 m dyp. Strømmene er kraftigst langs Hylsfjordens midtakse.

Den "reverserte" estuarine sirkulasjonen opptrer når blandingsvannet fra nærsone utenfor kraftverksutslippet har større tetthet enn overflatelaget i fjorden. I slike tilfeller dukker kraftverksvannet ned under overflatelaget og går som en utgående strøm i noen meters dyp (sommeren 1989 mellom ca 3-8 m), mens det er inngående kompensasjonsstrømmer av henholdsvis "ferskt" vann i overflatelaget og underliggende salt vann. En reversert estuarin sirkulasjon er et resultat av at blandingen mellom ferskvann og fjordvann er kraftigere ved Hylen enn ved andre ferskvannskilder pga den store hastigheten ferskvannet har ut av kraftverkstunnelene. Et slikt strømmønster er observert om sommeren når stor ferskvannstilførsel fra andre kilder enn Hylen fører til svært lav saltholdighet i fjordens overflatelag. Våre registreringer er fra perioder med vannutslipp fra overløpstunnelen i Hylen (utløp over vannnivå).

De ferskvannsdrevne strømmene er av avgjørende betydning for biologiske forhold. Kjøring av kraftverket førte gjennomgående til en utvasking av alger fra Hylsfjorden, og også større områder kunne påvirkes. Brakkvannsstrømmen fra Hylen dreier dels inn i Sauda-fjorden, hvor det ble registrert effekter i algefordeling og sammensetning. Ved store ferskvannsutslipp fra Hylen og andre ferskvannskilder sommeren 1989 ble giftalgen *Prymnesium parvum* spredd fra Hylsfjorden og videre ut i betydelig avstand utenfor Sandsfjordsystemet. Konsentrasjoner av mer dyptlevende algeformer (ceratier) ble funnet inne ved Hylen og kan trolig tilskrives inntransport med kompensasjonsstrømmen.

Vannutslippene i Hylen medfører at brakkvannslaget i Hylsfjorden føres ut i Sandsfjorden og videre ut av fjordsystemet. For planteplanktonet betyr dette at når kraftverket er igang, må biomasseøkningen foregå mens brakkvannet forflytter seg utover. Det vil si at jo kraftigere kjøringen ved Hylen kraftstasjon er, dess kortere tid har algene på å produsere før de forlater Sandsfjordsystemet. Kraftig kjøring av kraftverket over lengre tid vil derfor ha en utspylingseffekt som en tildels kunne se

i juli/august 1989. På grunn av at overløpet i Hylen ble kjørt og den spesielle nærsoneblanding som oppsto, kom utspylingen av vannmassene under det øvre brakkvannslaget.

På grunn av at Hylen kraftverk kjøres etter behov, er vannutslippene sterkt varierende. Dette, sammen med varierende vannføring i fjordsystemets øvrige ferskvannskilder, vindforholdene inne i fjordsystemet og utenfor, strømforhold, varierende lysforhold osv, skaper "turbulente" og varierende produksjonsforhold særlig i Hylsfjorden og Sandsfjorden. Algefronter skapes og "lokale" flak av alger forflyttes med brakkvannet. De forholdsvis kaotiske resultatene både for produksjonskapasitet og produksjonseffektivitet som resultatene viser når kraftverket er igang, kan forklares ut fra dette. I de perioder hvor kraftverket i Hylen ikke er i drift, er produksjonsforholdene i fjordsystemet mye mer ensartede.

Også dyreplankton ble i vesentlig grad påvirket av kraftverkskjøringen. Små variasjoner i dyrene vertikalfordeling fører til avgjørende forskjeller i transportprosesser. Brakkvannsplanktonet, som i hovedsak finnes i de øvre 2-5 m, blir "vasket" ut av Hylsfjorden via den estuarine sirkulasjon. Dette er vist gjennom felteksperiment, der oppstartingen av kraftverket førte til at brakkvannsarter forsvant fra fjordarmen, og ved sammenlikninger med fordelingsmønstre fra forundersøkelsen. Før utbyggingen var det gjerne populasjonsmaksima av brakkvannsplankton i Hylsfjorden (Fosshagen 1979), mens det i etterundersøkelsen er funnet minima i denne fjordarmen. Når det dannes reversert estuarin sirkulasjon har vi imidlertid funnet oppkonsentrering av brakkvannsplankton tett ved kraftverket.

Ferskvannsdrevne strømmer er også vesentlige for fordeling og mengde av marint plankton i Hylsfjorden. For disse organismene var det gjennomgående inn-transport som dominerte, selv om det også for enkelte marine former ble funnet indikasjoner på netto ut-transport med overflatestrømmen i perioder der kraftig blanding ved kraftverksutslippet førte til høy overflatesaltholdighet. Inn-transporten er et

resultat av at marine arter søker ned under det brakke overflatelaget som renner ut av fjorden, og dermed blir fanget opp av kompensasjonsstrømmen.

Økt inntransport om våren av den biomassemessig dominerende arten *Calanus finmarchicus* var en av de mest framtreddende kraftverks-effektene. *C. finmarchicus* søker tidlig om våren opp mot overflaten for å gyte etter å ha overvintret i dypet. Allerede i slutten av februar fant vi at arten i stor grad var knyttet til de øverste 10 m i Ryfylkefjordene, og den er deretter knyttet til øvre vannlagene utover vårmånedene. Fosshagen (1979) fant en rekke eksempler på årlige populasjonsmaksima av *C. finmarchicus* allerede i mars. På denne tiden er naturlig avrenning liten, og størstedelen av ferskvannstilførselen kommer fra kraftverket i Hylen.

