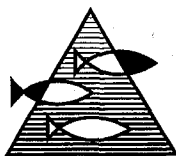


# PROSJEKTRAPPORT

ISSN 0071-5638



## HAVFORSKNINGSINSTITUTTET

MILJØ - RESSURS - HAVBRUK

Nordnesgaten 50 Postboks 1870 5817 Bergen

Tlf.: 55 23 85 00 Faks: 55 23 85 31

Forskningsstasjonen

Flødevigen

4817 His

Tlf.: 37 05 90 00

Faks: 37 05 90 01

Austevoll

havbruksstasjon

5392 Storebø

Tlf.: 56 18 03 42

Faks: 56 18 03 98

Matre

havbruksstasjon

5984 Matredal

Tlf.: 56 36 60 40

Faks: 56 36 61 43

Distribusjon:

ÅPEN

HI-prosjektnr.:

Oppdragsgiver(e):

MARICULT

Oppdragsgivers referanse:

471/TBS

Rapport:

FISKEN OG HAVET

NR. 11 - 2000

Tittel:

FJORDCULT: Økt biologisk produksjon i fjorder ved kunstig oppstrømning av dypvann.  
*Increased biological production in fjords by artificial upwelling.*

Senter:

Marint Miljø

Seksjon:

Fysisk

Forfatter(e):

Jan Aure, Svein Rune Erga og Lars Asplin

Antall sider, vedlegg inkl.:

30

Dato:

25.10.2000

Sammendrag:

Beregninger basert på observerte miljøforhold i Samnangerfjorden viser at primærproduksjonen etter vårblomstringen potensielt kan økes 3 – 4 ganger ved en ferskvannsdrevet kunstig oppstrømning av næringsrikt dypvann. Kunstig oppstrømning av dypvann vil trolig redusere forekomstene av giftige flagellatalger og bedre vekstforholdene for skjell og makroalger i fjorder. I fortsettelsen av prosjektet er det planlagt å etablere et forsøksanlegg for kunstig oppstrømning i Samnangerfjorden for å etterprøve resultatene i undersøkelsen.

Emneord - norsk:

1. Fjord
2. Kunstig oppstrømning
2. Algeproduksjon

Emneord - engelsk:

1. Fjord
2. Artificial upwelling
3. Algae production



Prosjektleder



Seksjonsleder

# **FJORDCULT**

## **Økt biologisk produksjon i fjorder ved kunstig oppstrømning av dypvann.**

*(Increased biological production in fjords by artificial upwelling)*

Av

Jan Aure, \*Svein Rune Erga og Lars Asplin

\* Universitetet i Bergen

**Havforskningsinstituttet**

oktober 2000

# INNHOILDSFORTEGNELSE

SAMMENDRAG	2
SUMMARY	
1. INNLEDNING	4
2. OMRÅDEBESKRIVELSE OG MÅLEPROGRAM	6
3. MILJØFORHOLD OG PLANKTONPRODUKSJON	10
3.1 Hydrografi og vanntporter	10
3.2 Næringssalter	14
3.3 Partikulært organisk materiale, klorofyll - <i>a</i> og oksygen	17
3.4 Produksjon av planteplankton	21
4. KUNSTIG OPPSTRØMNING	23
4.1 Ferskvannsdrevet kunstig oppstrømning av næringssalter	23
4.2 Beregnet økning i planktonproduksjon og influensområde	25

## SAMMENDRAG

Naturlig oppstrømningsområder forekommer i havområder og medfører en mer eller mindre kontinuerlig tilførsel av næringsrikt dypvann til overflatelaget. Områdene er karakterisert ved en meget høy biologisk produksjon. Produksjonen av planteplankton i et oppstrømningsområde utenfor nordvestkysten av Spania, som har den største skjellproduksjonen i Europa, er f.eks. omlag 5 ganger større enn typisk primærproduksjon i norske fjorder og kystområder etter vårbloomstringen.

En rik produksjon av planteplankton er avhengig av tilstrekkelig lys, næringssalter og karbondioksyd. I våre fjord og kystområder bygger det seg opp høye verdier av næringssalter i løpet av vinteren. Under vårbloomstringen i mars måned, som varer noen få uker, er det en eksplosiv vekst av planteplankton (diatomeer) som bruker opp det meste av næringssaltene ned til 25 - 30 meter dyp. Vårbloomstringen bidrar med nesten halvparten av årsproduksjonen av planteplankton og i resten av sommerhalvåret er produksjonen næringssaltbegrenset og algeproduksjonen pr tidsenhet er vesentlig mindre enn under vårbloomstringen.

Norske fjorder egner seg i utgangspunktet godt for å utprøve kunstig oppstrømning på grunn av deres begrensede størrelse, rikelig tilgang på næringssalter under 20 - 30 meter dyp og god tilgang på ferskvann som kan brukes til å transportere næringssalter opp i produksjonslaget.

Ferskvannsdrevet oppstrømning av næringsrikt dypvann vil kunne øke algeproduksjonen betydelig i et fjordområde, bidra til en jevnere algeproduksjon og samtidig redusere forekomstene av alger som gir giftige skjell. Tidligere forsøk i poller og i poser plassert i sjøen har vist at når sjøvann tilføres næringssalter med en balansert sammensetning av nitrat, fosfat og silikat vil algeproduksjonen øke og silikatforbrukende diatomeer dominere artsammensetningen.

I et samarbeidsprosjekt mellom Havforskningsinstituttet, Universitetet i Bergen og SINTEF Bygg og miljøteknikk, Trondheim under forskningsprogrammet MARICULT er mulighetene og evt. hindringer for økt biologisk produksjon i norske fjorder ved kunstig oppstrømning av næringsrikt dypvann blitt vurdert.

En viktig del av prosjektet var å utvikle et system for ferskvannsdrevet oppstrømning av dypvann til produksjonslaget. På bakgrunn av observasjoner av hydrografi og næringssalter i Samnangerfjorden i 1999, har vi vist at et utslipp av ferskvann på feks  $8 \text{ m}^3/\text{s}$  i 35 m dyp med en helningsvinkel på ca 35 grader, kan transportere  $80 - 100 \text{ m}^3/\text{sek}$  næringsrikt dypvann opp til produksjonslaget. Midlere tilførsler av nitrat, fosfat og silikat til produksjonslaget i vekstsesongen, med innlagingsdyp mindre enn 15 meter, er beregnet til henholdsvis omlag 500, 60 og 700 kg pr døgn.

Basert på at de tilførte næringssaltene omsettes til algeproduksjon og at produksjonen foregår over et areal på ca  $10 \text{ km}^2$ , er ny algeproduksjon etter vårbloomstringen basert på ferskvannsdrevet oppstrømning av dypvann beregnet å øke fra ca 20 til  $80 \text{ gC}/\text{m}^2$ . Totalproduksjonen (primærproduksjonen) fra april til september er beregnet å øke fra en naturlig produksjon på ca  $70 \text{ gC}/\text{m}^2$  til  $210 - 260 \text{ gC}/\text{m}^2$ . Algeproduksjonen i Samnangerfjorden kan dermed potensielt økes med en faktor på 3 - 4 med kunstig oppstrømning av dypvann. De tilførte næringssaltene er naturlig velbalanserte og algesamfunnet i øvre lag vil trolig domineres av diatomeer (ikke giftige alger)

I fortsettelsen av prosjektet er det planlagt å etablere et forsøksanlegg for kunstig oppstrømning i Samnangerfjorden for å etterprøve det ferskvannsdrevne blandingssystemet og undersøke responsen på fysisk/kjemiske forhold, algesammensetning og algeproduksjon.

I dag ser vi for oss at kunstig oppstrømning bør kunne få anvendelse i forhold til dyrking av organismer lavt i næringskjeden som skjell og makroalger. Avgiftingsanlegg for f.eks. blåskjell er en særlig interessant mulighet. I en eventuell senere fase av vil vi undersøke i hvilken grad kunstig oppstrømning av næringsrikt dypvann kan redusere problemet med skjellgiftalger og øke vekstmulighetene for skjell og makroalger. I denne fasen er det også planlagt å undersøke hvordan økosystemet i en fjord responderer på en kunstig og kontinuerlig tilførsel av næringsrikt dypvann over lengre tid.

### **Konklusjoner:**

- Beregninger basert på naturgitte miljøforhold i Samangerfjorden viser at algeproduksjonen etter vårblomstringen potensielt kan økes 3 – 4 ganger ved ferskvannsdrevet kunstig oppstrømning av næringsrikt dypvann. Den kunstige oppstrømningen av dypvann vil trolig også redusere forekomstene av giftige flagellatalger.
- Samnangerfjorden er en meget hensiktsmessig fjord for å teste ut økt biologisk produksjon i fjorder ved kunstig oppstrømning og undersøke vekstpotensialet for skjell og makroalger .
- I Norge er det en rekke fjorder hvor forholdene ligger tilrette for økt plankton - produksjon ved kunstig oppstrømning (ferskvann og kort vei ned til næringsrikt dypvann).

### **Summary:**

*Our investigations show that artificial upwelling of nutrient rich waters in fjords, using a submerged fresh water discharge, have a potential to increase the algae production by a factor of 3 – 4 after the spring bloom and probably also reduce the occurrence of toxic flagellate algae.*

*The Samnanger fjord is suitable as a natural laboratory for testing the effects of artificial upwelling on the biological productivity and increased growth of e.g. mussels and macro algae.*

*In general, a large number of Norwegian fjords can have increased biological production because of the availability of nutrient rich deep waters and fresh water sources suitable for submerging .*

## 1. INNLEDNING

FJORDCULT er et samarbeidsprosjekt mellom Havforskningsinstituttet, Universitetet i Bergen og SINTEF Bygg og miljøteknikk, Trondheim under forskningsprogrammet MARICULT. Målsettingen i den første fasen av prosjektet som startet i 1999 var å:

*Undersøke mulighetene og evt hindringer for økt biologisk produksjon i fjorder ved kunstig oppstrømning av næringsrikt dypvann.*

Hovedelementene i undersøkelsen i 1999/2000 var :

- Å kartlegge naturgitte miljøforhold i Samnangerfjorden (fysikk, kjemi og primærproduksjon).
- Å videreutvikle en beregningsmodell for heving av næringsrikt sjøvann til produksjonslaget ved bruk av dykket ferskvannsutslipp. Utføre beregninger av innlagringsdyp og tilførsler av næringsalter til produksjonslaget basert på observerte miljøforhold.
- Å utføre beregninger av vannsirkulasjon og økning i algeproduksjon ved kunstig oppstrømning av næringsrikt dypvann.

I fortsettelsen av prosjektet er det planlagt å etablere et forsøksanlegg for kunstig oppstrømning i Samnangerfjorden for å etterprøve det ferskvannsdrevne blandingssystemet og undersøke responsen på fysisk/kjemiske forhold, algesammensetning og algeproduksjon (fase II). I en evt fase III (avhengig av resultatene i fase II) vil vi undersøke i hvilken grad kunstig oppstrømning av næringsrikt dypvann kan redusere problemet med skjellgiftalger og øke vekstmulighetene for skjell og makroalger. I denne fasen er det også planlagt å undersøke hvordan økosystemet i en fjord over en lengre tidsskala responderer på en kunstig og kontinuerlig tilførsel av næringsrikt dypvann.

### Bakgrunn

En rik produksjon av planteplankton i våre fjordområder er avhengig av tilstrekkelig lys, næringssalter og karbondioksyd. Hver vinter bygger det seg opp høye verdier av næringssalter og i februar – mars starter vårbloomstringen i kyst og fjordområdene. Denne har en varighet på 2 - 3 uker. Den hektiske produksjonen under vårbloomstringen bidrar med omlag 50 % av årsproduksjonen av planteplankton i kyst - og fjordområdene. Resten av året, fram til september - oktober er det lave næringssaltkonsentrasjoner i øvre 25 - 30 m av vannsøylen og produksjonen pr tidsenhet er vesentlig mindre enn under vårbloomstringen. I fjordene er produksjonen av nytt plankton i perioden fra april til oktober for en stor del avhengig av begrensede tilførsler av næringssalter fra elver og fra dypvannet gjennom vertikal blanding.

I naturlige oppstrømningsområder er det en kontinuerlig tilførsel av næringsrikt dypvann til overflatelaget og det er en meget høy primærproduksjon pr flateenhet. Verdens best kjente oppstrømningsområde finner vi utenfor kysten av Peru. Produksjonen av planteplankton i et oppstrømningsområde utenfor nordvestkysten av Spania (Galicia), som har den største skjellproduksjonen i Europa (Figueiras and Reiriz, 2000) er feks omlag 5 ganger større enn typisk planktonproduksjon i norske fjord - og kystområder om sommeren.

I Norge har det ikke tidligere vært gjort forsøk med storskala kunstig oppstrømning for å øke produksjonen av planteplankton i fjorder og redusere sannsynligheten for giftige alger. I endel

mindre poller og i store poser i sjøen har en tilført næringssalter for å øke produksjonen og styre algesammensetningen ( se feks Aksnes *et al.*,1985, Egge *et al.*, 2000).

Norske fjorder egner seg i utgangspunktet godt for å utprøve kunstig oppstrømning med bla rikelig tilgang på næringssalter under 20 - 30 meter dyp og god tilgang på ferskvann som kan brukes til å transportere næringssalter opp i produksjonslaget (Aksnes *et al.*, 1985, Berntsen *et al.*, 2000)

## 2. OMRÅDEBESKRIVELSE OG MÅLEPROGRAM

Samnangerfjorden har et areal på ca 30 km<sup>2</sup>, er ca 20 km lang og har ingen terskel ut mot Fusafjorden (fig.1). Største dyp i fjorden er på ca 400 meter. I indre del av fjorden er det et terskeldyp ved Straumsneset på ca 85 meter og største dyp innenfor terskelen er på ca 240 m. Denne delen av fjorden har et overflateareal på ca 8 km<sup>2</sup>.

Fjorden har ferskvannstilførsel fra et vannkraftverk og et forholdsvis stort uregulert restfelt med utløp i den indre del av fjorden ved Tysse (fig.1). Frøland kraftverk (BKK) munner ut i Frølandsvannet ovenfor Tysse og har en normalkjøring mellom ca 3 og 18 m<sup>3</sup>/s. Samnangerområdet har en årsnedbør på 3000 - 3500 mm, slik at ferskvannstilførselen fra restfeltet vanligvis også er betydelig. Maksimale behov for ferskvann til et evt forsøksanlegg for kunstig oppstrømning i fjorder er beregnet til ca 8 m<sup>3</sup>/s, med inntak i fossen i Tysseelva 6 - 7 meter over havnivå.

