Havforskning
fra Miljøstyrelsen

Nr. 33 1994

# Planktondynamik omkring springlaget i Kattegat

Miljøministeriet **Miljøstyrelsen**

Havforskning
fra Miljøstyrelsen

Nr. 33 1994

# Planktondynamik omkring springlaget i Kattegat

Torkel Gissel Nielsen,
Danmarks Miljøundersøgelser

Peter Koefoed Bjørnsen,
Københavns Universitet

Hanne Kaas,
Danmarks Miljøundersøgelser

Bjarke Rasmussen,
Danmarks Tekniske Højskole

Amanda Cohen,
Stanford University, USA

Miljøministeriet **Miljøstyrelsen**

**Om Hav90 forskningsprogrammet**

Hav90 forskningsprogrammet skal

- bidrage til at evaluere effekterne af den iværksatte Vandmiljøplan.

- styrke beslutningsgrundlaget for de forholdsregler, der skal tages i fremtiden for at imødegå stigende eutrofiering - og dermed beskytte havmiljøet omkring Danmark.

Denne rapport er én af ca. 55 rapporter, der udsendes som et resultat af Hav90 forskningsprogrammet. Med Miljøstyrelsen som ansvarlig for programmets gennemførsel, er der sat omkring 65 Hav90 projekter i gang ved 15-20 institutioner.

I forbindelse med Folketingets vedtagelse af Vandmiljøplanen i 1987, blev det aktuelt, at få en bedre forståelse af de fysiske og kemiske processer samt de biologiske effekter af belastningen i de danske havområder. Endvidere var der behov for undersøgelser af, hvilken påvirkning af havområderne der sker ved tilførsel af næringsstoffer fra atmosfæren og tilstødende udenlandske farvande. Herudover blev det fundet hensigtsmæssigt at udvikle modeller til beskrivelse af vand- og stoftransporten samt stofomsætningen i de danske farvande.

Med henblik på at skaffe en større viden indenfor disse områder besluttede Folketinget, i forbindelse med Vandmiljøplanens vedtagelse, at bevilge 85 mio. kr. til et forskningsprogram, der skulle strække sig over en 5-årig periode fra 1988 frem til udgangen af 1992.

I 1987 nedsattte Miljøministeren et rådgivende ekspertorgan, der skulle bistå Miljøstyrelsen, dels ved planlægning af den fremtidige havmiljøforskning, dels være med til at sikre den faglige og økonomiske afvejning af denne forskning. Der blev nedsat 4 koordinationsgrupper, som hver fik det faglige ansvar for følgende områder:

- Stofomsætningen- og transporten i kystvandene, herunder belastningernes effekt på samme.

- Stofomsætningen i de frie vandmasser.

- Sedimentets rolle i stofomsætningen.

- Meteorologiske processers betydning for eutrofieringsforholdene.

Rapporterne udsendes i serien: "Havforskning fra Miljøstyrelsen".

Miljøstyrelsens Hav- og Spildevandskontor har været sekretariat for programmet og har sammen med koordinationsgrupperne stået for redaktionen af rapportserien.

# Indholdsfortegnelse


| | | |
|---|---|---|
| **Forord** | | 7 |
| **Sammendrag** | | 9 |
| **English Summary** | | 11 |
| **1.** | **Indledning** | 13 |
| 1.1. | Planktonsuccessionen i tempererede havområder | 13 |
| 1.2. | Horisontal udbredelse | 15 |
| 1.3. | Prøvetagning med høj vertikal opløsning | 15 |
| **2.** | **Fremgangsmåder** | 17 |
| 2.1 | Prøvetagning | 17 |
| *2.1.1* | *Overvågningstogter* | 17 |
| *2.1.1* | *Pyknoklintogter* | 17 |
| *2.1.1* | *Gradientvandhenterne* | 18 |
| 2.2 | Fysiske parametre | 20 |
| *2.2.1* | *Salinitet, temperatur og fluorecens* | 20 |
| *2.2.2* | *Lys og vind* | 20 |
| 2.3 | Kemiske analyser | 20 |
| *2.3.1* | *Næringssalte og DIC* | 20 |
| *2.3.2* | *Partikulært kvælstof og kulstof* | 20 |
| 2.4 | Biomasser og produktionsrater | 21 |
| *2.4.1* | *Algebiomasse* | 21 |
| *2.4.2* | *Primærproduktion* | 22 |
| *2.4.3* | *Bakterie biomasse* | 23 |
| *2.4.4* | *Bakterieproduktion* | 23 |
| *2.4.5* | *Biomasse af protozoer* | 23 |
| *2.4.6* | *Biomasse af mesozooplankton* | 24 |
| *2.4.7* | *Kvælstofomsætning* | 24 |
| 2.5 | Ilt | 24 |
| *2.5.1* | *Iltkoncentration* | 24 |
| *2.5.2* | *Iltforbrug* | 25 |
| 2.6 | Kvalitetssikring | 25 |
| *2.6.1* | *Vurdering af primærdata* | 25 |
| *2.6.2* | *Kalibrering* | 26 |
| **3.** | **Eksempler på dybmaksima af klorofyl i Kattegat på baggrund af overvågningsdata 1988-1992** | 27 |
| 3.1 | Introduktion | 27 |
| 3.2 | Datagrundlag | 28 |

| | | |
|---|---|---|
| 3.3 | Lys og vind, 1988-1992 | 34 |
| 3.4 | Nitrat, 1988-1992 | 34 |
| 3.5 | Klorofyl, 1988-1992 | 34 |
| 3.6 | Indikationer på dybmaxima af klorofyl, 1988-1992 | 35 |
| 3.7 | Klorofyl-dybmaksima i forhold til lagdeling | 38 |
| **4.** | **Planktonets vertikalfordeling omkring pyknoklinen; målinger med gradient vandhenteren i Kattegat, 91-92** | 39 |
| 4.1 | Introduktion | 39 |
| 4.2 | Togt GT-104 | 41 |
| 4.3 | Togt GT-106 | 43 |
| 4.4 | Togt GT-107 | 45 |
| 4.5 | Togt GT-108 | 47 |
| 4.6 | Togt GT-110 | 49 |
| 4.7 | Togt GT-121 | 49 |
| 4.8 | Togt GT-122 | 53 |
| 4.9 | Togt GT-123 | 55 |
| 4.10 | Togt GT-127 | 57 |
| 4.11 | Forekomst og placering af dybmaksima | 59 |
| **5.** | **Pyknoklintogt I, marts 1992** | 61 |
| 5.1 | Randbetingelser | 63 |
| *5.1.1* | *Næringssalte* | 61 |
| *5.1.2* | *Klorofyl* | 61 |
| *5.1.3* | *Iltforhold ved bunden* | 61 |
| 5.2 | Transektundersøgelserne | 62 |
| *5.2.1* | *Hydrografi* | 62 |
| *5.2.2* | *Næringssalte* | 63 |
| *5.2.3* | *Iltkoncentrationen lige over bunden* | 65 |
| *5.2.4* | *Fytoplankton biomasse og -produktion* | 65 |
| *5.2.5* | *Bakterieplankton og heterotrofe nanoflagellater* | 66 |
| *5.2.6* | *Mikrozooplankton* | 67 |
| **6.** | **Pyknoklintogt II, maj 1992** | 69 |
| 6.1 | Randbetingelser | 69 |
| *6.1.1* | *Næringssalte* | 69 |
| *6.1.2* | *Klorofyl* | 69 |
| *6.1.3* | *Iltforhold ved bunden* | 69 |

| | | |
|---|---|---|
| 6.2 | Transektundersøgelser | 70 |
| *6.2.1* | *Hydrografi* | 71 |
| *6.2.2* | *Næringssalte* | 72 |
| *6.2.3* | *Iltkoncentrationen ved bunden* | 72 |
| *6.2.4* | *Fytoplankton biomasse og -produktion* | 73 |
| *6.2.5* | *Bakterieplankton og heterotrofe nanoflagellater* | 74 |
| *6.2.6* | *Mikrozooplankton* | 75 |
| *6.2.7* | *Mesozooplankton* | 76 |
| *6.2.8* | *Dybdeprofiler for station 60 og 62* | 77 |
| 6.3 | Døgnundersøgelser | 80 |
| *6.3.1* | *Sammenligning af mål for primærproduktionen* | 82 |
| **7.** | **Pyknoklintogt september 1992** | 85 |
| 7.1 | Randbetingelser | 85 |
| *7.1.1* | *Næringssalte* | 85 |
| *7.1.2* | *Klorofyl* | 85 |
| *7.1.3* | *Iltforhold ved bunden* | 85 |
| 7.2 | Transektundersøgelserne | 86 |
| *7.2.1* | *Hydrografi* | 86 |
| *7.2.2* | *Næringssalte* | 86 |
| *7.2.3* | *Iltkoncentrationen ved bunden* | 87 |
| *7.2.4* | *Fytoplankton biomasse og -produktion* | 89 |
| *7.2.5* | *Bakterieplankton og heterotrofe nanoflagellater* | 90 |
| *7.2.6* | *Mikrozooplankton* | 91 |
| *7.2.7* | *Mesozooplankton* | 92 |
| *7.2.8* | *Dybdeprofiler for station 60 og 62* | 94 |
| **8.** | **Lagdeling og advektion i det sydlige Kattegat** | 97 |
| 8.1 | Indledning | 97 |
| 8.2 | Pyknoklintogt I, marts 1992 | 97 |
| *8.2.1* | *Vind- og strømforhold* | 97 |
| *8.2.2* | *Den ydre rand* | 98 |
| *8.2.3* | *Målinger på hovedtransektet* | 98 |
| 8.3 | Pyknoklintogt II, maj 1992 | 99 |
| *8.3.1* | *Vind- og strømforhold* | 99 |
| *8.3.2* | *Den ydre rand* | 99 |
| *8.3.3* | *Hovedtransektet* | 100 |
| 8.4 | Pyknoklintogt III, september 1992 | 101 |
| *8.4.1* | *Vind- og strømforhold* | 101 |
| *8.4.2* | *Den ydre rand* | 101 |
| *8.4.3* | *Hovedtransektet* | 101 |
| 8.5 | Hydrografi og fytoplankton forekomst i det indre område | 102 |
| *8.5.1* | *Lagdeling* | 102 |
| *8.5.2* | *Advektion* | 103 |
| *8.5.3* | *Advektion og flurescensmaksima* | 103 |
| *8.5.4* | *Sammenfatning* | 105 |

| | | |
|---|---|---|
| **9.** | **Kvælstofomsætningen** | 105 |
| 9.1 | Lysafhængighed i kvælstofoptagelsen | 105 |
| 9.2 | Forholdet mellem kulstof- og kvælstofoptagelse | 109 |
| 9.3 | Betydning af nitrat og ammonium | 112 |
| **10.** | **Planktondynamik i pyknoklinen** | 123 |
| 10.1 | Primærproduktion omkring pyknoklinen | 123 |
| 10.2 | Heterotroft respons | 126 |
| 10.3 | Næringssalt-dynamik og ny produktion i skillefaden | 128 |
| **11.** | **Modellering af planktondynamikken** | 137 |
| 11.1 | Indledning | 137 |
| 11.2 | Modellens opbygning | 139 |
| 11.3 | Startbetingelser og konstanter | 141 |
| *11.3.1* | *Vertikal turbulent diffusivitet, Dz* | 142 |
| *11.3.2* | *Algernes synkehastighed, S* | 142 |
| *11.3.3* | *Fotosyntetiskt kapacitet, α* | 143 |
| *11.3.4* | *Halvmætningskoncentrationer for næringssalte, Km* | 143 |
| *11.3.5* | *Respirationsrate, R, og mortalitetsrate,M* | 143 |
| *11.3.6* | *Fytoplankton selvskygning, Ab* | 143 |
| *11.3.7* | *Vandsøjlens lysaborption, Aw* | 143 |
| *11.3.8* | *Overflade-indstråling, Io* | 143 |
| *11.3.9* | *Omregningsforhold mellem næringssalt, kulstof og klorofyl* | 143 |
| 11.4 | Numerisk beregningmetoder | 144 |
| 11.5 | Resultater aftestkørsler | 144 |
| *11.5.1* | *Indledende kørsler* | 144 |
| *11.5.2* | *Test af modellens følsomhed* | 145 |
| *11.5.3* | *Kalibrering af modellen* | 151 |
| 11.6 | Diskusion | 154 |
| **12.** | **Konklusioner** | 155 |
| 12.1 | Betydningen af fytoplankton dybmaksima | 155 |
| 12.2 | Relevante skalaer i tid og rum | 155 |
| 12.3 | Kontrolerende faktorer | 156 |
| 12.4 | Overvågning og undersøgelse af dybmaksima | 156 |
| **13.** | **Referencer** | 157 |

# Forord

*Formål*

Formålet med dette projekt har været at levere datagrundlag for en detaljeret dynamisk og kvantitativ beskrivelse af planktondynamikken omkring springlaget i Kattegat, herunder

- den horisontale udbredelse af springlagsopblomstringer i Kattegat området,
- algelagets bidrag til den pelagiske produktion,
- regulering af produktionen i springlaget (lys, næringssalte og prædation),
- betydningen af kystblandingen, og heraf følgende intrusionsstrømme, for planktondynamikken,
- næringssaltsdynamik og fødekædestrukturen i intrusionslaget i forhold til afstanden fra fronten/blandingskammeret.

*Denne rapport*

Dette projekt var oprindeligt et delprojekt af "Springlagsopblomstringers og kystnære blandingsmekanismers betydning for planktondynamik og iltbalance i det sydlige Kattegat", men blev i forbindelse med finansiering fra Miljøstyrelsens Havforskningsprogram 90 udskilt som et selvstændigt projekt. Projektet er dog udført i tæt samarbejde med de to øvrige økonomisk støttede delprojekter fra den oprindelige ansøgning: " Blandingsmekanismer i kystnære farvande" og " Effekter af springlagsopblomstringer på benthos". Desuden omfatter rapporten resultater fra projektet "Plankton dynamik i springlaget i de indre danske farvande" støttet af Carlsberg fondet (bevillings nr. 90-00/48) og Miljøstyrelsens Havforskningsprogram 90 (projekt 2.32).

Projektet omfatter et meget stort datamateriale hvis detaljeringsgrad ikke er beskrevet til fulde i denne rapport, idet problemstillingen er centreret om hovedformålet: at beskrive de overordnede mekanismer i reguleringen af planktondynamikken i og omkring springlaget. De yderligere detaljer vil blive præsenteret i forbindelse med publicering af artikler i internationale tidsskrifter.

Rapporten består af en analyse af data fra de sidste 5 års overvågningstogter i Kattegat (kapitel 3). Det følgende kapitel (4) omfatter de mere detaljerede resultater fra fire stationer, hvor gradientvandhenteren har været anvendt i 1991 og 1992. Kapitel 5-7 indeholder resultaterne fra tre togter i det sydlige Kattegat, marts, maj og september 1992. Den mere tværgående beskrivelse og diskussion af hydrografi, kvælstofomsætning og planktondynamik findes i kapitel 8-10. Rapporten munder ud i en modellering af planktondynamikken (kapitel 11) og en samlet konklusion (kapitel 12).

*Tak til....*

Hovedparten af feltarbejdet i forbindelse med dette projekt er foregået under 11 ugers sejlads ombord på Miljøstyrelsens havforskningsskib Gunnar Thorson, hvis besætning vi vil takke for et godt samarbejde. Desuden har en lang række personer bidraget væsentligt til at få holdarbejdet ombord til at fungere under ofte vanskelige forhold. Vi skylder den faste laborantgruppe

tilknyttet projektet - Hanne Ferdinand, Dorete W. Jensen, Alexandra C. Nielsen og Birgit Søborg - megen tak for med deres store arbejdsindsats og engagement at have udgjort et overordentligt velfungerende team. Desuden tak til stud. scient. Juliane Albjerg, Martin Kristensen, Jens Larsen og Gitte Nielsen for hjælp under togterne og oparbejdning af de mange plankton-prøver og cand. scient. Steen Pedersen for at have foretaget og oparbejdet iltmålingerne. I forbindelse med overvågningstogterne ønsker vi desuden at takke Merete Ahlerup og Jack Melbye for hjælp med prøvetagning og oparbejdning af prøver.

I forbindelse med kapitel 3 ønsker vi desuden at takke Gunni Ærtebjerg og Carsten T. Agger for at have stillet data fra DMU's overvågningstogter til vores rådighed og for at have gennemlæst og kritiseret kapitlet.

Desuden ønsker vi at takke vore referee Kaj Sand Jensen, Ferskvands-biologisk Laboratorium, og Peter Tiselius, Kristineberg Marinbiologiske Station for konstruktiv kritik.

# Sammendrag

Denne undersøgelse er foretaget i det sydlige Kattegat. Området er karakteriseret af et skarpt springlag som adskiller salt nordsøvand fra brakt østersøvand. Inden for de sidste 10 år har forekomsten af giftige algeopblomstringer i springlaget (f.eks *Chrysochromulina polylepis* og *Gyrodinium aureolum*) forårsaget megen debat. Undersøgelser på Bøjestationen i det sydlige Kattegat i perioden 1988-90 tyder på at udviklingen af springlagsopblomstringer er en tilbagevendende og naturlig del af den årlige plankton succession i området.

At dette er et tilbagevendende fænomen blev yderligere bekræftet ved en analyse af de sidste fem års data fra Danmarks Miljøundersøgelsers overvågningsprogram i Kattegat (Figur 3.2-3.6). Fytoplanktonop-blomstringerne udvikles i springlaget efter, at forårsopblomstringen har opbrugt næringssaltene i overfladevandet, og de fortsætter indtil efterårsstorme igen tilfører overfladevandet næringssalte (kapitel 3).

Tykkelsen af springlagsopblomstringerne er ofte ringe (< 1m). På grund af vanskeligheder ved at indsamle prøver fra en 1m tyk algetop med en vandhenter af samme dimensioner, udviklede vi i forbindelse med dette projekt en gradientvandhenter (Figur 2.3). Denne vandhenter består af fyrre 150 ml sprøjter monteret parvis på en 3 meter aluminiumsramme med en indbyrdes afstand på 15 cm.

Ved hjælp af gradientvandhenteren blev planktondynamikken i skillefladen i Kattegat undersøgt på fire stationer i forbindelse med DMU's månedlige overvågningstogter fra april 1991 til oktober 1992. Data fra disse togter er præsenteret i kapitel 4.

Hydrografi, næringssalt- og planktondynamik blev undersøgt under tre togter i marts, maj og september 1992. Data fra disse togter er rapporteret i kapitel 5-9.

Den overordnede diskussion og konklusion findes i kapitel 10-12.

Som følge af de hydrografiske undersøgelser som blev foretaget i forbindelse med dette projekt (resumeret i kapitel 8), kan det konkluderes at advektionen af fytoplanktonholdigt vand fra Øresund og Storebælt er af stor betydning for forekomsten og udviklingen af springlagsopblomstringer af fytoplankton i den sydlige del af Kattegat.

Men til trods for betydningen af det tilførte fytoplankton, bidrager primærproduktionen i springlaget væsentligt til primærproduktionen i området. Springlagsproduktionen (primærproduktion dybere end 10 meter) er estimeret til hhv. 20, 50 og 33% af vandsøjlens produktion under togterne i marts, maj og september 1992 (Figur 10.2).

En del af primærproduktionen i dybmaksimummet udgøres af "ny produktion". Efter forårsopblomstringen er nutriklinen lokaliseret i midt af haloklinen. I løbet af sommeren sker der en sænkning af nutriklinen, både i forhold til vandoverfladen og i forhold til haloklinen (Figur 10.5). Dybmaksimummet følger nutriklinen, således at det i september er lokaliseret ved de samme næringssaltkoncentrationer som i maj, men i dybereliggende,

mere saline vandlag (Figur 10.4). At ny produktion spiller en væsentlig rolle for primærproduktionen i dybmaksima underbygges af vores undersøgelser af næringssaltdynamikken, som viste at nitrat dækker hovedparten af algernes N-behov i maj (Tabel 9.5, Figur 9.10-9.11). I september udgør nitrat omkring 25% af dybmaksima-algernes nitrogen-optagelse. Dette skyldes sandsynligvis, at algelaget på dette tidspunkt ligger dybere, dvs. med mindre gode lysbetingelser end i maj, og at det heterotrofe planktonsamfund har etableret sig. Den tætte samhørighed mellem dybmaksimummet og nutriklinen indikerer, at der sker en væsentlig ny produktion (= nitratbaseret produktion) i de dyberetliggende vandlag gennem sommeren. Det kan dog ikke udelukke at sænkningen af nutriklinen også skyldes hydrografiske processer.

I forbindelse med denne undersøgelse blev der ikke observeret opblomstringer af toksiske alger i skillefladen, hvilket medførte at den højeste heterotrofe aktivitet ofte var lokaliseret i algelaget i springlaget.

Denne undersøgelse illustrerer betydningen af processer i springlaget og understreger dermed behovet for en hensigtsmæssig prøvetagning af vandmassen omkring pyknoklinen, hvis man skal opnå en bedre forståelse af den pelagiske omsætning i et lagdelt havområde som Kattegat.

# English Summary

Title: *Plankton dynamics in the Southern Kattegat pycnocline.*

The aim of this project was to provide data supporting a detailed dynamic and quantitative description of the plankton dynamics in the pycnocline in the Kattegat. Special emphasis was placed on:

- the horizontal extension of subsurface blooms in the Kattegat area,
- the subsurface bloom contribution to pelagic production,
- regulation of subsurface production (light, nutrients and predation),
- the response of heterotrophic components of the plankton to subsurface blooms,
- importance of coastal mixing and the resulting intrusion for plankton dynamics,
- nutrient dynamics and food chain structure in relation to distance from the front/mixing chamber.

The investigation was conducted in the southern part of Kattegat, Denmark. The area is characterised by a steep halocline separating saline North Sea water from brackish Baltic water. The recent development of toxic subsurface phytoplankton blooms at the pycnocline (*Chrysochromulina polylepis* and *Gyrodinium aureolum*) has caused public concern. Analysis of data collected at a permanent station in the southern part of Kattegat (1988-90) indicates that the development of subsurface blooms is a recurrent event during the phytoplankton succession within the area.

The recurrence of subsurface blooms was confirmed by an analysis of data from National Environmental Research Institute monitoring program in the Kattegat. The analysis of the data from the last five years showed that development of subsurface blooms is a natural part of the phytoplankton succession during the summer period (Figure 3.2 -3.6). Subsurface phytoplankton blooms develop in the pycnocline after the surface water has been depleted of nitrate by the spring bloom and they continue until the autumn storms entrain nutrients into the surface water (chapter 3).

The vertical extension of the subsurface peaks is often less than one meter. Due to difficulties collecting these blooms using conventional water bottles, a gradient water sampler was developed and applied during this project (Figure 2.3). The gradient sampler is composed of twenty pairs of 150 ml syringes which collect samples every 15 cm over a 3 meter depth interval.

From April 1991 to October 1992, the plankton dynamics in the southern Kattegat pycnocline was investigated during monthly monitoring cruises using the high-resolution water sampler. Data from these cruises are presented in chapter 4.

The hydrography, nutrient dynamics and the vertical distribution of the plankton were studied in detail during three cruises in March, May and September 1992. Results from these cruises are presented in chapter 5-9.

Overall discussion and conclusion including modelling perspectives are given in chapter 10-12.

The hydrographical investigation associated with this project ( summarized in chapter 8) concluded that advection of phytoplankton-rich water from the Øresund and the Storebælt is essential for the occurrence and the development of subsurface blooms in the southern part of the Kattegat.

However, the primary production at the pycnocline contributes to the primary production in the area. The subsurface production (production below 10 meter) was estimated to 20, 50 and 33 % of the water column production during cruises in March, May and September, respectively (Figure 10.2).

A large fraction of the primary production in the pycnocline seems to be "new production". After the spring bloom, the nutricline is located in the middle of the halocline. During summer a lowering of the nutricline is observed, both in relation to the surface and to the halocline (Figure 10.5). the deep chlorophyll maximum follows the lowering of the nutricline, and in September the deep maxima is found at similar nitrate concentrations as in May but in deeper, more saline waters (Figure 10.4). That new production, based on nutrients from the bottom waters, is important, is supported by our measurements of nitrogen dynamics, which show that the major part of nitrogen consumption by the surface algal production in May is covered by nitrate (Table 9.5, Figure 9.10-9.11). In September, only about 25% of the nitrogen requirement is covered by nitrate (Table 9.5), probably due to less favourable light conditions and development of a heterotrophic plankton community at the deep chlorophyll maximum. Thus, our results indicate that new production is important to the deep maximum algal populations. It should be mentioned, however, that the position of the nutricline may also be influenced by the hydrography.

No toxic effect of the subsurface phytoplankton populations was observed on the pelagic food web during this investigation. Very often the highest activity of the heterotrophic components of the pelagic food web were located in the subsurface phytoplankton peak.

The present investigation illustrates the importance of processes at the pycnocline and thus stresses the need for a proper sampling of the pycnocline if the planktondynamics of a stratified water body like the Kattegat is to be understood.

# 1 Indledning

## 1.1 Planktonsuccessionen i tempererede havområder

*Den klassiske opfattelse*

Den klassiske opfattelse, er at fytoplanktonproduktionen kun finder sted i den opblandede øvre del af vandsøjlen, som følge af lysets begrænsede nedtrængen i vandet. I tempererede havområder starter vækstsæsonnen med en forårsopblomstring domineret af kiselalger, som udvikles som følge af de forbedrede lysforhold og den begyndende lagdeling. Efter at næringssaltene i overfladelaget er opbrugt sedimenterer en stor del af kiselalgerne. I den lagdelte sommerperiode er biomassen lav og primærproduktionen er hovedsageligt baseret på næringssalte regenereret i den øvre del af vandsøjlen. Dette fortsætte indtil efterårsstorme bryder lagdelingen og tilfører overfladen næringssalte fra bundvandet, hvilket danner grundlag for en opblomstring af furealger (f.eks. Cushing, 1973).

Ifølge denne beskrivelse af planktonsuccessionen kan algernes vækst om foråret og efteråret karakteriseres som ny produktion (ophobede eller tilførte næringssalte), mens fytoplanktonets produktion om sommeren er regenereret produktion (bygger på remineraliserede næringssalte). Om sommeren er der balance mellem remineralisering og primærproduktion; små algeformer vinder konkurrencen om de knappe uorganiske næringssalte, og disse små alger omsættes i vandsøjlen gennem et kompliceret fødenet domineret af mikroorganismer ( det mikrobielle fødenet). Forårsopblomstringen derimod domineres af hurtigt voksende store kiselalger; og mesozooplanktonet når ikke at etablere sig før forårsopblomstringen p.g.a. næringssaltmangel bryder sammen og algerne synker til bunden. Om efteråret er det ligeledes store algeformer (ofte furealger) der dominerer, men zooplanktonet er nu etableret og en væsentlig del af algeproduktionen omsættes via den 'klassiske' fødekæde af vandlopper.

*Akkumulering i springlaget*

Allerede i 1920'erne og 30'erne publicerede fysiske oceanografer undersøgelser som v.h.a. lysmåleteknik dokumenterede forekomst af høje planktonkoncentrationer i skillefladen i danske farvande (f.eks. Pettersson, 1934). Siden er en række teorier fremsat om årsagen til udviklingen af sådanne opblomstringer. De hydrografiske undersøgelser i forbindelse med Bøjeprojektet indikerede at intrusionsstrømninger også kan have en væsentlig betydning for dannelse af springlagsopblomstringer i Kattegat (Bo Pedersen, 1990). Specielt har det været fremført at intrusioner dannet som følge af blandingsprocesser langs kysten kan være vigtige (Rasmussen, 1994). En anden forklaring på forekomsten af sådanne dybmaksima har tidligere været, at fytoplankton ophobes i pyknoklinen p.g.a. reduceret synkehastighed ved den højere densitet (Steele & Yentch, 1960) og næringssaltkoncentration (Bienfang *et al.*, 1983).

*Vækst i springlaget*

Denne opfattelse er dog i modstrid med undersøgelser i tropiske farvande som har dokumenteret forekomst af dybmaksima på undersiden af pyknoklinen, som følge af algevækst (Herbland & Voituriez, 1979). Vækst i springlaget skyldes en kombination af en række faktorer: ringe turbulens (Pingree *et al.*, 1975) lystilførsel fra oven og næringssalte fra undersiden af laget ( Banse, 1987). Desuden vil selvbevægelighed (Holligan, 1979) og giftighed (Nielsen *et al.*, 1990, Bjørnsen & Nielsen, 1991) forbedre muligheden for at danne kraftige opblomstringer.

*Bøjeprojektet*

I forbindelse med det af Miljøstyrelsens Havforskningsprogram 90 støttede Bøjeprojekt i det sydlige Kattegat blev der foretaget flere undersøgelser af springlagsopblomstringers betydning for den pelagiske produktion (Nielsen *et al.*, 1990; Kaas *et al.*, 1991; Nielsen, 1991; Olesen, 1992). Her blev det i 1989 beregnet at springlagsopblomstringer bidrog med ca 30% af den årlige primærproduktion (Richardson & Christoffersen, 1991). Til sammenligning var bidraget fra forårsopblomstringen på 19% . Disse resultater står i stærk kontrast til den klassiske opfattelse ifølge hvilken forårsopblomstringen er altafgørende for størrelsen af den årlig primærproduktion.