I april 1989 ble det funnet 50 ganger mer *Calanus finmarchicus* innerst i Hylsfjorden enn maksimalfangstene fra Sandsfjordsystemet i forundersøkelsen. Dette representerte ca 10 ganger større mengder enn maksimalfangstene som i forundersøkelsen ble tatt i Jøsenfjorden. Også andre vanlige arter fra ytre områder ble funnet i store konsentrasjoner tett ved kraftverket. Vi har altså fått den paradoksale situasjonen at større ferskvannsmengder har gjort faunaen mer preget av marine former. Også ved den reverserte estuarine sirkulasjonen har vi dokumentert netto inntransport av marint plankton. Planktonet unnviker både det brakke overflatelaget og den noe saltere (men fortsatt brakke) utgående strømmen, og blir transportert innover i den dypere liggende kompensasjonsstrømmen.

Vi har vist at planktontransporten med de ferskvannndrevne strømmene påvirker fordelingen gjennom hele Hylsfjorden. Ferskvannsutslippene vil også påvirke utvekslingen mellom Sandsfjordsystemet og kystvannmassene. Her vil imidlertid mellomlags-transporter være vesentlige, og også bidrag fra andre ferskvannskilder spiller inn i utvekslingen mellom kyst og fjord. For mesoplankton har vi ikke forsøkt å skille

mellom disse drivkreftene, og for slike utvekslingsprosesser har vi dermed ikke dokumentert kraftverkseffekter.

Mellom november og februar, som er en periode med betydelig endret ferskvannstilførsel etter reguleringen, er det gjennomgående liten kraftverksinnvirkning (og innvirkning fra andre transportprosesser) på de mindre planktonformene. Dette henger sammen med lave planktonkonsentrasjoner i øvre lag da største delen av planktonet på denne tiden holder seg i bassengvannet. Transporten av krill kan imidlertid påvirkes i vesentlig grad i denne perioden. Høst og vinter utgjør krill den dominerende biomassekomponenten i øvre lag om natten, og maksimal kjøring av kraftverket om vinteren faller sammen med lang mørkeperiode (dvs at dyrene tilbringer lang tid i øvre lag). Undersøkelsene tyder på at strømmen drevet av utslippene fra Hylen er av avgjørende betydning for fordelingen av krill i Sandsfjordsystemet. Dette fremgikk både fra sammenlikninger mellom dyrenes og ferskvannsdrevne strømmers vertikale utbredelse, og av horisontale fordelingsmønstre innen fjordsystemet. Derimot syntes effekten å være mindre for utvekslingen mellom fjordsystemet og områdene utenfor. Dette henger sammen med at dyrene ved innløpet til fjordsystemet hadde en dypere fordeling enn inne i fjorden, og mellomlagstransporter er derfor viktigere for utvekslingsprosesser enn ferskvannsdrevne strømmer.

Mens tilførselen av ferskvann til Hylsfjorden i vesentlig grad har endret transporten av plankton i denne fjordarmen, har ikke tørrleggingen av Ulla- og Førre elvene hatt tilsvarende effekter i Jøsenfjorden fordi transportprosessene i denne mer åpne fjorden i større grad er styrt av forholdene på kysten. Som i forundersøkelsen ble det tidvis funnet konsentrasjoner av plankton innerst i Jøsenfjorden som hang sammen med inngående strømmer. Etter fjerningen av ferskvannstilførselen er estuarin sirkulasjon utelukket som forklaringsmodell for planktonakkumuleringen, som trolig skyldes vinddrevne innstrømminger i øvre del av mellomlaget. Siden forholdene i den åpne

Jøsenfjorden i stor grad er styrt av ytre drivkrefter (upwelling/downwelling på kysten) reduseres innflytelsen av lokale miljøendringer.

7.2. Ferskvannsforårsaket dødelighet

Marint plankton som transporteres inn mot Hylen kan her bli ført opp i vann med lav saltholdighet pga sterke blandingskrefter nær kraftverksutløpet. Slike raske endringer i saltholdighet er trolig skadelig for planktonet, og ferskvannsforårsaket dødelighet er en sannsynlig forklaring på høy dyreplanktondødelighet som ble observert i Hylsfjorden i en periode med svært stor ferskvannstilførsel. Vi har ikke data for i hvilken grad slik innblanding og eventuell neddreping av plankton også foregår i perioder med mindre ferskvannsutslipp.

7.3. Endringer i hydrografi

Ferskvannsutslipp fra Hylen har en markert effekt på hydrografiske forhold i Hylsfjorden og tildels også lenger ute i fjordsystemet. Saltholdigheten påvirkes både gjennom den økte totale ferskvannstilførselen og gjennom endringer i vertikale blandingsprosesser. Selv om kraftstasjonen representerer en stor ferskvannskilde, kan utslipp gi økt saltholdighet i overflatelaget som følge av at vannet fra kraftverkstunnelene har høy hastighet og dermed høy kinetisk energi. Det er derfor kraftigere vertikal blanding ved Hylen enn ved de ferskvannskilder som er bestemmende for saltholdigheten i Hylsfjorden i perioder uten utslipp fra kraftverket. Om høsten har vi eksempelvis sett at overflatesaltholdigheten i Hylsfjorden har økt fra 16 til 20-25 ved oppstartning av kraftverket. Når vann fra nærsone utenfor kraftverket møter vann fra andre ferskvannskilder blir det tydelige småskala variasjoner i overflatesaltholdigheten. Disse fremtrer som "linser" i de hydrografiske snittene, et fenomen som ikke ble registrert i forundersøkelsen.