Samnangerfjorden ved Bergen ser ut til å tilfredstille de fleste krav til en hensiktsmessig lokalisering for et storskala fjordkultiveringsforsøk:

- Tilstrekkelig tilgang på ferskvann
- Ytre del av fjorden har ingen terskel mot Fusafjorden. Indre del dyp terskel (85m)
- Kort avstand fra land til dyp på 30 - 60 meter utenfor Tysseelva .
- Kort avstand fra Bergen med bil og båt.

Målsettingen med observasjonene i 1999 var å:

- Kartlegge hydrografi, strømforhold, lysforhold, næringssalter, partikulært materiale, klorofyll - *a*, planteplankton og planktonproduksjon i Samnangerfjorden i en førsituasjon. Ut fra strømobservasjonene beregne typiske transporter av vann og beregne oppholdstiden for det algeførende lag i indre del av fjorden utenfor Tysse.
- Innhente miljødata for bedre å kunne simulere tilførsel av dypvann og næringssalter til produksjonlaget ved kunstig ferskvannsdrevet oppstrømning.
- Skaffe datagrunnlag for testing av numerisk fjordmodell og for beregning av endringer i fysisk - kjemiske forhold og primærproduksjonen i fjorden ved kunstig oppstrømning av dypvann

Det ble gjennomført 13 tokt til Samnangerfjorden fra mars 1999 til januar 2000 (tabell 1). Måleprogrammet besto av 5 stasjoner, hvorav S1 og S3 var hovedstasjonene i Samnangerfjorden og referansestasjon S5 ble lagt til Fusafjorden (fig1)

Tabell 1. Stasjonsposisjoner (se fig. 1). *Positions of stations, fig 1.*

Stasjon	Nord	Øst
S1	60° 23.1'	5° 44.4'
S2	60° 20.7'	5° 40.1'
S3	60° 17.6'	5° 37.7'
S4	60° 15.4'	5° 34.5'
S5	60° 13.8'	5° 37.7'



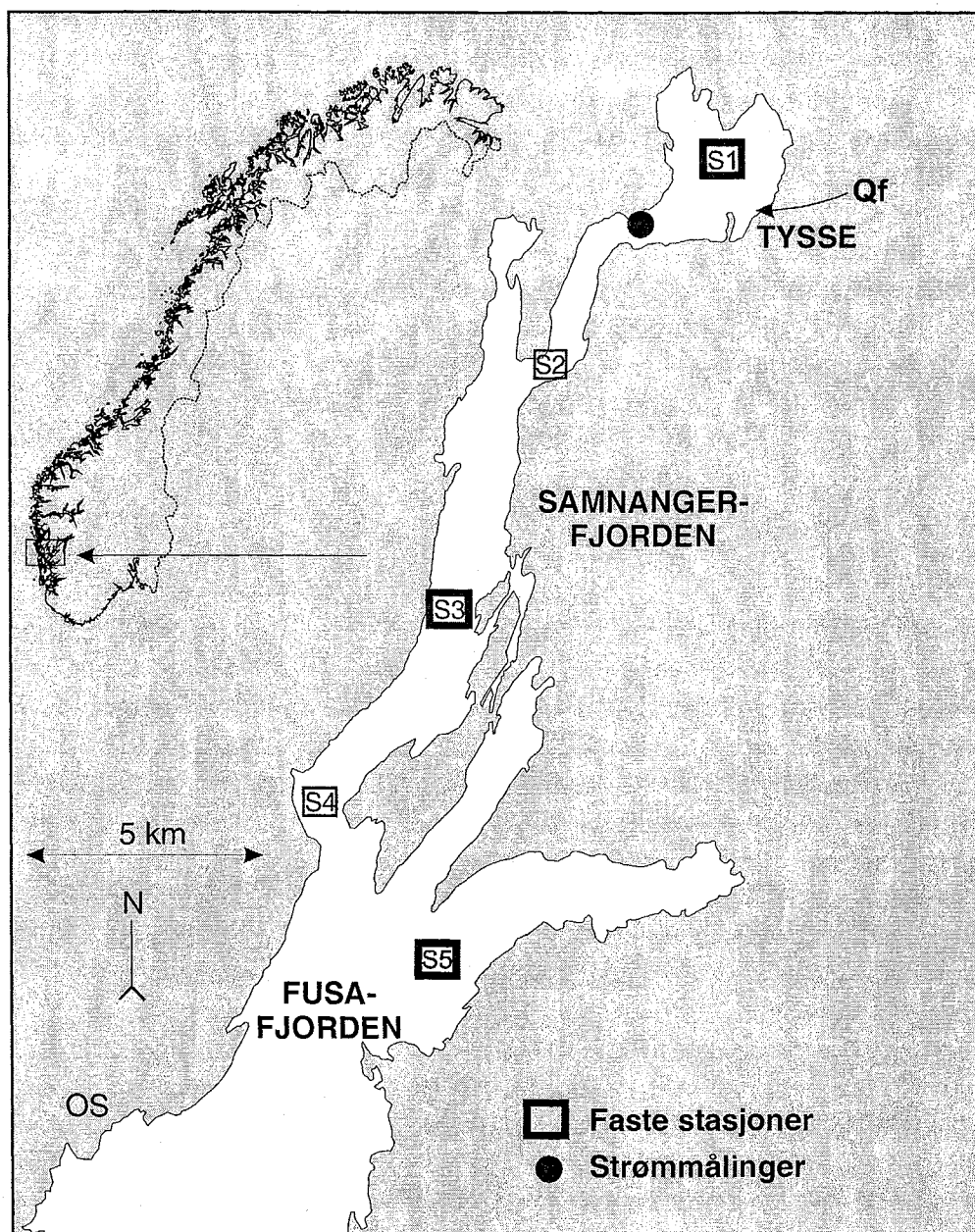


Fig 1. Kart over området med faste målestasjoner (S1 – S4) og lokalitet for strømmålinger (Straumsneset) i Samnangerfjorden, samt referansestasjon S5 i Fusafjorden. Stasjonene S1, S3 og S5 er hovedstasjoner.  
 Location of fixed stations and current meter observations in the Samnangerfjord and Fusafjord.

Tabell 2. Tokt med F/F Brattstrøm i 1999 - 2000. *Cruises in 1999 - 2000*

Tokt nr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Dag	16-17	14-15	29	27-28	16-17	7-8	4-5	18-19	1-2	22-23	20-21	12-13	11-12
Måned	3	4	4	5	6	7	8	8	9	9	10	11	1-00

Tabell 3. Måleprogram for undersøkelsene i Samnangerfjorden i 1999-2000. Stasjonene S1, S3 og S5 er hovedstasjoner. *Observation program in the Samnangerfjord in 1999-2000.*

PARAMETRE	T, S, Fluorc, lys	O <sub>2</sub>	UN	POC, PON	Klorofyll - a
MÅLESTASJONER	S1 - S5	S1, S3, S5	S1 - S5	S1, S3, S5	S1, S3, S5
MÅLEDYDYP (m)	Kontinuerlige målinger				
0		*	*	*	*
1		*	*	*	*
3		*	*	*	*
5		*	*	*	*
7		*	*	*	*
10		*	*	*	*
15		*	*	*	*
20		*	*	*	*
25		*	*	*	*
30		*	*	*	*
40		*	*	*	*
50		*	*	*	*
60		*(S1)	*	*	*(S1)
80		*(S1)	*	*	
100		*(S1)	*(S1)		
125		*(S1)	*(S1)		
150		*(S1)	*(S1)		
175		*(S1)	*(S1)		
200		*(S1)	*(S1)		

\* Planteplankton ble samlet inn i utvalgte dyp ved hovedstasjonene S1, S3 og S5 og det ble på hvert tokt utført *in situ* produksjonsmålinger på stasjon S3 i 0 - 30 meter.

Strømmålinger ved Straumsneset i Samnangerfjorden (60°22.37' N, 5° 42.3' Ø) ble utført i perioden fra 13.juni til 7.juli 1999 med Aanderaa RCM - 7 strømmålere (fig.1). Måledypene var 5 m, 10 m, 15 m, 20 m og 30 m. Strømfart, retning, saltholdighet og temperatur ble observert hvert 10 minutt.

## Målemetoder

### Primærproduksjon

Primærproduksjonen ble målt ved døgnlige *in situ* inkuberinger på stasjon 3 ved hjelp av <sup>14</sup>C - teknikken (Steemann Nielsen 1952). Dette foregikk ved at <sup>14</sup>C - merket bikarbonat ble tilført vannprøver fra standard dyp (se ovenfor). Prøvene ble så i 125 ml glassflasker satt ut på sine respektive dyp i sjøen ved hjelp av et spesielt oppheng. Etter ett døgnns innkubering ble så prøvene tatt opp, filtrert (GF/F filter) og frosset før analyse. Det ble korrigert for mørkeopptak av <sup>14</sup>C. Selve analysen foregikk ca en uke senere. Etter opptining ble prøvene behandlet med konsentrert saltsyre for å fjerne rester av uorganisk <sup>14</sup>C. Aktiviteten i prøvene ble målt i en Packard 1900CA TRI-CARB væskescintillasjonsteller etter tilsetning av 10 ml Ultima Gold tellervæske. Korreksjon for "quenched" foregikk ved Channels ratio-metoden. Total karbon dioksid innhold i sjøvannet ble beregnet ut fra saltholdighet i henhold til Parsons *et al.* 1992.

### Optiske målinger i vann

Spektrale lysmålinger på 308 nm, 320 nm, 340 nm og 380 nm samt synlig lys (PAR) 400-700 nm ble utført med en PUV 500 sonde (cosinus sensor) fra Biospherical Instruments Inc. Enhetene for UV kanalene og PAR kanalen er henholdsvis  $Wcm^{-2}nm^{-1}$  og  $\mu Ecm^{-2}s^{-1}$ .

Lysabsorpsjon (a) og spredning (b) ble målt ved hjelp av et profilerende instrument av typen AC-9 fra WET Labs. Dette instrumentet måler direkte lysabsorpsjon og lyssvekking (c) på 9 ulike bølgelengder innen det spektrale området 412 nm – 712 nm. Spredningen b kan så beregnes ved relasjonen :  $b = c - a$  hvor enheten er  $m^{-1}$ .

Temperatur, saltholdighet og fluoresense ble målt med Seabird SBE 911 plus CTD med Sea Tech fluoremeter og STD SAIV a/s SD 204 med Sea Point fluoremeter.

Uorganiske næringssalter, partikulært organisk materiale (POC og PON) samt klorofyll - a ble innsamlet og analysert etter standard metoder ved Kjemiseksjonen - Havforskningsinstituttet.

### 3. MILJØFORHOLD OG PLANKTONPRODUKSJON

#### 3.1 Hydrografi og vanntransporter

Variasjonene i saltholdighet, temperatur og vannutsiftning i de øverste 80 meter av Samnangerfjorden er hovedsakelig bestemt av hydrografiske endringer i kystvannet og Bjørnefjorden/Fusafjorden. Nedstrømning av vann langs kysten (downwelling) fører til innstrømning av vann med lavere saltholdighet i øvre lag og utstrømning i dypere liggende lag, mens oppstrømning av dypvann langs kysten (upwelling) fører til den motsatte sirkulasjon, med utstrømning i øvre og innstrømning i dypere lag av fjordsystemet.

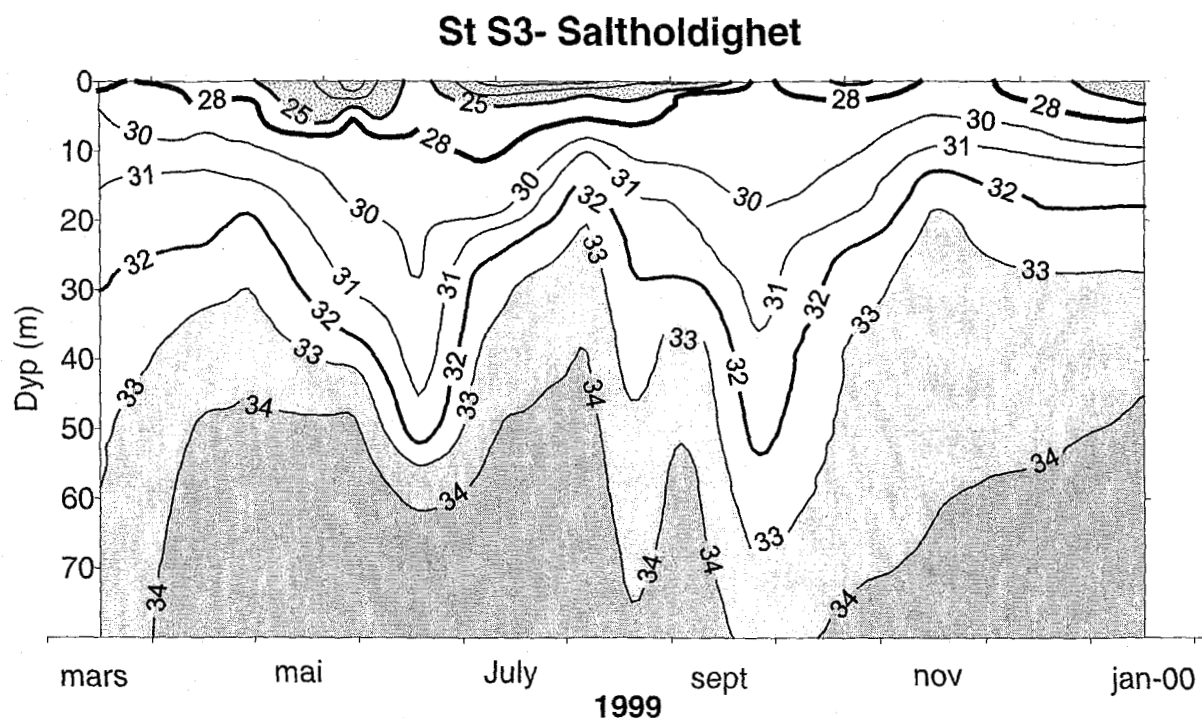


Fig 2. Saltholdighet i de øverste 80 meter ved stasjon S 3 i Samnangerfjorden fra mars 1999 til januar 2000.  
*Salinity in the upper 80 meters of the Samnangerfjord from March 1999 to January 2000.*

I Samnangerfjorden er det et brakkvannslag på 1 - 2 meters tykkelse knyttet til lokal ferskvannsavrenning. Fig. 2 viser at det i 1999 var fire markerte innstrømninger av ferskere kystvann i øvre lag av Samnangerfjorden: i mars, juni, august og september. Hvis vi antar at den nedre grensen mellom kystvann og dypvann er knyttet til saltholdighet 33.0 ser vi at kystvannets tykkelse varierte mellom ca 20 meter (juli-august) og ca 65 meter (september-oktober). I mellomliggende perioder var det innstrømning av dypvann i nedre lag og utstrømning av ferskere kystvann i øvre lag. De største endringene i saltholdighet i tilknytning til inn- og utstrømningene ble observert mellom ca 15 og 50 m dyp, hvor feks innstrømningen av dypvann fra slutten av juni til begynnelsen av august 1999 førte til en saltholdighetsøkning på ca 3.5 (fig.3).