*Stilkalgeopblomstringen 1988*

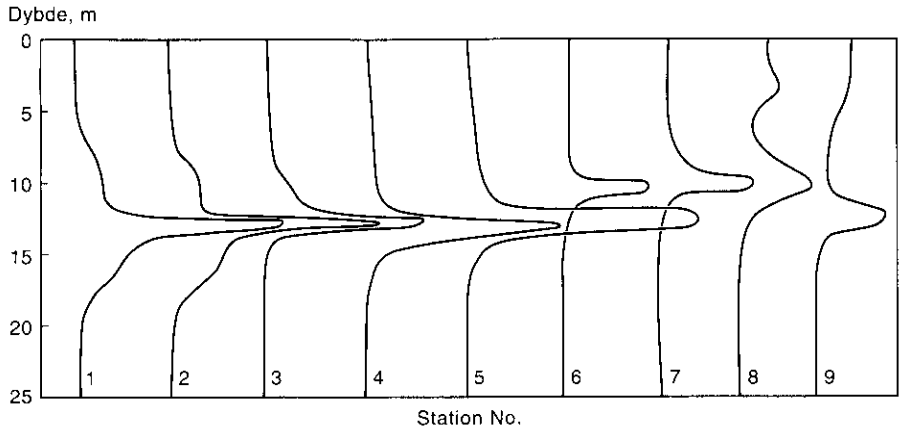
At skillefladeopblomstringer ikke kun er en kuriositet blev yderligere understreget i forbindelse med opblomstringen af den toksiske stilkalge *Chrysochromulina polylepis* i forsommeren 1988. Da opblomstringen havde sin maksimale udbredelse dækkede den hele Kattegat og Skagerrak. Opblomstringen var koncentreret i et meter tykt lag i springlaget (Nielsen *et al.*, 1990; Kaas *et al.*, 1991).

*1989*

Som følge af opblomstringen i 1988 har man siden været meget opmærksom på udviklingen i planktonet i perioden efter forårsopblomstringen. I maj 1989 udvikledes, som året før, kraftige opblomstringer i skillefladen af autotrofe nanoflagellater i det sydlige Kattegat. I modsætning til året før bestod opblomstringen af ikke-giftige former og der var i modsætning til 1988 stor heterotrof aktivitet i algelaget. I sensommeren udvikledes et dybmaksimum af furealgeslægten *Ceratium* (Nielsen, 1991)

*1990*

Udviklingen i fytoplanktonet i det sydlige Kattegat i 1990 fulgte mønsteret fra de to foregående år med dybmaksima i perioden efter forårsopblomstringen (Bjørnsen & Nielsen, 1991; Olesen, 1992). I sensommeren udvikledes et dybmaksimum af den giftige furealge *Gyrodinium aureolum*. Fytoplanktonudviklingen i forsommeren 1991 svarede til de tidligere års undersøgelser (Figur 1.1).




***Figur 1.1.*** *Den vertikale fordeling af fluorescensen (relative enheder) på tværs af det sydlige Kattegat 13 maj 1991. Afstanden mellem stationerne er 3 Nm, Bøjestationen svarer til station 5.*

Den gentagne forekomst af skillefladeopblomstringer i perioden efter forårsopblomstringen i det sydlige Kattegat må betragtes som et led i den naturlige planktonsuccession.

## 1.2 Horisontal udbredelse

*SKAGEX*

Gennem deltagelse i SKAGEX fik vi i juni 1990 lejlighed til at undersøge planktondynamikken langs et transekt på tværs af Skagerrak (Bjørnsen *et al.*, 1993). I denne undersøgelse deltog 20 forskningsskibe fra landende omkring Skagerrak, Kattegat og Østersøen. Et dybmaksimum af fytoplankton i og under pyknoklinen med stor horisontal udbredelse blev fundet. En tilsvarende stor horisontal udbredelse af klorofyldybmaksima blev observeret i den sydlige del af Nordsøen i samme periode. På 51 undersøgte stationer omkring Dogger banke blev de højeste algebiomasser observeret på dybder over 15 m. På dette tidspunkt bidrog dybmaksimummet med op mod 70% af vandsøjlens primærproduktion (Nielsen *et al.*, 1993). Både i Skagerrak og Nordsøen var fytoplanktonet sammensat af en blanding af autotrofe nanoflagellater, kiselalger og furealger. Stor heterotrof aktivitet faldt sammen med fytoplanktondybmaksimaet.

## 1.3 Prøvetagning med høj vertikal opløsning

*Konventionel prøvetagning*

Beskrivelsen af vertikalfordeling af fytoplankton tidligere i dette kapitel er foretaget på grundlag af målinger med *in situ* fluorescensprober, som med 10 cm's vertikal opløsning registrerer vandmassens klorofyl fluorescens. Dette står i stærk kontrast til indsamlingen af vandprøver med 0,5-1 m lange vandhentere. I forbindelse med nærværende projekt, viste det sig at vandsøjlens lagdeling bliver opretholdt i vandhenteren således at der kan være op til 8‰ forskel i saltholdighed mellem den første og sidste aftappede delprøve fra en og samme vandhenter udløst i skillefladen (Rasmussen, pers medd.).

*Gradient vandhenteren*

Den store tidsmæssige og horisontale udbredelse af springlagsopblomstringer samt erkendelsen af vanskelighederne ved at indsamle repræsentative vandprøver fra en 0,5 m tyk fytoplankdymaksimum en vandhenter af samme længde, inspirerede til udvikling af en vandhenter med den ønskede høje vertikale opløsning (Bjørnsen & Nielsen, 1991; afsnit 2.1.3). En prøve taget med gradientvandhenteren i august 1990 i forbindelse med en opblomstring af *Gyrodinium aureolum* viste, et klorofylmaksimum i springlaget på 70 µg klorofyl liter$^{-1}$. Algemaksimumlaget var kun en halv meter tykt, men indeholdt alligevel over halvdelen af hele vandsøjlens klorofyl.

*Stor kontaktflade mellem springlag og bund*

Kattegat har en gennemsnitsdybde på 23 meter, hvilket gør at et meget stort område af bunden er i kontakt med pyknoklinen (26% af Kattegats areal er mellem 10 og 20 m dybt). I sammenhæng med den regelmæssige udvikling af skillefladeopblomstringerne, understreger det behovet for en mere detaljeret beskrivelse af planktondynamikken omkring springlaget for at opnå en bedre forståelse af kulstofomsætningen.

# 2 Fremgangsmåder

Dette afsnit vil kort beskrive de togter, prøvetagningsprogrammer og metoder som har dannet baggrund for nærværende projektet.

## 2.1 Prøvetagning

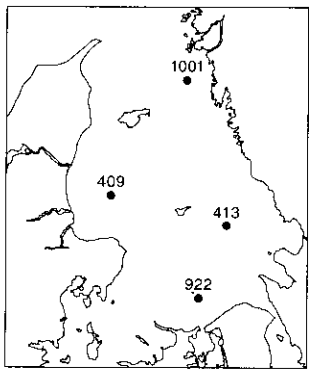
Prøvetagningsprogrammet omfatter kontinuerte profilmålinger med nedsænkede prober (salinitet, temperatur og fluorescens), tætliggende prøvetagning med høj vertikal opløsning med gradientvandhenter samt punktmålinger fra yderligere 3-10 dybder med Niskin rosettevandhenter.

Målingerne fra gradient- og rosettevandhenteren omfattede de kemiske og biologiske parametre beskrevet i afsnittene 2.2 - 2.6. Bestemmelsen af alle parametrene blev foretaget på vand fra samme sprøjtepar eller vandhenter.

### 2.1.1 Overvågningstogter

*Overvågning siden 1970érne*

Siden midten af 1970'erne har Danmarks Miljøundersøgelser (DMU) foretaget målinger af fysiske-kemiske variable samt algebiomasse og produktion i de indre danske farvande. For at undersøge den horisontale udbredelse af eventuelle springlagsopblomstringer i Kattegat deltog vi i forbindelse med et tidligere Hav90 projekt (nr. 2.32) på DMU's månedlige overvågningstogter med Gunnar Thorson fra april til oktober 1991. På disse togter tog vi prøver med høj vertikal opløsning i springlaget på 4 stationer (922, 413, 1001 og 409) i Kattegat. Dette prøvetagningsprogram blev fortsat i 1992 i forbindelse med nærværende undersøgelse (Figur 2.1).




***Figur 2.1** De 4 overvågningsstationer undersøgt med gradientvandhenteren i 1991 og 92.*

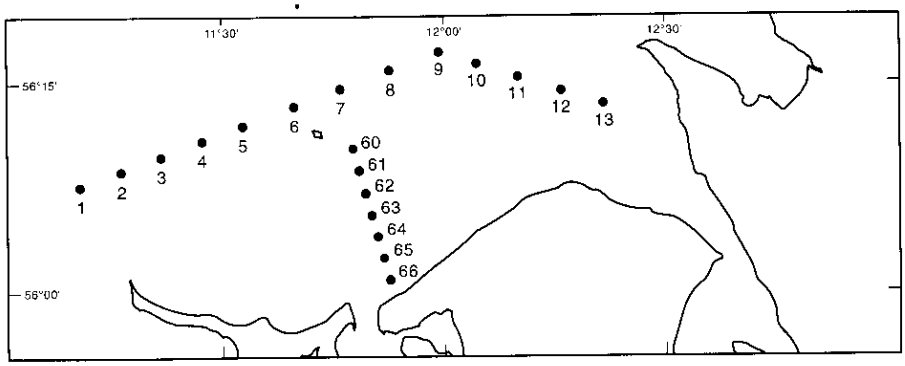
Prøvetagningsdybden for gradientvandhenteren blev valgt på basis af profilerne af temperatur, salinitet og fluorescens (se 2.1.3). Supplerende vandprøver blev taget med rosettevandhenteren, således at overflade-, spring- og bundlag blev repræsenteret i materialet.

### 2.1.2 Pyknoklintogter

I forbindelse med nærværende projekt gennemførtes 3 specialtogter af 10 døgns varighed med r/v Gunnar Thorson. Togterne skulle dække tre væsentlige perioder af planktonsuccessionen i det sydlige Kattegat; forårsopblomstringen, en periode med stor sandsynlighed for opblomstring af nanoflagellater samt efterårsopblomstringen af dinoflagellater.

*Hovedtransektet*

Med udgangspunkt i erfaringer opnået under Bøjeprojektet samt et DMU planktontogt i august 1991 valgte vi at koncentrere arbejdet langs et transekt mellem Hesselø og Hundested (Figur 2.2a), da dette området blev betragtet som upåvirket af vandmasserne fra Storebælt og Øresund. Syv stationer (60-66) er placeret med 3,3 km afstand fra station 60 (overvågningsstation 922) og vinkelret ind mod land således at transektet omfatter lagdelte og opblandede stationer hhv. yderst og inderst (Figur 2.2). Da havbunden i dette område skråner jævnt (ca. 1 m per km), er der en stor kontaktflade mellem springlag og bund på de midterste stationer.




***Figur 2.2.*** *Placeringen af randstationerne og hovedtransektstationer i det sydlige Kattegat.*

*Randbetingelser*

For at undersøge hvor repræsentativt transektet var for perioden og området, foretog vi i begyndelsen og ved slutningen af hvert togt en hydrografisk og kemisk kortlægning af det sydlige Kattegat. Denne randundersøgelse strækker sig fra DMU's station 921 (Kullen) nord om Hesselø til station 925 i Storebælt. Langs dette transekt placeredes 13 stationer (1-13) med en indbyrdes afstand på 6,5-7,4 km (Figur 2.2.).

Derudover omfattede hvert togt 3 gennemsejlninger af hovedtransektet ved starten, midten og slutningen af togtet, hvor samtlige fysiske, kemiske og biologiske parametre blev målt. Prøvetagningen fandt sted som beskrevet under 2.1.1. Prøvetagningen langs hovedtransektet blev gennemført i dagslys.

*Døgnundersøgelser*

Udover transektundersøgelserne blev der i forbindelse med hvert pyknoklintogt foretaget to døgnundersøgelser, h.h.v. på station 60 og en station i området hvor springlaget ramte bunden.

### 2.1.3. Gradientvandhenterne

*15cm' vertikal opløsning*

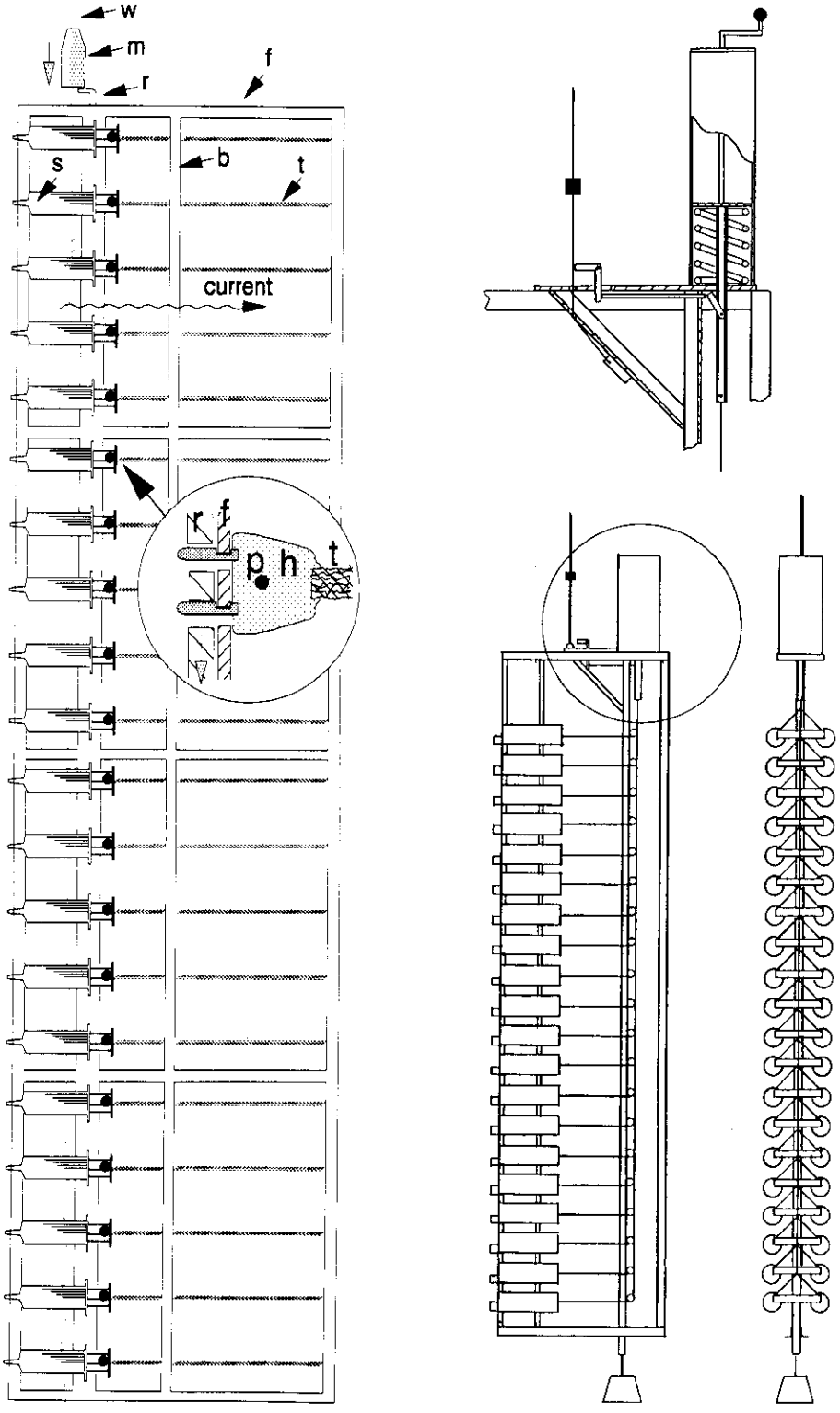
For at kunne beskrive planktondynamikken i skillefladen med høj vertikal opløsning udviklede vi i 1990 en vandhenter som muliggør prøvetagning med 15 cm's afstand (Bjørnsen & Nielsen, 1991). Gradientvandhenteren består af fyrre stk 150 ml katetersprøjter som parvis er placeret med 15 cm's afstand på forkanten af en 3 meter høj aluminiumsramme (Figur 2.3a). Sprøjternes stempler er parvist monteret i en ladeanordning, som med kraftige elastikker er udspændt til rammens bagkant.

Prøvetagningsdybden blev valgt på basis af den vertikale salt-, temperatur- og fluorescensfordeling. Før hver prøvetagning blev gradientvandhenteren forsynet med salt-, temperatur- og fluorescensprober, således at vandhenteren kunne sænkes til det ønskede vandlag. Når dette var, sket udløste et faldlod via en pal ladeanordningen, og sprøjterne fyldtes i løbet af 1 sekund (kontrolleret ved videooptagelser). Inden for 30 minutter var saltholdigheden i sprøjterne målt, og prøverne oparbejdet eller tilsat isotoper og sat i inkubator.

*Den store gradient-vandhenter*

En begrænsning ved den første gradientvandhenter var prøvestørrelsen. Hvis man eksempelvis ønsker at beskrive mesozooplanktonets fordeling eller næringssaltdynamikken, bør prøverne mindst være 10 gange større end i den første model. Som følge heraf udviklede vi sammen med Lars Gissel Nielsen en vandhenter, som kunne tage parvise større prøver på 1,5 liter. Den generelle opbygning svarer til den oprindelige model. Sprøjterne var lavet af

PVC rør forsynet med stempel og silikone kontraventil. Stemplerne er parvis forbundet til en central stålwire, som forbinder sprøjterne til en udløsermekanisme. Udløsermekanismen er placeret øverst på aluminiumsrammen og består af en bilfjeder i en lukket stålcylinder. Før prøvetagningen presses fjederen sammen med et håndsving til den låses af en pal (Figur 2.3b). Når vandhenteren er i den ønskede dybde aktiveres fjederen med et faldlod og samtlige sprøjter udløses. I modsætning til den lille vandhenter som kan betjenes fra en spinkel håndwinch, kræver denne en kran da den i fyldt tilstand vejer ca. 150 kg.




***Figur 2.3.*** *De to gradientvandhentere a) den lille gradientvandhenter (fra Bjørnsen & Nielsen, 1991), b) den store gradientvandhenter.*

*Fletning med CTD profiler*

I forbindelse med oparbejdningen og præsentationen af data fra gradient-vandhenteren skal målingerne placeres korrekt i vandsøjlen. Dette er gjort på basis af saliniteten i sprøjterne og saltprofilerne fra CTD-sonden, da denne parameter er uafhængig af biologiske processer og derfor afspejler gradientvandhenterens placeringen i vandsøjlen.

## 2.2 Fysiske parametre

### 2.2.1 Salinitet, temperatur og fluorescens

*CTD*

Temperatur- og saltprofiler blev registreret vha. et Neil Brown Mark II CTD (Conductivity, Temperature and Depth) system monteret på Gunnar Thorson. Saltproben blev kalibreret med en standardprøver med kendt salinitet målt på et Guildline Portosal salinometer. Saliniteten i prøverne fra gradient- og rosettevandhenteren blev målt i forbindelse med tapningen vha. en WTW probe. Den vertikale fluorescens fordeling blev målt vha et Q-instrument fluorometer (Hundahl & Holck, 1980) monteret på CTD-systemet. Fluorescens målingerne blev for hvert togt omregnet til klorofyl *a* ud fra en regression mellem spektrofotometriske målinger af klorofyl *a* indholdet i vandprøver og fluorometermålingerne. Derudover anvendte vi et Hardt fluorometer som kunne monteres på gradientvandhenteren i forbindelse med lokaliseringen af klorofyl-dybmaksima.

### 2.2.2 Lys og vind

Lysmålingerne er stillet til rådighed af Institut for Jordbrugsvidenskab, Sektion for Kulturteknik og Planteernæring, Den Kongelige Veterinær- og Landbohøjskole (KVL), i form af time og dagsmidler af overfladeind-strålingen i den fotosynteseaktive del af spektret (400 - 700 nm) målt ved Højbakkegård i Tåstrup. Indstrålingen blev omregnet fra energi til fotoner med faktoren 2,1 mol $MJ^{-1}$ (Sv. E. Jensen, pers medd.).

Lysets nedtrængning gennem vandsøjlen er beregnet under antagelse af en refleksion i overfladen (albedo) på 10% og en svækkelse (ekstinktion) af lyset fra vandet og fra fytoplanktonet på hhv. 0,18 $m^{-1}$ og 0,018 $m^{-1}$(mg klorofyl $m^{-3}$)$^{-1}$.

Vinddata fra Sprogø blev rekvireret fra Dansk Hydraulisk Institut.

## 2.3 Kemiske analyser

### 2.3.1 Næringssalte og DIC

Koncentrationen af nitrit, nitrat, ammonium, fosfat og silikat blev målt i 8-10 dybder med størst frekvens omkring springlaget. Næringssalt-koncentrationerne blev også målt i alle prøver fra gradientvandhenterne. Analyserne blev udført med en autoanalyser (ASA seawater analyser, Carlberg, 1972; Olsen & Lundgren, 1984). Koncentrationen af opløst uorganisk kulstof (DIC, mM) blev beregnet udfra saliniteten (S, ‰) efter Buch, (1947): DIC = 1.26 + 0.031·S.

### 2.3.2 Partikulært kvælstof og kulstof

Koncentrationen af partikulært kvælstof (PON) og kulstof (POC) er målt i forbindelse med undersøgelsen af kvælstofomsætningen. Det partikulære stof blev filtreret på forglødede GF/F glasfiber-filtre (1-2,5 l vand) og målt på en Perkin Elmer CHN-analyser 240C.

## 2.4 Biomasser og produktionsrater

### 2.4.1 Algebiomasse

Biomassen og den vertikale fordeling af fytoplanktonet blev bestemt ved profilmålinger med *in situ* fluorometer samt ved spektrofotometrisk og fluorometrisk bestemmelse af klorofyl *a* indholdet i ethanol-ekstraherede filtrerede algeprøver. Profilmålinger af fluorescens blev kalibreret mod klorofyl *a* indholdet i vandprøverne fra rosettevandhenteren. Prøver à 1-4 liter blev filtreret på GF/F glasfiber-filter, ekstraheret i 24 timer i 96 % ethanol (Jespersen & Christoffersen, 1987) og målt på et Milton Roy 1201 spektrofotometer (Strickland & Parsons, 1972). Klorofyl *a* i prøverne fra gradientvandhenteren blev bestemt i dobbelt-prøver á 40 ml som blev filtreret på GF/F filtre og ekstraheret 24 timer i 5 ml ethanol inden fluoroscensen blev målt på et Turner Design 10-AU Fluorometer. Prøverne blev kalibreret mod spektrofotometriske målinger.

### 2.4.2 Primærproduktion

Primærproduktionen blev målt med fire forskellige metoder: 1) dæk-in-kubation med naturligt lys, 2) laboratorieinkubation med hvidt lys, 3) laboratorieinkubation med grønt lys og 4) *in situ* inkubationer.

*Dækinkubation med naturligt lys*

Prøver blev udtaget i 5 m og midt i fluorescenstoppen på udvalgte stationer. Dobbeltprøver med 10 ml vand tilsat ca 2µCi $NaH^{14}CO_2$ inkuberedes i glasvials på dækket i plastikkasser afdækket til at give 50%, 20%, 10%, 4% og 2% af indstrålingen. Temperaturen blev holdt konstant ± 3°C ved gennemstrømning med overfladevand. Efter 2 timer blev kulstoffikseringen stoppet med 1 ml formalin og overskydende $CO_2$ uddrevet ved tilsætning af 300 µl HCl (1N) og gennembobling i mindst 1 time. $^{14}C$-aktiviteten blev målt på en scintillationstæller tidligst et døgn efter tilsætning af scintillationsvæske. Kulstof-fikseringen for hver lysintensiet blev beregnet efter Richardson & Christoffersen, 1991. Relationen mellem lysintensitet og kulstoffiksering er kalkuleret ved nonlineær regression (Statistica) efter modellen $P = Ps \cdot (1 - \exp^{(-\alpha \cdot I/Pmax)}) \cdot (\exp^{(-\beta \cdot I/Ps)})$ (Platt *et al.*, 1980) og tabsfunktion $L = (\text{predicted} - \text{observed})^2$, hvor Ps = maksimal fiksering, hvis lyshæmning ikke forekommer (den aktuelle $Pmax = Ps \cdot (\alpha/\alpha+\beta)(\beta/\alpha+\beta)^{\beta/\alpha}$). Iterationen startes ved at sætte P lig den højeste målte fotosynteserate, $\alpha$ lig hældningen op til og $\beta$ lig hældningen efter den højeste målte rate. Dybdeprofiler af primærproduktionen i klorofylmaksimummet er beregnet v.h.a. den aktuelle indstråling (timemålinger, jvf. afsnit 2.2.2), og lyssvækkelsen under hensyntagen til såvel vandets som algernes absorption.

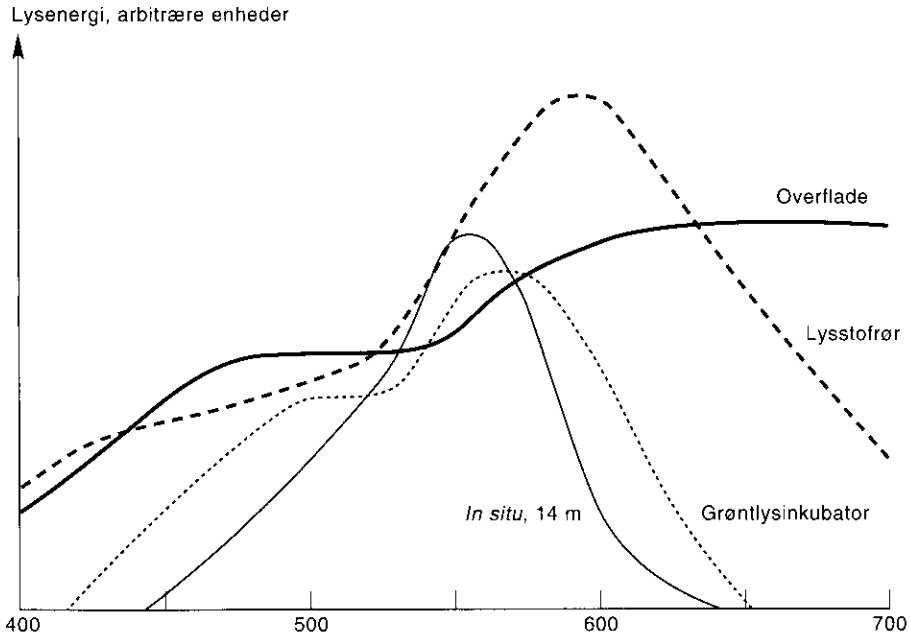
*Laboratorieinkubationer med hvidt lys*

Målingerne er udført som beskrevet ovenfor bortset fra at forsøgene blev udført i en laboratorieinkubator med kunstigt lys (Phillips TLD33). Antallet af laboratorieinkubationer på maj- og septembertogterne er begrænsede p.g.a. nedbrud af inkubatoren. For pyknoklintogterne er primærproduktionen beregnet som beskrevet ovenfor. For overvågningstogterne er primærproduktionen imidlertid beregnet ifølge Gargas & Hare, (1976). De væsentligste forskelle er, at produktionen er beregnet ved "normal" indstråling i stedet for aktuel indstråling, og at kulstofassimilationen ved de forskellige lysintensiteter er tilpasset en rektilineær kurve (lineær indtil lysmætning, derefter konstant), som ikke tager hensyn til evt. lyshæmning.

*Laboratorieinkubation med grønt lys*

De sædvanlige fremgangsmåder til bestemmelse af fytoplanktonets primærproduktion - herunder de to metoder beskrevet ovenfor - fastlægger sammenhængen mellem lysindstråling og kulstofassimilation i en eller få

vandprøver, og *in situ* produktionen beregnes derefter udfra den aktuelle indstråling og lysets nedtrængning gennem vandsøjlen. Denne fremgangsmåde er velegnet til at bestemme produktionen i det homogene overfladevand, men mindre egnet til at bestemme produktionen omkring skillefladen, hvor ikke blot lysforholdene, men også næringssaltkoncentrationer og algetæthed kan variere betydeligt indenfor få decimeter.




***Figur 2.4.*** *Spektralfordeling af fotosynteseaktivt lys ved overfladen, 14 meters dybde samt fra lysstofrør før og efter passage af grønfilter.*

Til dette projekt blev der bygget en special-inkubator med kapacitet til 100 prøver for at kunne måle kulstofassimilationen i alle 20 prøver fra gradientvandhenteren. Dobbelte vandprøver á 7,5 ml fra gradientvandhenter og rosettevandhenter blev overført til glasvials og anbragt i et termostatreguleret vandbad (8 ± 2°C). Hver prøve blev tilsat 1 µCi $Na^{14}CO_3$ og belyst med 40 µmol $m^{-2}s^{-1}$ grønt lys for at efterligne de naturlige lysforhold omkring skillefladen. Den ønskede spektralfordeling af lyset blev opnået ved at lade lys fra lysstofrør (Osram 25 Universalhvid) passere et 2 cm tykt lag af en 0,5 M $NiSO_4$-opløsning (Figur 2.4). Inkubationen blev standset efter 2 timer ved tilsætning af 150 µl 1 N HCl med 250 ppm $HgCl_2$. Den ikke-assimilerede uorganiske kulstof blev fjernet ved gennembobling i 1 time, hvorefter prøverne blev opbevaret koldt indtil $^{14}C$-aktiviteten kunne måles ved scintillationstælling. Parallel-prøver fikseret umiddelbart efter $^{14}C$-tilsætning tjente som blindprøver. *In situ* produktionen blev beregnet under antagelse af proportionalitet mellem kulstofassimilation og indstråling.

*In situ inkubationer*

Under pyknoklintogt GT-119 blev kulstofassimilationen bestemt ved inkubation under naturlige lys- og temperatur forhold. Dobbeltprøver på 7,5 ml blev udtaget fra gradientvandhenteren i engangs-sprøjter af polyethylen; 2 µCi $NaH^{14}CO_3$ blev injiceret i hver sprøjte, som herefter blev lukket med en kanyle. Sprøjterne blev bundet på en snor med 7,5 cm mellemrum og udhængt fra et forankret flåd i prøvetagningsdybden i 4 timer. Herefter blev sprøjterne taget op og inkubationen blev standset med HCl og $HgCl_2$ og prøverne viderebehandlet som beskrevet for laboratorieinkubationer med

grønt lys. Under udhængning og optagning blev prøverne udsat for overfladeindstråling i mindre end to gange 30 sekunder. Den øvrige prøvebehandling indtil syretilsætning foregik i dæmpet rødt lys, og prøverne blev holdt afkølede med is.