Mens overflatesaltholdigheten kan øke til tross for stor ferskvannstilførsel, reduseres saltholdigheten på noen meters dyp (tykkere

brakkvannslag). I juli 1989 sank f.eks saltholdigheten på 5 m dyp i Hylsfjorden fra 25 til 15 i forbindelse med utslipp fra Hylen. Hvorvidt kjøring av kraftverket på enkelte tider av året med liten tilførsel fra andre kilder også fører til redusert overflatesaltholdighet inne i fjordsystemet er ikke klart. Betydelig økt ferskvannstilførsel om vinteren vil imidlertid trolig gi lavere saltholdighet utenfor fjorden.

Ferskvannsutslipp fra Hylen har vesentlig innflytelse på temperaturforholdene i Hylsfjorden via temperaturen i ferskvannet og ferskvannsutslippenes effekt på brakkvannets oppholdstid i fjordarmen. Endringer i vertikale blandingsprosesser vil også endre temperaturforholdene i vannmassene, men siden Sandsfjordssystemet også før utbyggingen hadde et markert brakkvannslag er denne effekten av mindre betydning i dette fjordsystemet.

Når kraftverket er ute av drift om sommeren finnes de høyeste temperaturene i Hylsfjordens brakkvannslag fordi denne fjordarmen fungerer som en bakevje med lang oppholdstid for brakkvannet. Dette tilsvarende forholdene før utbyggingen. Når kaldt ferskvann tilføres ved oppstartning av kraftverket kan dette ha en markert effekt på fjordvannet, noe som ble tydelig demonstrert ved oppstartning av kraftverket sommeren 1989 da fjorden ble tilført svært store mengder ferskvann. Overflate-temperaturen sank med 8 °C innerst i Hylsfjorden, og en kaldtvannskile (temperaturfall på opp til 4 °C) av kraftverksvann kunne registreres gjennom Hylsfjorden og Sandsfjorden. I vinterhalvåret har kraftverksvannet noe høyere temperatur enn vann fra andre kilder, og også redusert oppholdstid av overflatevannet kan gi redusert avkjøling i Hylfjorden.

Temperaturen er avgjørende for hastigheten av biologiske prosesser, men biologiske (fysiologiske) effekter av temperaturendringene forårsaket av utslippene i Hylen lar seg ikke måle gjennom den typen feltundersøkelser vi har gjennomført. Grovt sett regner vi at en øking i temperaturen på 10 °C fører til en fordobling i veksthastighet ved tilfredsstillende næringstilgang. Dette indikerer at de endringer

som finner sted i Hylsfjorden kan være av vesentlig betydning i de dyp som påvirkes.

Større korttidsfluktuasjoner i saltholdighet og temperatur etter etableringen av kraftverket i Hylen vil også ha biologiske konsekvenser. Eksempelvis kan dette føre til økt stress for oppdrettsfisk, og variasjoner i tykkelse av brakkevannslaget vil f. eks ha praktisk betydning for utøvelse av rusefiske.

Det er ikke markerte hydrografiske forandringer i mellomlaget og dypvannet i Sandsfjordsystemet som følge av reguleringene. Sammenliknet med forundersøkelsen kan det spores en svak avtakende saltholdighet i øvre del av mellomlaget, men hvorvidt dette skyldes reguleringene eller naturlige årsaker er umulig å avgjøre. Endringene er imidlertid av den karakter en kan forvente at økt ferskvannstilførsel vil medføre. Da vannutvekslingen i mellomlaget foregår gjennom konvergenssoner i det øvre laget utenfor fjorden, vil en avsaltyng av mellomlaget være ventet når det øvre laget utenfor fjorden blir ferskere.

Det øvre laget i Jøsenfjorden er sterkt påvirket av reguleringene, og den sterke lagdelingen som før reguleringen var karakteristisk for øvre lag i store deler av året er nå i hovedsak forsvunnet. Bare i ett tilfelle om sommeren (juni) ble det i etterundersøkelsen registrert et markert brakkevannslag i Jøsenfjorden.

I likhet med Sandsfjordsystemet er det ikke mulig å knytte små hydrofysiske forskjeller i mellomlaget og bassengvannet mellom for- og etterundersøkelsen til endringene i ferskvannstilførselen.

7.4 Endringer i vannkjemi og produksjonsprosesser

Næringssaltdynamikken i Hylsfjordens øvre lag er endret som følge av Ulla-Førre utbyggingen. Ferskvannet som slippes ut i Hylen inneholder store mengder nitrat og silikat, men er fattig på fosfat. Prøvetaginger i forbindelse med stopp av kraftverket har vist at konsentrasjonen av nitrat og silikat i slike

perioder reduseres betydelig i Hylsfjordens brakkevannslag, mens konsentrasjonen av disse næringssaltene opprettholdes i øvrige deler av Sandsfjordsystemet som følge av tilførsel fra andre ferskvannskilder. Tilsvarende er det dokumentert at start av kraftverket i løpet av kort tid igjen fører til betydelige nitrat- og silikatkonsentrasjoner i Hylsfjorden.