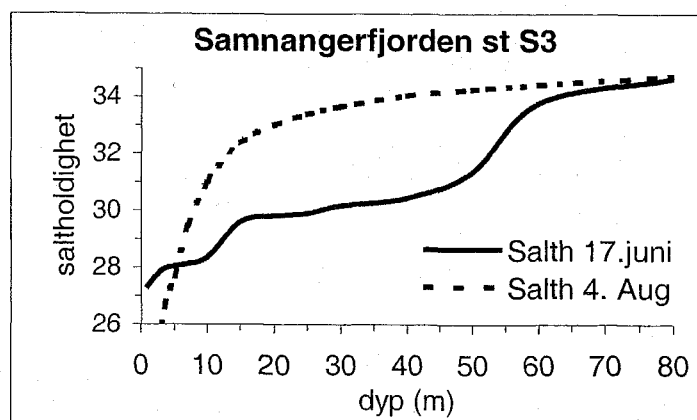


Fig. 3 Vertikalfordeling av saltholdighet ved innstrømming av kystvann (17.juni) og dypvann (4.august) i Samnangerfjorden. Vertical distribution of salinity at station S 3 in upwelling (4.August) and downwelling (17. June) periods in the Samnangerfjord.

Økningen av tetthet med dypet (lagdelingen) i de øverste 40 meter har innvirkning på innlagringsdypet for et dykket ferskvannsutslipp hvor feks små tetthetsforskjeller mellom overflaten og 40 meter dyp gir innlagring av blandingsvannet nærmere overflaten (se kap 4.1). Observasjonene viste at tetthetsforskjellen var størst i tilknytning til innstrømming av dypvann (oppstrømming) (fig 4). Et eksempel på en slik situasjon var i begynnelsen av juli 1999 hvor forskjellen i tetthet mellom 10 og 40 m dyp var  $5.5 \text{ kg/m}^3$ , mens den i september med innstrømming av kystvann i øvre lag ble reduserte til  $0.6 \text{ kg/m}^3$ .

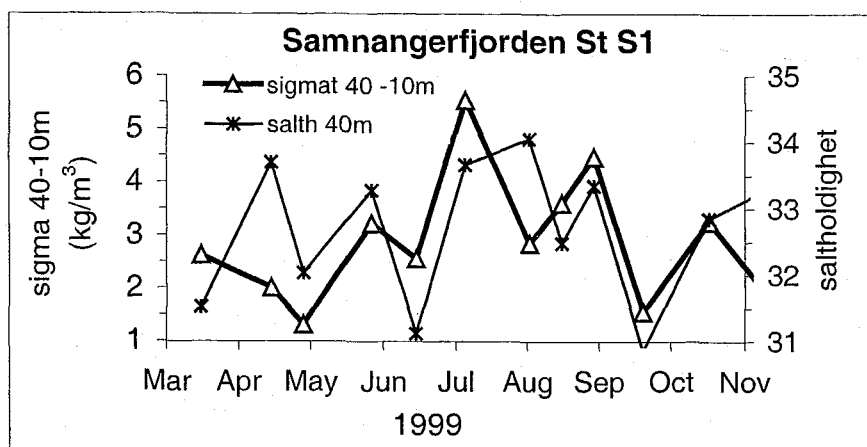


Fig.4 Tetthetsforskjellen ( $\text{kg/m}^3$ ) mellom 10 og 40 meter dyp og saltholdighet i 40 m dyp ved st S1 fra mars 1999 til januar 2000. Density difference ( $\text{kg/m}^3$ ) between 10 and 40 meter and salinity at 40 meter depth for station S1.

Temperaturen i overflatelaget (0 - 10m) økte fra ca  $5.0 \text{ }^\circ\text{C}$  i mars 1999 til  $14 - 15 \text{ }^\circ\text{C}$  i slutten av juni (fig. 5). Temperaturen holdt seg på dette nivå fram slutten av september 1999 og falt deretter gradvis til ca  $6 \text{ }^\circ\text{C}$  i januar 2000. I 10 - 25 m laget økte temperaturen gradvis fra ca  $5.5 \text{ }^\circ\text{C}$  i mars til  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  i juli. Innstrømming av kaldere (og saltere) dypvann i juli/august førte til et temperturfall på ca  $2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Deretter økte temperaturen til et årsmaksimum i september mellom  $14$  og  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ . I 25 - 50 meter laget var det betydelig mindre årsvariasjoner med tilnærmet konstant temperatur på  $8 \text{ }^\circ\text{C}$  fra mars til september. Den dype innstrømmingen av varmt (og ferskere) kystvann i september førte til et årsmaksimum på ca  $13 \text{ }^\circ\text{C}$ . Fra oktober til januar var det små endringer, med temperaturer på omlag  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ .

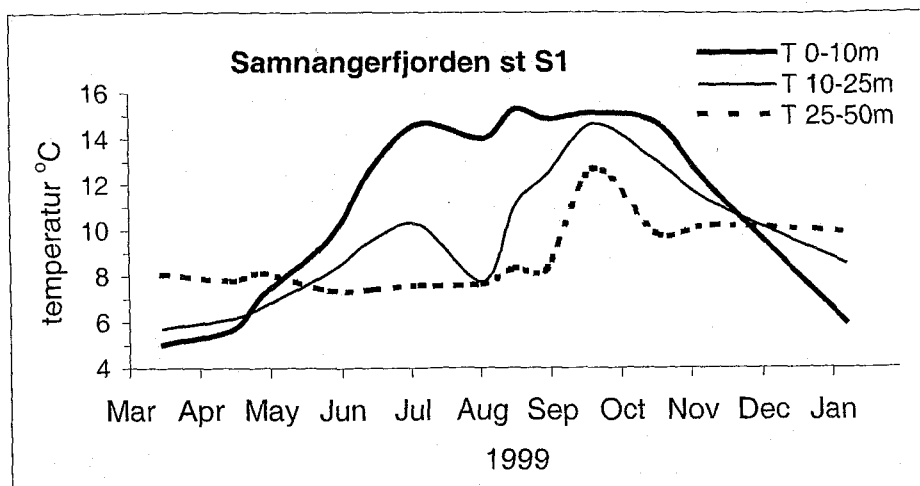


Fig. 5 Midlere temperatur i 0 – 10 m, 10 – 25 m og 25 – 50 m i Samnangerfjorden (st S1) fra mars 1999 til januar 2000. Mean temperature for 0-10, 10-25 and 25-50 meter layers at station S1 in the Samnangerfjord from March 1999 to January 2000.

I perioden fra 14. juni til 7. juli 1999 var det i de øverste 30 meterene en dominerende inngående strøm i Straumsundet i Samnangerfjorden (fig 1). I 10 m dyp var feks sterkeste inngående strøm ca 20 cm/s (tidevann filtrert vekk) mens sterkeste utgående strøm var ca 6 cm/s (fig.6). Saltholdighetsobservasjonene i samme dyp viste at forskjellene i inn-og utgående strøm var knyttet til innstrømninger av dypvann til fjorden.

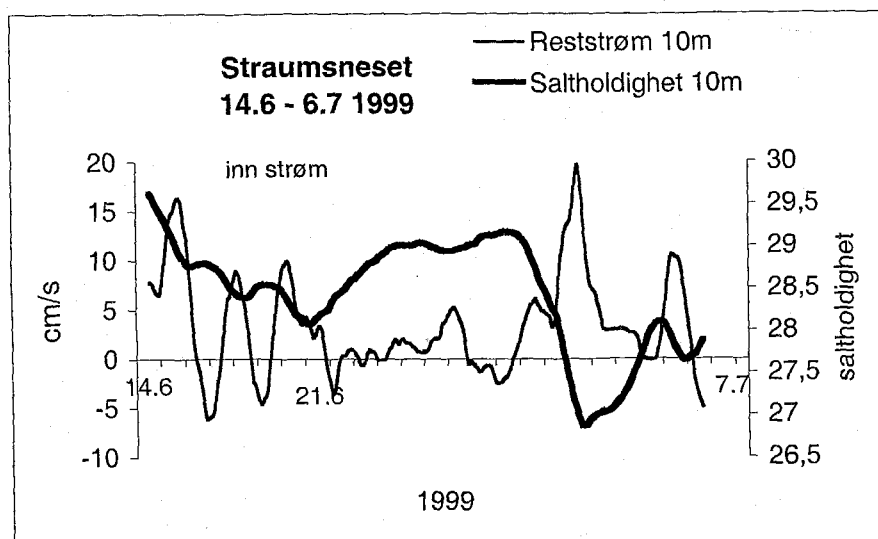


Fig.6 Strøm (tidevann filtrert vekk) og saltholdighet i 10m dyp ved Straumsneset i Samnangerfjorden fra 14.juni til 7.juli 1999. 25 hour running mean current velocity and salinity at 10 meter depth at Straumsneset in the Samnangerfjord between June 14. to July 7., 1999.

Under innstrømning av saltare dypvann, som feks fra 21. til 29. juni snudde ikke strømmen i 10 m dyp utover som forventet, men var fortsatt svakt inngående. Under den etterfølgende innstrømning av ferskere kystvann i øvre lag var det derimot en betydelig økning i inngående strøm i 10 meter dyp. Strømmålingene fra 5 til 30 meter dyp viste at utgående kompensasjonsstrøm i situasjoner med innstrømning av dypvann var svakt utviklet i de øverste 15 - 20 meter. Hoveddelen av den utgående kompensasjonstrøm ved innstrømning av dypvann i fjorden ser dermed ut til å foregå under ca 20 meter dyp. Dette strømmønsteret førte til at det

var inngående strøm i Straumsundet i 5 - 30 m laget i omlag 80 % av tiden i perioden fra 14. juni til 7.juli 1999 .

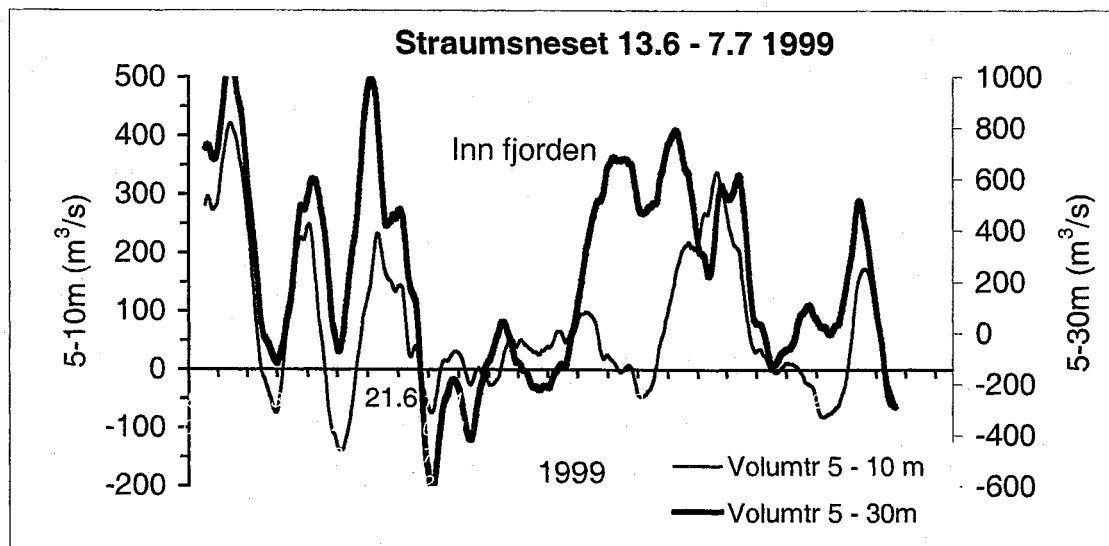


Fig 7. Vanntransport i Straumsundet i Samnangerfjorden mellom 5 og 30 m og 5 og 10m dyp fra 14.juni til 7.juli 1999. Water transport in the 5-10 and 5-30 meter layer at Straumsneset in the Samnangerfjord between June 14. to July 7., 1999.

Vanntransporten i Straumsundet mellom 5 – 30 m dyp varierte mellom ca 1000 m<sup>3</sup>/s innover og 600 m<sup>3</sup>/s utover fjorden og omlag 80 % av total vanntransport i måleperioden var rettet inn fjorden (fig 7). I 5 –10 m laget var største inngående vanntransport ca. 400 m<sup>3</sup>/s og største utgående ca 150 m<sup>3</sup>/s. Fordelingen mellom inn- og utgående transport var omlag som for laget 5 – 30 m laget, dvs dominerende vanntransport inn Straumsundet .

Innstrømning av ferskere kystvann (1.juli) og dypvann (23.juni) illustrerer den store forskjellen i inn- og uttransport i de øverste 30 meter av fjorden (fig 8). Tilførslene av ferskere kystvann til Samnangerfjorden 23. juni førte til en betydelig innstrømning av vann mellom 5 og 15 meter dyp (450 m<sup>3</sup>/s) og den utgående kompensasjonsstrøm lå dypere enn største måledyp på 30 meter. I en periode med innstrømning av dypvann (23.juni) var utgående vanntransport i samme laget bare ca 50 m<sup>3</sup>/s.