### 2.4.3 Bakteriebiomasse

Biomassen af bakterier blev bestemt i formalinfikserede vandprøver, som blev filtreret på sort-farvede filtre. Præparaterne blev farvet med acridin-orange (Hobbie *et al.*, 1977). Mindst 400 celler blev talt på hvert præparat under et Olympus epifluorosens mikroskop ved 1250 · forstørrelse. Bakterieplanktonets biomasse blev beregnet under antagelse af et kulstof-indhold på 20 pg kulstof pr. celle ( Lee & Fuhrman, 1987; Simon & Azam, 1989).

### 2.4.4 Bakterieproduktion

Bakterieplanktonets netto-produktion blev målt vha. indbygning af $^{3}H$-mærket thymidin (Fuhrman & Azam, 1980). Umiddelbart efter indsamlingen blev to prøver og en præfikseret blindprøve (7,5 ml) fra hver dybde inkuberet med 5nM methyl-$^{3}H$-thymidin i 30 minutter ved *in situ* temperatur. Herefter blev de fikseret med neutral formalin (0,1% i slutkoncentration), filtreret på cellulosenitrat filtre og skyllet 10 gange med 5% iskold trikloreddike-syre. Præfikserede blindprøver blev behandlet tilsvarende. Den indbyggede thymidin blev omregnet til celleproduktion vha en omregnings faktor på $1{,}1 \cdot 10^{18}$ celler per mol thymidin indbygget (Riemann *et al*, 1987). Celleproduktionen blev omregnet til kulstof som beskrevet under (2.4.3).

### 2.4.5 Biomasse af protozoer

*Nanoflagellater*

Forekomsten af nanoflagellater blev bestemt på formalinfikserede prøver farvet med proflavine hemisulfate. Prøverne blev filtreret ned på sortfarvede 0,2 µm polycarbonatfiltre og talt vha. epifluoroscensmikroskopi (Haas, 1982). Mindst 400 celler blev talt og delt i 1) autotrofe og heterotrofe 2) dino-flagellater og andre flagellater og 3) størrelsesgrupperne 2, 4, 8, 12, 16, 20 µm under antagelse af kugleform. Volumen blev omregnet til kulstof vha. en omregningsfaktor på 0,12 pgC $\mu m^{-3}$ (Edler, 1979). Dinoflagellater større end 20 µm blev talt i Lugol prøverne under omvendt mikroskop.

*Ciliater og heterotrofe-dinoflagellater*

Prøver à 100 ml til bestemmelse af biomassen af mikrozooplankton blev fixeret i 1% Lugols opløsning. Efter et døgns sedimentation blev de talt og målt under omvendt mikroskop. Ciliaterne blev bestemt til art/slægt og/eller størrelsesgruppe ifølge Leegaard, 1915; Kahl, 1932 og Lynn *et al.*, 1988. Dinoflagellaterne blev bestemt vha. Dodge, 1985. Biomassen er bestemt ved måling af de linære dimensioner og en kulstofomregnings faktor på 0,11 pgC $\mu m^{-3}$ for ciliater og nøgne dinoflagellater og 0,13 pgC $\mu m^{-3}$ for thekate dinoflagellater (Edler, 1979).

### 2.4.6 Biomasse af mesozooplankton

*Det store zooplankton*

Antallet af mesozooplankton i Lugol prøverne blev talt, men i langt de fleste tilfælde var antallet meget ringe. I forbindelse med anvendelsen af den store gradientvandhenter blev forekomsten af mesozooplankton bestemt på døgn-stationerne på togt GT-124. Indholdet af sprøjterne blev parvis koncentreret på et 45 µm filter og talt. I forbindelse med GT-119 togtet blev biomassen af mesozooplankton langs et af transekterne undersøgt v.h.a en zooplankton-pumpe (400 liter $minut^{-1}$) udstyret med et 50 µm net. Pumpen blev under pumpningen hævet fra bunden med konstant hastighed (10 m $minut^{-1}$). Prøverne blev fikseret i 2% formalin. Zooplankton blev bestemt, talt og målt

i delprøver, mindst 400 eksemplarer blev talt og målt per prøve og omregnet til kulstof ud fra længde- vægt regressioner i Kiørboe & Nielsen, 1990.

### 2.4.7 Kvælstofomsætning

Kvælstofomsætningen blev undersøgt med N15-teknik parallelt med måling af primærproduktion i dæksinkubatoren. Undersøgelserne skete på udvalgte stationer yderst, midt og inderst på transekterne under pyknoklintogterne. 2·30 liter vand blev taget med 30 l's Niskin vandhenter fra én dybde i det dybtliggende algemaksimum eller på de inderste opblandede stationer i 5 meters dybde. Vandet blev blandet før udtagning af prøver til måling af næringssalte, PON, POC, klorofyl, nitratoptagelse og ammoniumoptagelse og -remineralisering. Da ammoniumkoncentrationen ofte er usikkert bestemt med autoanalyseren, blev koncentrationen i forbindelse med N15-forsøg bestemt manuelt ved dannelse af indophenolkompleks og måling på spektrofotometer (Grasshoff, 1976). Til bestemmelse af nitrat- og ammoniumoptagelsen blev 5 sæt bestående af 3·500 ml tilsat henholdsvis 0,05, 0,5 og 5 µM N15-mærket næringssalt inkuberet ved 5 forskellige lysintensiteter. Inkubationerne skete i dækinkubatorer screenet til at give 50, 20, 10, 4 og 2% af indstrålingen. Efter 3-5 timers inkubation blev det partikulære materiale filtreret ned på forglødede GF/F filtre og tørret. N15% i det partikulære materiale blev målt ved emissionsspektrometri efter Dumas oxidation (Kristiansen & Paasche, 1982; Johansen, 1984). Remineraliseringen blev målt som N15%-fortynding i vandet efter ca 5 timers inkubation i 10% lyskassen. Medium ammoniumkoncentration blev tilsat til 2,5 liter vand og 2·500 ml umiddelbart udtaget til bestemmelse af start-ammonium-N15%. Efter filtrering gennem forglødede GF/F filtre blev vandet straks frosset. Ved forsøgets afslutning filtreredes ligeledes 2·500 ml, der umiddelbart blev frosset. I laboratoriet blev prøverne efter optøning afmålt, tilsat 2 µmol $^{14}NH_4$ og derefter 10 ml 5N NaOH. Et forglødet filter behandlet med svovlsyre blev anbragt over vandoverfladen og flaskerne lukket og anbragt på rystebord (Søren Rysgård, pers. medd.). Efter 3 dage blev filtrene anbragt i eksicator i 1 døgn, hvorefter de kom i ampuller og N15% i den opsamlede ammonium blev målt ved emissionspektrometri. De aktuelle optagelses- og remineraliseringsrater blev beregnet efter Dugdale & Wilkerson, 1986 for nitrat og Glibert, 1982 for ammonium. Den ambiente optagelsesrate beregnedes under antagelse af Michaelis-Mentens kinetik ved brug af direkte lineært plot (Eisenthal & Cornish-Bowden, 1974). Relationer mellem lysintensitet og optagelsesrater blev opstillet og benyttet til beregning af døgnrater.

## 2.5 Ilt

### 2.5.1 Iltkoncentration

I forbindelse med gennemsejlingen af randen og transekterne blev iltkoncentrationen i 1-4 dybder lige over bunden bestemt i følge Dansk Standard (1974). Umiddelbart efter prøvetagning blev prøver til ilttitrering forsigtigt tappet, efter gennemløb af ca. 3 gange flaskevolumen, hvorefter reagenserne blev tilsat, proppen sat på, prøven rystet og titreret.

### 2.5.2 Iltforbrug

På døgnstationerne på togt 119 og 124 blev iltforbruget i forskellige vandlag i og omkring pyknoklinen bestemt vha. Mini-Winkler teknik (Kruse, 1993). Prøverne fra 4 til 5 sprøjtepar blev forsigtigt tappet fra den store gradientvandhenteren over i en syreskyllet dunk. Efter at have stået ca 15 min, for at eventuelle luftbobler kunne stige til vejrs, blev prøverne forsigtigt

sifoneret over i alufolieposer som efter 3 gennemløb blev svejset til og anbragt i kølebad ved *in situ* temperatur. Prøver til bestemmelse af iltkoncentrationen blev tappet via en gastæt Tygon slange forbundet til den nu lukkede alupose. Prøver blev udtaget med ca. 12 timers mellemrum i 4 døgn. I nærværende undersøgelse har vi kun anvendt de første 24 timer af inkubationerne til bestemmelse af respirationen for at minimerer effekten af de opvoksende bakteriepopulationer.

## 2.6 Kvalitetssikring

To forhold omkring projektet - det store antal sammenhørende målinger af en række parametre, og brugen af tilpassede målemetoder - nødvendiggør særlig påpasselighed med hensyn til kvalitetssikring af måleresultaterne.

### 2.6.1 Vurdering af primærdata

Denne rapport er baseret på omkring 2500 indsamlede vandprøver, hvori en række parametre er målt. Nogle af målingerne er simple - f.eks. måling af salinitet med en ledningsevne-probe - men de fleste af målingerne er komplicerede og indebærer adskillige enhedsoperationer, hvorunder fejl kan opstå.

For eksempel er hvert mål for bakterieproduktionen baseret på tre del-vandprøver (to prøver og en blindprøve) som er tilsat isotop, inkuberet, fikseret, filtreret, ekstraheret 10 gange med trikloreddikesyre, hvorefter filteret er overført til nyt prøveglas, opløst, tilsat scintillationsvæske og talt to gange i scintillationstæller. Hver af disse operationer kan give anledning til fejl, som kan påvirke det endelige resultat.

Nogle fejl er lette at opdage: tastefejl kan findes ved at sammenligne de to parallelle scintillationstællinger af den enkelte prøve; mangelfuld ekstraktion af overskydende isotop vil føre til unormalt høje blindværdier. Afvigelser mellem dobbeltinkubationer vil også indikere fejl. Et datasæt af den givne størrelse vil uundgåeligt indeholde fejlmålinger og målinger som forekommer upålidelige.

Disse målinger må fjernes fra datasættet, da muligheden for at gentage målingerne jo som regel er forpasset når problemet erkendes. Det er imidlertid vigtigt at denne 'lugning' i primærdata foretages på en 'neutral' måde, f.eks. at fjernelse af mistænkeligt høje blindværdier ledsages af en tilsvarende fjernelse af forhøjede prøveværdier, så estimaterne for nettoindbygningen ikke påvirkes ensidigt ved lugningen.

Behandling af et stort datasæt indebærer en irreversibel reduktion af datamængden, og det kan være vanskeligt at spore fejl efter denne datareduktion. I dette projekt har det været valgt hellere at fjerne lidt for mange tvivlsomme primærdata end at risikere en svækkelse af grundlaget for at drage konklusioner på baggrund af datamaterialet. I nogle tilfælde har dette ført til udeladelse af hele måleserier. For eksempel har der i perioder været problemer med målingen af nogle af næringssaltene, sandsynligvis forårsaget af forurening af laboratorievandet.

### 2.6.2 Kalibrering

Et andet særkende ved dette projekt er anvendelsen af metoder, som afviger fra standard. Dette problem starter allerede ved prøvetagningen, hvor de

særlige gradientvandhentere er benyttet for at opnå høj vertikal opløsning af målingerne. Ved anvendelse af rosettevandhenteren udløses de enkelte Niskin-flasker elektronisk, og den tilhørende dybde og salinitet kan umiddelbart aflæses og verificeres vha. CTD-sonden. Ved anvendelse af gradientvandhenteren, især den først udviklede type, er der risiko for at enkelte - eller alle - sprøjter udløses i en forkert dybde. Her er saliniteten i den enkelte prøve blevet brugt som en kontrol-parameter, som er hurtig at måle. Hvis målingen har vist, at prøven ikke har været taget i den forventede dybde, f.eks. fordi sprøjten er blevet fyldt med overfladevand, er den pågældende prøve blevet kasseret.

Flere af de anvendte målemetoder har undergået modifikationer, som regel betinget af det særlige krav til hurtighed eller den begrænsede prøvemængde (knapt 300 ml til måling af salinitet, klorofyl, primær produktion og bakterieproduktion samt til mikroskopi).

For klorofyl-målingerne blev prøvemængden reduceret til 40 ml (normalt 200 ml) som blev filtreret på 13 mm Ø glasfiber filtre (normalt 47 mm Ø), ekstraheret i 5 ml ethanol (normalt 10 ml) og målt fluorometrisk.

For primærproduktions-målingerne blev prøvemængden reduceret til 7.5 ml, og inkubatoren var specialbygget til at rumme de mange prøver i åbne glasvials. Prøverne blev således i samme beholder fra prøveudtagningen til scintillationstællingen, hvilket sparede arbejde og mindskede risikoen for isotop-kontaminering.

En kalibrering af de modificerede metoder til standardmetoderne er en nødvendighed for at opnå absolutte og sammenlignelige resultater. Klorofylmålingerne blev udført med både fluorometri og spektrofotometri (efter standard-metoden) på alle prøverne fra rosettevandhenteren. Udfra dette begrænsede datasæt blev der for hvert togt foretaget en kalibrering af de fluorometriske målinger til et absolut mål for klorofyl-koncentrationen, og denne kalibrering indgår i de præsenterede resultater. For primærproduktionsmålingerne fik de forskellige metoder lov til at stå for sig selv, men en sammenligning er præsenteret i kapitel 6 og diskuteret i kapitel 10.

# 3 Eksempler på dybmaksima af klorofyl i Kattegat på baggrund af overvågningsdata 1988-1992

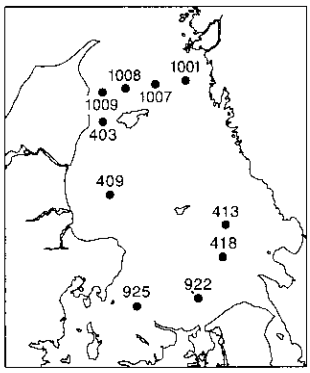
## 3.1 Introduktion

Opblomstringen af stilkalgen (*Chrysochromulina polylepis*) i maj - juni 1988 skærpede opmærksomheden omkring forekomsten af dybmaksima af fytoplankton i de indre danske farvande. Den giftige stilkalge var afgrænset til et tyndt lag omkring springlaget i Kattegat i ca. 13 - 14 meters dybde og unddrog sig dermed registrering af det rutinemæssige overvågningsprogram, som er baseret på prøvetagning i fastlagte dybder på 1, 5, 10 og 15 meter. Det begrænsede antal prøvetagningsdybder kunne være årsagen til, at *Chrysochromulina*-opblomstringen - eller tilsvarende fænomener - ikke var blevet registreret gennem overvågnings-programmet. På den anden side ændres placeringen af springlaget med den generelle ind/udstrømningssituation i Kattegat, og springlaget hælder normalt fra omkring 10 meters dybde i det nordlige Kattegat til omkring 20 meters dybde i Bælthavet (Bo Pedersen, 1990). Såfremt algeopblomstringer omkring skillefladen er et tilbagevendende eller endog normalt fænomen skulle man forvente at disse opblomstringer vil blive registreret af overvågningsprogrammet, som dækker 10 - 15 stationer i Kattegat.

En anden mulighed er at stilkalge-opblomstringen i 1988 virkelig var et enestående fænomen. Den ringe vind og den høje sol-indstråling i perioden forud for opblomstringen er blevet fremhævet som specielle faktorer, der kunne have udløst og understøttet opblomstringen (Barth & Nielsen, 1990; Nielsen *et al.*, 1990).

I de følgende kapitler af denne rapport fremlægges resultaterne af undersøgelser i 1991 - 1992. Forsommeren i 1992 var usædvanlig solrig, men der viste sig ikke en gentagelse af stilkalge-episoden fra 1988. Undersøgelserne viser dog at der lokalt forekom dybmaksima af fytoplankton i begge år.

Med henblik på at belyse, hvorvidt undersøgelserne i 1991 - 1992 var repræsentative for en længere årrække, blev der foretaget en analyse af data fra DMU's overvågningstogter i Kattegat i årene 1988 - 1992. Målinger af salinitet og koncentrationer af næringssalte og klorofyl i forskellige dybder blev sammenholdt med data for vindstyrke og solindstråling, og forekomsten af dybmaksima af klorofyl blev relateret til årstid, geografisk position, lagdeling og næringssalte.




***Figur 3.1.*** *Stationer i Kattegat. Numrene refererer til DMU's overvågningsprogram*

## 3.2 Datagrundlag

Det analyserede datamateriale er baseret på 47 overvågningstogter som dækker årene 1988 - 1992. I disse år blev klorofyl målt i 4 fastlagte dybder (1, 5, 10 og 15 meter), medens der før 1988 blev målt i varierende dybder afhængigt af lysnedtrængningen. Målinger fra 10 stationer i Kattegat blev anvendt (jvf. Figur 3.1, idet stationerne 409 (Ålborg Bugt) og 415 (Fornæs) blev udeladt på grund af deres lave vanddybde (under 15 m)).

*SCM-indeks*

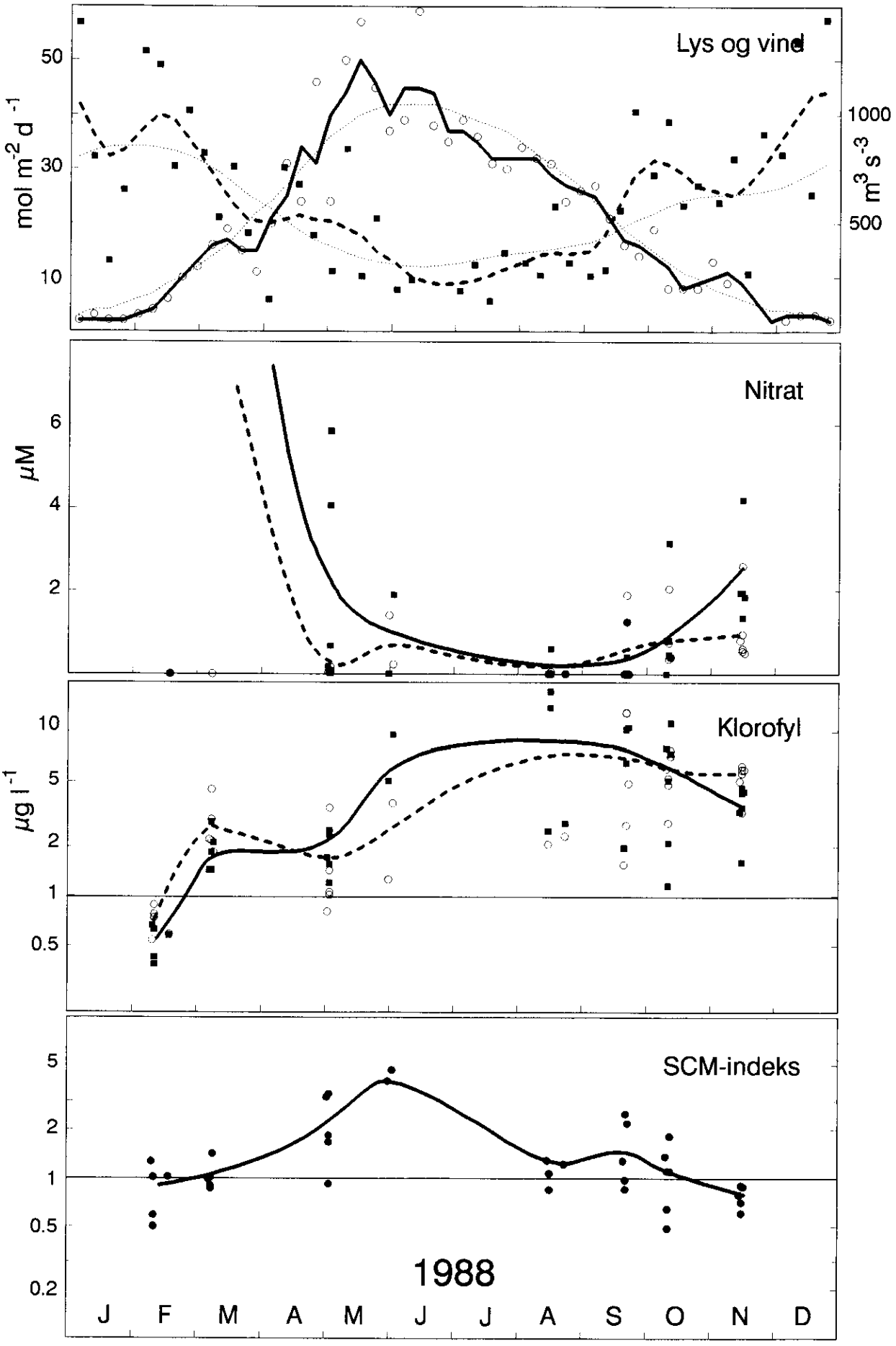
Udfra klorofylmålingerne beregnedes overfladekoncentrationen som gennemsnittet af værdierne i 1 og 5 meters dybde; mens den maksimale værdi fra 10 eller 15 meters dybde repræsenterede pyknoklin koncentrationen, og forholdet $\max(Chl_{10},Chl_{15})/avg(Chl_1,Chl_5)$ er anvendt som et indeks for forekomsten af dybmaksimum af klorofyl (SCM-indeks, subsurface chlorophyll maximum). Et SCM-indeks større end 1 udtrykker at klorofylkoncentrationen er højere i 10 eller 15 m end i overfladen.

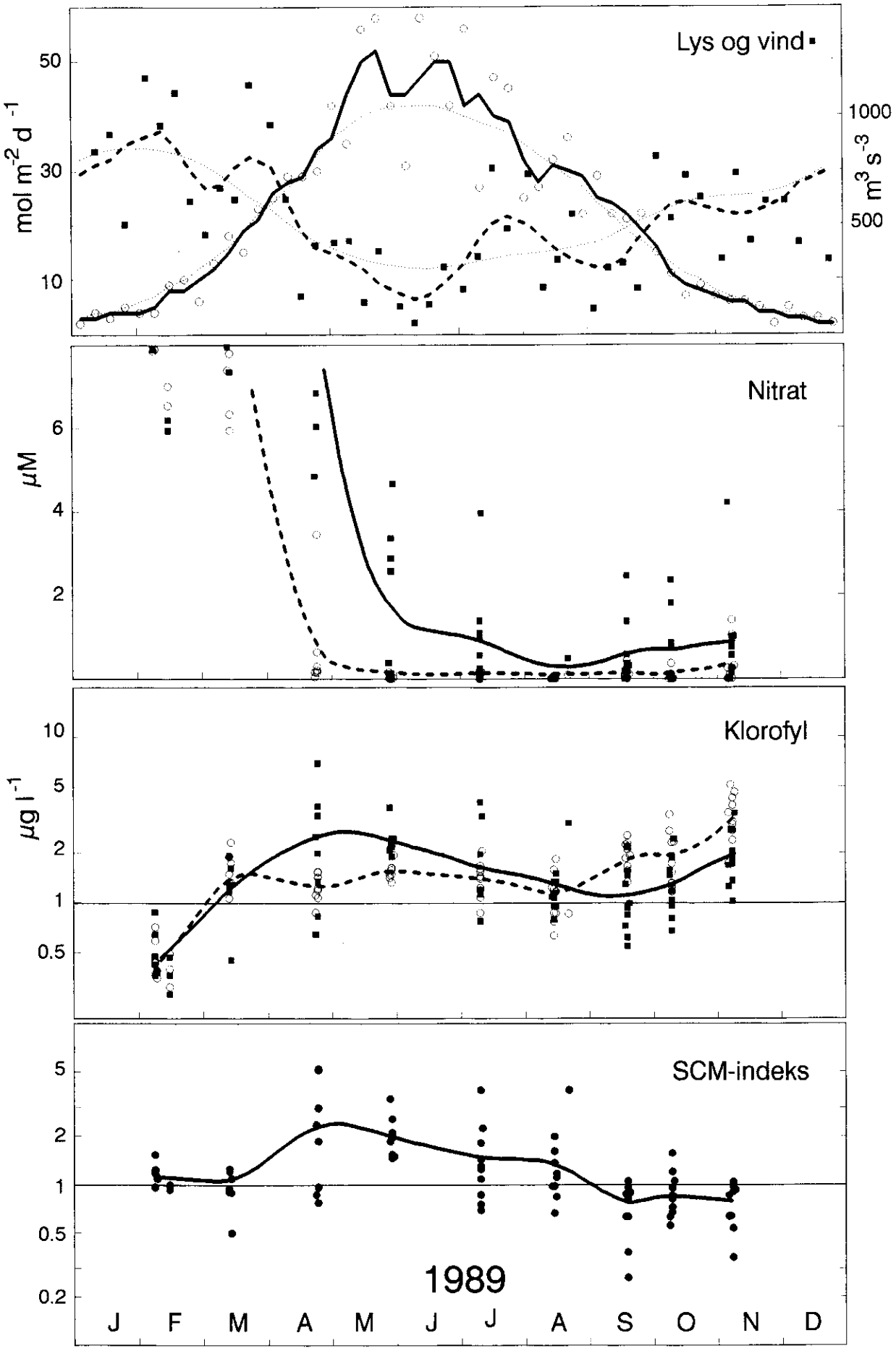
Målinger af salinitet, nitrat og fosfat i dybderne 1, 5, 10, 15, 20, 25 og 30 meter er benyttet til at beskrive lagdeling og næringssalt-status. Overflade- og pyknoklin-koncentrationer er beregnet, som for klorofyl.

Som udtryk for vindenergien er anvendt ugemiddelværdier af vindhastigheden i tredje potens baseret på vindmålinger ved Sprogø hver tredje time (kilde: Risø/SBF).

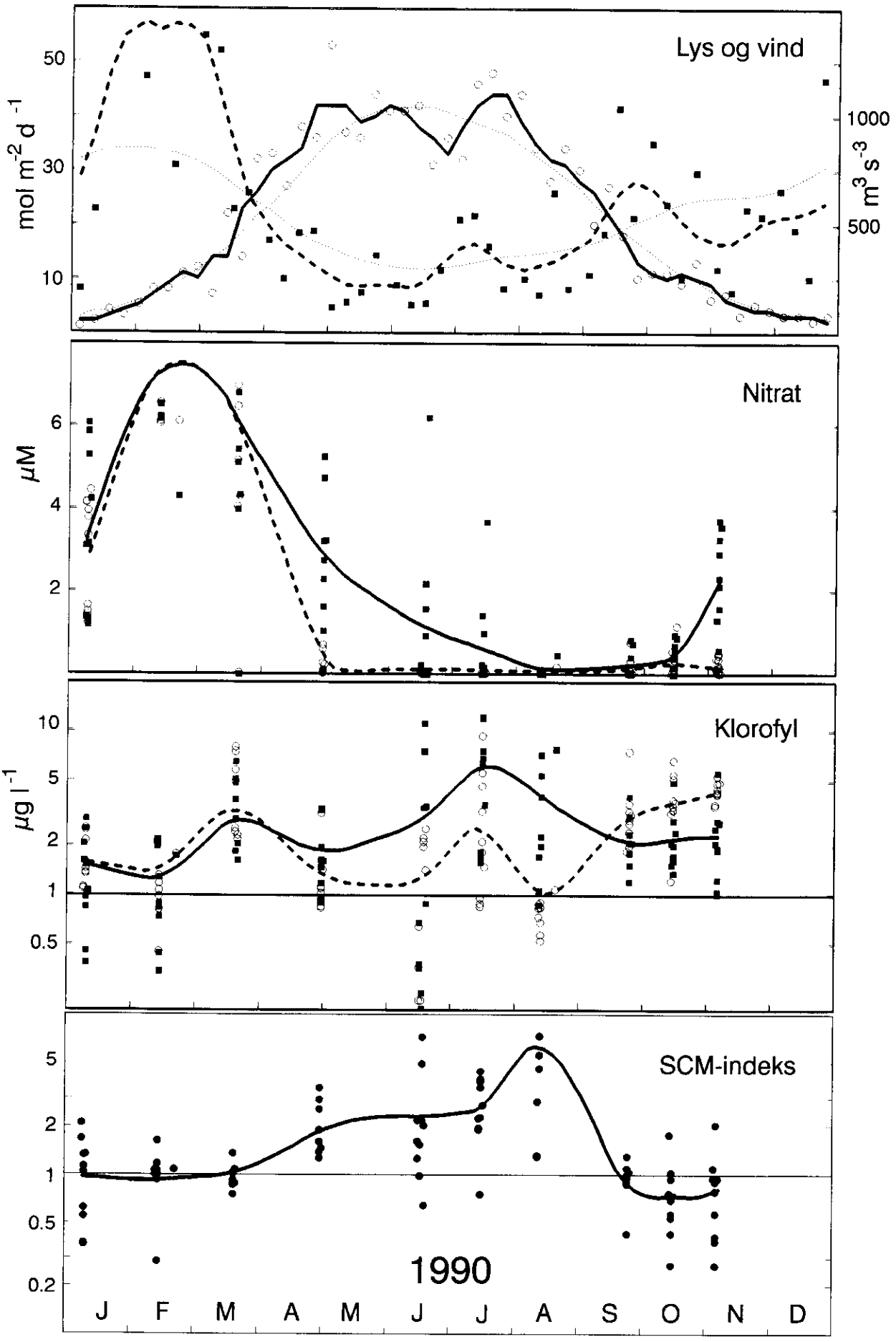
Data for solindstrålingen målt i Tåstrup er stillet til rådighed af Institut for Jordbrugs-videnskab, Sektion for Kulturteknik og Planteernæring, Den Kgl. Veterinær- og Landbohøjskole. Værdier for global indstråling er omregnet til fotosynteseaktiv indstråling (400 - 700 nm bølgelængde) ved multiplikation med 2.1 µmol $J^{-1}$ (Sv. E. Jensen, KVL, pers. komm.).