Kjøring av kraftverket kan tidvis også gi et næringssalttilskudd via medrivingsprosesser. Dette er viktigst for fosfat som er det begrensende næringssaltet for algeveksten. Medrivingsprosesser har f. eks betydning om våren når vannet som blandes inn i brakkevannslaget i nærsone utenfor kraftverket fortsatt inneholder betydelige fosfatkonsentrasjoner. Utover sommeren avtar næringskonsentrasjonene i det underliggende vannet, og tilførsel via medrivning blir uvesentlig.

Undersøkelsene har vist at algeveksten i Sandsfjordsystemet kan være CO₂-begrenset. Trolig har vann fra Hylen et avvikende CO₂-innhold i forhold til vann fra annen elveavrenning, men det foreligger ikke data om konsentrasjonen fra perioden før Ulla-Førre utbyggingen. CO₂-mangel syntes også å kunne begrense algeveksten i andre deler av fjordsystemet (Saudafjorden). Etterundersøkelsene ble gjennomført før Blåsjømagasinet var fylt opp, og vannet som i fremtiden blir sluppet ut fra Hylen kan ha avvikende kjemiske egenskaper sammenliknet med resultatene rapportert i denne undersøkelsen.

Artsprøvene av planteplanktonet tyder på at diatomeer nå er mer fremtredende i Sandsfjordsystemet i forhold til forundersøkelsen, mens den relative betydningen av diatomeer er redusert i Jøsenfjorden. Dette kan henge sammen med vannkjemien i de to fjordene - silikattilførselen til Sandsfjordsystemet har økt, mens overføringen av ferskvann fra Ulla og Førre til Hylen har fjernet en betydelig silikatkilde fra Jøsenfjorden.

En lagdelt vannmasse om vinteren vil i prinsippet kunne hindre tilførsel av underliggende næringsrikt vann. Fosfatverdiene i oktober og

februar var relativt høye. Endringene i vannkjemi sammen med de endringene i transportforhold som er beskrevet tidligere, innebærer at kraftverket i Hylen er en vesentlig drivkraft for algevekst og -mengde i Hylsfjorden.

7.5. Kobling mellom planteplankton og dyreplankton

Dyreplanktons fruktbarhet påvirkes nesten umiddelbart når fødetilbudet endres. Selv kortidsvariasjoner som utslippene i Hylen har på planteplanktonfordelingen kan derfor forventes å påvirke dyreplanktonproduksjonen hos arter med kort generasjonstid. Eksempler på en slik kortidsvariasjon fremgikk ved oppstartingen av kraftverket både høsten 1988 og sommeren 1989. Kraftverket hadde her ulik innflytelse på plante- og dyreplankton slik at den horisontale overlappingen mellom disse gruppene ble markert endret etter ferskvanns-utslippene.

Lagdelingen i Sandsfjordsystemet hindrer tildels dyreplanktonet å gresse i de øverste metrene. En slik vertikal barriere mellom dyreplanktonet og deler av planteplanktonet var imidlertid fremtredende også i forundersøkelsen, og etterundersøkelsen gir ikke indikasjoner på at disse forholdene er vesentlig endret.

Lagdelingen fører til at våroppblomstringen kommer tidligere enn i en homogen vannsøyle, og økte ferskvannstilførsler om vinteren kan resultere i en dekobling mellom tidspunktet for planteplanktonets våroppblomstring og dyreplanktonets gyting. I de fleste tilfeller vil imidlertid stabiliseringen være av begrensende geografisk utstrekning (f. eks knyttet til fjordsystemet), men rekrutteringen av *Calanus finmarchicus* vil stamme fra områder utenfor, altså områder som ikke er påvirket av de lokale endringene for planteplanktonets vekst. Også under forundersøkelsen var det en markert lagdeling om vinteren i Sandsfjorden. Effekter av eventuell økt stabilisering av vannmassene utenfor fjordsystemet er ikke behandlet i denne undersøkelsen.

7.6. Vassdragseffekter i bassengvannet

Selv om ferskvannsavrenningens direkte påvirkning i hovedsak er begrenset til øvre lag, vil også økologien i dypet påvirkes av endringer i overflateprosesser. Da all plantevekst foregår i de øvre, opplyste lagene er næringstilgangen også for dyptlevende arter i første instans styrt av forhold oppe i vannsøylen. Dessuten kan arter fra bassengvannet tidvis finnes høyere i vannsøylen og dermed være direkte påvirket av kraftverkskjøringen. Dette gjelder f. eks raudåte (*Calanus finmarchicus*). Vi har vist at denne arte dominerer i de øverste metrene om våren. Utover sommeren og høsten vil regulerings-effekter bli transportert mot dypet med raudåta's sesongmessige vertikale vandring. Fosshagen (1979) fant at vekslingene av *C. finmarchicus* i dypet fra år til år ikke var like markerte som dem over 100 m. Likevel syntes det å være en sammenheng mellom størrelsen på sommerbestandene i øvre lag og størrelsen på den overvintrende bestanden.

Også den dominerende makroplanktonarten (*Meganyctiphanes norvegica*) representerer et bindeledd mellom kraftverks-påvirkning i øvre lag og bassengvannet, i dette tilfellet på en døgnlig skala. Krill vandrer mot overflaten om natten, men tilbringer for en stor del dagen i bassengvannet.

Fisk fra bassengvannet vandrer også oppover i mørket. Selv om disse kanskje ikke selv påvirkes av ferskvannsavrenningen, er deres byttedyr bl.a. påvirket av transportprosesser. Igjen vil "spor" av kraftverkseffekter bringes ned i dypet.