Den store overvekt av inngående vanntransport i de øverste 30 meter i fjorden (under brakkvannet ) fører bla til forlenget oppholdstid for det algeførende laget i fjorden og en netto tilførsel av alger fra utenforliggende fjordområder. Basert på strømmålingene vil vi i kap.5.2 beregne oppholdstiden for det algeførende laget innenfor Straumsneset i Samnangerfjorden.

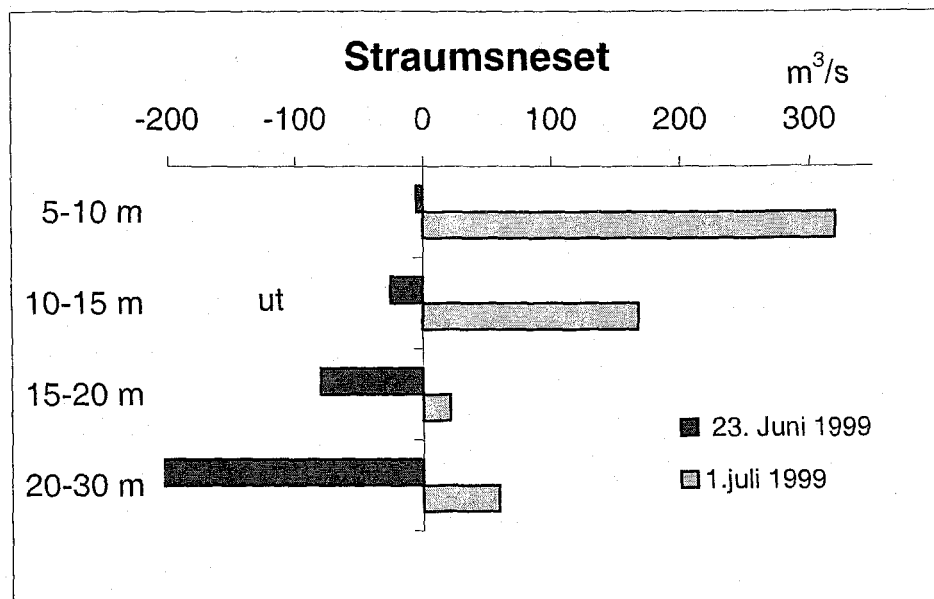


Fig. 8 Vertikalfordeling av vanntransport i øverste 30 meter ved Straumsneset i Samnangerfjorden i en situasjon med innstrømming av kystvann (1. juli 1999) og i en situasjon med innstrømming av dypvann i dypereliggende lag (23. juni 1999). Vertical distribution of water transport in the upper 30 meter at Straumsneset in an upwelling (June 23.) and downwelling situation (July 1.).

### 3.2 Næringsalter (nitrat, silikat og fosfat)

På senhøsten og vinteren bygger det seg opp høye konsentrasjoner av næringsalter og i mars måned starter vårbloomstringen i kyst- og fjordområdene langs Vestlandskysten.

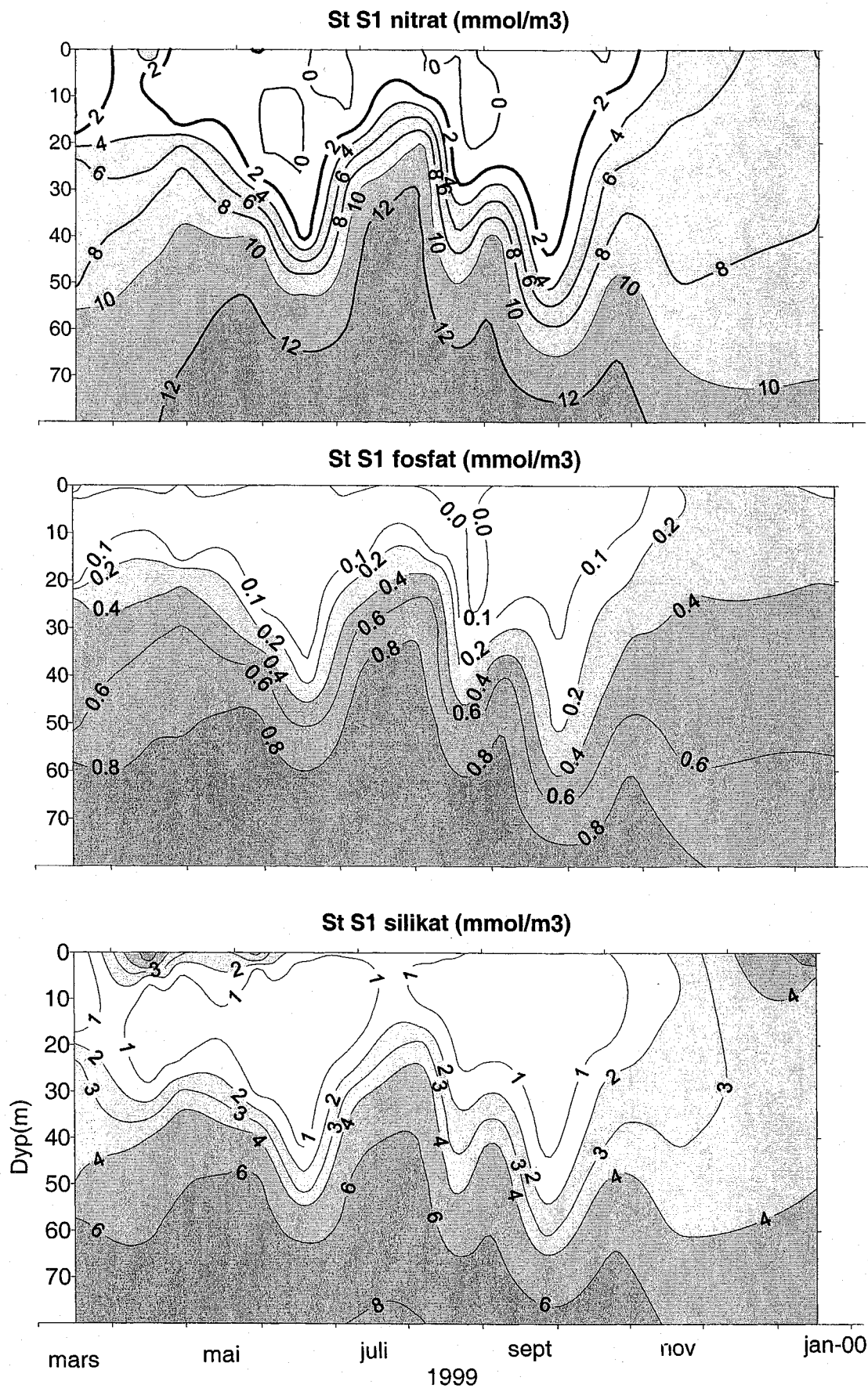
Vårbloomstringen bruker i løpet av 2 - 3 uker opp mesteparten av næringsaltene i de øverste 20 - 30 meter (produksjonslaget). Etter vårbloomstringen og fram til september - oktober er det lave næringssaltkonsentrasjoner. I denne perioden tilføres produksjonslaget en begrenset mengde nye næringsalter fra ferskvannsavrenning, gjennom vertikal blanding og periodevis oppstrømning av dypvann. Algeproduksjonen om sommeren er derfor i stor grad basert på resirkulerte næringsalter fra nedbrytning av organisk materiale i produksjonslaget.

Under vårbloomstringen i Samnangerfjorden i 1999 var næringsaltene i de øverste 20 meter betydelig redusert allerede i midten av mars (fig 9). Innstrømninger til fjorden førte imidlertid til store variasjoner i vertikalutbredelsen av næringsfattig vann. I feks september førte innstrømninger av kystvann til en betydelig økt vertikalutbredelse av næringsfattig vann, mens innstrømning av dypvann i juli medførte oppstrømning av næringsrikt dypvann til ca 15 m dyp (se også fig 2). De vekslende innstrømninger av kystvann og dypvann førte til at tykkelsen på det næringsfattige vannet gjennom produksjonssesongen varierte mellom ca 15 meter og 45 meter.

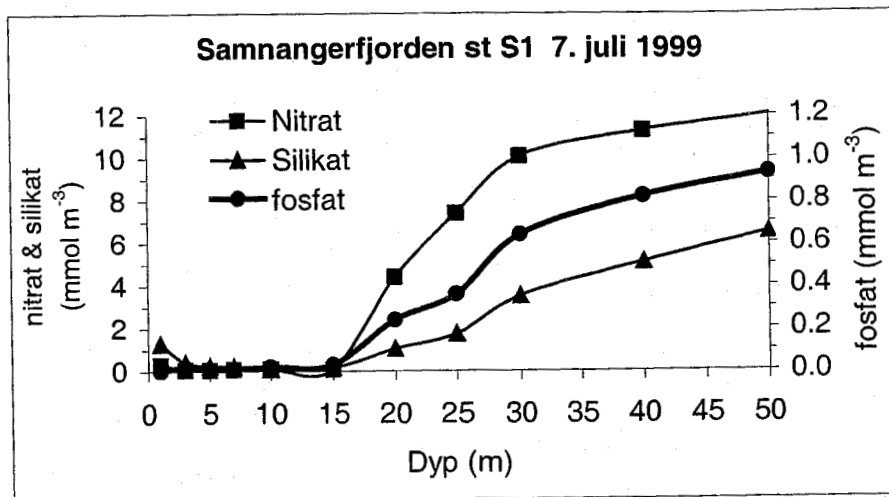
Fig 10 viser et eksempel på vertikalfordelingen av næringsalter om sommeren hvor nitrat, fosfat - og silikatverdiene i begynnelsen av juli 1999 var tilnærmet null i de øverste 15 m for deretter å øke mot dypet til henholdsvis 12, 6 og 0.9 mmol/m<sup>3</sup> i 50 meter dyp.

I de øverste 10 meter var det lave næringssaltverdier fra midten av mars til oktober 1999 (fig 11 a). Midler verdier av nitrat, silikat og fosfat i denne perioden var henholdsvis 0.4, 0.8 og 0.02 mmol/m<sup>3</sup>. Utover senhøsten og vinteren var det en gradvis økning i næringsaltverdier og i januar 2000 var nitrat, silikat og fosfatverdiene henholdsvis 7, 4.3 og 0.3 mmol/m<sup>3</sup>.



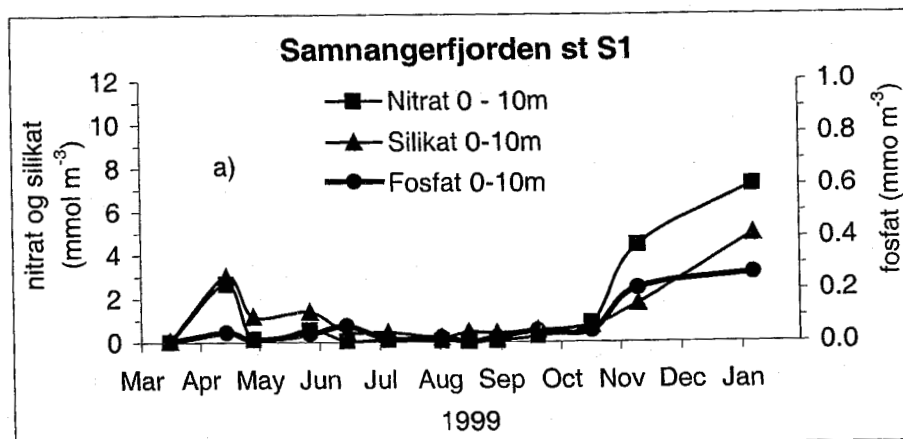


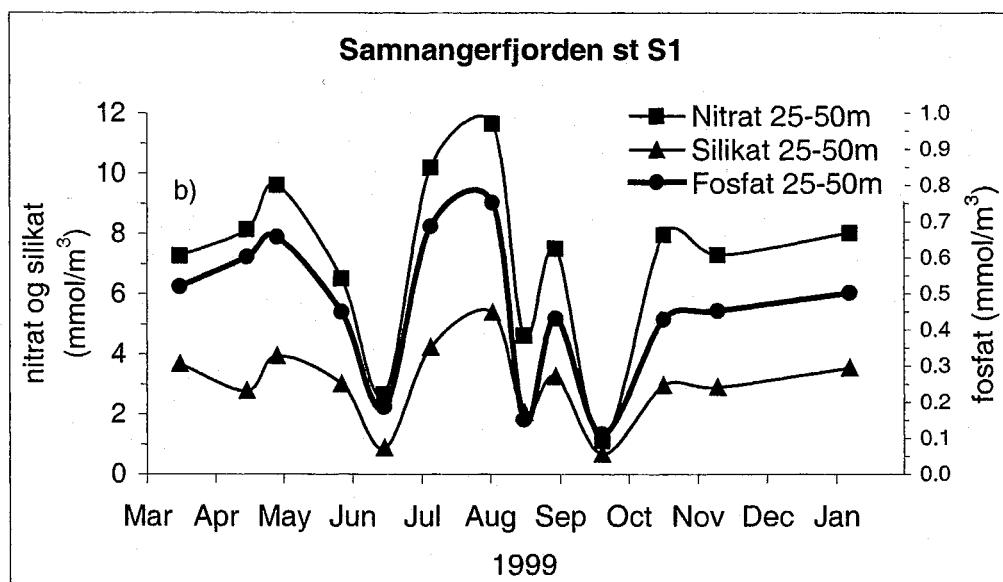
Figur. 9 Nitrat, fosfat og silikat i de øverste 80 meter i Samnangerfjorden (st S3) fra mars 1999 til januar 2000. Vertical distribution of nitrate, phosphate and silicate in the upper 80 meter at st S3 in the Samnangerfjord from March 1999 to January 2000.



Figur. 10 Vertikalfordeling av nitrat, silikat og fosfat i en sommersituasjon (7. juli 1999) ved st S1 i Samnangerfjorden. *Vertical distribution of nitrate, phosphate and silicate in a summer situation at station S1 (July 7., 1999)*

Under produksjonslaget, mellom 25 og 50 meter dyp, var næringssaltverdiene betydelig høyere enn i 0 - 10 m laget gjennom hele produksjonssesongen. I periodene med dype innstrømninger av kystvann i øvre lag i juni og slutten av september var det forbigående lave næringssaltkonsentrasjoner også i dette laget (nitrat og silikatverdi rundt 2 mmol/m<sup>3</sup> og fosfatverdi på ca 0.25 mmol/m<sup>3</sup>) (fig 11 b). Høyeste næringssaltverdier ble observert under oppstrømningen av næringsrikt dypvann i juli, hvor midlere nitratverdi var oppe i 12 mmol/m<sup>3</sup>, mens silikat og fosfatverdiene var henholdsvis 5 og 0.8 mmol/m<sup>3</sup>. Midlere nitrat-, silikat- og fosfatverdier i 25 - 50 meter laget i produksjonssesongen fra mars til oktober 1999 var henholdsvis 6.9, 3.0 og 0.45 mmol/m<sup>3</sup>.