***Figur 3.2.*** *Overvågningsdata fra 1988. Øverste ramme viser fotosyntese-aktiv lysindstråling (mol fotoner $m^{-2}d^{-1}$, kilde Inst. f. Jordbrugs-vid., KVL) som ugemiddel (o) og som udglattet kurve, running average (——) sammenholdt med gennemsnittet for 1988 -1992 (·····), samt vindhastigheden i tredje potens ($m^3s^{-3}$) som ugemiddel (■) og som udglattet kurve (——) sammenholdt med gennemsnittet for 1988 - 1992 (·····). De næste rammer viser koncentration af nitrat (µM) og klorofyl (µg $l^{-1}$, bemærk logaritmisk skala) i overflade (1 - 5 m dybde, --o--) og i 'pyknoklinen' (10 - 15 m dybde, —■—). Den nederste ramme viser forholdet mellem klorofylkoncentration i 'pyknoklin' og overflade (SCM-indeks, log skala).*

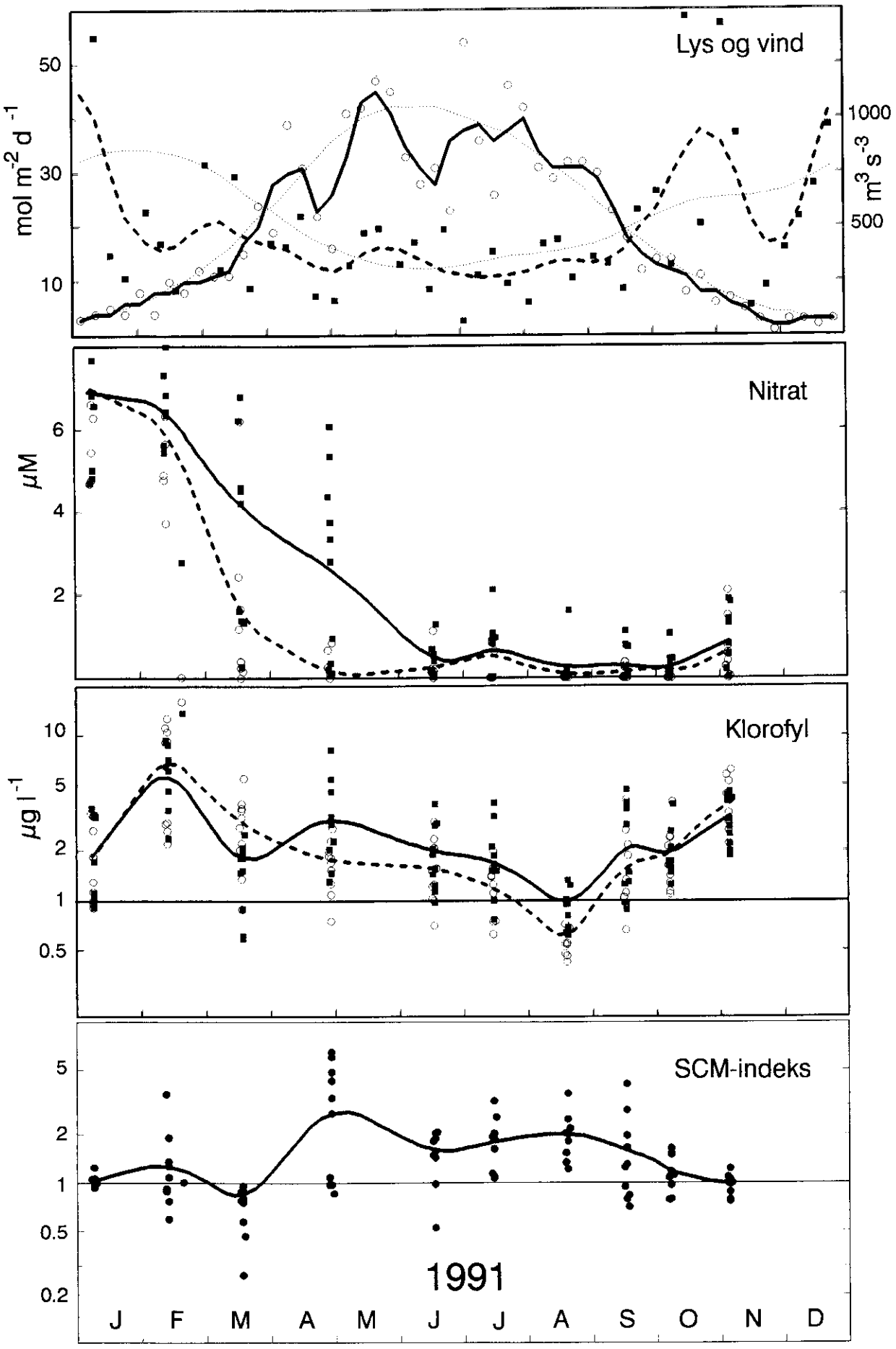

Lys og vind
mol m-2 d-1
50
30
10
1000
m3 s-3
500
Nitrat
µM
6
4
2
Klorofyl
µg l-1
10
5
2
1
0.5
SCM-indeks
5
2
1
0.5
0.2
1988
J F M A M J J A S O N D



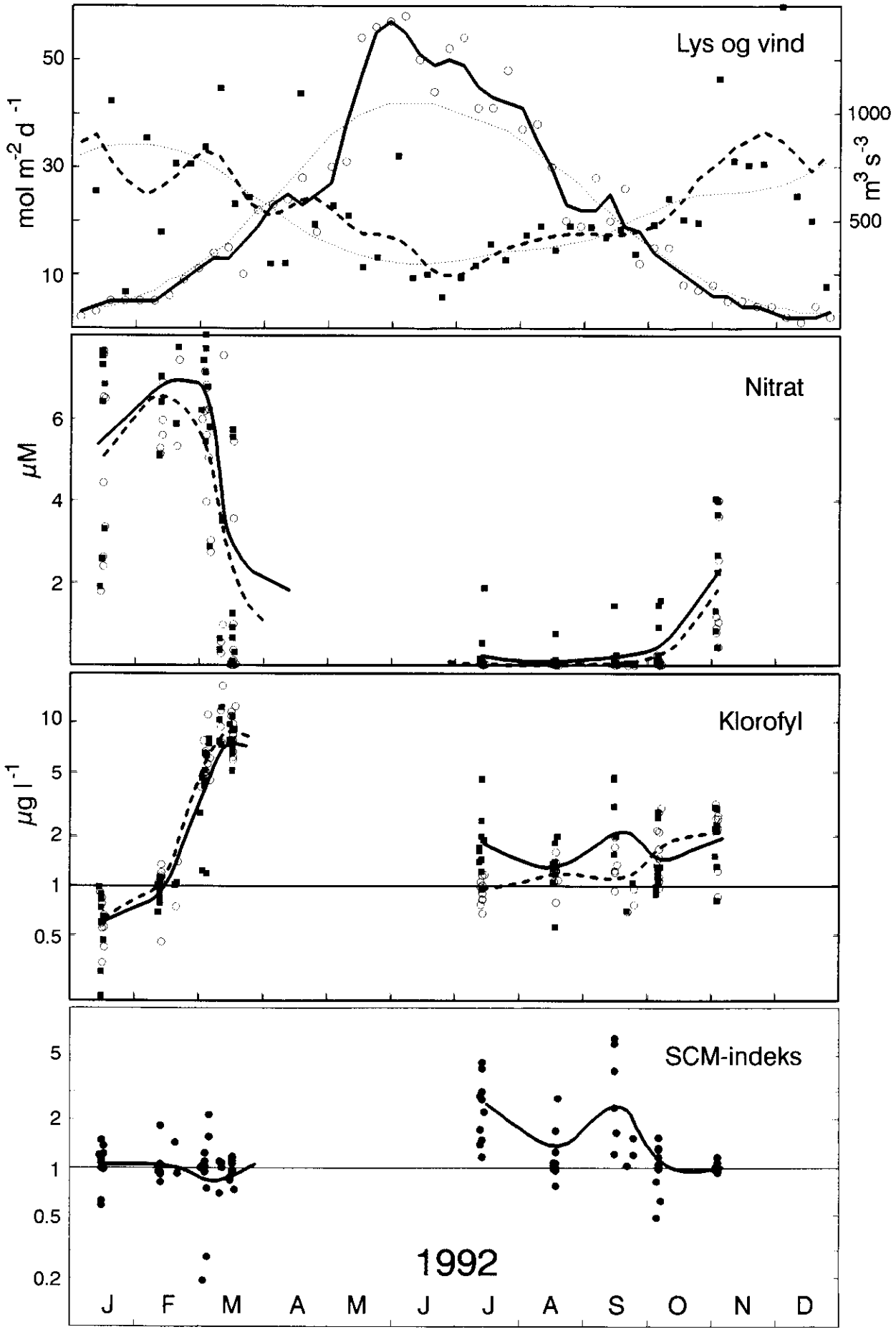

***Figur 3.3.*** *Overvågningsdata fra 1989 (se Figur 3.2).*




***Figur 3.4.*** *Overvågningsdata fra 1990 (se Figur 3.2).*




***Figur 3.5.*** *Overvågningsdata fra 1991 (se Figur 3.2).*




*Figur 3.6. Overvågningsdata fra 1992 (se Figur 3.2).*

## 3.3 Lys og vind, 1988 - 1992

Den generelle årstidsvariation i indstråling og vindenergi er vist som de fint stiplede kurver i figurerne 3.2 til 3.6. Lysindstrålingen varierer mere end en faktor 10 gennem året, medens vindenergien varierer omkring en faktor 2, med den laveste vindenergi i månederne maj - august. De enkelte ugemiddelværdier, både for lys og vind, varierer dog betydeligt omkring de udglattede kurver.

1988 er det af de udvalgte år, hvor årstidsvariationen i lys og vind tættest følger gennemsnittet for de 5 år (Figur 3.2), dog var der relativ høj indstråling i maj forud for stilkalgeopblomstringen. I 1989 var der forholdsvis høj indstråling og lav vindenergi i juni - juli. 1990 var karakteriseret af stærk vind i årets første måneder, medens 1991 viste ringe vind om foråret. 1992 afveg fra gennemsnittet ved høj indstråling i maj - juli.

## 3.4 Nitrat, 1988 - 1992

Nitratkoncentrationen i overfladevandet ligger generelt på omkring 6 µM i årets første måneder og falder brat omkring april som følge af forårsopblomstringens forbrug af næringssalte. I 1991 og 1992 sker opbruget af nitrat i overfladevandet allerede i marts. Herefter holder nitratkoncentrationen sig nær detektionsgrænsen på 0,3 µM indtil starten af efteråret, hvor den igen stiger, typisk efter en periode med kraftig vind.

Nitratkoncentrationen i 10 - 15 m dybde viser samme vinterværdier som overfladevandets, men forbruget om foråret kommer generelt senere og mindre brat, og koncentrationen om sommeren er højere end i overfladen, generelt omkring 1 µM.

## 3.5 Klorofyl, 1988 - 1992

Koncentrationen af klorofyl stiger i det tidlige forår i både overfladevandet og i 10 - 15 m dybde, men en markant forårsopblomstring med mere end 5 µg klorofyl $l^{-1}$ ses kun i 1991 og 1992. Forbruget af nitrat i overfladevandet viser dog, at en forårsopblomstring må have fundet sted alle årene. Et forbrug af 6 µM nitrat svarer til en produktion af 14,4 µg klorofyl $l^{-1}$ under antagelse af et C:N molforhold på 6 og et C:klorofyl vægtforhold på 30 (g:g). Den tilsyneladende forskel mellem årene i algebiomassen om foråret kan skyldes den begrænsede prøvetagningsfrekvens, advektion og forskelle i tabsprocesserne (udsynkning og græsning) fra algebiomassen.

Efter forårsopblomstringen falder koncentrationen af klorofyl i overfladevandet til omkring 1 - 2 µg $l^{-1}$, og koncentrationen holder sig lav indtil september - oktober, hvor den igen stiger til omkring 5 µg $l^{-1}$.

Koncentrationen af klorofyl i 10 - 15 m dybde er lavere end overfladekoncentrationen om foråret, men overstiger herefter overfladekoncentrationen og holder sig over ca. 2 µg $l^{-1}$ gennem sommeren.

## 3.6 Indikationer på dybmaksima af klorofyl, 1988-1992

SCM-indekset (forholdet mellem maksimal koncentration af klorofyl fra 10 - 15 m dybde og overfladekoncentrationen) ligger omkring 1 i forårs- og efterårsperioderne, men stiger markant om sommeren i alle årene (Figur 3.2 til 3.6). I 1988 og 1989 er SCM-indekset højest i forsommeren, medens det i 1990 er højest i august med en gennemsnitsværdi over 5, hvilket er den højeste værdi for 5-årsperioden. Denne observation er sandsynligvis forbundet med et udbredt dybmaksimum af dinoflagellaten *Gyrodinium aureolum* (Bjørnsen & Nielsen, 1991; Buck *et al.*, 1993).

De forskellige årsforløb af SCM-indekset kan relateres til lysforholdene i de foregående perioder. Således er lysindstrålingen højere end gennemsnittet for de 5 år i forsommeren 1988, forsommeren 1989 og sensommeren 1990. Sammenhængen er dog langt fra entydig, og kan næppe klarlægges med den givne tidsmæssige opløsning af datamaterialet.

Kvalitativt viser de 5 undersøgte år et meget ensartet billede med tydelige indikationer på dybmaksima af klorofyl gennem månederne maj - september. I den videre analyse har vi derfor valgt udelukkende at anvende data fra disse 5 sommermåneder, samt at betragte data fra de 5 år under ét. Herved reduceres datamængden til 182 datasæt (stationer). Herudfra udvalgtes de datasæt, hvor SCM-indekset var større end 2 og hvor klorofylkoncentrationen i 10 - 15 m dybde var højere end 2 µg $l^{-1}$, altså hvor der fandtes et tydeligt dybmaksimum af klorofyl af en vis absolut størrelse. Disse to kriterier var opfyldt for 46 datasæt, som herefter betegnes 'scoringer'.

***Tabel 3.1.*** *Frekvens af høje SCM-'scoring' for årene.*

| År | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 |
|---|---|---|---|---|---|
| Scoring | 0,31 | 0,18 | 0,38 | 0,20 | 0,20 |

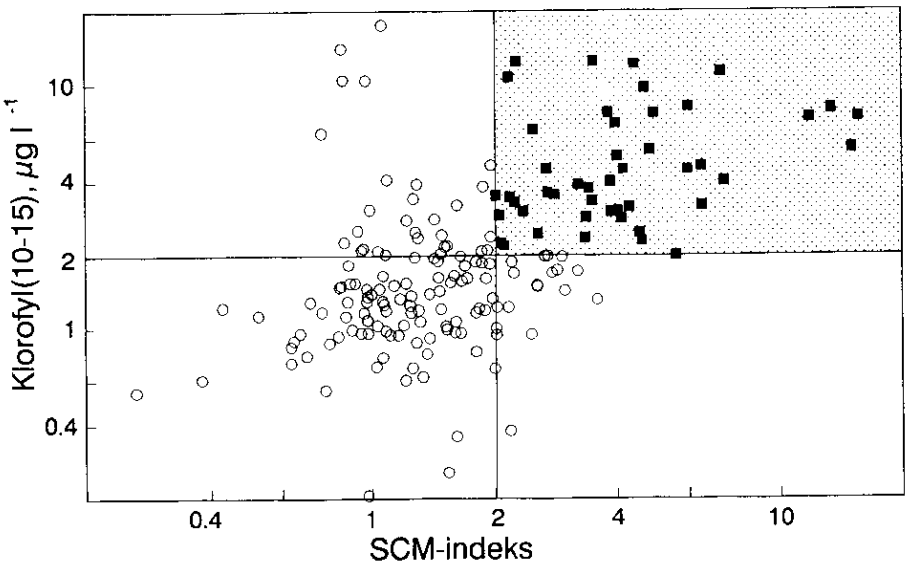
Fastlæggelsen af de to kriterier er arbitrær, som det fremgår af Figur 3.7, og scoringerne kan kun opfattes som et relativt udtryk for forekomsten af dybmaksima af klorofyl. Sættet af scoringer udgør 26% af det samlede datasæt. Scoringsfrekvensen var markant højere i 1988 (jvf. *Chrysochromulina*-opblomstringen; Nielsen *et al.*, 1990) og i 1990 (jvf. *Gyrodinium*-dybmaksimummet; Bjørnsen & Nielsen, 1991) end i de øvrige tre år, hvor frekvensen var omkring 20% (Tabel 3.1).

***Tabel 3.2.*** *Frekvens af høje SCM-'scoringer' for stationerne.*

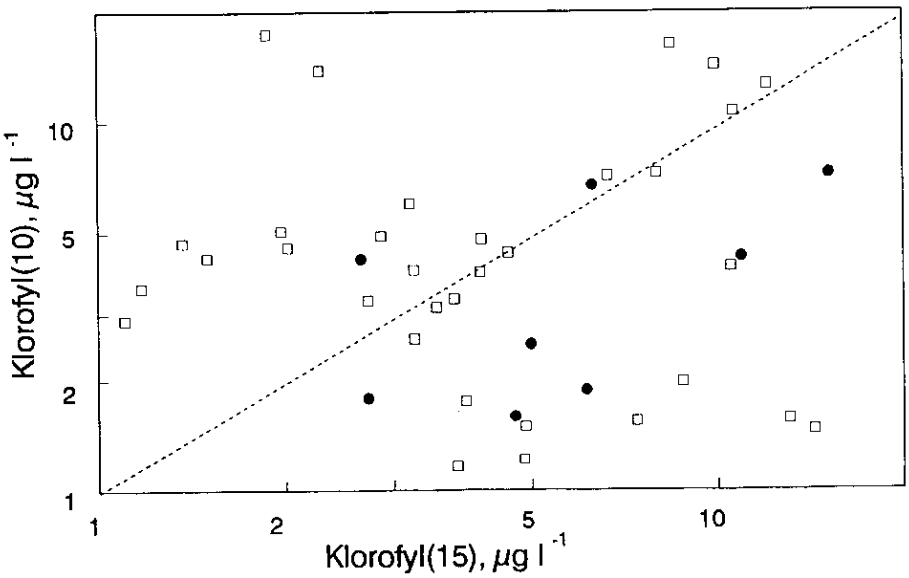
| Station | 403 | 1001 | 1007 | 1008 | 1009 | 925 | 922 | 418 | 413 | 905 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Scoring | 0,35 | 0,32 | 0,29 | 0,35 | 0,29 | 0,35 | 0,20 | 0,06 | 0,10 | 0,17 |

Den geografiske fordeling af scoringerne viser to distinkte grupper (Tabel 3.2): stationerne i det nordlige Kattegat lige syd for Skagerrak-fronten samt station 925 (Gniben) viser scoringsfrekvenser på 29 - 35%, medens de sydøstlige stationer og station 905 (Fladen) viser scoringsfrekvenser på 6 - 20%.

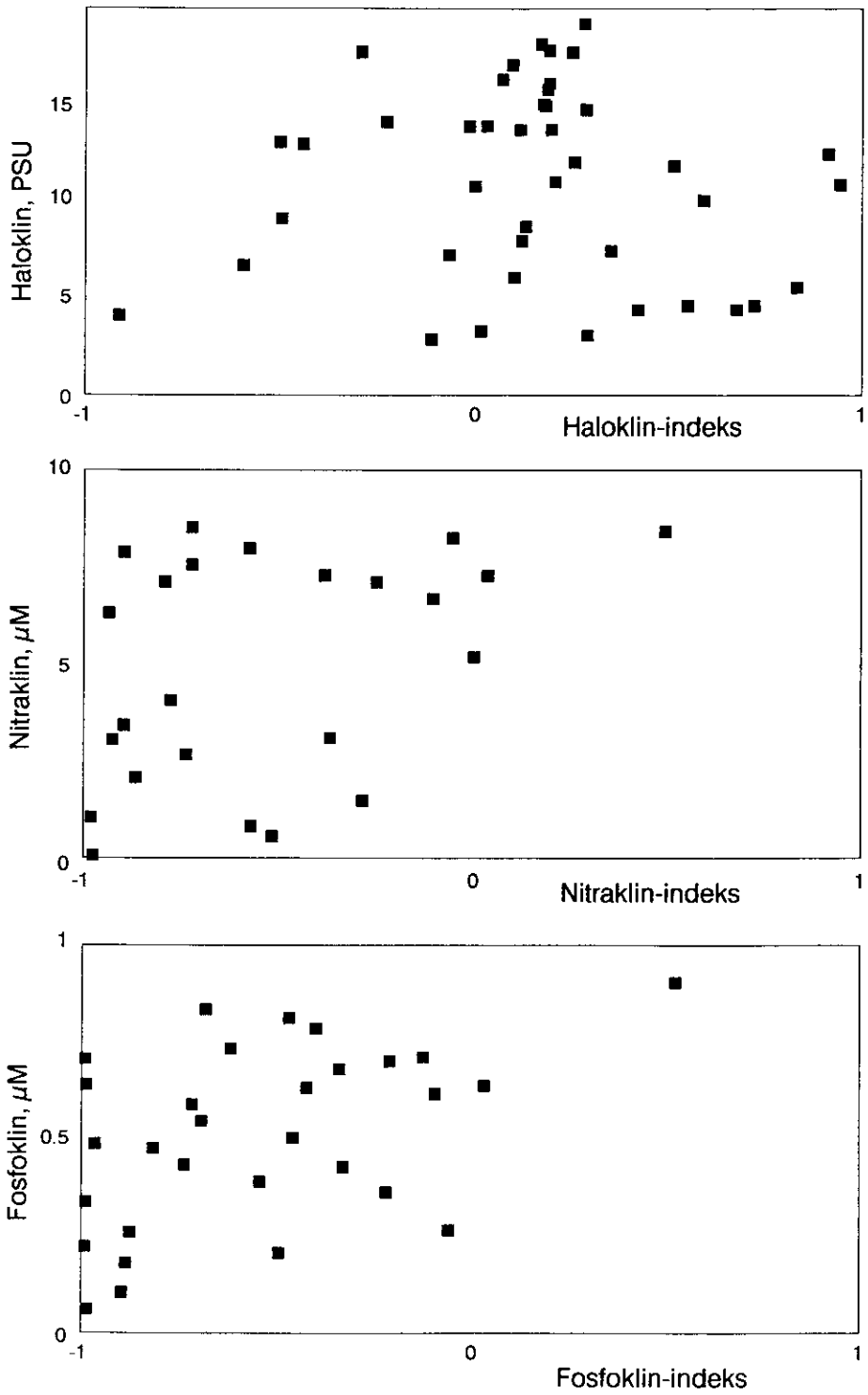
Denne geografiske fordeling af scoringerne kunne delvis skyldes, at springlaget ligger nærmere overfladen i den nordlige del af Kattegat men undertiden også ved Gniben. Dette understøttes af, at scoringerne fra de sydøstlige stationer viste maksimal klorofylkoncentration i 15 m dybde, medens de øvrige scoringers maksimale klorofylkoncentration var mere ligeligt fordelt mellem 10 og 15 m dybde (Figur 3.8).




***Figur 3.7.*** *Scatterplot af SCM-indices og klorofyl-koncentration i 10 - 15 m dybde fra sommertogter (maj - september) 1988 - 1992. Scoringer er defineret som datapunkterne i det rastede felt (■).*




***Figur 3.8.*** *Sammenligning af klorofyl-koncentrationerne i 10 og 15 m dybde for scoringer fra stationerne 922, 418, 413 og 905 (•, med lav scoringsfrekvens) og fra de øvrige stationer (□).*




***Figur 3.9.*** *Scatterplot af lagdelingens styrke mod indeks for lagdelingens placering for scoringer udregnet for salinitet (øverst), nitrat (midt) og fosfat (nederst). Se tekst for nærmere forklaring.*

## 3.7 Klorofyl-dybmaksima i forhold til lagdeling

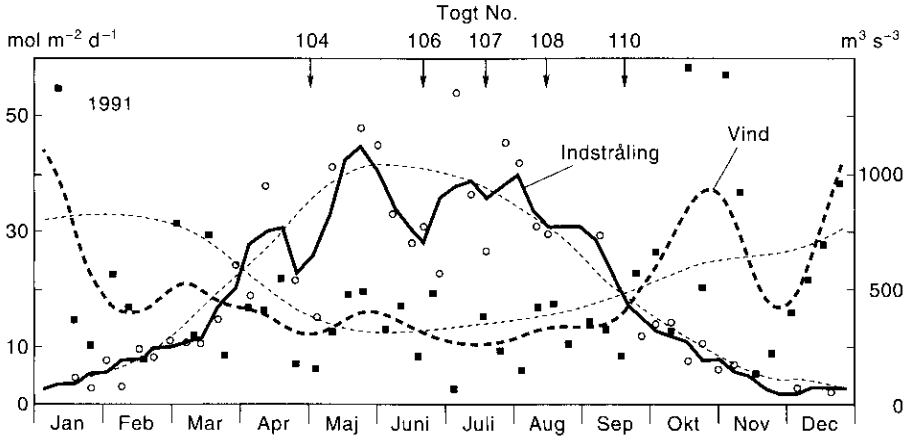
*Haloklin-inddeks*

Det er nærliggende at antage, at opnåelse af scoring forudsætter lagdeling samt at prøverne fra 10 og 15 m dækker springlaget. Lagdelingens styrke kan simpelt udtrykkes som forskellen mellem salinitet i bundvand og overfladevand, $S_b$ - $S_o$, hvor $S_b$ er gennemsnit af værdierne fra 20, 25 og 30 m, mens $S_o$ er gennemsnit fra 1 og 5 m. Placeringen af springlaget kan udtrykkes ved et haloklin-indeks $((S_{10}+S_{15})-(S_b+S_o))/(S_b-S_o)$, hvor $S_{10}$ og $S_{15}$ er værdierne fra 10 og 15 m dybde. Hvis gennemsnittet af disse to værdier svarer til gennemsnittet af overfladevand og bundvand er indekset nul; hvis gennemsnittet svarer til overfladeværdien, bliver indekset -1, og svarer det til bundværdien bliver indekset 1.

Ved at plotte saltlagdelingens styrke mod haloklin-indekset for scoringerne (Figur 3.9 øverst) ses det, at scoring ikke forudsætter en særlig kraftig lagdeling; scoringerne er jævnt fordelt langs plottets y-akse.

Hovedparten af scoringerne viser haloklin-indeks mellem 0 og +0.5 svarende til at prøverne med dybmaksimum i 10-15 m dybde ligger i springlaget. Denne analyse er temmelig grovmasket. Et forsøg på at forfine analysen ved at betragte målingerne fra 10 og 15 m dybde adskilt og ved at skelne mellem stationer med maksimal klorofylkoncentration i hhv. 10 og 15 m's dybde gav dog ikke nogen forbedring.

En tilsvarende analyse for lagdelingen i nitrat og fosfat med beregning af indeks svarende til haloklin-indekset (Figur 3.9, midt og nederst) viser at prøverne i 10 - 15 m ligger på nutriklinens overside. Hovedparten af scoringerne har index for nitraklin og fosfoklin mellem -0.9 og nul, svarende til næringssalt-koncentrationer på 5-50% af bundvandets. Indirekte viser Figur 3.9, at ved forekomst af klorofyl-dybmaksimum er nutriklinen generelt placeret under haloklinen.

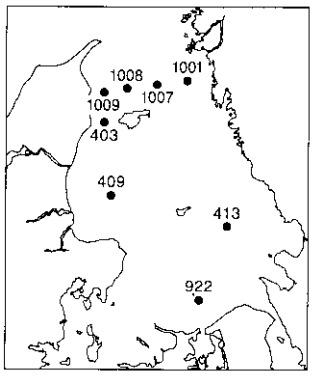


# 4 Planktonets vertikalfordeling omkring pyknoklinen; målinger med gradient vandhenteren i Kattegat, 91-92

## 4.1 Introduktion

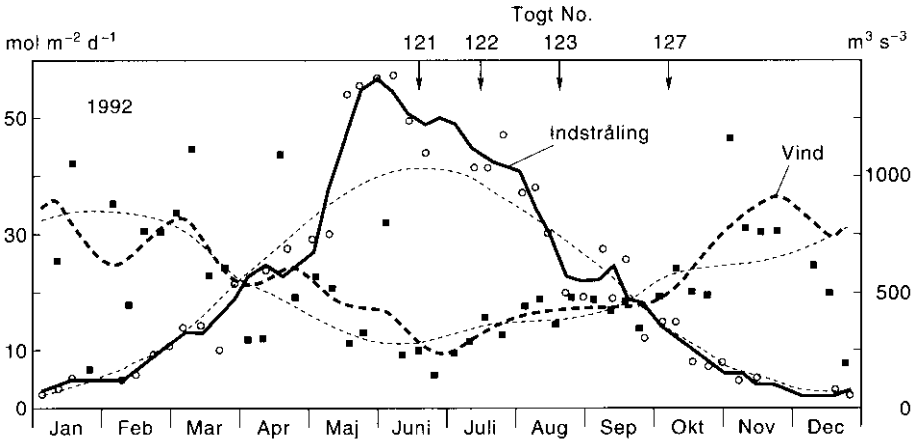
I det foregående kapitel er det udfra data fra DMU's overvågningstogter vist, at dybmaksima af klorofyl tilsyneladende er et almindeligt forekommende fænomen i Kattegat gennem sommermånederne. De fundne dybmaksima af klorofyl er fortrinsvis placeret på undersiden af saltskillefladen (haloklinen) og på oversiden af skillefladen for næringssaltene (nutriklinen). Tolkningen af datamaterialet fra rutine-overvågningen begrænses imidlertid af, at prøverne tages i få, på forhånd fastlagte dybder. Det er endvidere vanskeligt at afgøre, om dybmaksimummerne udgøres af aktivt producerende fytoplankton, af ikke produktive alger under udsynkning eller af alger tilført horisontalt.

I 1991 - 1992 blev overvågningsmålingerne på DMU's sommertogter suppleret på 4 udvalgte stationer i Kattegat. Koncentrationer af næringssalte samt algebiomasse, primærproduktion og bakterieproduktion blev målt med høj vertikal opløsning omkring pyknoklinen. Formålet med denne del af projektet var at opnå et mere detaljeret indblik i planktonets vertikalfordeling og aktivitet omkring dybmaksima af klorofyl.