7.7. Ulla-Førre utbyggingens innflytelse på forhold utenfor fjordsystemet

Det er gjennom dette prosjektet avdekket at ferskvannsutslippene fra Hylen er en vesentlig faktor i fjordøkosystemet. Hvordan utslippene fra Hylen påvirker områdene utenfor Sandsfjorden har ikke inngått i mandatet for undersøkelsene. Et utfyllende svar på dette spørsmålet krever egne undersøkelser, og vi skal her

bare skissere enkelte problemstillinger.

Spredningen av *Prymnesium parvum* i juli 1989, der alger (eller giftig vann) fra Sandsfjordsystemet drepte fisk flere mil fra fjordutløpet, viser at brakkvannskilen kan ha vesentlig påvirkning i betydelig avstand fra fjorden (se Kaartvedt et al. 1990). Vann som strømmer ut fra Sandsfjorden avviker fra kystvannmassene i flere henseender. Vi har i rapporten vist hvordan våroppblomstringen i det ferskvannspåvirkete fjordsystemet starter flere uker tidligere enn i områdene utenfor. Utstrømming av betydelige brakkvannsmengder om våren kan påvirke blomstringsforløpet utenfor fjordene via ulike mekanismer. Brakkvannet vil til en viss grad stabilisere vannmassene også i ytre områder. Dessuten tilføres "fjordplankton", og dette kan føre til en "seeding" av betydning for blomstringsforløpet også utenfor fjorden.

Ferskvannet representerer et stor tilskudd av nitrat og silikat. Ved maksimalutslipp fra Hylen tilføres ca 3 tonn nitrat i døgnet. Betydelige mengder av dette næringsstoffet eksporteres fra Sandsfjorden, bl.a. fordi algeveksten i det ferskvannspåvirkete fjordsystemet er fosfatbegrenset, noe som hindrer utnyttelse av de store nitratmengdene. Utenfor fjorden er derimot algeveksten gjennomgående nitratbegrenset, mao møtes fosfatbegrensete og nitratbegrensete vannmasser i antatt produktive blandingsområder (fronter).

8. GENERELLE MODELLER FOR EFFEKTER AV KRAFT-UTBYGGING

Modellene som er beskrevet i denne rapporten kan i prinsipp anvendes for en hvilken som helst fjord. Vi vil i det følgende først understreke betydningen av en fjords topografi når det gjelder anvendelse av simuleringsmodeller, da topografien er avgjørende for om en kan betrakte biologien i fjordens vannmasser som et resultat av lokal eller ytre påvirkning. Simuleringsmodellene stiller også visse krav

til data, og vi vil kort peke på hva slags typer data som er nødvendige for å foreta en modellsimulering. Videre diskuterer vi begrensninger i modellene og arbeid som er igangsatt for å øke realismen i disse.

8.1. Biologien i fjordens vannmasser - eksternt eller lokalt drevet.

En fjords størrelse, åpning mot utenforliggende farvann og karakteristiske strømhastigheter er avgjørende for om endringene i biologiske prosesser i vannmassene skyldes påvirkning utenfra fjordsystemet eller prosesser i fjorden selv. Dette er et nøkkelspørsmål i vurdering av effekter av endret ferskvannstilførsel eller andre miljøinngrep, som det er for hensiktmessigheten av å anvende simuleringsmodeller av den typen som er utarbeidet i dette prosjektet.

I en åpen fjord vil biologien i vannmassene domineres av prosesser som foregår utenfor fjorden. F.eks. vil vannkvalitet, mengden av planteplankton og mengden av raudåte og krill i fjorden avhenge av prosesser i Kyststrømmen og i Norskehavet. Derimot, hvis fjorden kan betraktes å være lukket vil fjordens tilstand først og fremst avhenge av lokale prosesser. Lokale manipulasjoner som endringer i ferskvannsutslipp vil i større grad endre tilstanden i den lukkede fjorden enn i den åpne fjorden som i vesentlig grad er styrt av ytre drivkrefter. Hva er så en åpen og en lukket fjord? I det følgende gir vi et enkelt kriterium for å bestemme om en fjord er åpen eller lukket i forhold til en biologisk variabel (som f.eks. algemengde), og dermed om fjorden er eksternt eller lokalt drevet med hensyn på denne variabelen.

Planteplanktonmengde og artssammensetning i en fjord er bestemt av lokal vekst og av mengden plankton som transporteres inn (og ut). Hvis transporten dominerer over den lokale veksten kan fjorden sies å være eksternt drevet med hensyn på planteplanktonmengde. Forholdet mellom transporten av alger inn til (og ut av) fjorden og algemengden i fjorden er avhengig av fjordens størrelse, åpenhet og karakteristiske strømhastighet. Algenes lokale

reproduksjonsevne er imidlertid uavhengig av disse størrelsene. Matematisk kan virkningen av fjordtopografi og karakteristisk strømhastighet bringes på samme form som planteplanktonveksten:

$$Av/V \gg m$$

V representerer det volumet av fjorden (m^3) hvor algeveksten foregår. Dette tilsvarer volumet av den eufotiske sonen og kan i større norske fjorder antas å være 30m multiplisert med arealet av fjorden (i sommerhalvåret). A representerer arealet av fjordens grenseflate (m^2) mot ytre farvann. Et mål for A får en hvis fjordens bredde ved terskelen multipliseres med dybden av eufotisk sone (30 m). Den karakteristiske strømhastigheten over denne grenseflaten (A) er gitt ved v (m/s). Algenes veksthastighet er representert ved m (pr sek). Hvis ulikheten ovenfor er oppfylt vil planteplanktonet i fjorden være eksternt drevet, dvs. at endringer i algemengden i fjorden domineres av prosesser utenfor fjorden, og fjorden kan karakteriseres som åpen med hensyn på algemengde. Omvendt, hvis:

$$Av/V \ll m$$

vil planteplanktonet i fjorden være lokalt drevet, og fjorden karakteriseres som lukket. Hvis de to uttrykkene er tilnærmet like kan en si at lokal og ytre påvirkning er av samme størrelsesorden. I Tabell 16. har vi anvendt formlene for noen tenkte fjorder med forskjellig topografi, men med samme karakteristiske strømhastighet over terskelen.