Figur 11. Midlere nitrat, silikat og fosfat konsentrasjoner i 0 – 10 m (a) og 25 – 50 m laget (b) ved st S1 i Samnangerfjorden fra mars 1999 til januar 2000. *Mean nitrate, phosphate and silicate concentrations in the 0 – 10 (a) and 25-50 meter layer (b) at station S1 between March 1999 and January 2000.*

### 3.3 Partikulært organisk karbon (POC), nitrogen (PON), oksygen og klorofyll - a

Etter vårblomstringen i mars var konsentrasjonene av klorofyll - a lavere enn ca  $2.5 \text{ mg/m}^3$  og algeproduksjonen foregikk hovedsaklig i de øverste 20 meter av vannsøylen (fig 12). Klorofyllverdiene var høyest nær overflaten i mars og i september, mens klorofyll maksimum i resten av produksjonssesongen ofte lå mellom 5 og 10 meter dyp (fig 12 og 13). Høyeste klorofyll - a og oksygenmetning ble observert i tilknytning til innstrømninger av kystvann i øvre lag av Samnangerfjorden i juni og august 1999. POC verdiene var også høyest under innstrømningene i juni og august, med maksimalverdier mellom  $250$  og  $300 \text{ mg/m}^3$ . Under 25 meter dyp i produksjonssesongen og om vinteren (januar 2000) var klorofyllverdiene  $0.5 \text{ mg/m}^3$  eller lavere. Tilsvarende POC konsentrasjoner var  $40 - 60 \text{ mg/m}^3$ , med unntak under innstrømningen av kystvann i august hvor POC var oppe i nærmere  $120 \text{ mg/m}^3$  i 30 meter dyp.

Fig.13 viser en typisk vertikalfordeling av klorofyll - a og POC om sommeren med et klorofyllmaksimum på ca  $2 \text{ mg/m}^3$  mellom 5 og 10 meter dyp og hvor klorofyllverdiene deretter avtok raskt med dypet til ca  $0.5 \text{ mg/m}^3$  i 15 meter dyp. I motsetning til klorofyll - a hadde POC sitt maksimum nær overflaten ( $350 \text{ mg/m}^3$ ), men som for klorofyll var det lave verdier under 15 - 20 meter dyp (ca  $50 \text{ mg/m}^3$ ).

Midlere verdier av klorofyll - a, oksygenmetning (%) og POC i produksjonslaget (0 - 20 meter) viser igjen de lokale maksima i mars knyttet til vårblomstringen og i juni og august i forbindelse med innstrømninger av kystvann i øvre lag av Samnangerfjorden (fig 14 og 15). I produksjonssesongen var det lavest klorofyll - a og POC i slutten av mai, mens laveste oksygenmetning, nær 100 %, ble observert i april og september. I løpet av produksjonssesongen var midlere klorofyll - a, oksygenmetning (%) og POC i 0 - 20 meter laget for stasjonene S1 og S3 henholdsvis  $1.2 \text{ mg/m}^3$ , 107.8 %, og  $133 \text{ mg/m}^3$ .

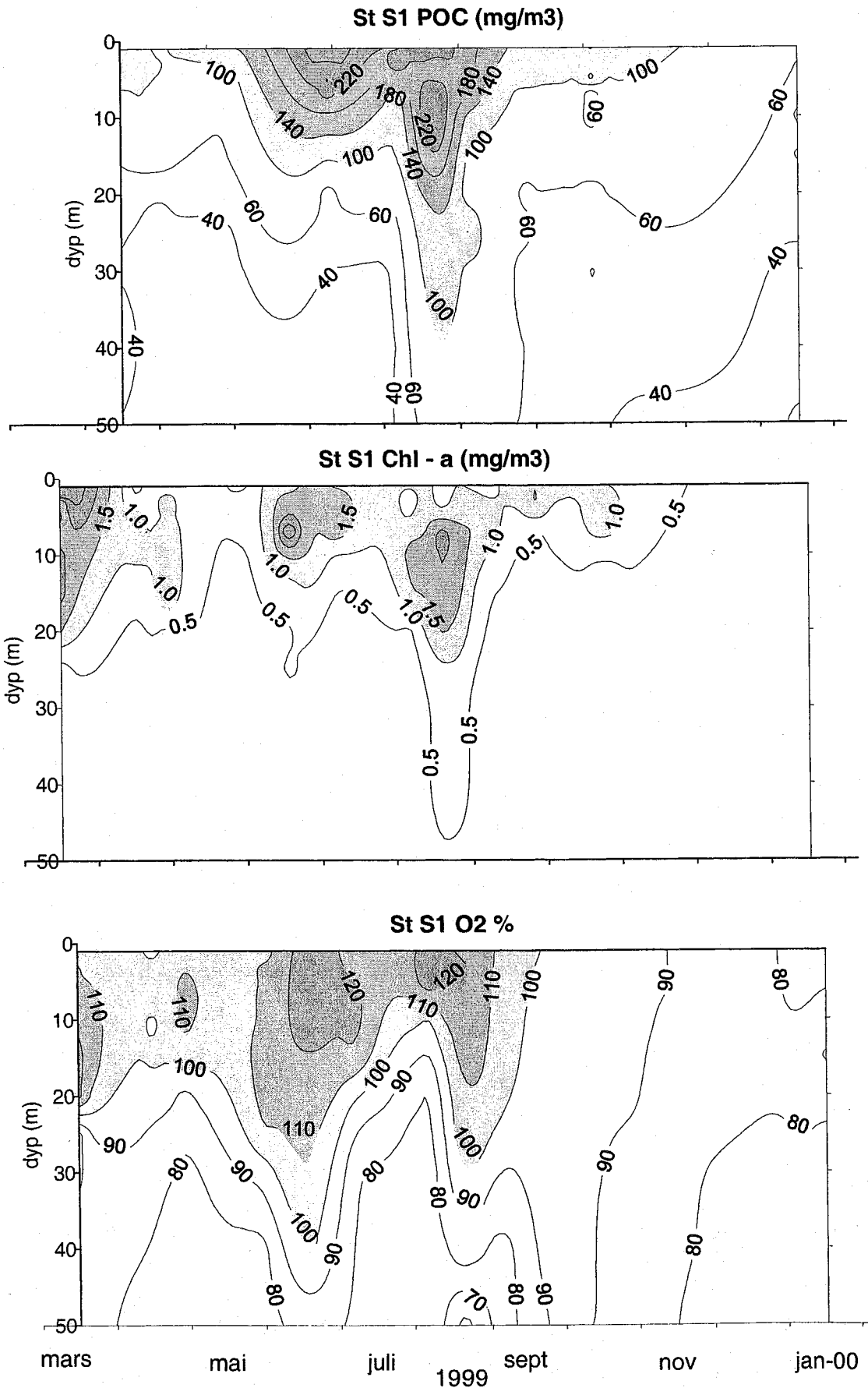


Fig. 12 Partikulært organisk karbon (POC), klorofyll - a og oksygenmetning (%) i de øverste 50 meter ved st S1 i Samnangerfjorden fra mars 1999 til januar 2000. POC, chlorophyll - a and oxygen saturation (%) in the upper 50 meter at station S1 from March 1999 to January 2000.

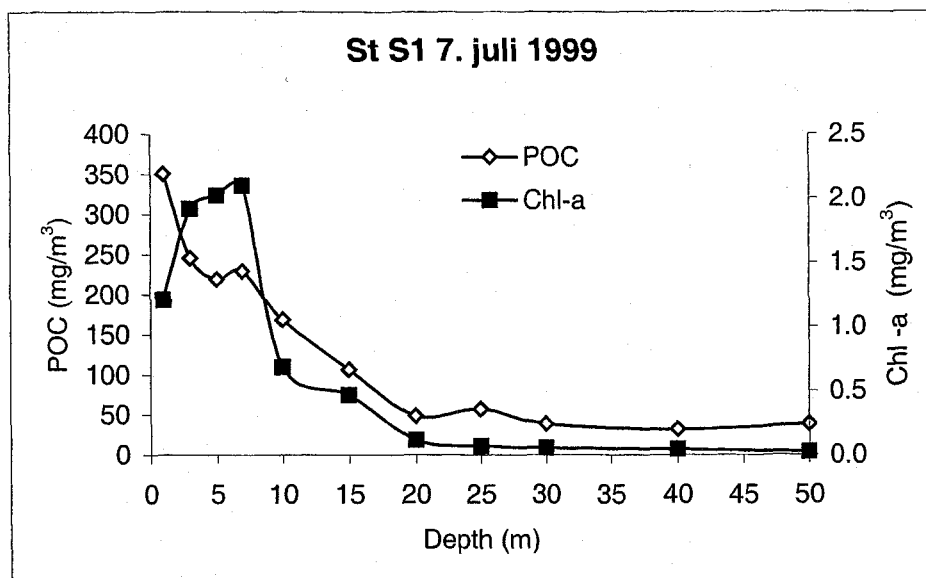


Fig. 13 Vertikalfordeling av POC og klorofyll - a ved st S1 Samnangerfjorden 7.juli 1999. *Vertical distribution of POC and chlorophyll - a at station S1 July 7., 1999.*

Klorofyll - a, POC og oksygenmetning er knyttet til algeproduksjonen og vi forventer derfor en viss sammenheng mellom disse tre parametrene. Fig 16 viser også at det var en rimelig god lineær sammenheng ( $R = 0.83$ ) mellom POC og klorofyll - a i 0 - 20 meter for stasjonene S1, S3 og S5. Midlere forhold mellom POC og klorofyll - a var ca 80 og "bakgrunnsverdien" for POC ved tilnærmet null klorofyll var ca  $50 \text{ mg/m}^3$ . Sammenhengen mellom POC og oksygenmetning (%) var noe svakere ( $R = 0.73$ ) og "bakgrunnsverdien" for POC på  $50 \text{ mg/m}^3$  tilsvarte en oksygenmetning på ca 80 %. Som forventet var det en god lineær sammenheng mellom POC og PON med  $R = 0.94$ , med et midlere forhold mellom POC og PON på 5.5.

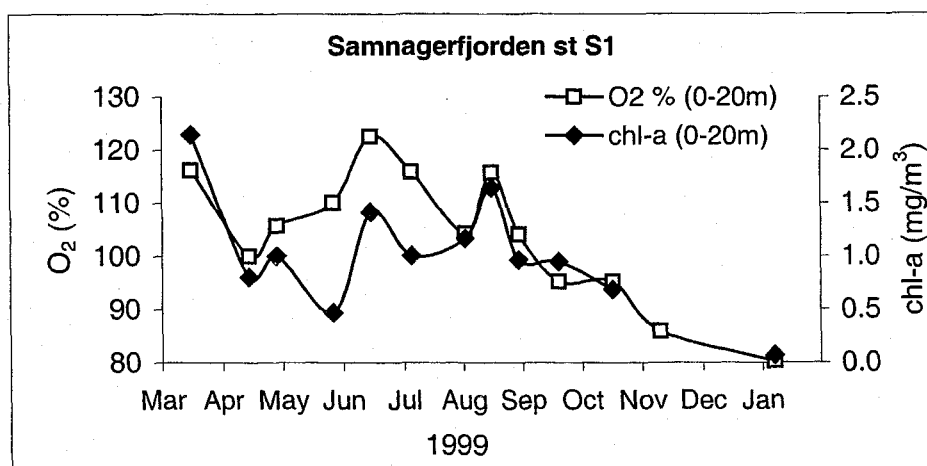


Fig. 14 Midlere oksygenmetning ( $O_2$  %) og klorofyll - a i 0-20m laget ved st S1 i Samnangerfjorden fra mars 1999 til januar 2000. *Mean oxygen saturation (%) and chlorophyll - a in the 0 - 20 meter layer at station S1 from March 1999 to January 2000.*

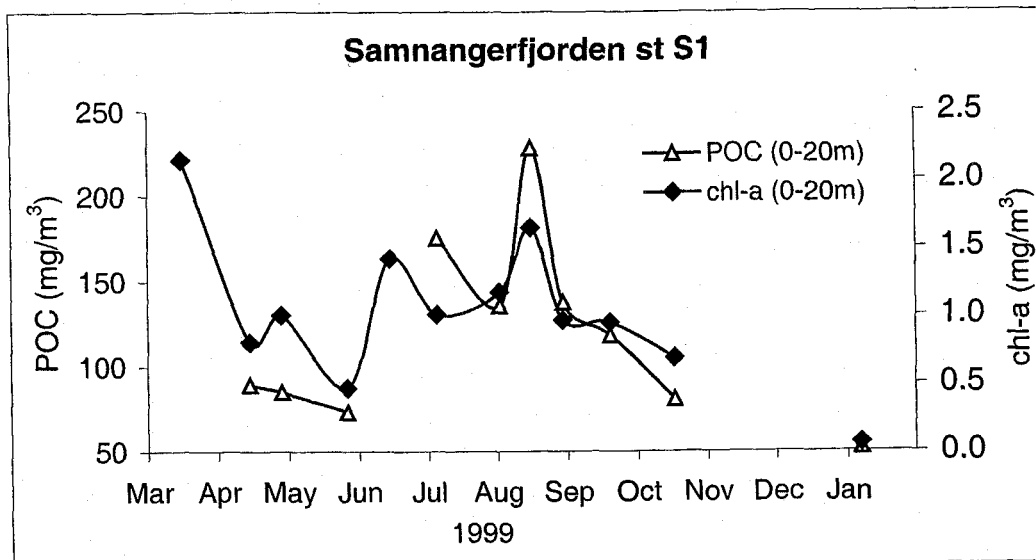


Fig. 15 Midlere POC og klorofyll-a i 0-20 meter laget ved st S1 i Samnangerfjorden fra mars 1999 til januar 2000. Mean POC and chlorophyll - a in the 0 - 20 meter layer at station S1 from March 1999 to January 2000.