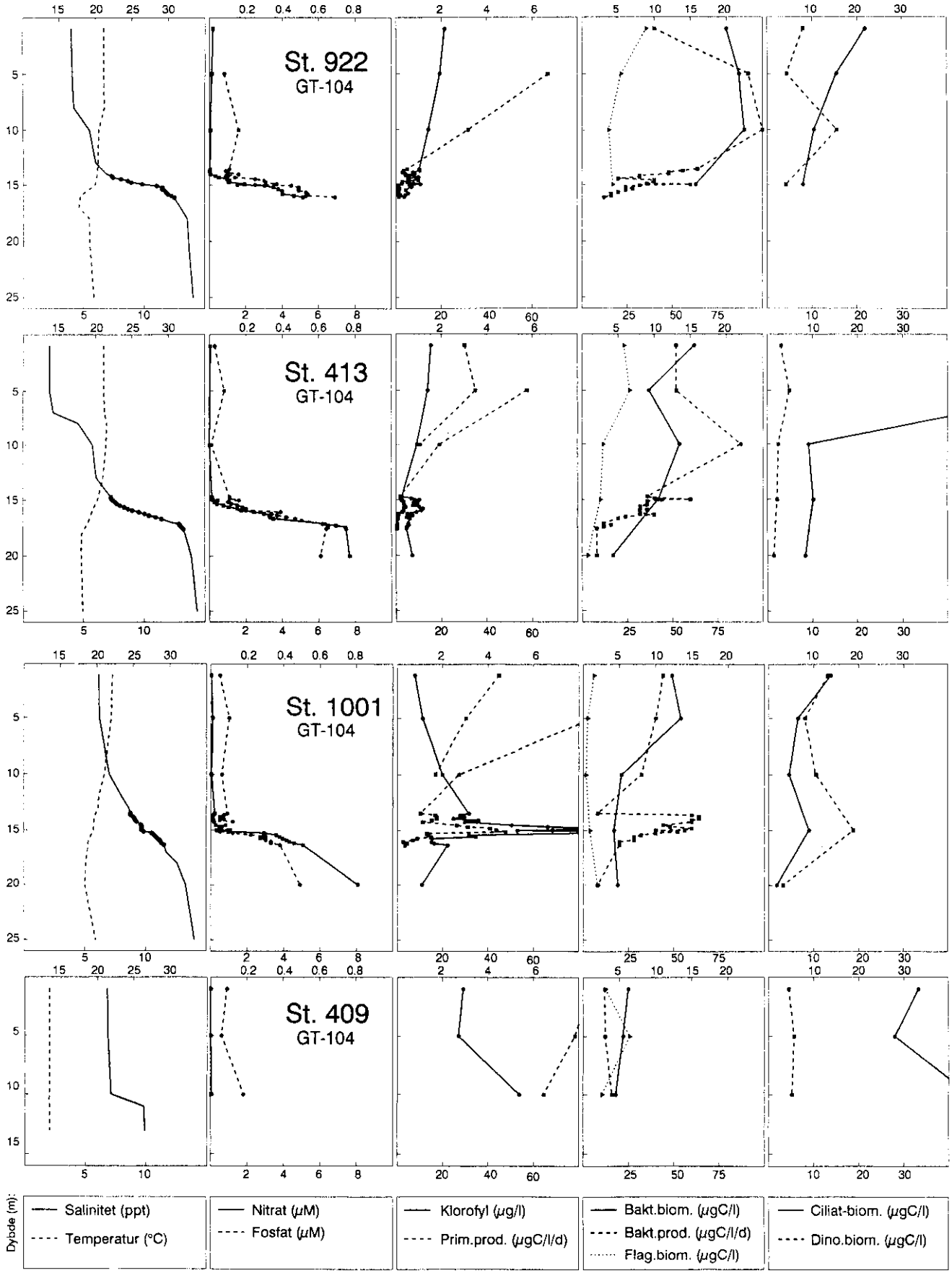



***Figur 4.1***
*Stationskort*

De udvalgte stationer 922 (Hesselø), 413 (Anholt), 1001 (Vinga) og 409 (Ålborg Bugt) repræsenterer en bred geografisk dækning af Kattegat (Figur 4.1). Station 409 er relativt lavvandet og viser i 1991 kun lagdeling få gange; denne station blev derfor udskiftet med station 403 på nogle af togterne i 1992. Stationerne blev besøgt 5 gange i 1991 og 4 gange i 1992 (Figur 4.2).



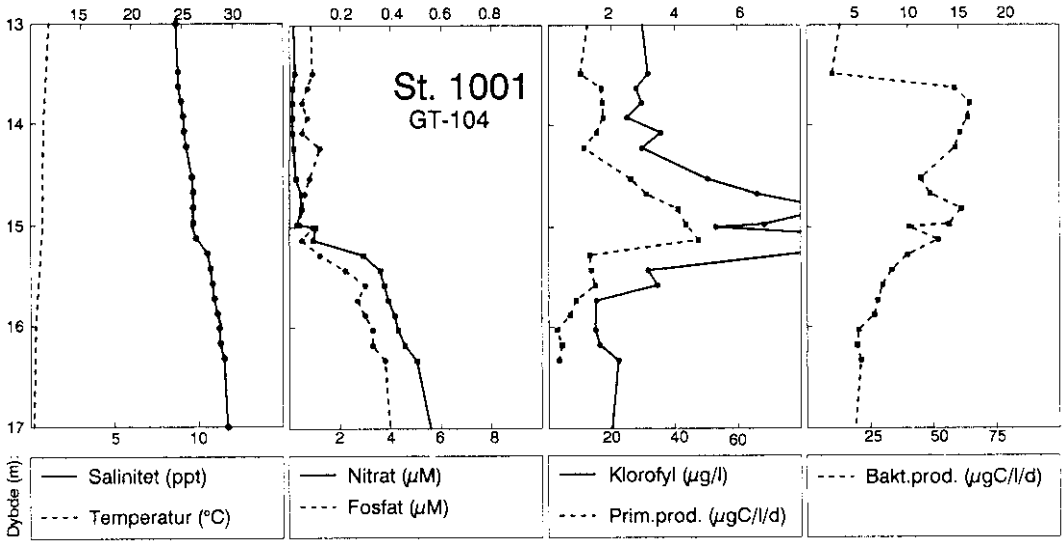

***Figur 4.2.*** *Tidspunkter for overvågningstogterne i 1991 (modstående side) og 1992 (ovenfor) i relation til indstråling og vind, jvf. kapitel 3.*




***Figur 4.3.*** *Måleresultater fra togt GT-104. De øverste skalaer refererer til salinitet, fosfat, klorofyl, bakterieproduktion og flagellatbiomasse; de nederste skalaer refererer til temperatur, nitrat, primærproduktion og bakteriebiomasse.*

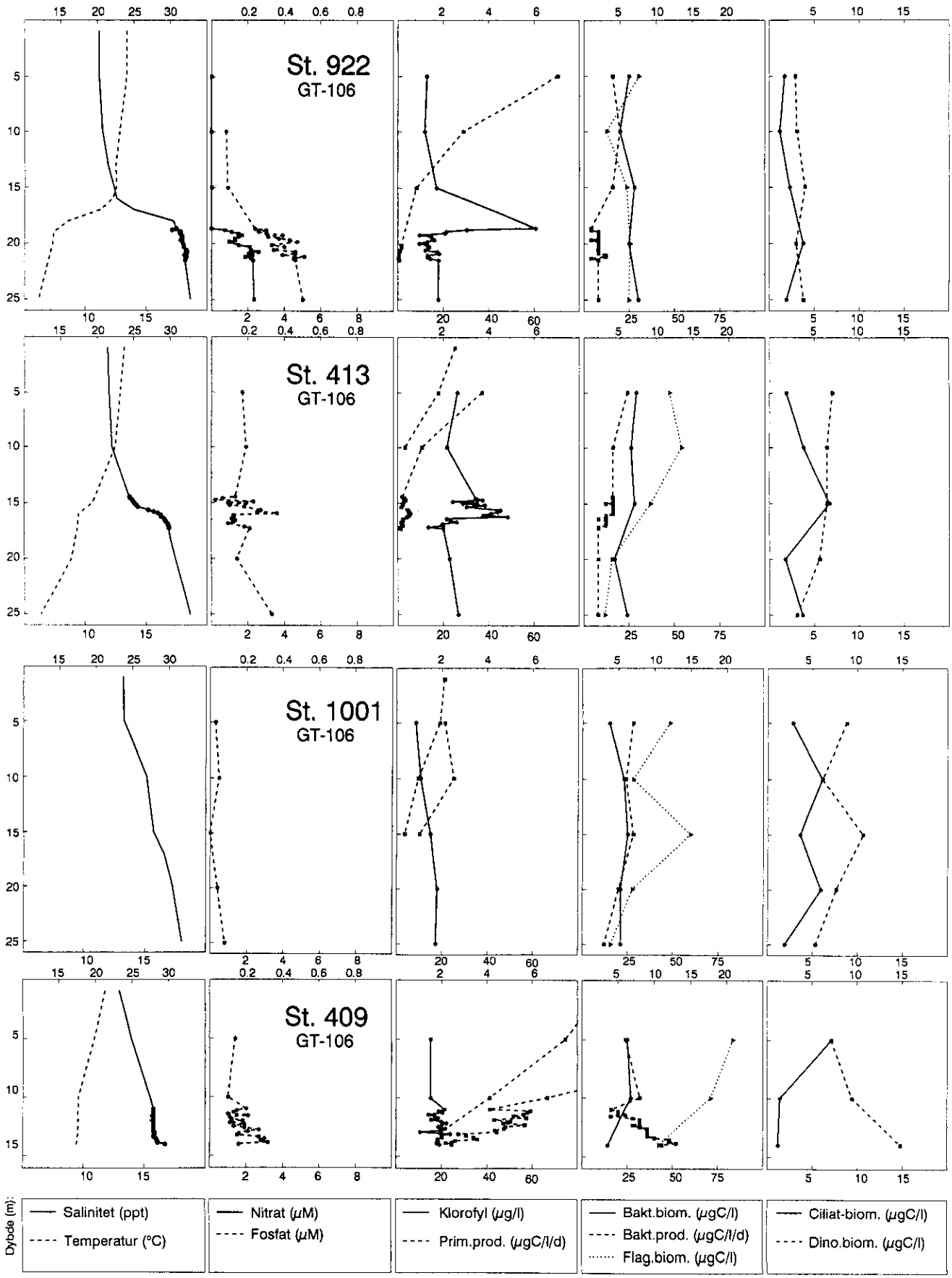
## 4.2 Togt GT-104

Togt GT-104 fandt sted fra 29. april - 1. maj 1991 efter en lang periode med svag vind (Figur 4.2). På stationerne 922 og 413 var der en skarp primær haloklin i 15 - 16 m dybde og en sekundær haloklin i omkring 8 m dybde (Figur 4.3). Temperaturen var næsten konstant gennem vandsøjlen. En skarp nutriklin (nitrat og fosfat) blev lokaliseret sammenfaldende med den primære haloklin. På station 413 fandtes et svagt maksimum af klorofyl omkring pyknoklinen, men den maksimale klorofylkoncentration oversteg ikke overfladekoncentrationen. På station 922 observeredes der ikke noget dybmaksimum af klorofyl. Bakterieproduktionen var på begge stationer høj i overfladen og der var ikke noget respons ved skillefladen.




*Figur 4.4. Måleresultater fra togt GT-104, station 1001, jvf. figur 4.3.*

På station 1001 strakte den primære haloklin sig fra 10 til 20 m dybde. Nutriklinen var derimod skarp, og koncentrationerne af fosfat og især nitrat steg fra omkring 10% til 50% af bundværdierne over få decimeter (Figur 4.4). Lige over denne nutriklin fandtes et markant dybmaksimum af klorofyl med koncentrationer over 10 µg $l^{-1}$, mere end 10 gange overfladekoncentrationen. Primærproduktionen viste et maksimum sammenfaldende med maksimummet af klorofyl, medens bakterieproduktionen var størst lige over algelaget (Figur 4.4). Udfra de foreløbigt optalte prøver var der dybmaksima i biomasserne af mikrozooplanktonet (ciliater og dinoflagellater), men derimod ikke i biomasserne af bakterier eller nanoflagellater (Figur 4.3). Ciliatbiomasserne var generelt høje på dette togt. Gradientvandhenteren blev ikke anvendt på station 409, som viste en svag haloklin tæt ved bunden.




***Figur 4.5.*** *Måleresultater fra togt GT-106. De øverste skalaer refererer til salinitet, fosfat, klorofyl, bakterieproduktion og flagellatbiomasse; de nederste skalaer refererer til temperatur, nitrat, primærproduktion og bakteriebiomasse.*

## 4.3 Togt GT-106

Dette togt fandt sted fra d. 17. - 18. juni 1991. På stationerne 922 og 413 fandtes som på det foregående togt en skarp primær haloklin i omkring 16 m dybde (Figur 4.5). Lagdelingen var blevet forstærket ved en opvarmning af overfladevandet på omkring 5°C, og der observeredes ingen sekundær pyknoklin.

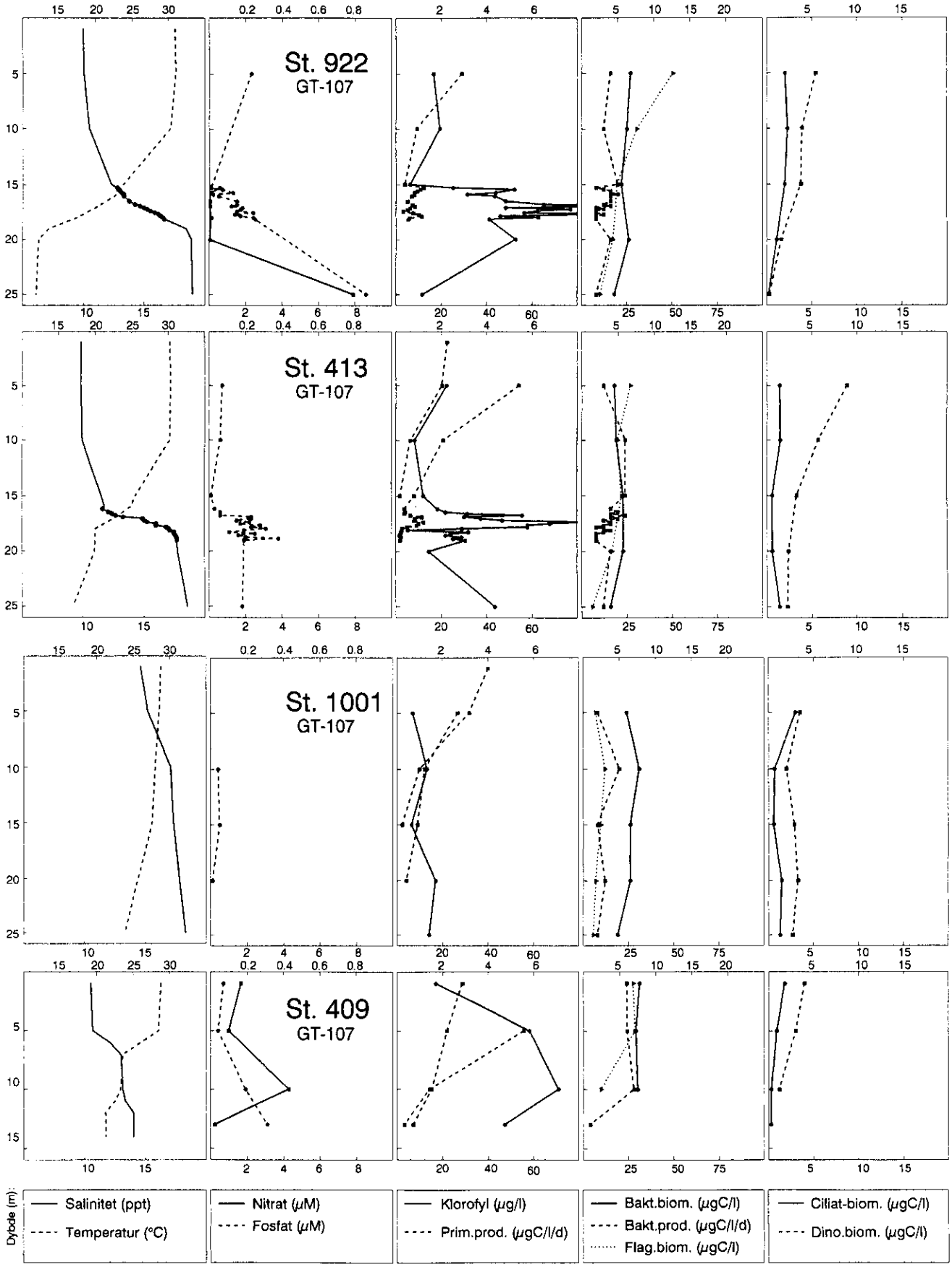
På station 922 ses en nutriklin på undersiden af springlaget. Overfladevandet er tømt for nitrat, medens der er målbare koncentrationer af fosfat. Et markant dybmaksimum af klorofyl med maksimum-koncentration på over 5 gange overfladekoncentrationen fandtes over pyknoklinen. Gradient-vandhenteren dækker kun undersiden af dette dybmaksimum. Udfra prøverne er der intet tegn på dybmaksima af primærproduktion eller bakterie-produktion, men dette kan skyldes positioneringen af gradientvandhenteren.

For station 413 findes der ingen nitratmålinger og fosfatmålingerne viser ikke nogen tydelig nutriklin. Der ses imidlertid et svagt dybmaksimum af klorofyl omkring pyknoklinen med op til 2 gange overfladekoncentrationen af klorofyl. Primærproduktionen viser en svag stigning i pyknoklinen, medens der ikke er noget respons i bakterieproduktionen.

På station 1001 blev gradientvandhenteren ikke anvendt. Lagdelingen var her meget svag og fosfatkoncentrationen var lav i alle de målte prøver. Klorofylkoncentrationen steg med dybden.

På station 409 var der en tendens til øget salinitet lige over bunden. Gradientvandhenteren blev udløst stående på bunden. Fosfatkoncentrationen steg lige over bunden, men der var ikke noget tydeligt dybmaksimum af klorofyl eller i primærproduktionen. Til gengæld viste bakterieproduktionen tydeligt stigende værdier mod bunden. Den øgede bakterielle aktivitet umiddelbart over bunden kan være betinget af en frigivelse af opløst organisk stof fra bunden.

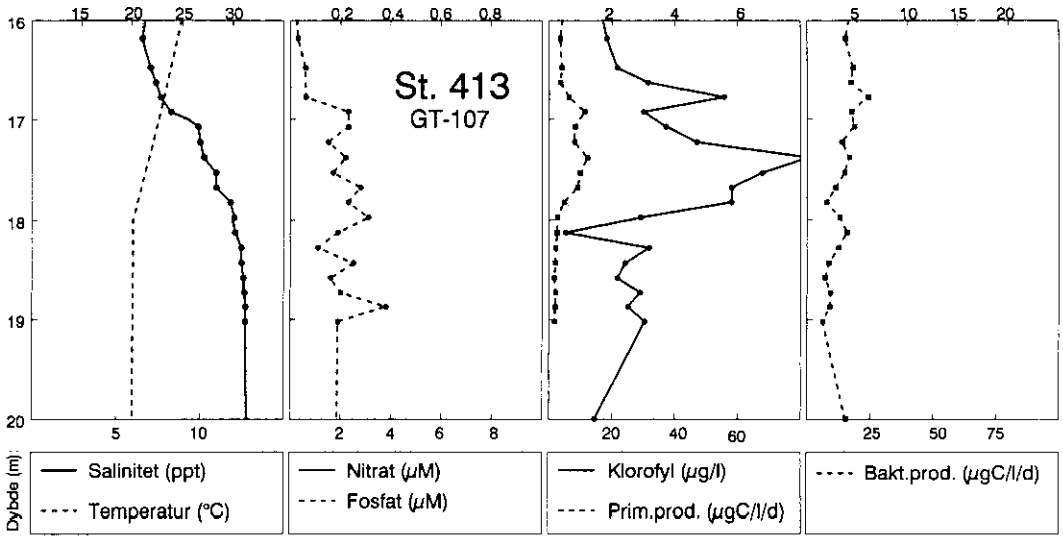
For alle stationerne var ciliatbiomasser lavere end på det foregående togt.




***Figur 4.6.*** *Måleresultater fra togt GT-107. De øverste skalaer refererer til salinitet, fosfat, klorofyl, bakterieproduktion og flagellatbiomasse; de nederste skalaer refererer til temperatur, nitrat, primærproduktion og bakteriebiomasse.*

## 4.4 Togt GT-107

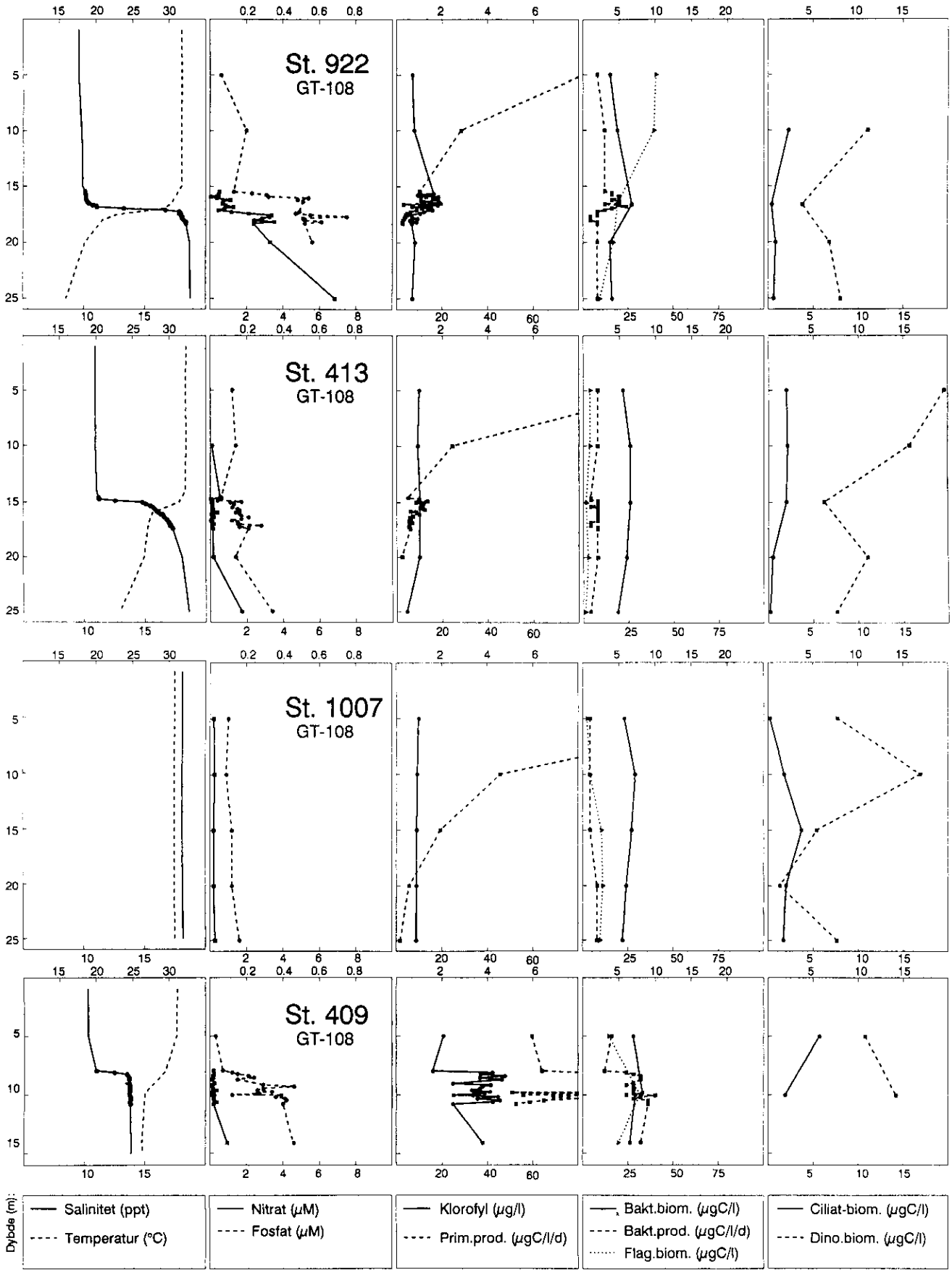
Togt GT-107 fandt sted fra d. 15. - 17. juli 1991. På de sydlige stationer 922 og 413 var der fortsat en markant haloklin omkring 17 m dybde, og på station 922 var overfladelaget 10°C varmere end bundlaget (Figur 4.6). På begge stationer fandtes en fosfoklin sammenfaldende med pyknoklinen. På station 922 lå nitraklinen væsentligt dybere, mellem 20 og 25 m. Der var ikke nitratmålinger for station 413. Begge stationer viste et dybmaksimum af klorofyl i pyknoklinen med op til 5 gange overflade-koncentrationen. På station 413 var der en lille stigning i primærproduktionen i algelaget (Figur 4.7), medens bakterieproduktionen ikke viste nogen respons i på de høje algebiomasser skillefladen på de to stationer.




*Figur 4.7. Måleresultater fra togt GT-106, station 413, jvf. Figur 4.6.*

Gradientvandhenteren blev ikke anvendt på stationerne 1001 og 409. På station 1001 var lagdelingen meget svag og fosfatkoncentrationen var lav i de øverste 20 meter. Klorofylkoncentrationen steg svagt med dybden. På station 409 var vandsøjlen delt i tre lag. Mellemlaget, fra 6 til 12 m dybde, indeholdt at dømme efter den ene vandprøve taget i laget, de højeste koncentrationer af nitrat og klorofyl.

På alle stationer var ciliatbiomassen yderligere reduceret og lavere end biomassen af heterotrofe dinoflagellater.



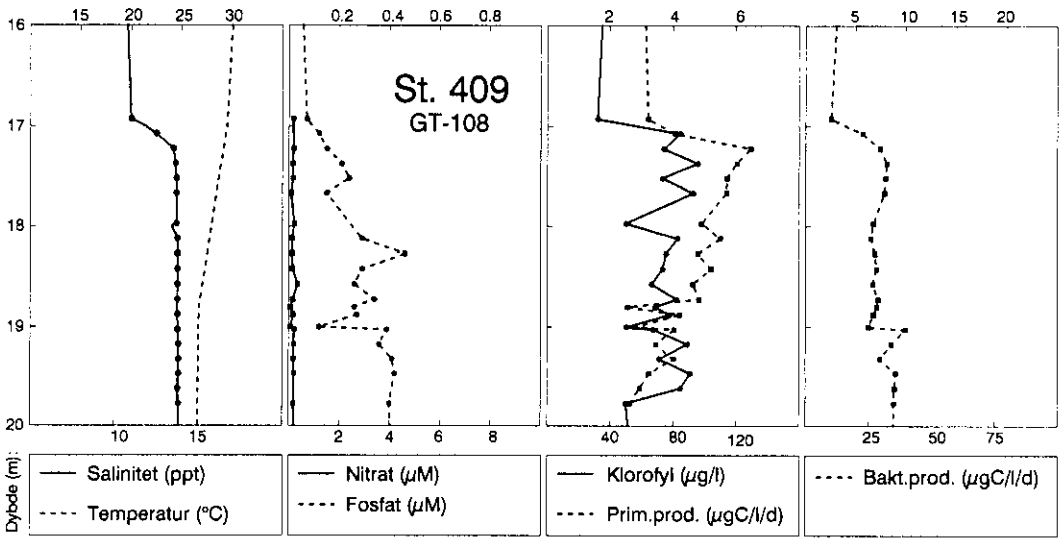

***Figur 4.8.*** *Måleresultater fra togt GT-108. De øverste skalaer refererer til salinitet, fosfat, klorofyl, bakterieproduktion og flagellatbiomasse; de nederste skalaer refererer til temperatur, nitrat, primærproduktion og bakteriebiomasse.*

## 4.5 Togt GT-108

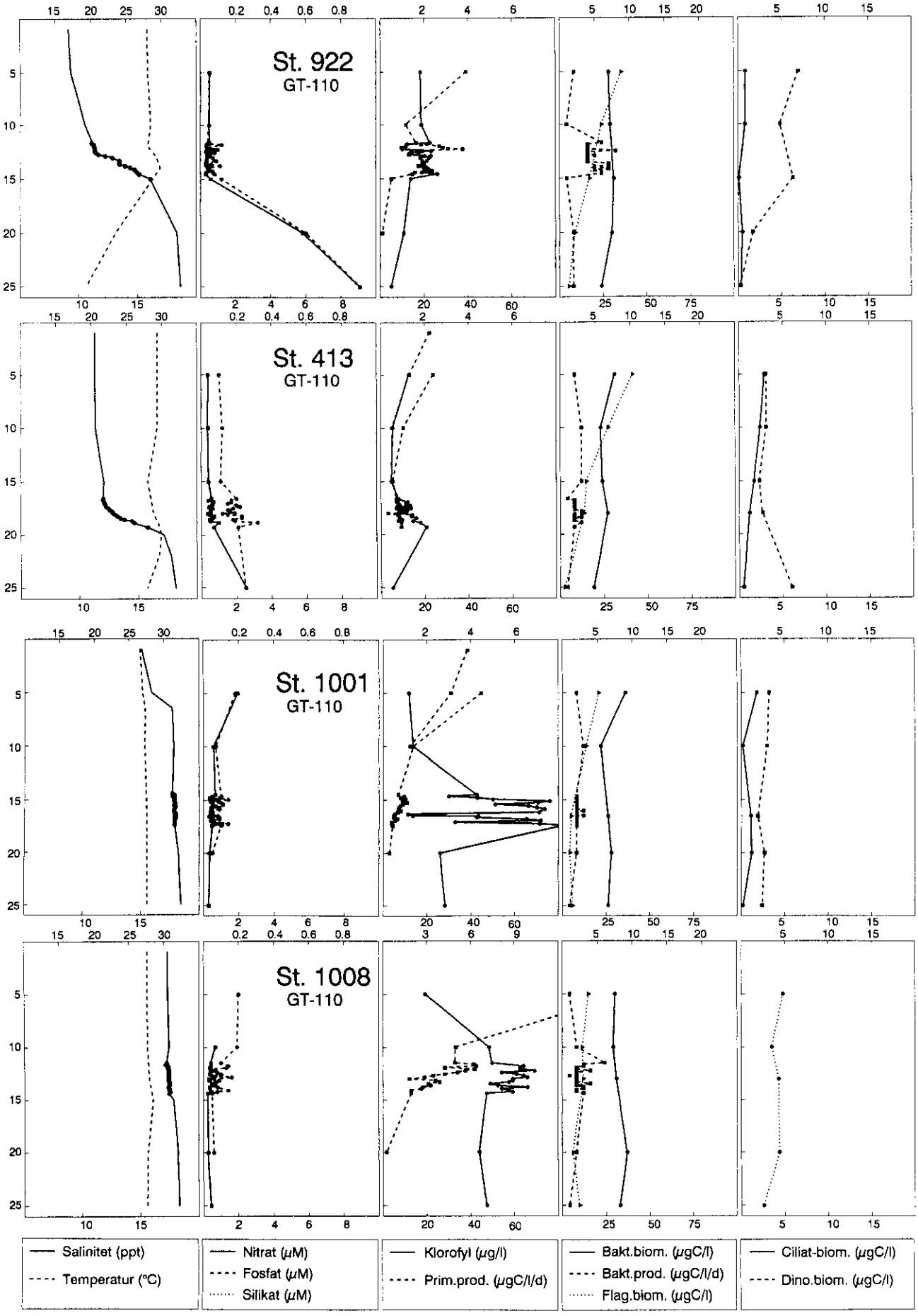
Togt GT-108 fandt sted fra d. 12. - 14. august 1991. Lagdelingen på de sydlige stationer var meget skarp, på station 922 øgedes saliniteten 10 ‰ over få decimeter (Figur 4.8). På station 922 fandtes en nutriklin (både for nitrat og fosfat) omkring pyknoklinen. På station 413 fandtes en svag lagdeling i fosfat medens nitrat var opbrugt indtil 20 m dybde. Station 922 viste en antydning af et dybmaksimum i pyknoklinen. For station 413 blev klorofyl kun målt i de 5 standard-dybder. Bakterieproduktionen viste en svag stigning i pyknoklinen på station 922.