Vi ser av Tabell 16. at Sandsfjordsystemet (innenfor Nevøy) har en topografi som tilsier at algemengden i fjordsystemet er lokalt drevet. Av eksemplene går det også klart fram at fjordens størrelse ikke er tilstrekkelig for å avgjøre om en fjord er lukket eller åpen. Lindåspollene med et overflateareal på ca 3 km^2 har en lukkethet som tilsvarer det langt større Sandsfjordsystemet. Masfjorden med et areal på ca 30 km^2 er derimot 10 ganger mer åpen (med hensyn på endringer i algemengde) enn Lindåspollene.

Tabell 16. Dominerende pådriv for algemengde i eufotisk sone (30 m) i fjorder med forskjellig topografi. Lokalt: algemengden i fjorden dominert av lokal vekst, Eksternt: algemengden dominert av utveksling med utenforliggende farvann.

Fjordlengde m	Bredde m	Strømhastighet (v) m/s	vA/V pr.s	m pr.s	Dominerende pådriv
1 000	50	0.05	$5 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-6}$	Eksternt
10 000	500	0.05	$5 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-6}$	Lokalt/Eksternt
100 000	2 000	0.05	$5 \cdot 10^{-7}$	$8 \cdot 10^{-6}$	Lokalt
Masfjord-Nord Hordaland		0.10	$2 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-6}$	Lokalt/Eksternt
Lindåspollene		1.00	$2 \cdot 10^{-7}$	$8 \cdot 10^{-6}$	Lokalt
Sandsfjordsystemet (innenfor Nærvøy)		0.10	$5 \cdot 10^{-7}$	$8 \cdot 10^{-6}$	Lokalt
Jøsenfjorden		0.10	0.10	$4 \cdot 10^{-6}$	Lokalt/Eksternt

Analysene ovenfor kan utføres med hensyn på alle komponenter som driver fritt med vannmassene. For dyreplankton ligger den karakteristiske veksthastigheten (m) en størrelsesorden under planteplanktonveksten. Dette betyr at alle fjorder er mer åpen med hensyn på dyreplankton som driver fritt med vannmassene enn med hensyn på planteplankton. For Sandsfjordsystemet vil, i følge en tilsvarende analyse, endringer i dyreplanktonmengden være bestemt både av lokale og ytre prosesser i omtrent samme grad. Tilsvarende betraktninger for Jøsenfjorden gir at mens denne er lokalt/eksternt drevet for planteplankton, er den hovedsakelig eksternt drevet med hensyn på dyreplankton.

Simuleringsmodeller som anvendes for åpne fjorder krever nøye spesifiserte grensebetingelser (dvs målinger som er utført utenfor fjorden) da disse dominerer endringene i fjorden. Ved sterkt ytre pådriv (stor grad av åpenhet) vil modellsimuleringer ha liten verdi da simuleringsresultatene vil ligge nær opp til de målte grenseverdiene. For mer lukkede systemer vil derimot simuleringsresultatene være lite avhengige av grensebetingelsene og desto mer avhengig av lokale drivkrefter (f eks ferskvannsavrenning). Det er første og fremst i slike tilfeller en har nytte av simuleringsmodeller for å undersøke effekter av lokale manipulasjoner. Nyttan er imidlertid fortsatt avhengig av visse måledata og ikke minst modellens realisme. Dette berøres i de to neste punktene.

8.2. Data som er nødvendige for modell-simuleringer.

Topografisk gitternett.

Det topografiske gitternettet må gjenspeile fjordens topografi ved at bunndyp og fjordens bredde angis for punkter med valgt horisontal og vertikal avstand fra ytterst til innerst i fjorden (se Fig. 16). For tre-dimensjonale modeller må dybdepunkter (eventuelt landpunkter) angis både på langs og på tvers av fjorden.

Startverdier.

Enhver simulering krever kjente temperatur-, salt-, næringssalt- og algedata for første dag i simuleringsperioden. Dersom høyere organismer som dyreplankton og fisk skal være med i modellen må en også ha startverdier for disse. For hele simuleringsperiodene må en ha data for drivkreftene, dvs ferskvannsavrenning (med næringssaltinnhold), vind og lysinnstråling.

Modellområdet er avgrenset mot ytre farvann hvor dynamikken i vesentlig grad er bestemt av prosesser. Tilstanden utenfor modellområdet virker inn på tilstanden i modellområdet (se forrige avsnitt) og måledata må nyttes for å karakterisere den ytre påvirkningen under simuleringsperioden. Salt-, temperatur- og vannstandsdata er nødvendige for å gi realistiske utvekslingsforhold mellom den simulerte fjorden og de ytre farvannene. For de biologiske variablene er betydningen av grenseverdiene i stor grad bestemt av fjordens åpenhet slik som diskutert ovenfor.