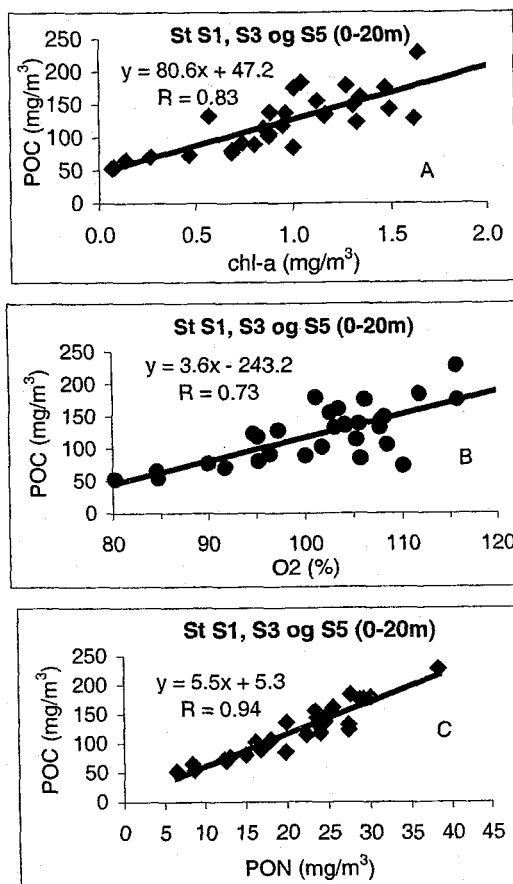


Fig. 16 Relasjoner mellom POC og klorofyll - a (A), O<sub>2</sub> % (B), PON (C) basert på middelverdier mellom 0 og 20 meter (produksjonslaget) for st S1, S3 og S5 i perioden fra mars 1999 til januar 2000. Relations between POC and chlorophyll - a (A), O<sub>2</sub> % (B) and PON (C) based on mean values 0-20 meter from stations S1, S3 and S5.

### 3.4 Produksjon av planteplankton

Planktonproduksjonen i Samangerfjorden ved stasjon S3 foregikk stort sett i de øverste 20 meter av vannsøylen (produksjonslaget) og midlere produksjon i 0 - 20 meter laget under vårbloomstringen i 17.mars var 1254 mgC/m<sup>2</sup>/døgn (tabell 4). I resten av produksjonsesongen fra april til oktober varierte produksjonen mellom 497 (7.juni) og 114 mgC/m<sup>2</sup>/døgn (20.oktober) (tabell 4). Midlere produksjon etter vår- blomstringen i mars var 413 mgC/m<sup>2</sup>/døgn. De lave verdier av næringssalter, klorofyll - a og oksygenmetning 17. mars tyder på at vårbloomstringen i Samangerfjorden på dette tidspunkt hadde kulminert og den observerte produksjonen var derfor trolig noe for lav. I januar 2000 var produksjonen tilnærmet lik null (1.5 mgC/m<sup>2</sup>/døgn).

Tabell 4 Midlere planteplanktonproduksjon (mgC/m<sup>2</sup>/døgn) og algenes midlere fotosynteseeffektivitet (mgC/mg klorf - a pr døgn) i 0 - 20 meter ved St S3 i Samnangerfjorden fra 17.mars 1999 til 11. januar 2000.

*Observed mean primary production (mgC/m<sup>2</sup>/day) and primary production- chlorophyll-a ratio in the 0-20 meter layer at station S3 from March 1999 to January 2000*

Dato	17.3	15.4	29.4	27.5	17.6	7.7	4.8	18.8	1.9	22.9	20.10	11.1
Produksjon	1254	412	305	294	451	497	302	459	133	325	114	1.5
Prod/klorf-a	34.1	15.5	26.5	16.7	12.7	23.8	11.2	17.5	7.5	21.9	21.2	1.0

Planktonalgenes fotosynteseeffektivitet, dvs produksjonen av karbon pr klorofyllenhet, var størst under vårbloomstringen 17. mars (34.1 mgC/mg klor - a pr døgn) og varierte resten av vekstsesongen mellom 7.7 (1. september) og 26.5 (29.april). Midlere fotosynteseeffektivitet i produksjonslaget fra april til oktober 1999 var 17.5 mgC/mg klorf - a pr døgn. Variasjonene i fotosynteseeffektivitet har bla sammenheng med lysforhold, tilgjengelighet på næringssalter og algesammensetning.

Ved å kurvetilpasse målingene i tabell 4 har vi beregnet månedlig algeproduksjon fra mars til oktober 1999 (fig 17). Primærproduksjonen i februar ble antatt å være tilnærmet lik null. Høyest produksjon 34 gC/m<sup>2</sup>/måned ble observert under vårbloomstringen i mars. Fra april til september varierte produksjonen mellom 9.2 og 15.5 gC/m<sup>2</sup>/måned, for så å avta til 3.5 gC/m<sup>2</sup>/måned i oktober. Total produksjon fra mars til oktober 1999 var 112 gC/m<sup>2</sup>, mens den etter vårbloomstringen, fra april til oktober, var ca 75 gC/m<sup>2</sup>. Den observerte produksjonen i mars er høyst usikker med bare en måling i en periode av året hvor det er store endringer i primærproduksjonen. Som nevnt foran ser det også ut til at målingene 17.mars 1999 ble observert etter at vårbloomstringen var kulminert og månedsproduksjon i mars og dermed den totale årlige produksjonen var derfor trolig noe for lav. Til sammenligning ble årlig produksjon i Boknafjorden, Rogaland, målt med samme metode som i Samnangerfjorden, beregnet til å ligge mellom ca 120 og 140 gC/m<sup>2</sup> (Erga, 1989).

Primærproduksjonen eller den totale produksjon (TP), er summen av ny produksjon (NP) og resirkulert produksjon (RP). NP er basert på at det tilføres nye næringssalter til produksjonslaget fra feks elver og gjennom vertikal blanding, mens RP er basert på nedbrytning av dødt organisk materiale i produksjonslaget som frigjør næringssalter til algeproduksjon. Når en ser produksjonssesongen under ett er NP summen av det partikulære organiske materialet som synker ut av produksjonslaget i løpet av produksjonssesongen (året) og evt. eksporteres ut av området gjennom næringskjeden .

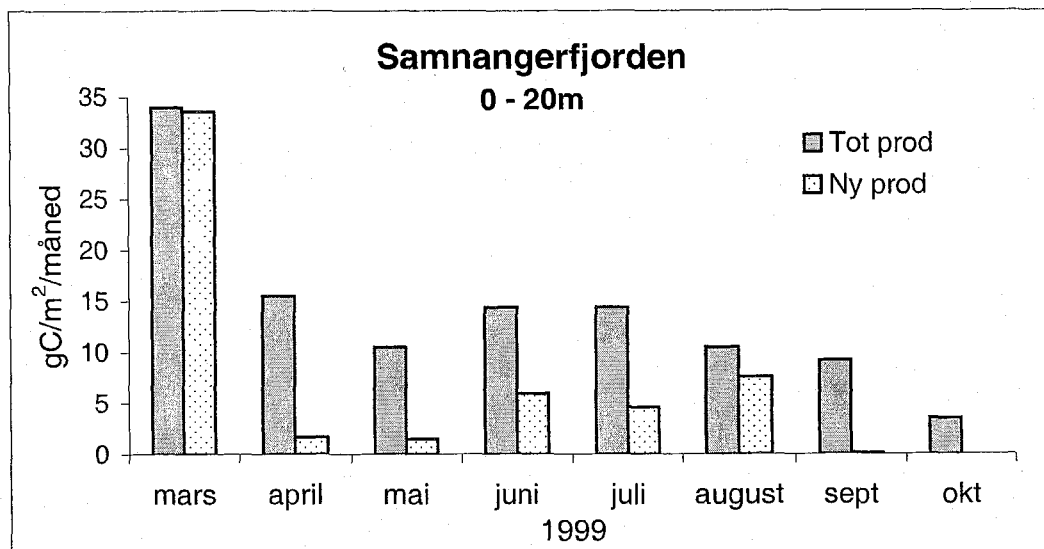


Fig.17 Algeproduksjon (totalproduksjon) pr måned interpolert ut fra målinger og beregnet ny produksjon i Samnangerfjorden fra mars til oktober 1999. *Observed monthly mean total production and calculated new production in the Samangerfjord from March to October 1999*

Fluksen av organisk materiale mot dypet i kyst - og fjordområdene i Møre og Romsdal ( $F_c$ ) er beregnet ut fra observasjoner av oksygenforbruket i en rekke fjordbasseng (Aure og Stigebrandt,1990, Stigebrandt et al,1996) :

$$F_c = F_{co} * e^{-z/L} \text{ (gC/m}^2\text{/måned) hvor } L = 50\text{m} \quad (1)$$

For et produksjonslag med dypde 20 meter kan vi dermed beregne årlig ny produksjon:  
 $NP = F_{co} * e^{-20/50} = 2/3 F_{co}$ . Med  $F_{co} = 5.5 \text{ gC/m}^2\text{/måned}$  ( $z = 0 \text{ m}$ ) for Møre og Romsdal er NP beregnet til ca  $45 \text{ gC/m}^2\text{/år}$ .  $F_{co}$  er noe for lav da den ikke inkluderer organisk materiale som blir varig sedimentert i fjordbassengene og organisk materiale som blir eksportert ved marine dyr og fisk.

Wassman (1990) har vist at på våre breddegrader øker TP med økende NP på følgende sett:

$$TP = 8.5 * NP^{0.71} \text{ (gC/m}^2\text{/år)} \quad (2)$$

Ved å benytte NP på  $45 \text{ gC/m}^2\text{/år}$  gir ligning (2) en TP på  $127 \text{ gC/m}^2\text{/år}$ . NPs andel av TP blir i følge samme ligning ca ca 35%.

Vi kan også utføre bergninger av NP i vekstsesongen ut fra kjennskapet til tidsutviklingen av oksygen i produksjonlaget og oksygenutvekslingen med atmosfæren ( $F_{ot}$ ) gjennom sjøoverflaten (Stigebrandt,1991):

$$\gamma NP = \int_0^{H_p} (dO_2/dt) dz + F_{ot} \quad (3)$$

$$F_{ot} = V(O_2 - O_{2s})(1+x)$$

Hvor  $V$  er en utvekslingshastighet,  $O_2$  er overflatekonsentrasjonen av oksygen og  $O_{2s}$  er metningskonsentrasjonen av oksygen i overflatelaget. "Boblefaktoren"  $x = 0.025$  dvs når



metningskonsentrasjonen av oksygen er større enn 102.5 % er det en positiv fluks av oksygen fra vann til luft.

Integralet beskriver endringen av oksygen over tid i produksjonslaget ( $H_p = 20\text{m}$ ) og  $\gamma = 3.5$  er omregningsfaktor mellom oksygen og karbon basert på vekt. Beregningene er mest følsom for  $F_{ot}$  hvor bla månedsmiddel for vind er en viktig parameter. Ved å benytte rimelige månedsmiddelverdier for kystnær vind, antar at NP ikke kan bli større enn TP i mars måned og at NP er positiv i hele vekstsesongen fram til september, har vi beregnet NP fra mars til september 1999 basert på månedsmidlete data fra stasjonene S1, S3 og S5. Fig 17 viser at det var store variasjoner i NP etter vårbloomstringen i mars med lavest NP i april, mai og september mellom 0.1 og 1.7  $\text{gC/m}^2/\text{måned}$  og høyest NP i juni, juli og august mellom 4.6 og 7.6  $\text{gC/m}^2/\text{måned}$ . Total NP fra mars til oktober 1999 var ca 55  $\text{gC/m}^2$ , dvs noe høyere enn gitt ved lign (1), fordelt med ca 60 % under vårbloomstringen i mars og 40 % for resten av vekstsesongen.

Oppsummert var totalproduksjonen av planteplankton i Samangerfjorden 120-130  $\text{gC/m}^2/\text{år}$  hvor ny produksjon bidro med omlag 50  $\text{gC/m}^2/\text{år}$ . Ny produksjon etter vårbloomstringen var omlag 20  $\text{gC/m}^2$ , dvs ca 40 % av ny produksjon i vekstsesongen.

## 4. KUNSTIG OPPSTRØMNING

### 4.1 Kunstig oppstrømning av næringsrikt dypvann

For å transportere næringsrikt dypvann opp mot overflatelaget kreves energi og metodene kan være dykket ferskvannsutslipp, luft og store strømsettere. Den mest aktuelle metoden er å bruke et dykket ferskvannsutslipp hvor ferskvann blander seg med næringsrikt dypvann opp mot overflatelaget (Fig.18). Et dykket ferskvannsutslipp må konstrueres slik at vi får maksimal transport av næringsrikt dypvann opp til produksjonslaget med innlagringsdyp grunnere enn ca 15 meter. Ved siden av den tekniske dimensjonering av utslippssystemet, vil naturgitte endringer i vertikalfordeling av tetthet og næringsalter i fjorden og variasjoner i tilgjengelighet på ferskvann påvirke både innlagringsdyp og transporten av næringsalter til produksjonslaget.

Inderst i Samangerfjorden ligger Tysselva som har en maksimal vannføring på over 20  $\text{m}^3/\text{s}$  (fig 1). I tørre år med lav produksjon i vannkraftverket på oppsiden av Tysseelva, kan vannføringen i kortere perioder fra mars til oktober kunne gå ned mot 1  $\text{m}^3/\text{s}$ . (kilde: Bergenshalvøens kommunale kraftselskap - BKK). Forholdene ligger godt tilrette for å etablere et forsøksanlegg for kunstig oppstrømning i tilknytning til Tysselva, med kort avstand fra fossen til sjøen (ca 150 m) og kort avstand til store vanddyp utenfor elveutløpet.

Den beste løsningen er trolig å bygge en betongterskel med rørinntak i fossen ved Tysse 6 - 7 meter over havnivå. Et rør med diameter på 1.2 m og total lengde på ca 220 meter vil ha en kapasitet på ca 8  $\text{m}^3/\text{s}$  ferskvann (BKK, 2000). På enden av røret plasseres en rørutvidelse (dyse) med diameter på feks 1.5 meter for å justere innblandingen av ferskvannsutslippet. Det mest optimale utslippsdyp ser ut til å være ca 35 meter med en helningsvinkel på røret på ca  $-35^\circ$  (McClimans *et al*, 2000). Et inntak 6 - 7 meter over havnivå vil ligge lavere enn de andre brukerne av vannet i Tysselva (Safa industrier og laksetrapp) og vil dermed ikke påvirke deres vannbehov.