Station 1007 var opblandet ned til mindst 25 m, og nitratkoncentrationen var lav i alle måledybder. Gradientvandhenteren blev ikke anvendt.

På station 409 var der en skarp haloklin i 8 m dybde. Saliniteten i bundvandet var dog kun 25‰, altså betydeligt lavere end det egentlige bundvand i Kattegat. Der var en tydelig fosoklin lige under pyknoklinen, medens nitratkoncentrationen i bundvandet var lav. Klorofylkoncentrationen, primærproduktionen og bakterieproduktionen steg i pyknoklinen (Figur 4.9).




***Figur 4.9.** Måleresultater fra togt GT-108, station 409, jvf. Figur 4.8.*

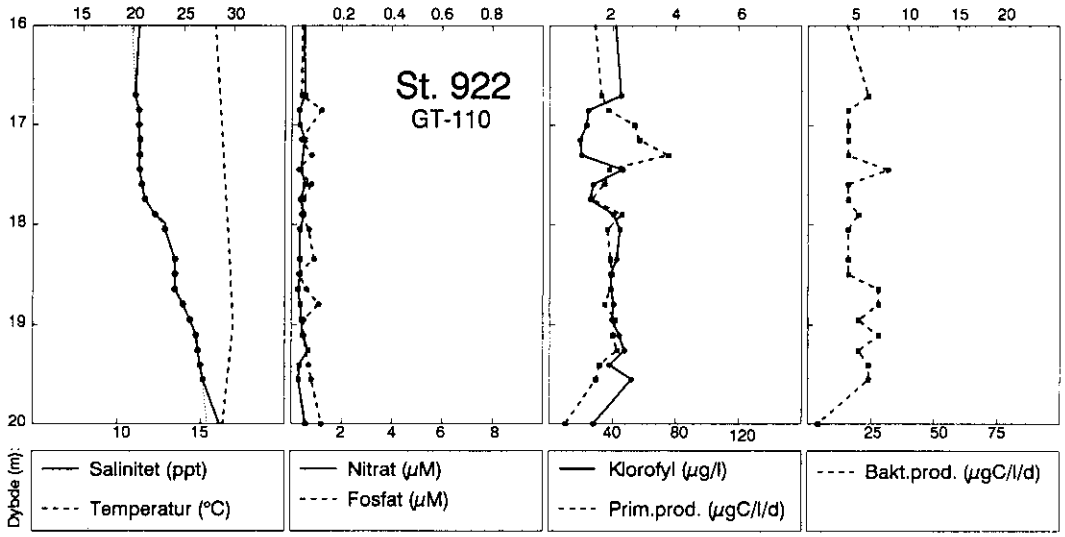



***Figur 4.10.*** *Måleresultater fra togt GT-110. De øverste skalaer referer til salinitet, fosfat, klorofyl, bakterieproduktion og flagellatbiomasse; de nederste skalaer refererer til temperatur, nitrat, primærproduktion og bakteriebiomasse.*

## 4.6 Togt GT-110

Togt GT-110 fandt sted fra d. 16. - 18. september 1991. De sydlige stationer var fortsat skarpt lagdelte, men på station 413 lå haloklinen i 18 - 19 m dybde, og lagdelingen var ikke længere forstærket af en temperaturforskel mellem overflade og bundvand (Figur 4.10).

På station 922 var der en nitra- og fosfoklin, men nutriklinen lå dybere end 15 m og var således ikke dækket af gradientvandhenteren. Der var en stigning i klorofylkoncentrstionen, primærproduktion og bakterieproduktion omkring pyknoklinen (Figur 4.11).



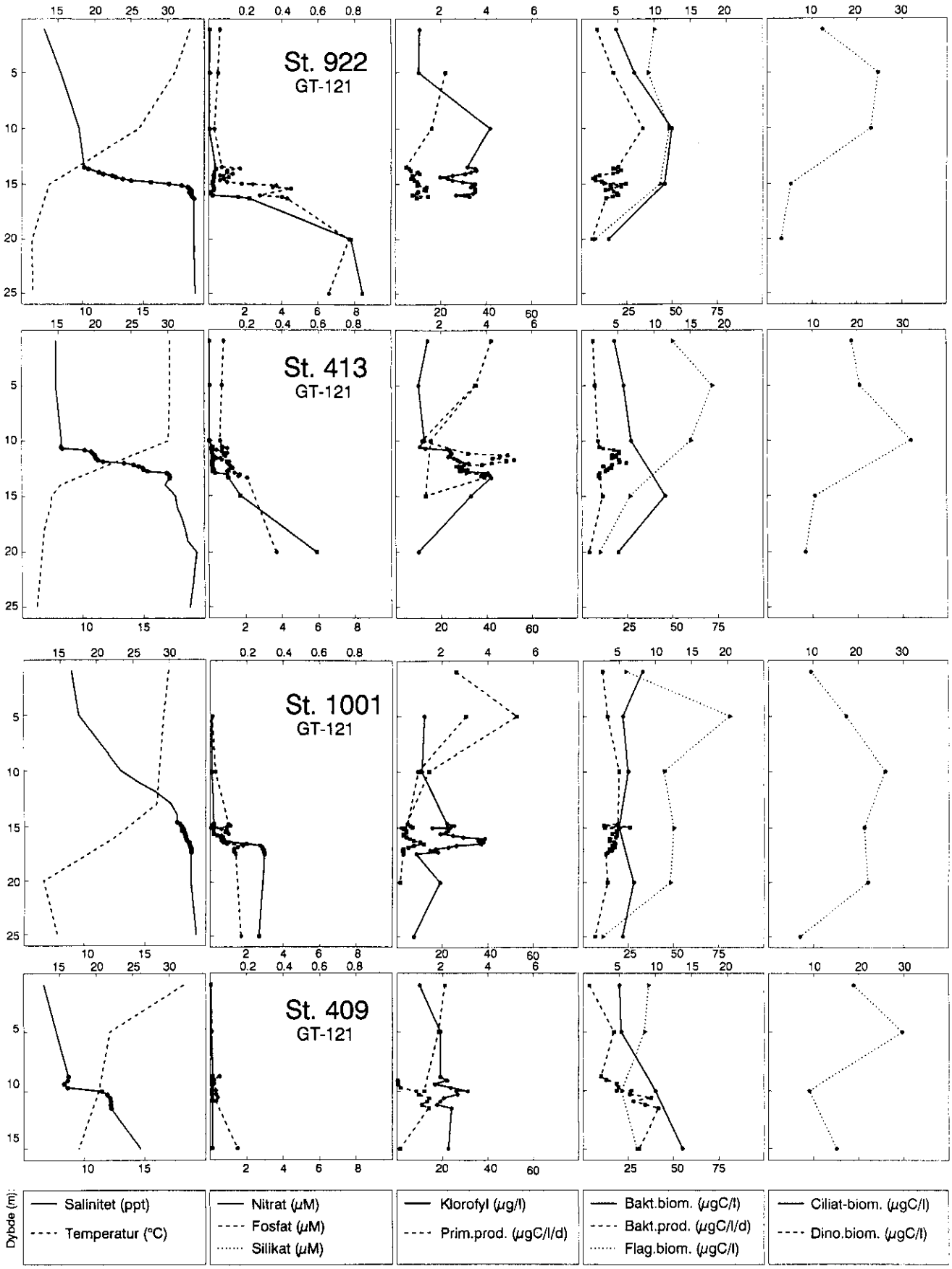

*Figur 4.11. Måleresultater fra togt GT-110, station 922, jvf. Figur 4.10.*

På station 413 var der ligeledes lave næringssaltkoncentrationer i pyknoklinen og tendens til et dybmaksimum af klorofyl omkring pyknoklinen. Gradientvandhenteren dækker kun den øverste ende af dette dybmaksimum. Der er ingen synlig respons i primærproduktion eller bakterieproduktion.

På station 1001 var der et tyndt overfladelag med reduceret salinitet, medens station 1008 var fuldt opblandet ned til 25 m dybde. Der var ingen nutriklin. På begge stationer fandtes et dybmaksimum i klorofyl i hhv. 15 - 16 m og 12 - 13 m dybde i det homogene bundvand, men der sås intet respons i primærproduktion eller bakterieproduktion.

## 4.7 Togt GT-121

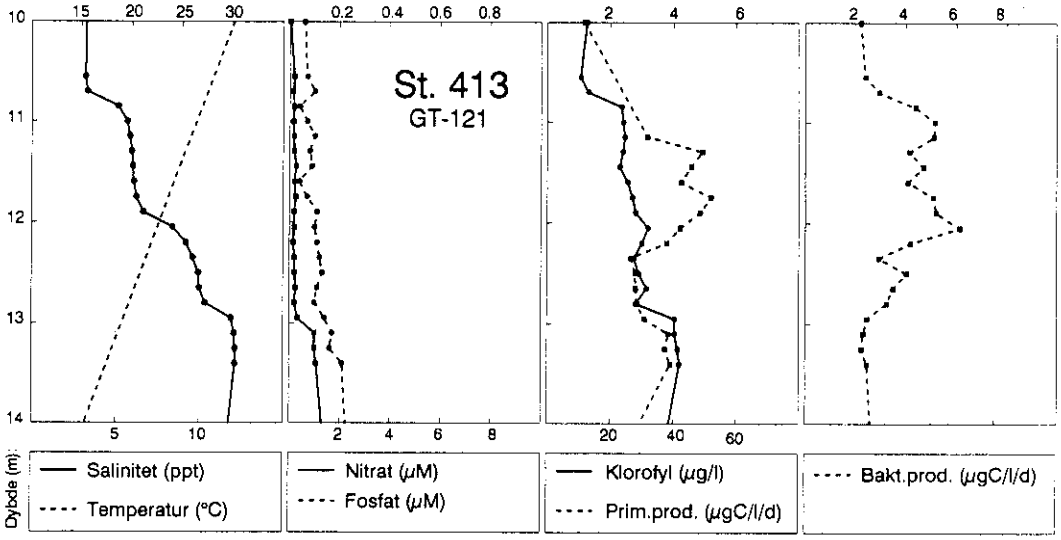
Togt GT-121 fandt sted fra d. 15 - 17 juni 1992, og svarer således tidsmæssigt til togt GT-106. Lagdelingen af de sydlige stationer var veletableret med en skarp haloklin forstærket af en temperaturforskel på 10°C , p.g.a. opvarmning af overfladevandet (Figur 4.12).




***Figur 4.12.*** *Måleresultater fra togt GT-121. De øverste skalaer refererer til salinitet, fosfat, klorofyl, bakterieproduktion og flagellatbiomasse; de nederste skalaer refererer til temperatur, nitrat, primærproduktion og bakteriebiomasse.*

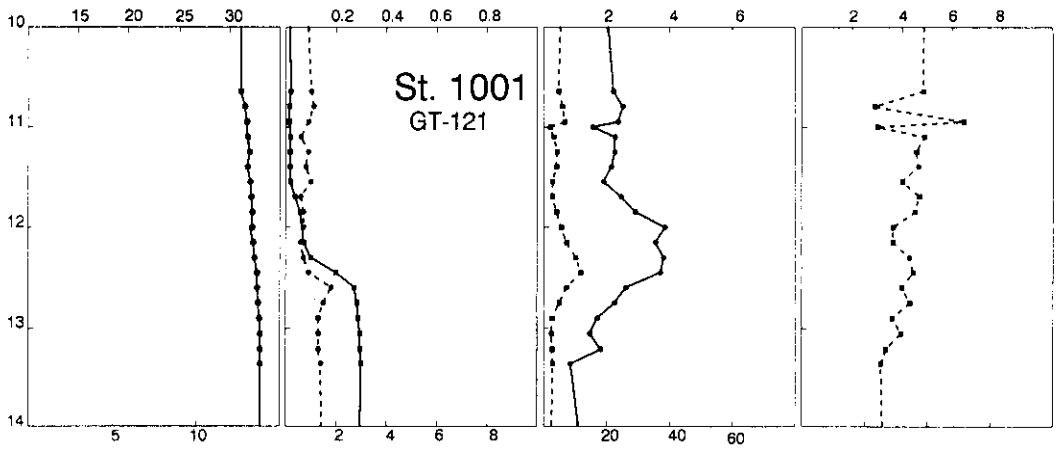
På station 922 fandtes en skarp nutrikliln (både nitrat og fosfat), men medens fosfoklinen var sammenfaldende med pyknoklinen lå nitraklinen ca. 2 m dybere end pyknoklinen. Der fandtes et dybmaksimum af klorofyl med koncentrationer op til 4 gange overfladevandets. Primærproduktionen viste en svag stigning omkring pyknoklinen medens der ikke var nogen respons i bakterieproduktionen.

På station 413 var der en tilsvarende forskydning mellem skillefladerne i nitrat og fosfat, og et tilsvarende dybmaksimum i klorofyl. Både primærproduktion og bakterieproduktion viste tydelige maksima omkring pyknoklinen, over klorofyl-maksimummet (Figur 4.13).



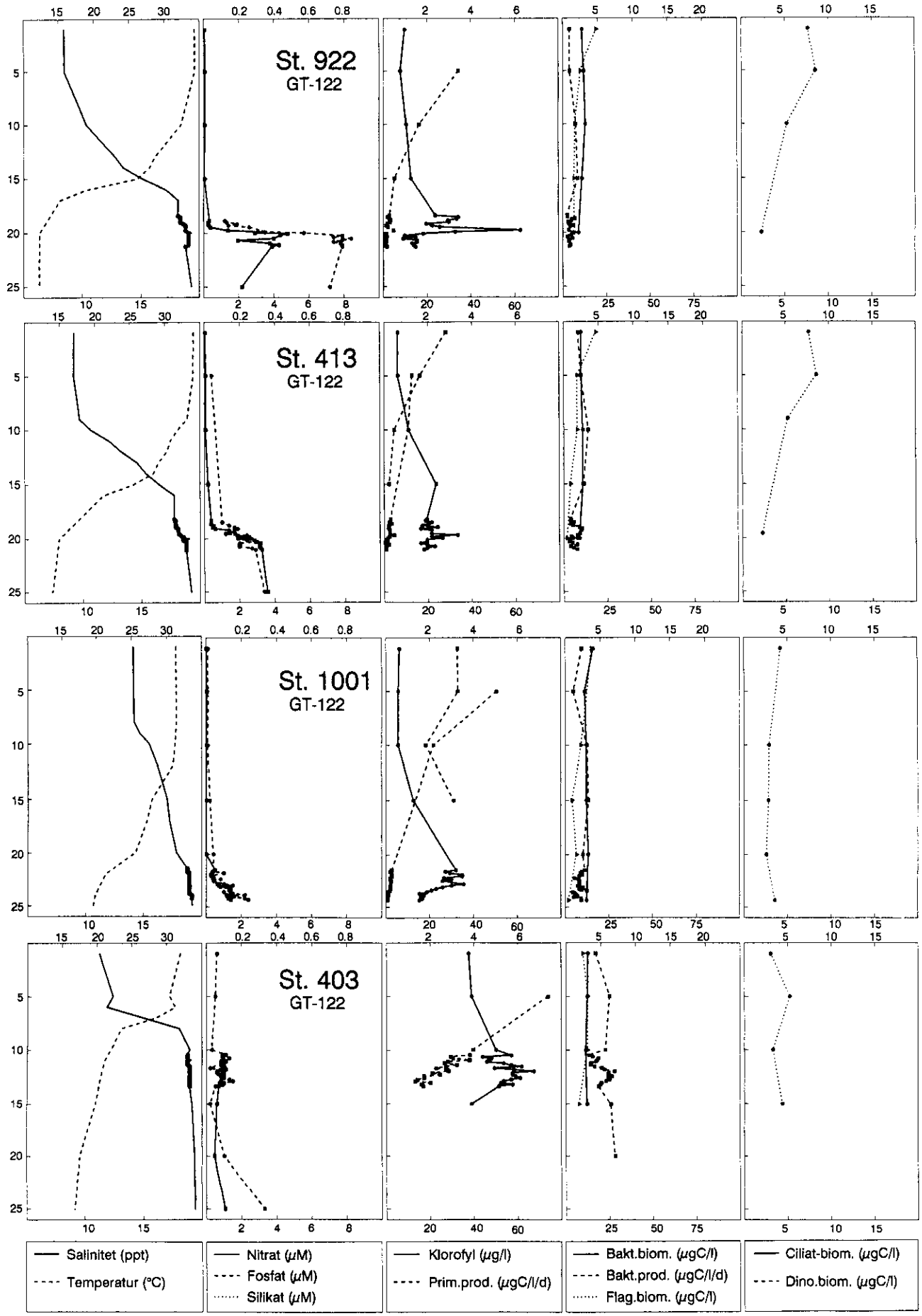

***Figur 4.13.*** *Måleresultater fra togt GT-121, station 413, jvf. Figur 4.12.*

På station 1001 strakte haloklinen sig fra 5 til 15 m dybde. I 16 m dybde fandtes en skarp nutriklin og i forbindelse hermed et markant dybmaksimum af klorofyl. Primærproduktionen viste et lille lokalt maksimum i algelaget, medens der ikke var nogen respons i bakterieproduktionen.




***Figur 4.14.*** *Måleresultater fra togt GT-121, station 1001, jvf. Figur 4.12. Symboler se Figur 4.13.*

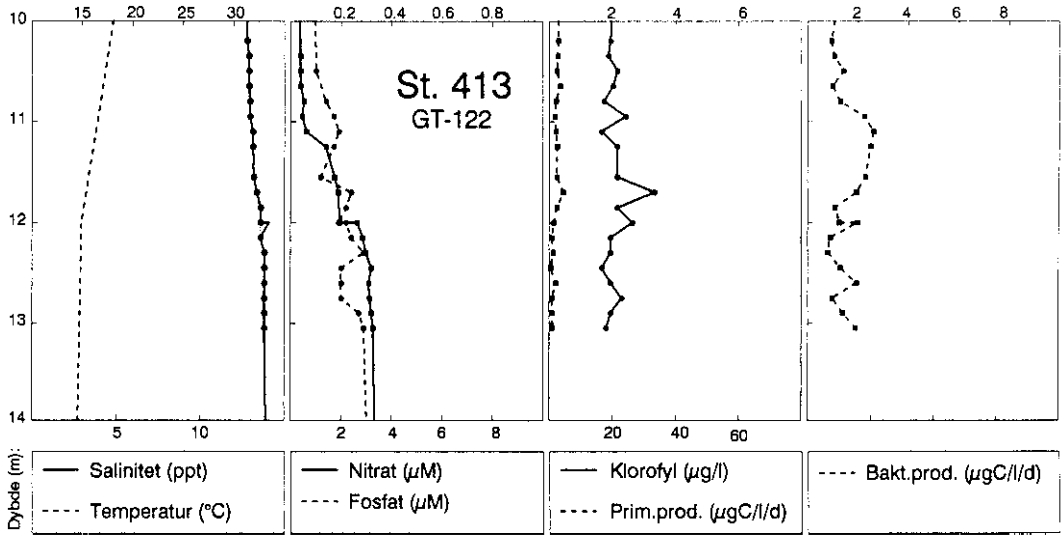
Station 409 var lagdelt i 10 m dybde, men bundvandet havde lavt indhold af nitrat. Der var ikke tegn på dybmaksimum af klorofyl i pyknoklinen. Bakterieproduktionen steg i pyknoklinen til en højere værdi for bundvandet.




***Figur 4.15.*** *Måleresultater fra togt GT-122. De øverste skalaer refererer til salinitet, fosfat, klorofyl, bakterieproduktion og flagellatbiomasse; de nederste skalaer refererer til temperatur, nitrat, primærproduktion og bakteriebiomasse.*

## 4.8 Togt GT-122

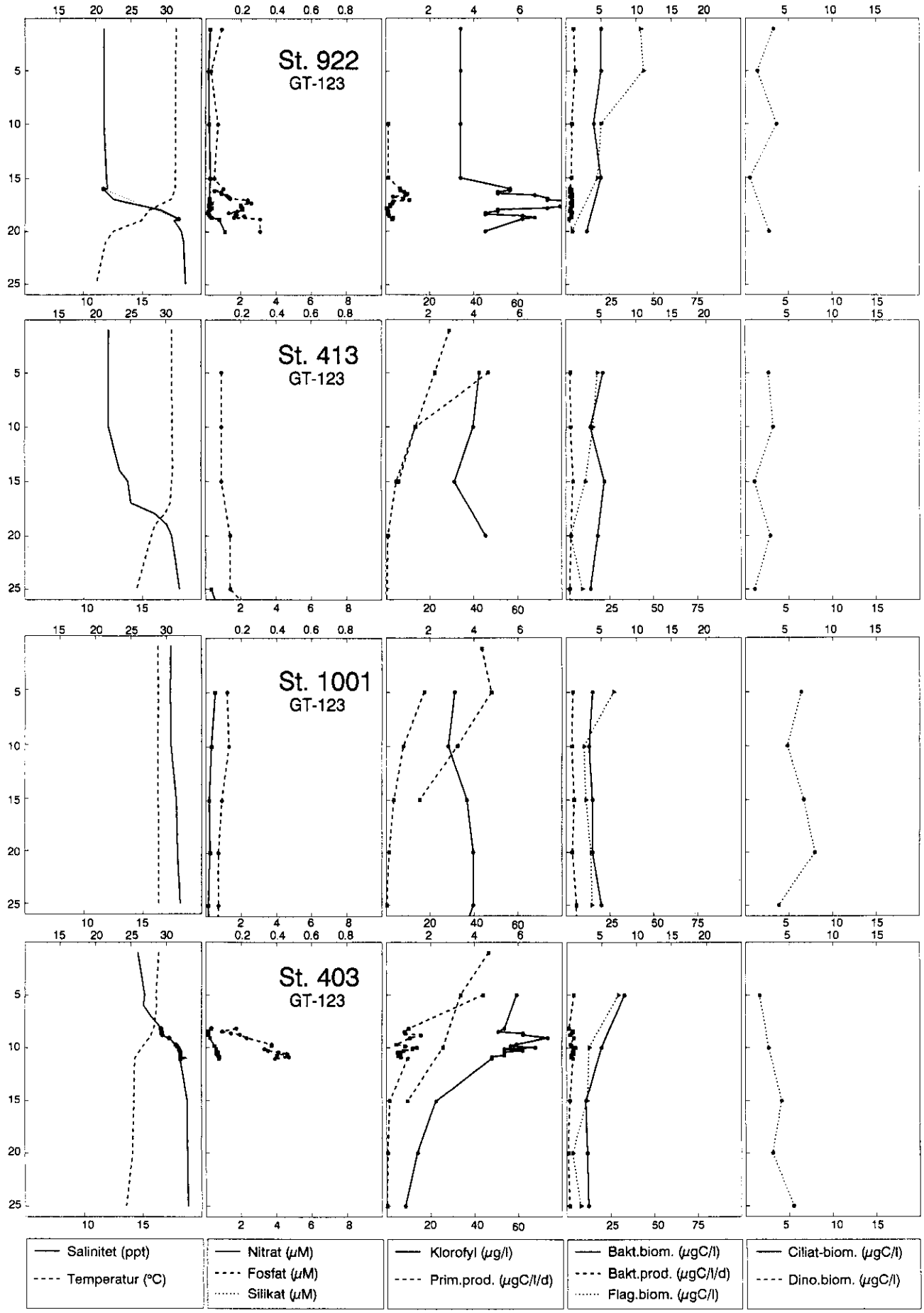
Togt GT-122 fandt sted fra d. 13. - 14. juli 1992, samme tid som togt GT-107 året før. Lagdelingen på de sydlige stationer var mindre skarp end på det foregående togt GT-121, og pyknoklinen strakte sig fra omkring 8 til 17 m dybde (Figur 4.15). På begge stationer fandtes en veludviklet nutriklin på undersiden af pyknoklinen i 19 - 20 m dybde. Dybmaksima af klorofyl fandtes omkring nutriklinen på begge stationer, tydeligst på station 922. På station 413 var der en svag positiv respons i bakterieproduktionen omkring nutriklinen, medens der ikke sås nogen respons i primærproduktionen i de to stationers dybmaksima (Figur 4.16).




*Figur 4.16. Måleresultater fra togt GT-122, station 413, jvf. Figur 4.15.*

Lagdelingen på station 1001 var svagere end på de sydlige stationer, og der var tilsyneladende flere lag mellem overflade- og bundvand. Et dybmaksimum af klorofyl fandtes i den øverste del af bundvandet sammenfaldende med en nutriklin.

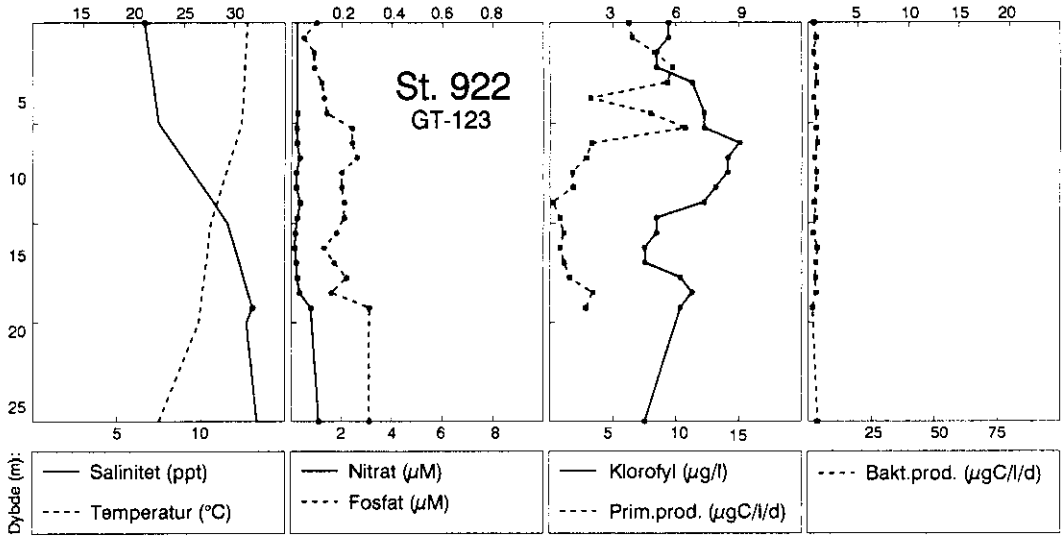
På station 403 lå haloklinen i omkring 7 m dybde, og koncentratione af nitrat og fosfat var lav i de øverste 20 m. Et lille dybmaksimum af klorofyl fandtes i ca. 12 m dybde uden tilknytning til en nutriklin. Der sås et svagt respons i bakterieproduktionen i klorofylmaksimummet, men ingen stigning i primærproduktionen.