8.3 Begrensninger i modellene og videre modellutvikling ved Universitetet i Bergen

Både nasjonalt og internasjonalt er utvikling av fysisk-biologiske komplette simuleringsmodeller et forholdsvis nytt arbeidsområde. Realismen i slike modeller er best på de "lavere" nivåene, dvs. på temperatur-, salt-, næringssalt- og strømningsnivå, men også på disse nivåene har modellene viktige begrensninger. Resultater fra ekte tre-dimensjonale modeller har sjelden blitt presentert. Dette har delvis sammenheng med begrenset tilgang på regne-

ressurser, men mer fundamentalt er problemet med å parametrisere horisontal og vertikal turbulens. Det satses idag relativt mye både nasjonalt og internasjonalt på å utvikle tre-dimensjonale modeller på både global og regional skala. Ved Geofysisk institutt, Universitetet i Bergen, arbeides det idag med en tre-dimensjonal versjon av modellen som er presentert i denne rapporten. Ved instituttet er det også startet utvikling av en tre-dimensjonal koplet fjord-kyst modell. Vi venter således at en i løpet av få år kan ta i bruk mer realistiske fysiske modeller.

Total algeproduksjon er også relativt godt beskrevet av dagens simuleringsmodeller da modellene synes å inkludere de viktigste drivkreftene og prosessene for planteproduksjonen. Modellene trenger imidlertid videreutvikling for å kunne simulere forskjellige algegrupper. Oppblomstringen av *Prymnesium parvum* i Ryfylkefjordene viste at forvaltningsmessig kan nettopp algegruppen være viktigere enn selve omfanget av algeproduksjonen. Vi har i dag satt i gang flere prosjekt som har som målsetting å kunne simulere forskjellige algegrupper, og arbeidet innenfor disse prosjektene vil øke nytten av algesimuleringsmodeller de neste årene.

På de høyere nivåene i næringskjeden er kjennskapet til de biologiske prosessene for dårlig til at modellene kan sies å ha en ønsket grad av realisme. Hovedproblemet er å håndtere dyrenes atferd på en kvantitativ måte. Adferden må forstås kvantitativt for at en skal kunne forutsi effekten av manipulasjoner. F eks må en vite hvordan fødeadferd styres av lystilgang for at en skal kunne si noe om hvordan et endret lysklima (som følge av f eks økt tilstedeværelse av ferskvann) virker inn på en fiskebestands vandring og vekst. Kunnskapsmangelen om slike prosesser synes å være mer fundamental enn i den fysiske oseanografien. Dette betyr at et relativt vidt spekter av biologisk og økologisk kunnskap må erverves før en kan presentere realistiske simuleringsmodeller for høyere nivå i næringskjeden. Ved Institutt for fiskeri- og marinbiologi (Universitetet i Bergen) er det etablert, delvis med

bakgrunn i erfaringene fra Ryfylke undersøkelser, en egen forskergruppe som har som mål å frambringe kvantitativ økologikunnskap som er egnet til å øke realismen i neste generasjon av koplete fysisk-biologiske simuleringsmodeller.

9. LITTERATUR

- Aksnes, D., Aure, J., Kaartvedt, S., Magnesen, T. & Richard, J, 1989. Significance of advection for the carrying capacities of fjord populations. - *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 50: 263-274.
- Aksnes, D. & J. Giske, 1989. *FORTTRAN codes for MODMAS-0, a pelagic ecosystem model of Masfjorden, Western Norway*. IMB Rapport 6/89. Department of Marine Biology, University of Bergen, 115 pp.
- Aksnes, D. & U. Lie, 1990. A Coupled Physical-Biological Pelagic Model of a Shallow Sill Fjord. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 31: 459-486
- Buckley, J. R. & S. Pond 1976. Wind and the surface circulation of a fjord. - *J. Fish. Res.* 33(10):2265-2271.
- Cannon, G. A. 1972. Wind effects on currents observed in Juan de Fuca submarine canyon. - *J. Phys. Ocean.* 2(3):281-285.
- Ellison, T. & J. S. Turner 1959. Turbulent entrainment in stratified flow. - *J. Fluid. Mech.* No 6.
- Erga, S. R. 1989. *The importance of external physical controls on vertical distribution of phytoplankton and primary production in fjords of western Norway*. Dr. Scient. thesis. University of Bergen. 158 pp.
- Forward, R.B. & Fyhn, H.J. 1983. Osmotic regulation of the krill *Meganyctiphanes norvegica*. - *Comp. Biochem. Physiol* 74A:301-305.
- Fosshagen, A. 1979. *Dyreplankton i Ryfylkefjordene, 1973-1975*. Rådgivende utvalg for fjordundersøkelser. Ryfylkeprosjektet. Rapport nr. 2: 1-138
- Frost, B.W. 1985. Food limitation of the planktonic marine copepods *Calanus pasificus* and *Pseudocalanus* sp. in a temperate fjord. - *Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol.* 21:1-13.
- Gade, H. G. 1976. Transport mechanisms in fjords. Pp. 51-56 i *Freshwater on the sea.*, S. Skreslet, R. Leinebø, J. B. L. Matthews & E. Sakshaug (red.)
- Giske, J., D. L. Aksnes, U. Lie & S. M. Wakili 1991. Computer simulation of pelagic production in Masfjorden, western Norway, and its consequences for production of released 0-group cod. *ICES mar. Sci. Symp.*, 192: 161-175
- Harrison, P. J., J. D. Fulton, F. J. R. Taylor & T. R. Parsons 1983. Review of the biological oceanography of the Strait of Georgia: pelagic environment. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 40: 1064-1094
- Holbrook, J. R., R. D. Muench & G. A. Cannon 1980. Seasonal observations of low frequency atmospheric forcing in Strait of Juan de Fuca. In H. J. Freeland, D. M. Farmer & C. D. Levings (eds). *Fjord Oceanography*. Plenum Press, New York.