McClimans *et al*, 2000 har også beregnet det teoretisk innlagringsdyp ( $Z_o$ ) for ferskvannsutslippet ( $Q_f$ ) og innblandingforholdet ( $P_s$ ) mellom sjøvann ( $Q_s$ ) og ferskvann ( $Q_f$ ) ( $P_s = Q_s/Q_f$ ) nær den nedre grense for produksjonslaget i 15 m dyp. Beregningene er basert på vannføringer i Tysseelva i et tørt år med lav årsproduksjon i kraftverket ovenfor

Tysselva og den vertikale tetthetsfordeling i fjorden i 1999. Tilførselene av av nitrat, fosfat og silikat til produksjonlaget er deretter beregnet ut fra næringssaltobservasjonene i fjorden.

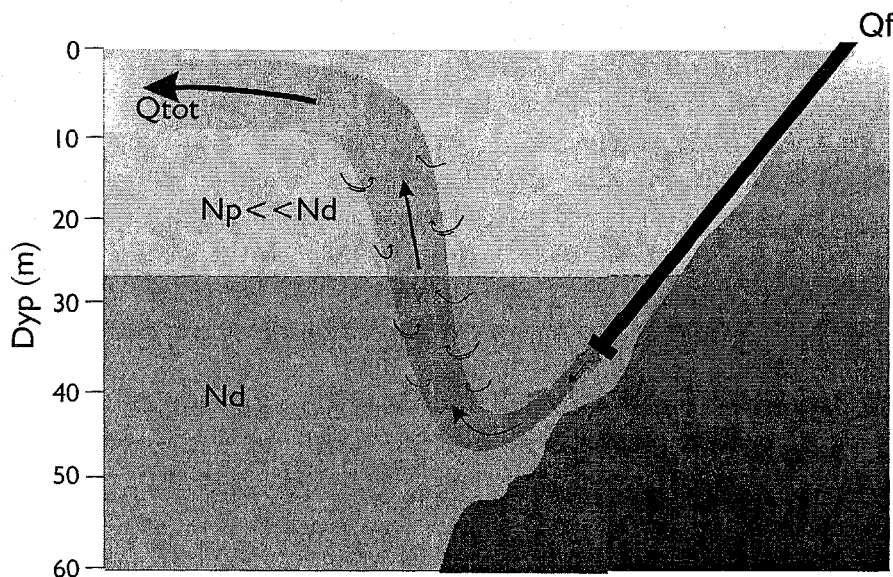


Fig. 18 Prinsippskisse for kunstig oppstrømning av dypvann ( $Q_{tot}$ ) ved dykket ferskvannsutslipp ( $Q_f$ ).  
 $N_d$  = næringsalter dypvann og  $N_p$  = næringsalter i produksjonlaget etter vårblomstring.  $Q_{tot} = Q_s + Q_f$ .  
*Artificial upwelling of deep water ( $Q_{tot}$ ) using a submerged fresh water discharge ( $Q_f$ ).*

Tabell 5 viser at det fra mars til oktober var perioder hvor tilgjengeligheten på ferskvann var lavere enn den maksimale kapasitet i røret på  $8 \text{ m}^3/\text{s}$ . Dette resulterte i en redusert vertikaltransport av næringsalter til produksjonlaget og en grunnere innlagring av blandingsvannet. Med en diameter på 1.5 m på utløpsrøret (dysen) varierte  $P_s$  mellom 11.5 og 13.3 for vannføringer på henholdsvis 3 - 4 og  $8 \text{ m}^3/\text{s}$  (tabell 5 a). Det teoretiske innlagringsdypet ( $Z_o$ ) varierte mellom 0 og 20 meter, mens midlere innlagringsdyp var ca 13 meter. Det virkelige innlagringsdyp vil vanligvis være noen meter grunnere enn  $Z_o$ . De forholdsvis dype innlagringene av blandingsvannet i slutten av mai, i begynnelsen av juli 1999 og i oktober 1999 var forårsaket av økte vertikale forskjeller i tetthet mellom overflatelaget og 40 meter dyp knyttet til innstrømning av dypvann (fig 2 og 4). Midlere transport av nitrat, fosfat og silikat til produksjonlaget fra mars til oktober var henholdsvis ca 530, 60 og 720 kg/døgn.

Hvis kravet er at innlagringsdypet ( $Z_o$ ) skal være mindre enn 15 m gjennom hele produksjonssesongen kan dysediameteren økes noe og  $P_s$  reduseres til 10 for  $8 \text{ m}^3/\text{s}$  og 8.5 for 3 - 4  $\text{m}^3/\text{s}$  (tabell 5 b). Denne endringen vil i middel heve  $Z_o$  med ca 5 meter til ca 8.4 meter på bekostning av næringsalttransportene til produksjonlaget som reduseres med ca 20 %. (midlere tilførsel ca 420, 50 og 570 kg/døgn henholdsvis for nitrat, fosfat og silikat).

I år hvor det ikke er begrensninger i ferskvannstilgangen, dvs  $Q_f$  er ca  $8 \text{ m}^3/\text{s}$  fra april til september, vil næringsalttransportene til produksjonlaget øke med 20 - 25 % for begge blandingsalternativene a) og b) i tabell 5.

Tabell 5. Beregnete næringssalttransporter til produksjonslaget og innlagingsdyp ( $Z_o$ ) for blandingsalternativ - ene (a)  $P_s = Q_s/Q_f = 13.1$  og (b)  $P_s = 10$  for  $Q_f = 8 \text{ m}^3/\text{s}$ .  $Q_s$  er tilført dypvann til produksjonslaget i 15 m nivået og  $Q_f$  er ferskvannstilføselen i år med lav tilgjengelig på ferskvann i Tysseelva.

*Calculated nutrient transports into the production layer (Nfluks) and the depth of intrusion ( $Z_o$ ) with different entrainment  $P_s = Q_s/Q_f$  at 15 meter depth (a)  $P_s = 13.1$  and (b)  $P_s = 10$  related to  $Q_f = 8 \text{ m}^3/\text{s}$ . The fresh water discharge ( $Q_f$ ) represent a year with low access of fresh water in the Tysse river.*

(a)

Dato	$Q_f (\text{m}^3/\text{s})$	$P_s=Q_s/Q_f$	$Z_o(\text{m}) (D_d=1.5\text{m})$	Nfluks (kg/døgn)	Pfluks (kg/døgn)	Si fluks(kg/døgn)
16-Mar-99	8	13.3	13	451	78	1400
15-Apr-99	4	11.5	8	327	39	303
29-Apr-99	3	11.7	7	278	32	270
28-May-99	8	12.9	18	668	74	768
16-Jun-99	8	13.1	13	292	22	430
7-Jul-99	8	13	20	925	113	949
4-Aug-99	8	13.1	13	1108	125	1173
18-Aug-99	8	13.1	16	496	19	645
1-Sep-99	1.5	For lav $Q_f$				
22-Sep-99	3	11.7	0	75	6	154
20-Oct-99	8	13.1	18	768	71	762
<b>Middel</b>	<b>6.8</b>	<b>12.2</b>	<b>13.1</b>	<b>531</b>	<b>60</b>	<b>721</b>

(b)

Dato	$Q_f (\text{m}^3/\text{s})$	$P_s=Q_s/Q_f$	$Z_o(\text{m}) (D_d>1.5\text{m})$	Nfluks (kg/døgn)	Pfluks (kg/døgn)	Si fluks (kg/døgn)
16-Mar-99	8	10	8	360	62	1120
15-Apr-99	4	8.5	6	261	31	242
29-Apr-99	3	8.5	5	222	25	216
28-May-99	8	10	8	534	59	614
16-Jun-99	8	10	8	233	17	344
7-Jul-99	8	10	16	740	90	759
4-Aug-99	8	10	9	886	100	938
18-Aug-99	8	10	12	396	15	516
1-Sep-99	1.5	For lav $Q_f$				
22-Sep-99	3	8.5	0	60	4.8	123
20-Oct-99	8	10	9	614.4	56.8	609
<b>Middel</b>	<b>6.8</b>	<b>9.2</b>	<b>8.4</b>	<b>425</b>	<b>48</b>	<b>576</b>

## 4.2 Beregnet økning i planktonproduksjon og influensområde

Influensområdet for ny produksjon basert på en ferskvanndreven oppstrømning av næringsrikt dypvann innerst i Samnangerfjorden ved Tysse er styrt av oppholdstiden for det algeførende laget ( $T_o$ ) i fjorden og algenes veksthastighet ( $V_a$ ). Med feks liten  $T_o$  og lav  $V_a$  vil algene transporteres ut av et lokalt fjordområde og produksjonen blir spredt over et forholdsvis stort område (regional effekt). Betingelsen for lokal eller regional effekt av tilførte næringssalter kan uttrykkes som følger (Aksnes, 1993):

$$R = 1/(T_o * V_a) \quad (4)$$

Hvor  $R \ll 1$  er vilkåret for lokal oppblomstring, mens  $R \gg 1$  betyr at algeproduksjonen domineres av ytre forhold og effekten av lokale næringssalttilførsler spres over et større område (regional effekt).  $R = 1$  betyr at lokal og ytre påvirkning er av samme størrelsesorden.

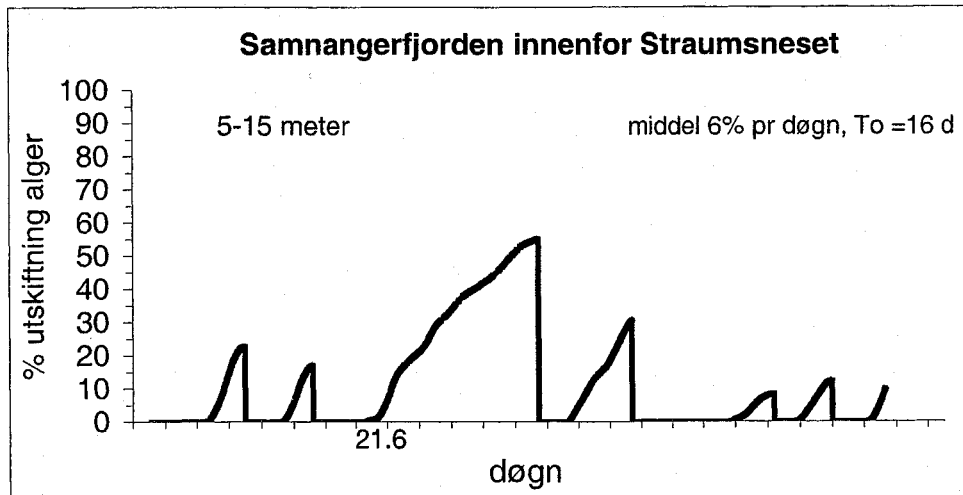


Fig 19. Beregnet % utskifting av algeførende lag (5 - 15m) i Samnangerfjorden innenfor Straumsneset basert på strømmålinger i perioden fra 14.juni til 7.juli 1999. *Calculated % renewal of phytoplankton in the 5 - 15 meter layer inside Straumsneset between June 14. and July 7., 1999.*

Ut fra observasjonene av klorofyll - *a* og POC ser det ut til at nedre dybdegrense for det algeførende laget var omlag 15 meter i løpet av produksjonssesongen 1999 (se feks fig 12). De varierende hydrografiske forhold med vekselvise oppstrømninger og nedstrømninger i fjorden ser derfor ikke ut til å ha påvirket vertikalfordelingen av alger i stor grad. Dette er et resultat av algenenes positive oppdrift og/eller bevegelse mot overflaten (lyset).

Ved inngående strøm i det algeførende laget vil derfor lokalt produserte alger akkumuleres i fjorden og kan bare transporteres ut av fjorden ved utgående strøm i samme lag.

Ut fra strømmålingene, inkluderte utstrømning på 80 m<sup>3</sup>/sek pga kunstig oppstrømning (tabell 5), har vi beregnet uskiftningsraten for det algeførende laget i fjordområdet innenfor Straumsneset. Resultatet fra beregningene er gitt i fig 19 og i tidsrommet fra 14. juni til 7. juli 1999 var det utgående strømperioder hvor fra 10 til 50 % av det algeførende laget mellom 5 - 15 meter ble transportert ut av fjordområdet. Når vi ser hele perioden under ett var midlere utskifting av det algeførende laget ca 6 % per døgn. Dette gir en midlere oppholdstid  $T_o$  på 16 døgn .

Med en  $V_a = 10^{-5} \text{ sek}^{-1}$  blir  $R = 0.07$  og ut fra strømmålingene i juni/juli 1999 ser det derfor ut å ligge naturlig tilrette for lokale blomstringer i indre del av Samnangerfjorden. Den økte lokale produksjon ved kunstig oppstrømning av dypvann ved Tysse antas derfor hovedsakelig å forgå i den indre del av Samnangerfjorden over et areal på ca 10 km<sup>2</sup> .

Det usikre er om strømforholdene i perioden fra midten av juni til begynnelsen av juli 1999 ved Straumsneset var representative for hele produksjonssesongen.

Algekonsentrasjonene i det algeførende laget i fjorden påvirkes både av den lokale algeproduksjonen og inn- og uttransporter av alger i fjorden. Ved inngående transport i øvre lag vil algekonsentrasjonene øke både pga lokal produksjon og tilførsler av nye alger fra sjøområdene utenfor. Ved utgående transport avtar algekonsentrasjonene når uttransporten av alger er større enn lokal produksjon. Dette ser vi klare eksempler på fra målingene i 1999 hvor feks innstrømninger av kystvann i øvre lag i juni og august 1999 førte til betydelige økte konsentrasjoner av POC og klorofyll - *a*, mens det i perioder med utstrømning i øvre lag (innstrømning av dypvann) var reduserte konsentrasjoner .