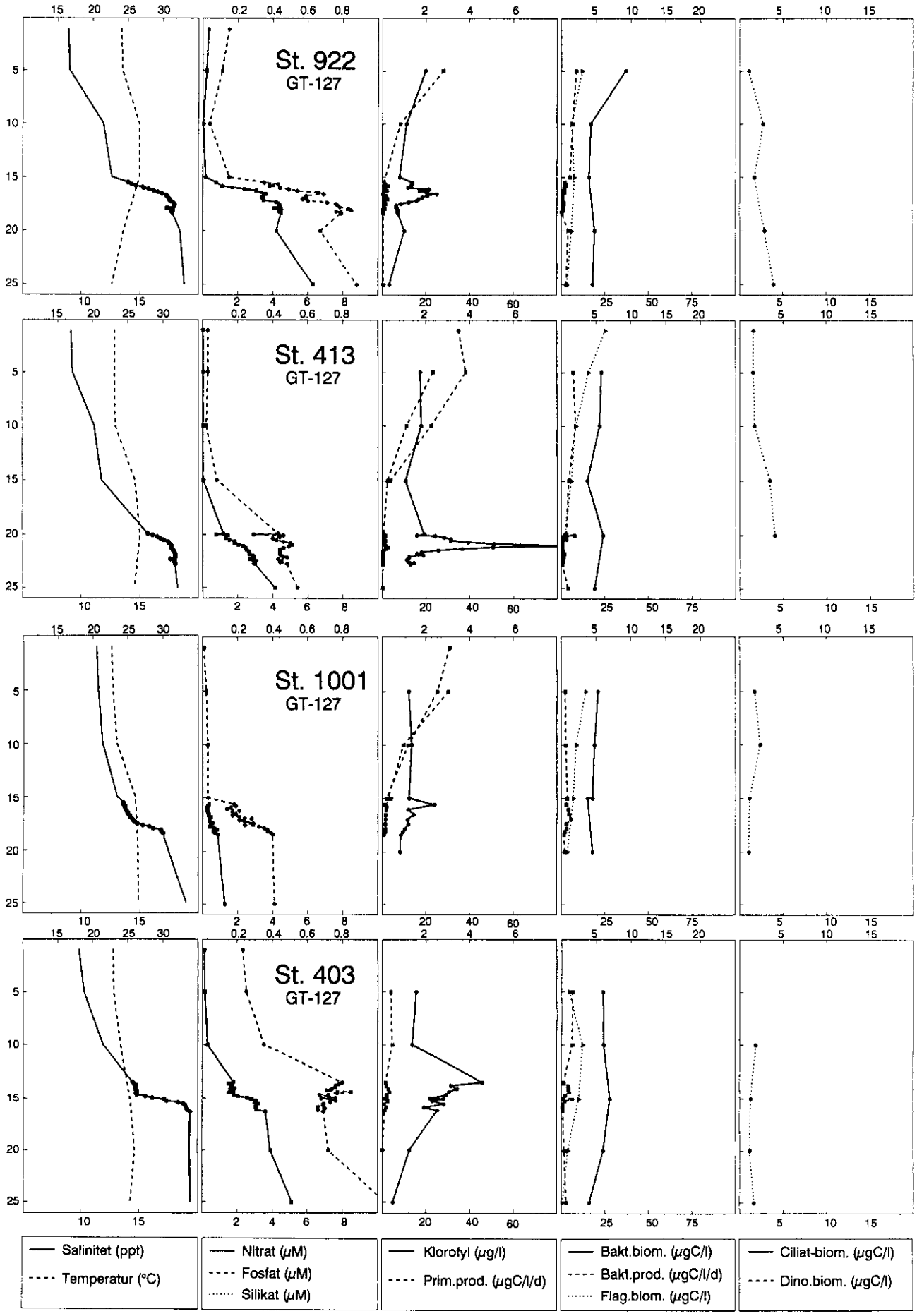

***Figur 4.17.*** *Måleresultater fra togt GT-123. De øverste skalaer refererer til salinitet, fosfat, klorofyl, bakterieproduktion og flagellatbiomasse; de nederste skalaer refererer til temperatur, nitrat, primærproduktion og bakteriebiomasse.*

## 4.9 Togt GT-123

Togt GT-123 fandt sted fra d. 17 - 18 august 1992, jvf. togt GT-108 i 1991. På de sydlige stationer lå pyknoklinen dybere end det foregående togt GT-122 (Figur 4.16). På station 922 observeredes både en nutriklin og et dybmaksimum af klorofyl sammenfaldende med pyknoklinen. Primærproduktionen viste et maksimum i den øverste del af algelaget (Figur 4.17). På station 413 var koncentrationerne af nitrat og fosfat lave i de øverste 25 m, og gradientvandhenteren blev ikke taget i anvendelse. Station 1001 var fuldt opblandet og med lave næringssalt-koncentrationer i de øverste 25 m, og gradientvandhenteren blev på dæk. På station 403 fandtes en nutriklin i 9 m dybde, sammenfaldende med den nedre del af pyknoklinen og med et svagt dybmaksimum af klorofyl, uden synlig respons i primærproduktion eller bakterieproduktion.




*Figur 4.18. Måleresultater fra togt GT-123, station 922, jvf. Figur 4.17.*

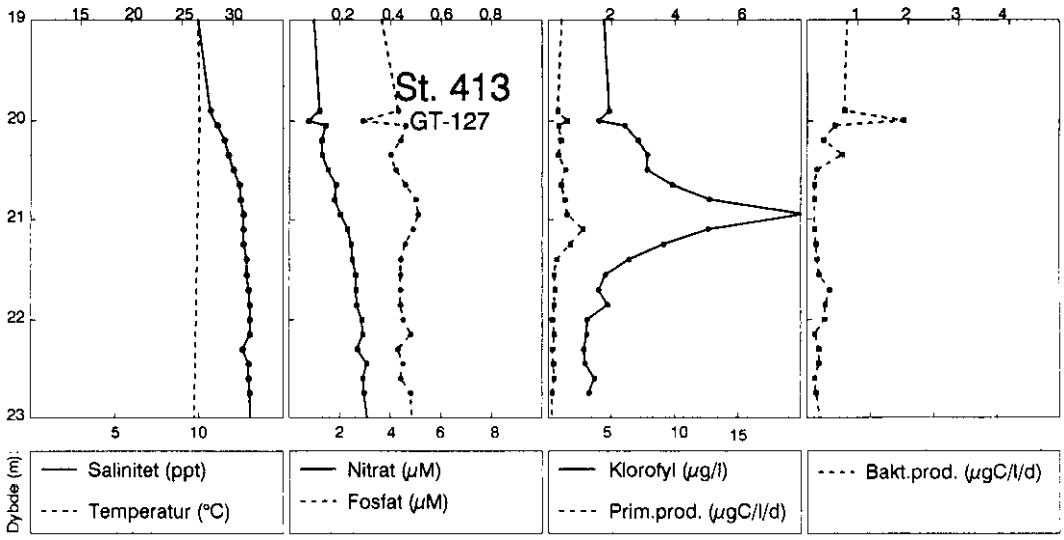



***Figur 4.19.*** *Måleresultater fra togt GT-127. De øverste skalaer refererer til salinitet, fosfat, klorofyl, bakterieproduktion og flagellatbiomasse; de nederste skalaer refererer til temperatur, nitrat, primærproduktion og bakteriebiomasse.*

## 4.10 Togt GT-127

Togt GT-127 fandt sted fra d. 5. - 6. spetember 1992. På station 922 fandtes den primære haloklin i 15.5 m dybde (Figur 4.18). Fosfo og nitraklinen fandtes i h.h.v 16 og 16.5 m's dybde, sammenfaldende med et dybmaksimum af klorofyl. Der sås ingen stigning i primærproduktion eller bakterieproduktion i algelaget.

På station 413 fandtes et markant dybmaksimum af klorofyl i 21 m dybde, sammenfaldende med nitraklinen. Den primære haloklin og fosfoklinen var lokaliseret i 20 m dybde. Primærproduktionen viste en svag stigning i algelaget.




*Figur 4.20. Måleresultater fra togt GT-127, station 413, jvf. Figur 4.19.*

De nordlige stationer 1001 og 403 viste en lagdeling svarende til de sydlige stationer. På station 1001 fandtes nutriklinen sammenfaldende med haloklinen og intet dybmaksimum af klorofyl. På station 403 var nitraklinen sammenfaldende med haloklinen medens fosfatmålingerne ikke viste en klar lagdeling. Gradientvandhenteren dækkede undersiden af et dybmasimum af klorofyl placeret over haloklinen. Primærproduktionen viste et svagt maksimum omkring algelaget. Både primærproduktioner og bakterieproduktioner var meget lave på dette togt.

***Tabel 4.1.*** *Dybmaksima af klorofyl i Kattegat 1991 - 1992: forekomst og placering i forhold til haloklin og nutriklin. Talværdierne angiver dybden (m) af maksimal klorofyl, primærproduktion og bakterieproduktion samt af haloklin og nutriklin (dybden svarende til gennemsnitsværdi for overflade og bund). Plusser og parenteser angiver hvor markant klinen/maksimummet er, medens ≈ angiver at positionen er omtrentlig. Kun lagdelte situationer er medtaget, jvf. Figur 14.3 - 14.18.*

| St | Togt | Haloklin | Nutriklin N P | Klorofyl | PP | BP |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 922 | 104 | +15 | +15 | ((15)) | ((14.5)) | ((15)) |
| | 106 | +17 | +19 | ++18 | ÷ | ÷ |
| | 107 | +17 | ÷ (18) | +17 | ÷ | ÷ |
| | 108 | ++17 | 17.5 | ÷ | ÷ | (16-17) |
| | 110 | +14 | ≈18 | (13-14) | (12-13) | (12-15) |
| | 121 | ++14.5 | +16.5 +15 | (13-14) | (15.5) | ÷ |
| | 122 | (15) | +20 | 20 | ÷ | ÷ |
| | 123 | +17.5 | ÷ (17) | +17 | ÷ | ÷ |
| | 127 | +15.5 | +16.5 +16 | 16.5 | ÷ | ÷ |
| 413 | 104 | +16 | +16.5 | ((16)) | ((15.5)) | ÷ |
| | 106 | +15.5 | ? | 17 | (16) | ÷ |
| | 107 | +17 | ÷ (17) | +17.5 | (17) | ÷ |
| | 108 | +15 | (15) | i.m. | ÷ | ÷ |
| | 110 | +18.5 | ≈20 | ≈19 | ÷ | ÷ |
| | 121 | ++12 | ≈15 ≈13 | +13 | +12 | +12 |
| | 122 | (13) | +19 | 20 | ÷ | (19) |
| | 123 | 17 | >25 | ÷ | ÷ | ÷ |
| | 127 | 20 | +21 (20) | ++21 | ((21)) | ÷ |
| 1001 | 104 | (15) | +15.5 | ++15 | ++15 | +14 |
| | 110 | (5) | ÷ | (15-16) | ÷ | ÷ |
| | 121 | (11) | +16 (16) | +16 | +16.5 | ÷ |
| | 122 | ((8-25)) | 23 | (22-23) | ÷ | ÷ |
| | 127 | 16.5 | ÷ 16.5 | ÷ | ÷ | ÷ |
| 409 | 108 | +8 | (8.5) | (8-10) | (8-9) | 8-bund |
| | 121 | +10 | ÷ | ÷ | ÷ | bund |
| 403 | 122 | 7 | (22) | (12) | ÷ | ((12)) |
| | 123 | 8 | ≈9 | 9 | ÷ | ÷ |
| | 127 | +15 | +15 ÷ | 13.5 | ((14.5)) | ÷ |

## 4.11 Forekomst og placering af dybmaksima

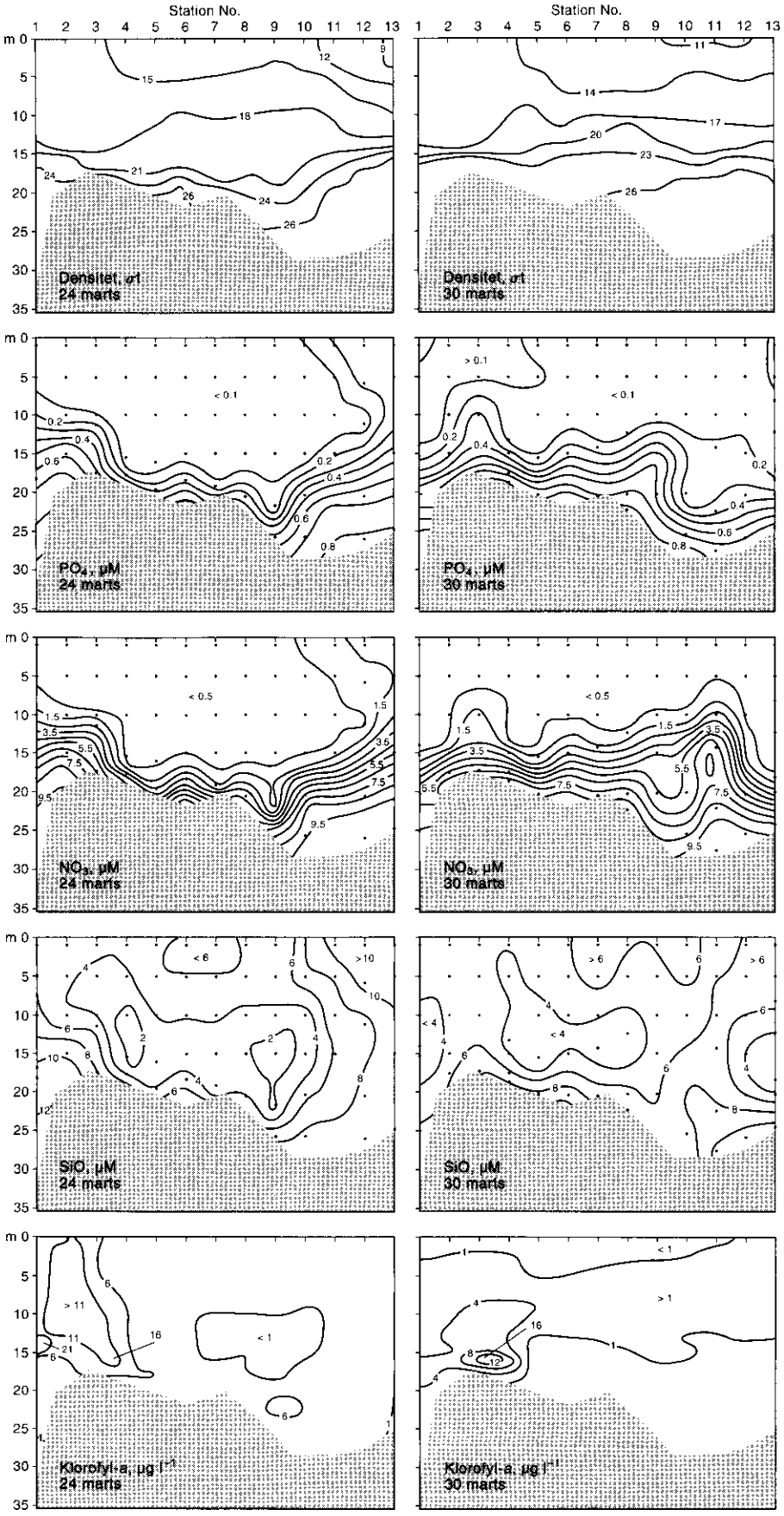
Forekomst af lagdeling og dybmaksima på de undersøgte overvågningsstationer i Kattegat i 1991 - 92 er sammenfattet i Tabel 4.1.

De sydlige stationer (922 og 413) var lagdelt under samtlige 9 togter i sommeren 1991 og 1992, og lagdelingen var da ofte markant (angivet ved + i Tabel 4.1). Haloklinen var som regel placeret mellem 15 og 20 m dybde. På de fleste togter fandtes en nutriklin, enten sammenfaldende med haloklinen eller forskudt få meter nedad. I tre tilfælde lå nitratklinen dybere end fosfatklinen. Dybmaksima af klorofyl blev fundet i 15 ud af 18 observationer på de to sydlige stationer. Placeringen af disse dybmaksima i forhold til haloklinen og nutriklinen viste ikke et entydigt mønster - nogle gange fulgte de haloklinen, nogle gange nutriklinen.

De nordlige stationer (1001, 409 og 403) var kun lagdelt i 10 ud af 18 observationer, og lagdelingen var ofte svag. Dybmaksima af klorofyl forekom i 8 tilfælde. Udfra dette datasæt synes dybmaksima således at forekomme hyppigere på de sydlige end på de nordlige stationer, i modsætning til tendensen fra kapitel 3, hvori data fra DMU's overvågningsmålinger blev analyseret.

Årsagen til dette kan være, at skillefladen og evt. associerede klorofylmaksima ligger dybere i det sydlige end i det nordlige Kattegat og derfor ikke dækkes af de fastlagte prøvetagningsdybder. På de to sydlige stationer lå 11 ud af de 15 dybmaksima af klorofyl dybere end 15 m, medens det for de to nordlige stationer kun var 2 ud af de 8 dybmaksima der lå under 15 m (Tabel 4.1).

Primærproduktionen viste dybmaksima omkring halvdelen af situationerne med klorofyldybmaksima, med en placering og styrke svarende nogenlunde til klorofylen. Bakterieproduktionen viste dybmaksima i 7 tilfælde, hvoraf 4 samtidigt viste dybmaksima i såvel klorofyl og primærproduktion.




***Figur 5.1.*** *Den vertikale fordeling af a) Densitet, b) Fosfat, µM, c) Nitrat, µM, d) Silikat, µM og e) fytoplankton biomasse µg klorofyl a liter$^{-1}$, langs med randen på tværs af det sydlige Kattegat 1) den 25. marts og 2) den 30. marts. Prøvedybderne er vist som punkter.*

# 5 Pyknoklintogt I, marts 1992

## 5.1 Randbetingelser

*Togt 118*

Togt 118 varede fra 24. marts til 2. april 1992. Randbetingelserne blev undersøgt hhv. den 24. og 30. marts (Figur 5.1). Randen var karakteriseret af en kraftig pyknoklin i 15-21 m's dybde (Figur 5.1.a).

### 5.1.1 Næringssalte

*Nutriklin sammenfaldende med pyknoklinen*

Sammenfaldende med pyknoklinen var der udviklet en kraftig nutriklin (nitrat og fosfat). På oversiden af pyknoklinen var fosfatkoncentrationen hhv. under 0,1 og 0,2 µM ved de to gennemsejlninger, koncentrationen var dog væsentlig højere i den østlige og vestlige side i forbindelse med Øresund og Storebælt. Midt i pyknoklinen ved 23 isolinien (1023 kg $m^{-3}$ densitet svarer til 29‰ salinitet) var fosfatkoncentrationen 0,3 µM, hvorunder den steg til mellem 0,8 og 1 µm i bundvandet (Figur 5.1.b).

Den vertikal og horisontale fordeling af nitrat (Figur 5.1.c) svarer til fosfat fordelingen: meget lave værdier i overfladen (< 0,5 µM) stigende over en kraftig nutriklin til koncentrationer > 9,5 µM i bundvandet. Ved den første gennemsejlning blev der observeret relativt høje værdier i den vestlige og østlige del af transektet (Figur 5.1.c).

Fordelingen af silikat (Figur 5.1.d) var mere heterogent end for nitrat og fosfat, idet overfladekoncentrationerne varierede mellem 2 og 6 µM. Ved den første gennemsejlning var værdierne i Øresundsvandet dog over 10 µM (Figur 5.1.c.1). Koncentrationerne i bundvandet var generelt omkring 10 µM, dog over 12 µM i Øresundssiden af randen.

### 5.1.2 Klorofyl

Fordelingen af fytoplankton var karakteriseret ved lave biomasser (1-2 µg klorofyl $liter^{-1}$) øst for station 3 (Figur 5.1.e). Ved den første gennemsejlning blev der målt høje biomasser i Storebæltsvandet, op til 10-20 µg klorofyl *a* $liter^{-1}$, i og over pyknoklinen. Ved den anden gennemsejlning blev de højeste biomasser ligeledes registreret i den vestlige del af transektet, i dette tilfælde dog i selve pyknoklinen (Figur 5.1.b.2).

### 5.1.3 Iltindhold ved bunden

Iltindholdet i bundvandet var konstant på tværs af Kattegat under begge gennemsejlninger. Der blev registreret en mindre reduktion i iltkoncentrationen fra første til anden gennemsejlning fra 8,8±0,4 mg $liter^{-1}$ til 8,2±0,3 mg $liter^{-1}$ svarende til et fald i den gennemsnitlige iltmætning fra 86±3% til 81±4%.

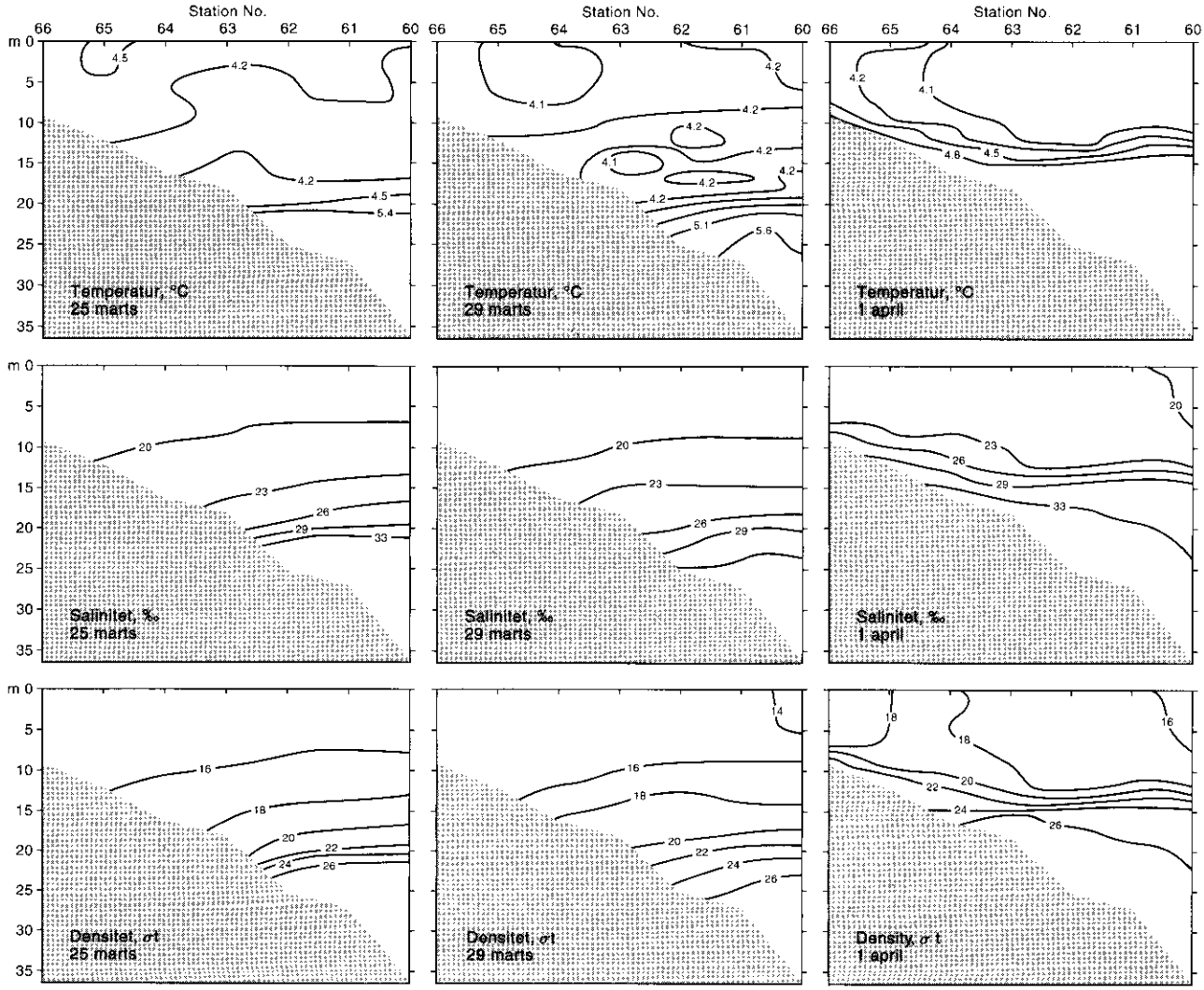
## 5.2 Transektundersøgelserne

*Gradientvandhenteren ikke anvendt*

Intensive biologiske undersøgelser blev foretaget langs med transektet den 25. og 29. marts samt 1. april 1992. På grund af algetoppens store vertikale udbredelse blev gradientvandhenteren ikke anvendt. Vandsøjlens vertikal struktur blev defor undersøgt v.h.a. tæt prøvetagning med rosettevandhenter.

### 5.2.1 Hydrografi

Perioden var karakteriseret ved at vandsøjlen havde en relativ homogen temperaturfordeling (mindre end 2°C forskel mellem overflade og bund) og de laveste temperaturer blev målt i overfladevandet. Et svag temperaturspringlag var dog etableret i 18-20 m's dybde ved de to første gennemsejlinger (Figur 5.2.a.1 & a.2), hvorefter temperaturspringlaget blev løftet op og ind over de lavvandede kyststationer ved gennemsejlningen den 1. april (Figur 5.2.a.3).




***Figur 5.2.*** *Den vertikale fordeling af a) temperatur,°C, b) salinitet, ‰, og c) densitet i forbindelse med de tre gennemsejlinger af transektet.*

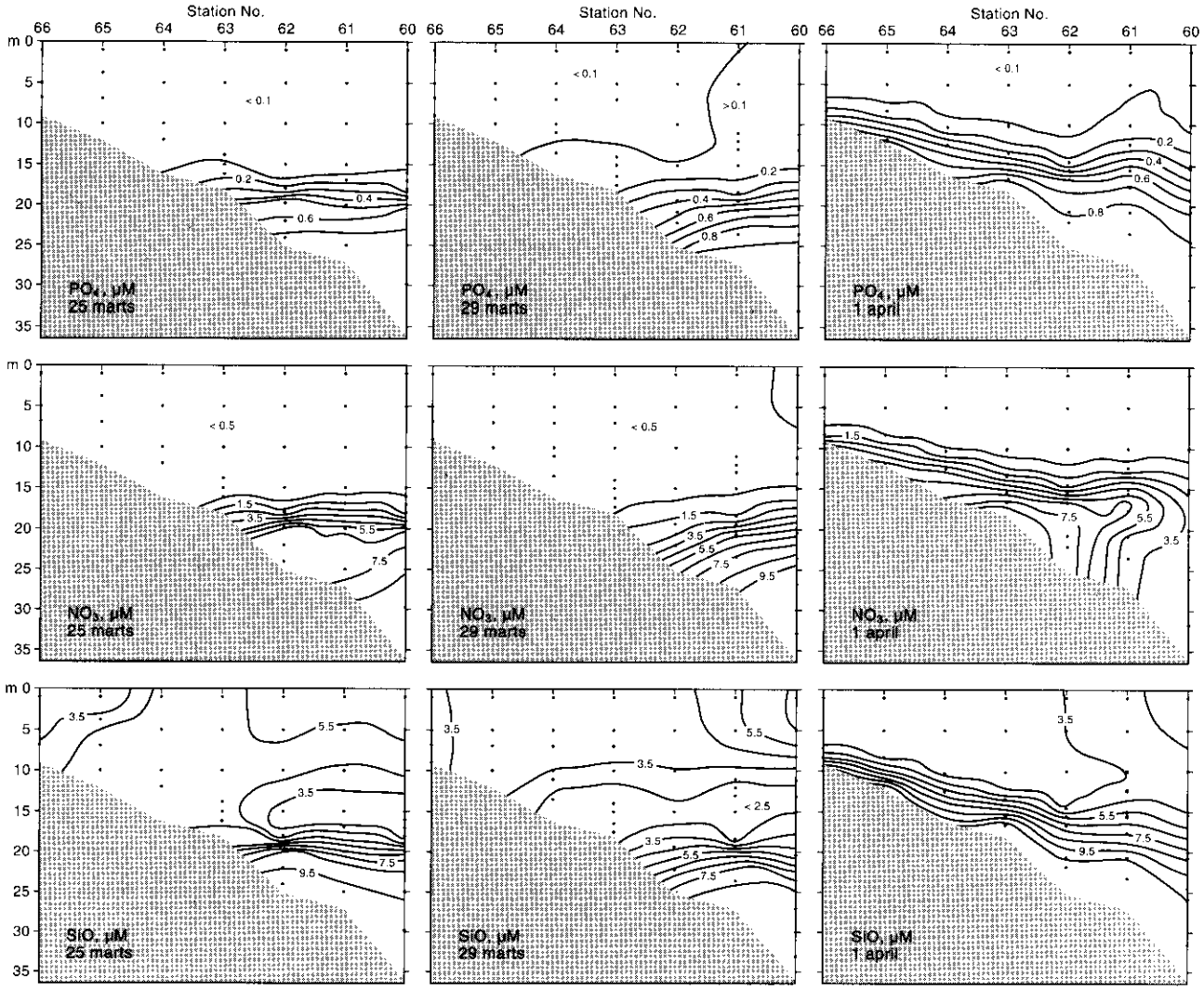
Den vertikale fordeling af saltholdighed var karakteriseret af et springlag i 18-21 meters dybde den 25. og 29. marts, hvorefter et løft af springlaget den 1. april førte salt, varmt bundvand ind på de kystnære stationer (Figur 5.3.b). På grund af de små temperaturforskelle, er temperaturens bidrag til vandsøjlens lagdeling ubetydelig i forhold til saltbidraget, hvorfor densiteten meget nøje afspejler saltfordelingen (Figur 5.2.c).

### 5.2.2 Næringssalte

*Ingen næringssalte over springlaget*

Den vertikale fordeling af næringssalte følger meget nøje placeringen af saltspringlaget, med en kraftig nutriklin sammenfaldende med saltspringlaget.