-
- Holm-Hansen, O., C. J. Lorenzen, R. W. Holmes & J. D. H. Strickland 1980. Fluorometric determination of chlorophyll. *J. Cons. int. Explor. Mer* 30: 3-15
- Holm Hansen, O. & Rieman B. 1978. Chlorophyll *a* determinations: improvements in methodology. *Oikos* 30: 438-447
- Hovgaard, P. 1984. *Blåskjell i Ryfylkefjordene*. Rådgivende utvalg for fjordundersøkelser. Ryfylkeprosjektet. Rapport nr. 4: 1-30
- Johnsen, T. M. & T. E. Lein 1989. *Prymnesium parvum* Carter (Prymnesiophyceae) in association with macroalgae in Ryfylke, southwestern Norway. *Sarsia* 74: 277-281
- Johnsen, T. M., S. Kaartvedt & D. L. Aksnes 1989. *Identifikasjon og tidlige observasjoner av Prymnesium parvum blomstringen i Ryfylkefjordene, juli-august 1989*. IMB Rapport 15/89, 19 pp.
- Kjørboe, T. 1988. *Planktonfødekæden: Bioenergetiske og økologiske studier*. Dr-thesis, Danmarks Fiskeri- og Havundersøkelser.
- Kjørboe, T., Kaas, H., Kruse, B., Møhlenberg, F., Tiselius, P. & Ærtebjerg, G. 1990. The structure of the pelagic food web in relation to water column structure in the Skagerrak. - *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 9: 19-32.
- Klinck, J., J. J. O'Brien & H. Svendsen 1981. A Simple Model of Fjord and Coastal Circulation Interaction. - *J. Phys. Oceanogr.* 11(12).
- Kaartvedt, S., Johnsen, T., Aksnes, D. Lie, U. & Svendsen, H. 1990. *Giftalgen Prymnesium parvum i Ryfylkefjordene, juli-august 1989*. IMB-rapport 1990 no 2: 68 pp.
- Kaartvedt, S. & H. Svendsen 1990. Impact of freshwater runoff on physical oceanography and plankton distribution in a western Norwegian fjord: an experiment with a controlled discharge from a hydroelectric power plant. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 31: 381-395
- Lindahl, O. 1987. *Plankton community dynamics in relation to water exchange in the Gulmarfjord, Sweden*. Dr.-thesis, Universitetet i Stockholm.
- Mikki, S. 1988. *Numerische Untersuchungen im Sandsfjordsystem*. Rapport. Geofysisk institutt, Universitetet i Bergen.
- Nebeker, A., D. G. Steevens & R. K. Stroud 1976. Effects of air-supersaturated water on adult sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*). - *J. Fish. Res. Board Can.* 33:2629-2633.
- Nygaard, I. 1979. *Planteplankton i Ryfylkefjordene 1972 - 1975*. Rådgivende utvalg for fjordundersøkelser. Ryfylkeprosjektet. Rapport nr. 1: 1-137
- Parsons, T. R., M. Takahashi & B. Hargrave 1977. *Biological oceanographic processes*. 2nd ed. Pergamon Press, Oxford. 332 pp.
-

-
- Runge, J.A. 1988. Should we expect a relationship between primary production and fisheries? The role of copepod dynamics as a filter of trophic variability. -*Hydrobiologia* 167/168: 61-71.
- Røed, L. P., H. Skåtun & T. B. Irmann-Jacobsen 1990. *Autrofi-situasjonen i ytre Oslofjord 1989, Delprosjekt 4.8: Transportmodell, simuleringer av strøm, sporstoffer og partikkelbaner. En analyse og oppsummering*. Statlig program for forurensningsovervåking. Rapport 412/90.
- Smetacek, V.S. 1986. Impact of freshwater discharge on production and transfer of materials in the marine environment. Pp. 85-106 in: S. Skreslet (ed). *The role of freshwater outflow in coastal marine ecosystems*. Nato ASI series, Springer Verlag, Berlin Heidelberg.
- Svendsen, H. 1977. A study of the circulation in a sill fjord on the west coast of Norway. - *Mar. Sc. Comm.*, Vol. 3, No. 2, 151-209.
- Svendsen, H. 1979. *Vindeffekt i fjorder*. Hovedoppgave. Geofysisk institutt, Universitetet i Bergen.
- Svendsen, H. 1981. *A study of circulation and exchange processes in the Ryfylkefjords*. Dr-thesis, Universitetet i Bergen.
- Svendsen, H. & R.O.R.Y. Thompson 1978. Wind-driven circulation in a fjord. - *J. Phys. Oceanogr.* 8(4):703-713.
- Svendsen, H. & N. Utne 1979. *Fysisk-oseanografiske undersøkelser i Ryfylkefjordene 1972-1977*. Rådgivende utvalg for fjordundersøkelser. Ryfylkeprosjektet. Rapport nr. 3: 1-81.