Når næringsfattig sjøvann tilføres nye næringssalter og det er tilstrekkelig med lys får vi økt algeproduksjon. Det er utført en rekke slike forsøk i store poser plassert i sjøen og i

innelukkete små poller. Med en balansert næringssaltsammensetning bestående av nitrat, fosfat og silkat har forsøkene også vist at silikatforbrukende diatomeer vil dominere produksjonen (se feks Aksnes et al, 1985, Egge et al, 2000). Storskala forsøk med kunstig tilførsel av næringssalter til fjorder er ennå ikke prøvd.

Hvis vi antar at næringssaltene som tilføres produksjonslaget ved de to eksemplene på kunstig oppstrømning av dypvann i tabell 5a og b omsettes til algeproduksjon ( $C/N = 7$ ) og algeproduksjonen foregår over et areal på ca  $10 \text{ km}^2$  er ny produksjon (NPa og NPb) beregnet å variere mellom 1.5 og  $22 \text{ gC/m}^2/\text{måned}$  i år med lav tilgjengelighet på ferskvann (tabell 6). De lave NPa og NPb i september var forårsaket av en kombinasjon av liten ferskvannstilførsel og ekstra dyp nedstrømning av næringsfattig kystvann (fig 10).

Tabell 6 Månedsmidler for NPa og NPb fra april til september basert på næringssalttilførselene til produksjonslaget gitt i tabell 5 a og b (år med lav tilgjengelighet på ferskvann). NPc er beregnet ut fra at  $P_s = 10$  og  $Q_f = 8 \text{ m}^3/\text{s}$  gjennom hele produksjonssesongen og at  $Z_o < 15$  meter.  $Z_{o,a,b,c}$  er tilhørende teoretisk innlagringsdyp for NP a, b og c. *Calculated monthly mean new production (NP a,b) and the depth of intrusion (Zo a,b) based on the nutrient transports in table 5a ,b. NPc represent a situation with constant  $Q_f = 8 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $P_s = 10$  and  $Z_o < 15$  meter from April to September.*

Måned	NPa ( $\text{gC/m}^2$ )	NPb ( $\text{gC/m}^2$ )	NPc ( $\text{gC/m}^2$ )	Zo a (m)	Zo b (m)	Zo c (m)
april	6.8	4.9	13.0	7.5	5.5	7.5
mai	12.4	8.8	8.8	18.0	8.0	8.0
juni	10.7	7.8	7.8	13.0	8.0	8.0
juli	22.5	16.6	16.6	20.0	16.0	16.0
august	10.7	8.8	8.8	14.5	10.5	10.5
sept	2.5	1.5	6.7	0.0	0.0	7.0
Sum/middel	65.6	48.4	62.0	12.2	8.0	9.5

Vi ser også at kravet til innlagringsdyp grunnere enn 15 meter i produksjonssesongen ( $Z_{ob}$ ) førte til at NP i perioden fra april til september ble redusert fra ca 66 (NPa) til  $48 \text{ gC/m}^2$  (NPb) I år med tilgjengelighet på  $8 \text{ m}^3/\text{s}$  ferskvann gjennom hele produksjonssesongen og med krav om innlagringsdyp mindre enn 15 m, er ny produksjon beregnet til  $62 \text{ gC/m}^2$  (NPc) og midlere innlagringsdyp  $Z_{oc}$  var 9.5 meter (tabell 6 og fig 18).

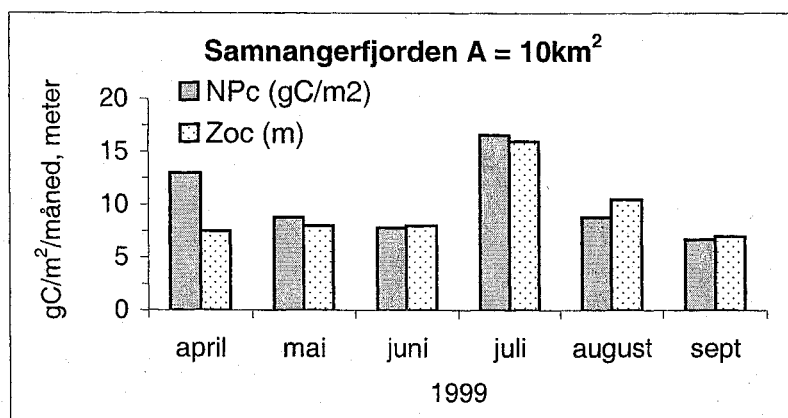


Fig.18. Beregnet midlere ny produksjon pr måned (NPc) og midlere teoretisk innlagringsdyp ( $Z_{oc}$ ) fra mars til september 1999 for  $Q_f = 8 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $P_s = 10$  og  $Z_o < 15$  meter. *Calculated monthly mean new production (NPc) and mean intrusion depth (Zoc) from April to September, using constant  $Q_f = 8 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $P_s = 10$  and  $Z_o < 15$  meter.*

Den forholdsvis dype innlagringen og høye NPc i juli var knyttet til innstrømning av dypvann til Samnangerfjorden (fig 2, 4, og 9).

Naturlig ny produksjon fra april til september er beregnet til omlag  $22 \text{ gC/m}^2$  og ny produksjon inkludert kunstig oppstrømning (tabell 6) vil dermed variere mellom 70 og  $87 \text{ gC/m}^2$ . Observert totalproduksjon fra april til september er målt til ca  $70 \text{ gC/m}^2$  og når vi antar at totalproduksjonen er omlag tre ganger større enn ny produksjon er totalproduksjonen med oppstrømning beregnet å øke til mellom 215 og  $265 \text{ gC/m}^2$  (fig 19). Ny og total produksjon vil dermed kunne økes med en faktor på 3 - 4 ved kunstig oppstrømning av dypvann i forhold til naturlig produksjon avhengig bla. av tilgjengeligheten på ferskvann og krav til innlagingsdyp.

NP er bestemmende for konsentrasjonene av algebiomasse (POC). Under ellers like forhold vil derfor konsentrasjonene av partikulært organisk materiale i produksjonslaget øke i samme forhold som økningen av NP ved kunstig oppstrømning av næringsrikt dypvann. Da dypvannet inneholder en balansert sammensetning av næringssalter inkludert silikat vil algesamfunnet i oppstrømningsområdet trolig være dominert av diatomeer (ikke giftige alger).

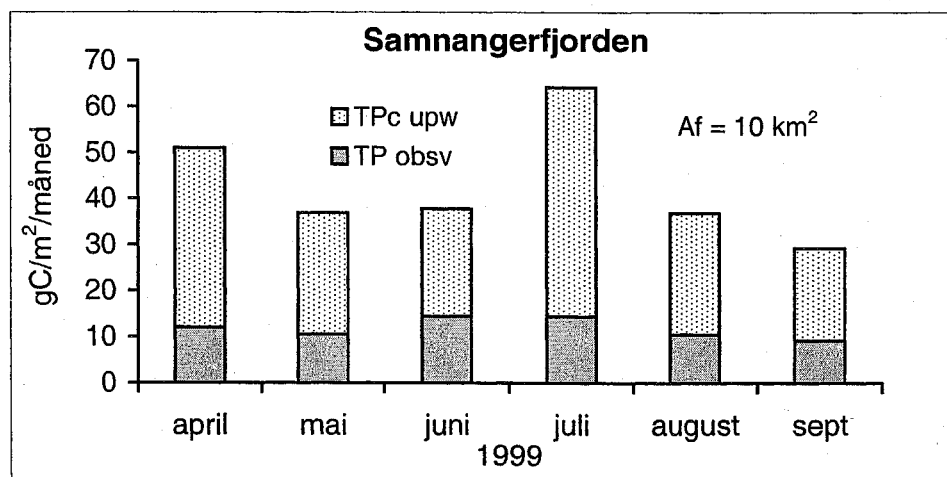


Fig. 19 Observert totalproduksjon (TP obsv) og beregnet totalproduksjon ved kunstig oppstrømning (TPc upw) i Samnangerfjorden basert på NPC i tabell 6. *Observed total production (TP obsv) and calculated total production with artificial upwelling (TPc upw) based on NPC in table 6.*

I perioder med innstrømning av kystvann vil det næringsfattige øvre lag fordypes og vi får reduserte tilførsler av næringssalter til produksjonslaget ved kunstig oppstrømning (fig. 9 og tabell 5 og 6, feks juni 1999). Innstrømningen av vann i øvre lag vil imidlertid redusere arealet for NP og dermed delvis kompensere for den reduserte tilgangen på næringssalter.

Ved å benytte en endimensjonal primærproduksjonsmodell kan vi beregne den relative økning i totalproduksjonen i et fjordområde når øvre lag tilføres næringsrikt dypvann. Den biologiske primærproduksjonsmodellen er en forenklet utgave av primærproduksjonsmodulen i havmodellen NORWECOM. Hovedkomponentene i modellen er lys, nitrat, fosfat og silikat, samt produksjon og biomasse av kiselalger (diatomeer) og flagellater (Skogen *et al*, 1995).

Modellområdet består av en vannkolonne fra overflaten til 30 m dyp og er inndelt i bokser med vertikal utstrekning på 0.5 m. Boksene representerer de midlere forholdene for en fjord på  $10 \text{ km}^2$ . Dette er en forenklet modell, først og fremst fordi horisontale transporter og vertikalblanding er for dårlig representert. Likevel fungerer sannsynligvis modellen godt med hensyn til å avdekke relative forskjeller i produksjonsforhold med store forskjeller i næringssalttilførsler.

Lysforholdene som er brukt i modellen tilsvarer gode sommerforhold og det er også beregnet en vertikal lyssvekking basert på selvskygging fra algene. Startverdiene av næringssalter er delvis bestemt på grunnlag av observerte verdier i Samnangerfjorden ved Bergen sommeren

1999. Tilførselen av næringsrikt dypvann til produksjonssonen baserer seg på resultatene foran og vi antar at det tilføres en volumfluks  $Q_{tot} = 88 \text{ m}^3/\text{s}$  blandingsvann (ferskvann og sjøvann) til sjiktet mellom 7.5 og 12.5 m dyp (dvs. 5 vertikale bokser). Tilførselene av nitrat, fosfat og silikat til dette sjiktet er henholdsvis 630, 60 og 530 kg/døgn.

Totalproduksjon og algesammensetning ved kunstig upwelling er simulert for 30 dager med solskinn og førte til en dominerende diatomeblomstring og en gryende flagellatblomstring.

Ved å beregne totalproduksjon i gram karbon pr. flateenhet over  $10 \text{ km}^2$ , finner vi at produksjonen i en sommersituasjon var ca 4 ganger større når tilførselen av næringsrikt dypvann (blandingsvann) til produksjonslaget var  $88 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Berntsen *et al* 2000 benyttet en mer avansert numerisk fjordmodell for en fjord med lengde 60 km og bredde 4 km. Med et dypvannsutslipp av ferskvann på  $10 \text{ m}^3/\text{sek}$  beregnet de en midlere økning av primærproduksjonen fra ca 70 til  $230 \text{ gC}/\text{m}^2/\text{år}$  i de inderste 40 km av fjorden.

## Litteratur

Aure, J., Erga, S.R., Asplin, L. and Frette, Ø. 2000. Fjordcult: Increased biological production in fjords by artificial upwelling. Poster presentation, First Maricult Conference, Trondheim, Norway, June 25-28, 2000.

McClimans, T. and Grimnes, G. 2000. Fjordcult: Laboratory simulation of controlled artificial upwelling in a fjord using a submerged fresh water discharge. SINTEF Civil and Environmental Engineering. Coastal and Ocean Engineering, Trondheim, Norway. Report STF22 A00217.21 pp.

McClimans, T., Grimnes, G. and Aure, J. 2000. Fjordcult: Controlled artificial upwelling in a fjord using a submerged fresh water discharge. First Maricult Conference, Trondheim, Norway, June 25-28, 2000. 13 pp.

Aksnes, A.L., Magnesen, T. and Lie, U. 1985. Nutrient enrichment experiments in plastic cylinders and the implications of enriched primary production in Lindåspollene, western Norway. *Sarsia* 70: 45-58. Bergen. ISSN 0036-4827.

Aksnes, D.L. og Magnesen, T. 1984. Kunstig oppstrømning, framtidig havbruk?. *Naturen* 1984, nr. 2. 59-62.

Skogen, M.D., Svendsen, E., Berntsen, J., Aksnes, D. and Ulvestad, K. 1995. Modelling the primary production in the North Sea using a coupled three-dimensional physical-chemical-biological ocean model. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 41:545-565.

Stigebrandt, A., Aure, J. and Molvær, J. 1996. Oxygen budget methods to determine the vertical flux of particulate matter with application to coastal waters off western Scandinavia. *Deep-Sea Research II*. Vol.43, No.1, pp.7-21, 1996.

Berntsen, J., Aksnes, D.L. and Foldvik, A. 2000. Production enhancement by artificial upwelling – a simulation study. First Maricult Conference, Trondheim, Norway, June 25-28, 2000.

Figueiras, M.J. and Reiriz, M.J.F. 2000. Coastal upwelling, primary production and mussel growth in the Rias Baixas of Galicia. First Maricult Conference, Trondheim, Norway, June 25-28, 2000.

Egge, J., Nejstgaard, J.C., Svensen, C. And Stianssen, J.E. 2000. Where do all nutrients go?. First Maricult Conference, Trondheim, Norway, June 25-28, 2000.

Aksnes, D.L. 1993. Sammenfatning av resultater - en vurdering av årsaker. I sluttrapport *Prymnesium parvum* i Ryfylke. SMR-rapport 9/93, Universitetet i Bergen, Senter for Miljø-og Ressursstudier.

Erga, S.R. 1989. Ecological studies on the phytoplankton of Boknafjorden, western Norway. II Environmental control of photosynthesis. *J. Plankton Res.*, 11, 785-812.

Aure, J. and Stigebrandt, A. 1989. On the influence of topographic factors upon the oxygen consumption rate in sill basins of fjords. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 28, 59-69.

Stigebrandt, A. 1991. Computations of oxygen fluxes through the sea surface and the net production of organic matter with application to the Baltic and adjacent seas. *Limnology and Oceanography*, 36, 444-454.

Wassmann, P. 1990. Relationship between primary and export production in the boreal coastal zone of the North Atlantic. *Limnology and Oceanography*, 25:464-471.

BKK, 2000. Tysseelva - dypvannsrør ut i Samnagerfjorden. Notat til HI fra Bergenshalvøens Kommunale Kraftselskap (BKK) (G. Trætteberg) 28.06.2000.