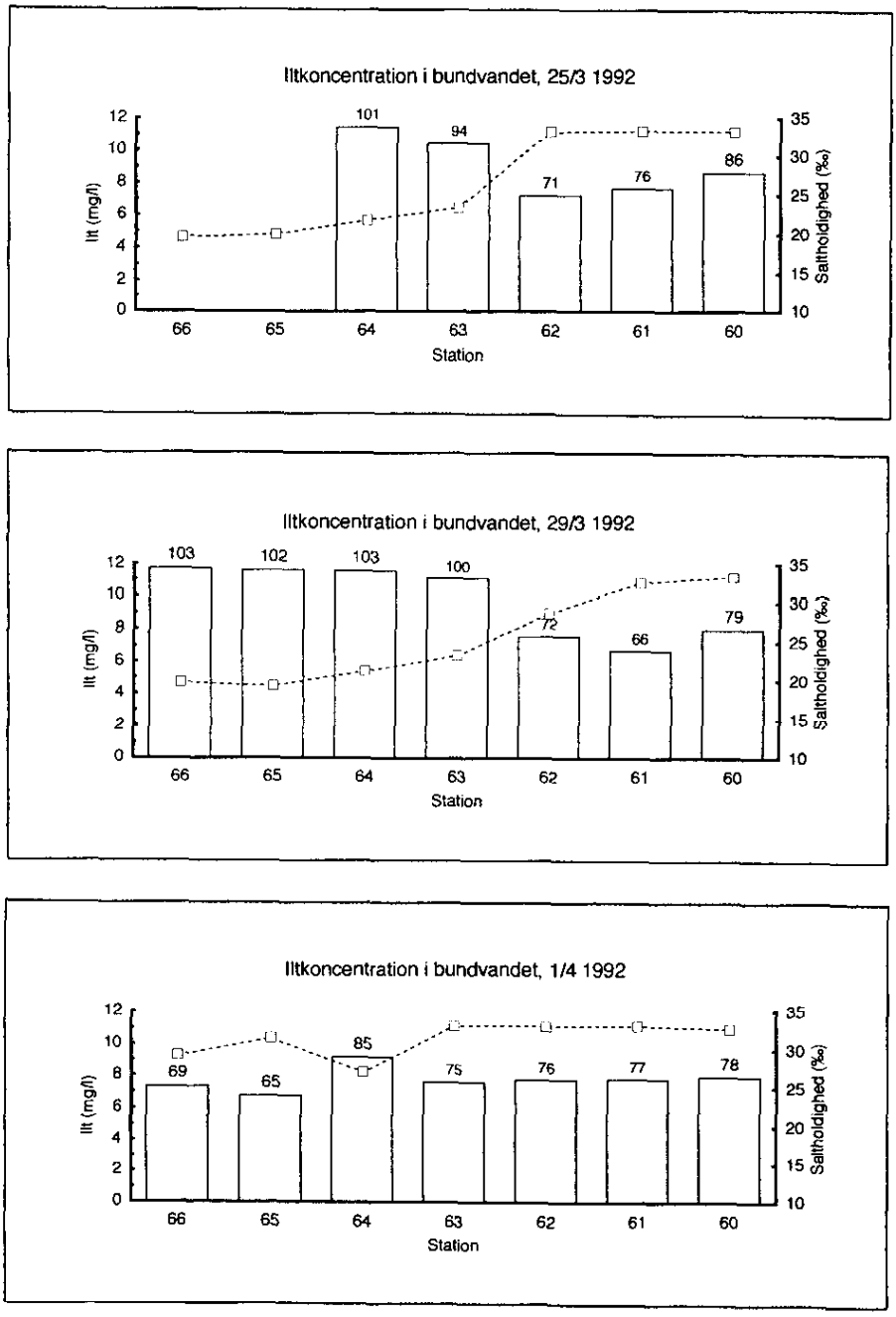
Generelt er fosfatkoncentration lav i overfladen, < 0,1 µM og stigende til koncentrationer på 0,8-1 µM i bundvandet på de tre yderste stationer (Figur 5.3.a) den 25 og 29 marts. I forbindelse med skillefladeløftet den 1. april blev fosfatrigt bundvand ført ind til station 66 (Figur 5.3.a.3).




***Figur 5.3.*** *Den vertikale fordeling af næringssalte langs med transektet under de tre gennemsejlinger a) fosfat, µM, b) nitrat, µM og c) silikat, µM.*

Nitratfordelingen er fuldstændigt parallel til fosfat: meget lave koncentrationer i overfladevandet, en kraftigt nitraklin på de yderste stationer ved den første gennemsejlning. I forbindelse med skillefladeløftet føres nitratrigt bundvand helt ind på de lave kyststationer. (Figur 5.3.b). Nitratkoncentrationen i bundvandet var over 9.5 µM.

Fordelingen af silikat var noget mere heterogen, men følger dog det generelle billede: moderate værdier i overfladen (3,5-5,5 µM), kraftig nutriklin i 18-22 m's dybde, koncentrationer på over 9,5 µM i bundvandet, som føres ind langs bunden i forbindelse med skillefladeløftet den 1 april (Figur 5.3.c).




***Figur 5.4.*** *Iltkoncentration (mg ilt liter$^{-1}$, søjler) og saltholdigheden (‰, stiplede linie) lige over bunden i under de tre transekt gennemsejlinger, værdierne over søjlerne angiver iltmætningen i %.*

### 5.2.3 Iltkoncentrationen ved bunden

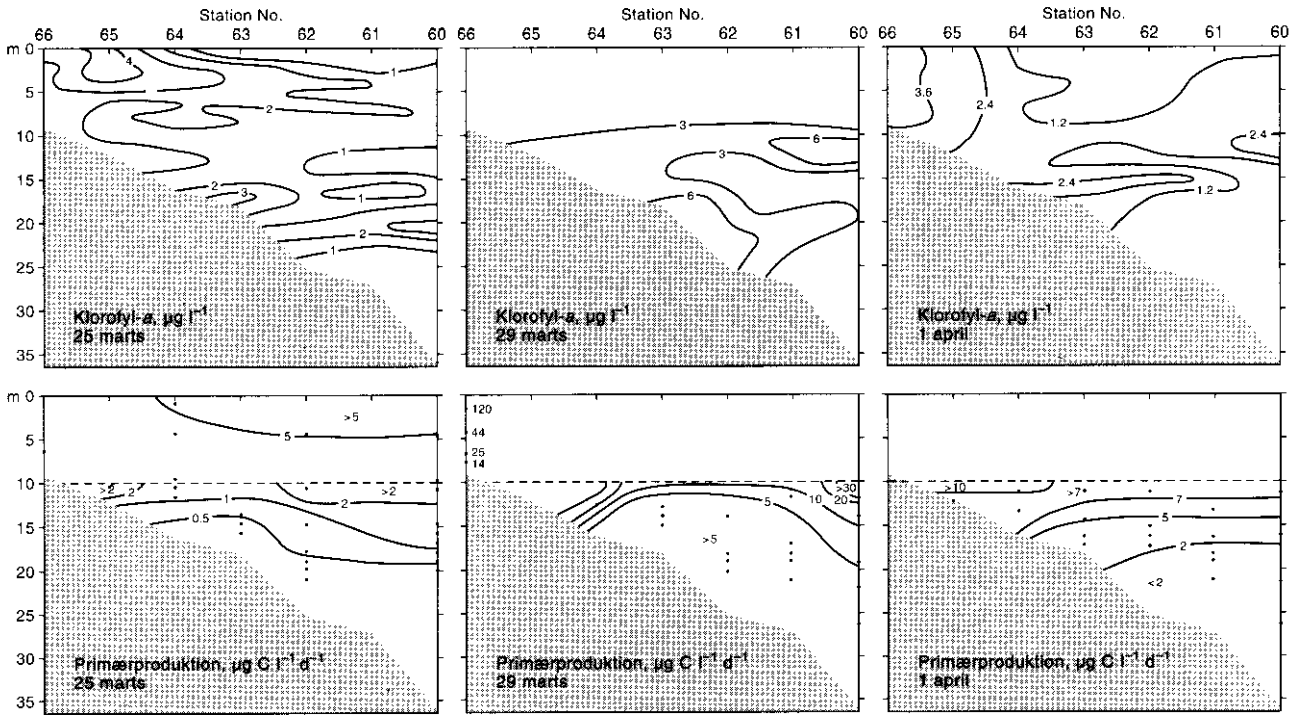
Iltkoncentrationen lige over bunden ændredes langs med transektet. På de inderste opblandede stationer (66-64) var vandet mættet svarende til en iltkoncentration på 11,3±0,5 mg liter$^{-1}$, hvorimod den på undersiden af det område, hvor springlaget er i kontakt med bunden faldt, til 7,7±0,5 mg liter$^{-1}$ svarende til en iltmætning på 75±6% (Figur 5.4.a & b). I forbindelse med skillefladeløftet den 1. april blev det iltfattige vand ført ind mod kysten (Figur 5.4.c).

### 5.2.4 Fytoplanktonbiomasse og -produktion

*Dominans af kiselalger*

Biomassen af fytoplankton, angivet som klorofyl varierede ganske betydeligt mellem de tre gennemsejlninger. Der var dog generelt høje klorofylværdier på de inderste lavvandede stationer (Figur 5.5.a). Fytoplankton var domineret af store kiselalger (*Chaetoceros affinis*, *Coscinodiscus* spp., *Rhizosolenia* sp., *Skeletonema costatum*, *Thalassiosira nordenskioldii*).

Den 25. marts blev der udover de store værdier ved kysten registreret høje koncentrationer af klorofyl på undersiden af springlaget på de to yderste stationer (Figur 5.5.a.1). I forbindelse med det andet transekt blev der målt biomasser på 5-10 µg klorofyl liter$^{-1}$ i den nederste del af overfladelaget på de tre yderste stationer. Desuden var der høje værdier omkring saltspringlaget i området, hvor laget rammer bunden (Figur 5.5.a.2). Den sidste gennemsejlning viste en tunge af høje klorofylværdier i pyknoklinen på station 62-64 og på de kystnære stationer.



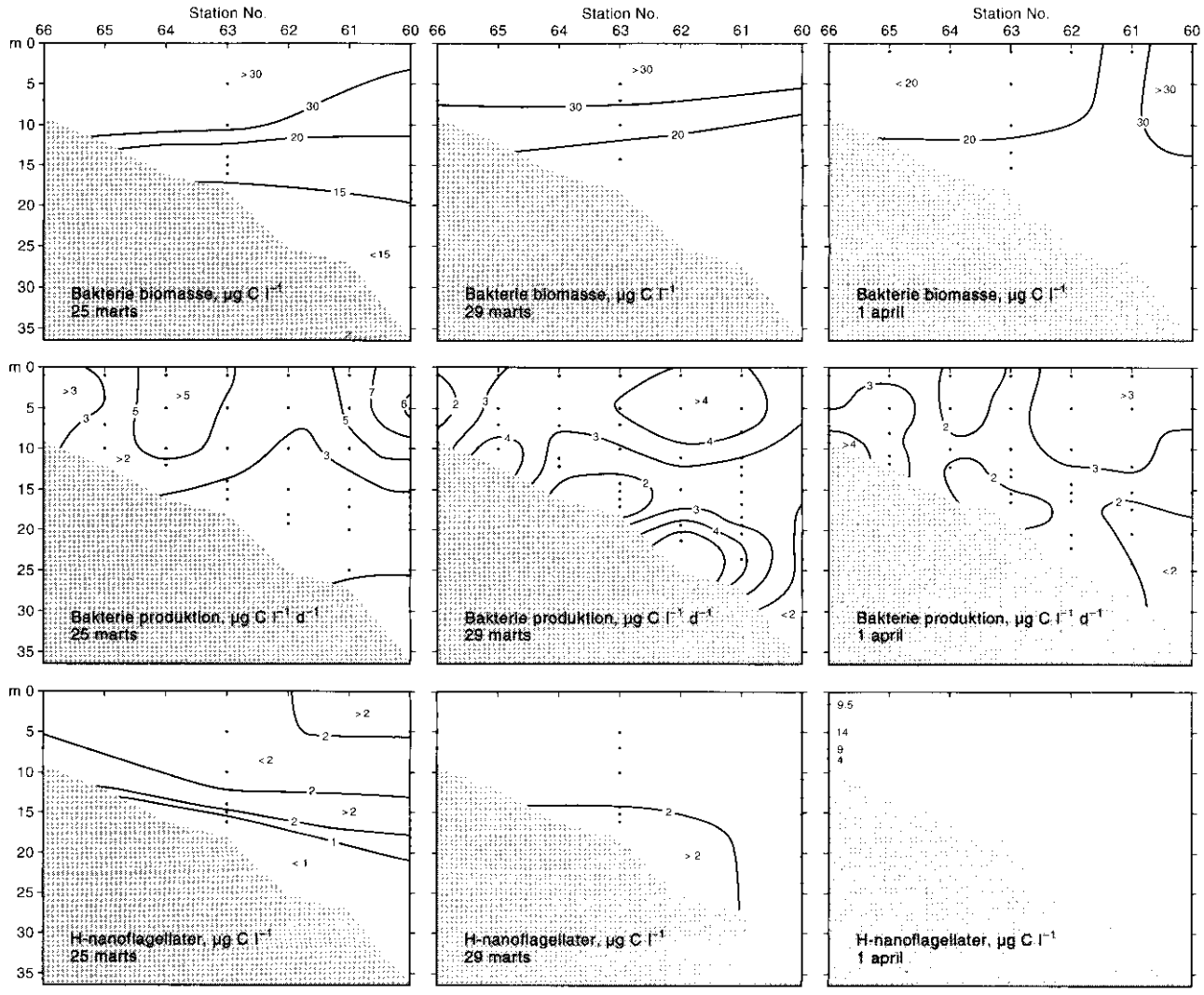

***Figur 5.5.*** *Den vertikale fordeling af a) fytoplanktonbiomasse (µg klorofyl a liter$^{-1}$) og b) primærproduktion (µg C liter$^{-1}$ dag$^{-1}$) langs med transektet under de tre gennemsejlinger. Målingerne over den stiplede linie på de to første transekter stammer fra laboratorieinkubationerne, mens de resterende stammer fra grøntlysinkubatoren, hvorfor de ikke er direkte sammenlignelige (se afs. 2.4.2).*

Primærproduktionen var generelt højest i den øverste del af vandsøjlen. Den 25. marts var primærproduktionen 2-5 µg C liter$^{-1}$ dag$^{-1}$. Den 29. marts blev vandsøjlens højeste produktion observeret lige i oversiden af springlaget sammenfaldende med nutriklinen, samt på den kystnære station 66 (Figur 5.5.b.2). Under den sidste transektgennemsejlning blev de højeste primærproduktioner målt på de lavvandede kystnære stationer, hvor også de højeste algebiomasser blev registreret (Figur 5.5.b.3).

### 5.2.5 Bakterieplankton og heterotrofe nanoflagellater

Den vertikale fordeling af bakteriebiomassen var ensartet under hele togtet (Figur 5.6.a). Biomassen var 30-50 µg C liter$^{-1}$ i overfladen, og 15-20 µg C liter$^{-1}$ i bundvandet.

Bakterieproduktionen var generelt højest over springlaget (3-9 µg C liter$^{-1}$ dag$^{-1}$). Tilsyneladende var der intet respons på de høje klorofyl værdier i springlaget. Under springlaget var bakterieproduktionen generelt lav, < 2 µg C liter$^{-1}$ dag$^{-1}$, til trods for de høje næringssalt- og fytoplankton-koncentrationer (Figur 5.6.1.b).




*Figur 5.6. Den vertikale fordeling af a) biomasse (µg C liter $^{-1}$) og b) produktion (µg C liter$^{-1}$ dag$^{-1}$) af bakterioplanktonets samt c) biomassen heterotrofe nanoflagellater (µg C liter$^{-1}$) langs med transektet.*

Biomassen af heterotrofe nanoflagellater var lav under de to første transekt-gennemsejlinger (< 2 µg C liter$^{-1}$), Biomasserene var lidt forøgede i skillefladen den 25. marts (Figur 5.6.c.1) og i området, hvor skillefladen rammer bunden ved anden gennemsejling (Figur 5.6.c.2). Den 1. april blev observeret biomasser over 10 µg C liter$^{-1}$ på den kystnære station sammenfaldende med de høje algebiomasser.

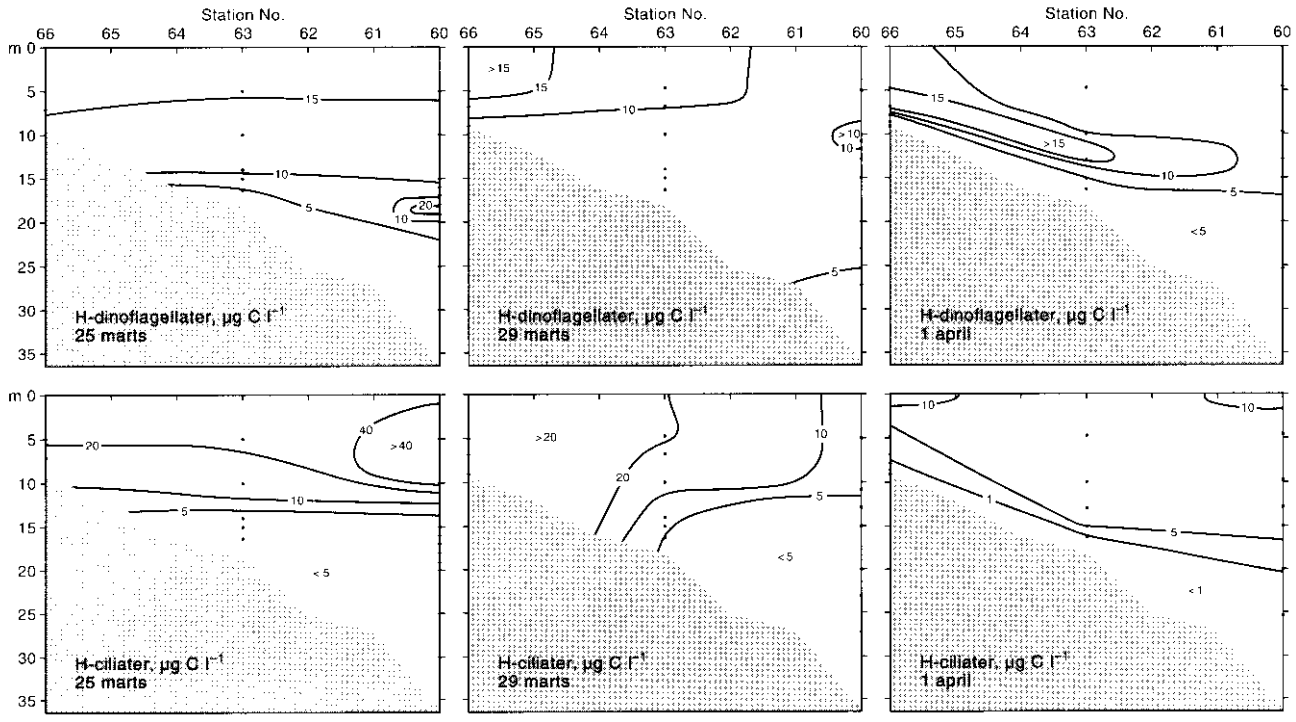
### 5.2.6 Mikrozooplankton

*Ciliaterne dominerede*

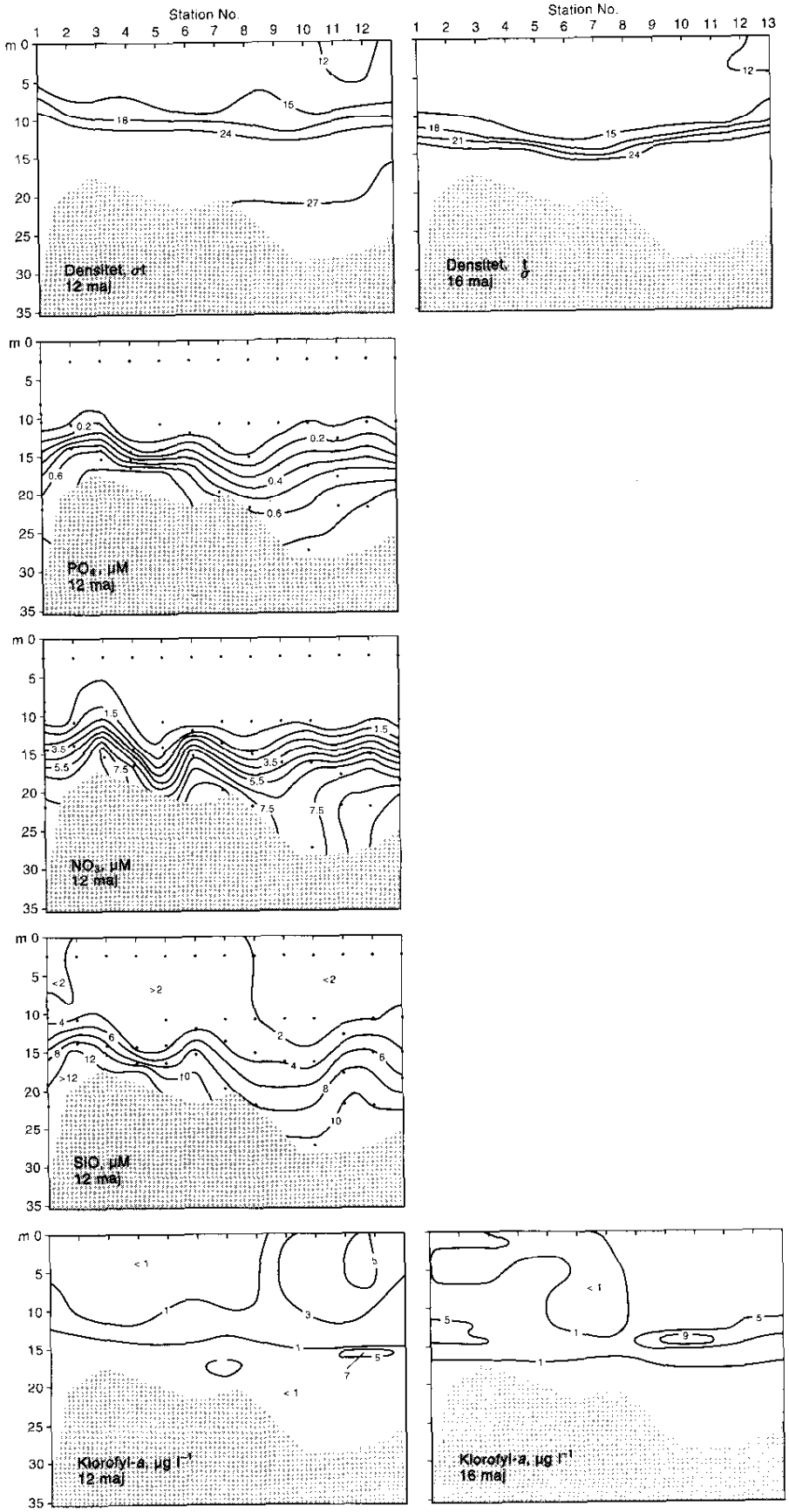
Biomassen af mikrozooplankton var meget høj og ciliaterne dominerede i den øverste del af vandsøjlen, op til 100 µg C liter$^{-1}$, under de to første gennemsejlinger af transektet. De biomassemæssigt vigtigste ciliater var de store litostomatide former *Cyclotrichium* spp. og rovciliater af slægten *Didinium* spp.. Desuden udgjorde nøgne oligotriche ciliater en væsentlig del af biomassen (*Lohmaniella oviformis*, *Strombidium* spp. og *Tontonia* sp.).

Under den sidste gennemsejlning var der et kraftigt respons i biomassen af heterotrofe dinoflagellater på de høje algebiomasser langs med kysten og i skillefladen (Figur 5.7.b.3). Biomassen af heterotrofe dinoflagellater var domineret af store nøgne former (*Gyrodinium spirale* og *Gyrodinium* spp.)

Sammenlignet med ciliaterne viste de heterotrofe dinoflagellater en mere jævn fordeling ned gennem vandsøjlen. De fulgte i modsætning til ciliaterne ændringerne i algebiomassen.




***Figur 5.7.*** *Den vertikale fordeling af mikrozooplankton langs med transektet under de tre gennemsejlninger a) Hetero/mixotrofe ciliater (µg C liter$^{-1}$) og b) Heterotrofe dinoflagellater (µg C liter$^{-1}$).*




***Figur 6.1.*** *Den vertikale fordeling af a) densitet, b) fosfat, µM, c) nitrat, µM, d) silikat, µM og fytoplankton biomasse, (µg klorofyl a liter$^{-1}$), i forbindelse med de to gennemsejlninger af randen i det sydlige Kattegat 1) 11. maj og 2) 21. maj. Prøvetagningsdybderne er vist som punkter.*

# 6 Pyknoklintogt II, maj 1992

## 6.1 Randbetingelser

*Togt 119*

Togt 119 varede fra den 11. til 21. maj 1992. Randbetingelserne blev undersøgt den 12. og den 16. maj. Under den sidste gennemsejlning blev der på grund af forsinkelser ikke taget vandprøver, hvorfor der ikke eksisterer isopleter over næringssaltfordelingen. Ved begge gennemsejlinger var der en meget skarp pyknoklin i 12-14 m dybde (Figur 6.1.a).

### 6.1.1 Næringssalte

*Nutriklinen under pyknoklinen*

I modsætning til togt 118 lå næringssaltspringlaget under pyknoklinen (Figur 6.1.b-d). Generelt var der lave fosfat- og nitratkoncentrationer på oversiden af pyknoklinen hhv. < 0,1 µM og < 0,5 µM. I niveauet svarende til 24 isolinien for densitet var koncentrationerne af fosfat, nitrat og silikat var hhv. 0.2 µM, 1.5 µM og 4 µM. Koncentrationen af silikat var lav i overfladen: midt på randen 1-2 µM og omkring 2 µM i Storebælt- og Øresundsiden af randen. Bundvandskoncentrationerne for de tre næringssalte var hhv. 0.8, 8 og 8 µM. Koncentrationerne af silikat var dog væsentligt højere (13 - 14 µM) i bundvandet i Storebælt og Øresundsiden af randen.

### 6.1.2 Klorofyl

På grund af indberetninger om opblomstring af den potentielt giftige stilkalge (*Chrysochromulina* spp.) i Lillebælt og Kattegat i ugerne op til togtet (Hansen *et al*, 1994), blev der taget vandprøver til arstbestemmelse af alger i overfladen og springlaget langs med randen. Under mikroskoperingen af prøverne fandt vi dog ingen stilkalger. Klorofylkoncentrationen i overfladevandet i den vestlige del af randen var lav, < 1 µg liter$^{-1}$. I Øresundsvandet blev målt noget højere koncentrationer og her blev der observeret forhøjede koncentrationer lige under springlaget på op til 7 µg klorofyl liter$^{-1}$ (Figur 6.1.e.1). Ved gennemsejlningen den 16. maj blev der registreret et maksimum under springlaget ved de vestlige og østlige sider af randen med klorofylkoncentrationer på 10-15 µg liter$^{-1}$ (Figur. 6.1.e.2).

### 6.1.3 Iltkoncentrationen ved bunden

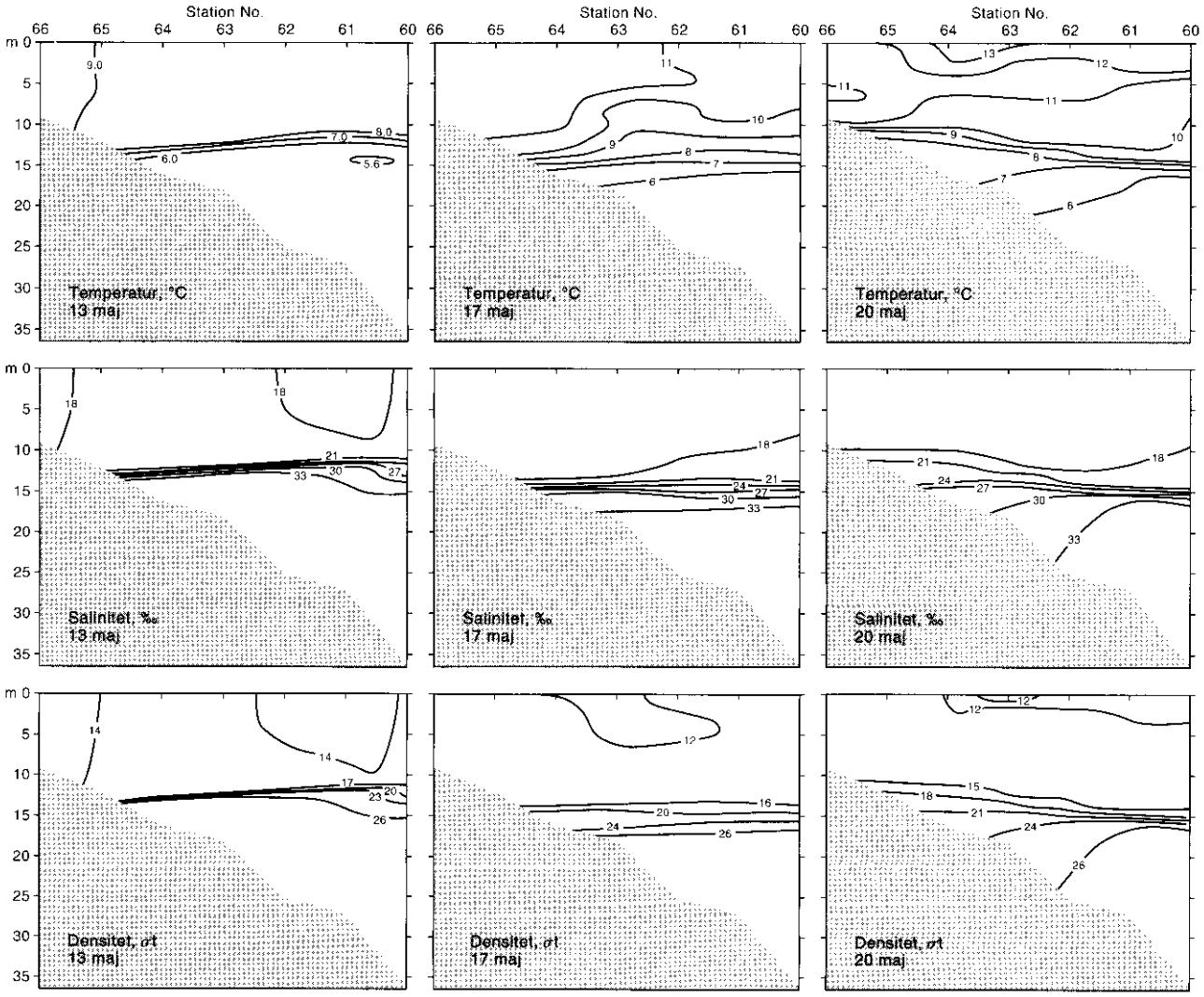
Iltkoncentrationen i bundvandet var relativt konstant langs med randen (6,7 ± 0,1 mg ilt liter$^{-1}$ svarende til en iltmætning på 66 ± 2%). Sammenlignet med togtet i marts var iltkoncentrationen i bundvandet reduceret med ca. 20%.

## 6.2 Transektundersøgelserne

### 6.2.1 Hydrografi

*Kraftig opvarmning af overfladevandet*

Langs med transektet var der et skarpt saltspringlag i 15-16 m's dybde. Overfladevandets salinitet var ca. 17‰ og bundvandet omkring 33‰ (Figur. 6.2.a.1-3). Springlaget ramte bunden mellem station 64 og 65. Sammenfaldende med saltspringlaget var der etableret et temperaturspringlag som i løbet af togtet blev forstærket af den kraftige indstråling. Temperaturen i overfladen steg fra 8-9°C ved første gennemsejling til 12-13°C ved den sidste transekt gennemsejlning (Figur 6.2.b.1-3). Temperaturen på undersiden af den primære skilleflade var generelt under < 6°C.

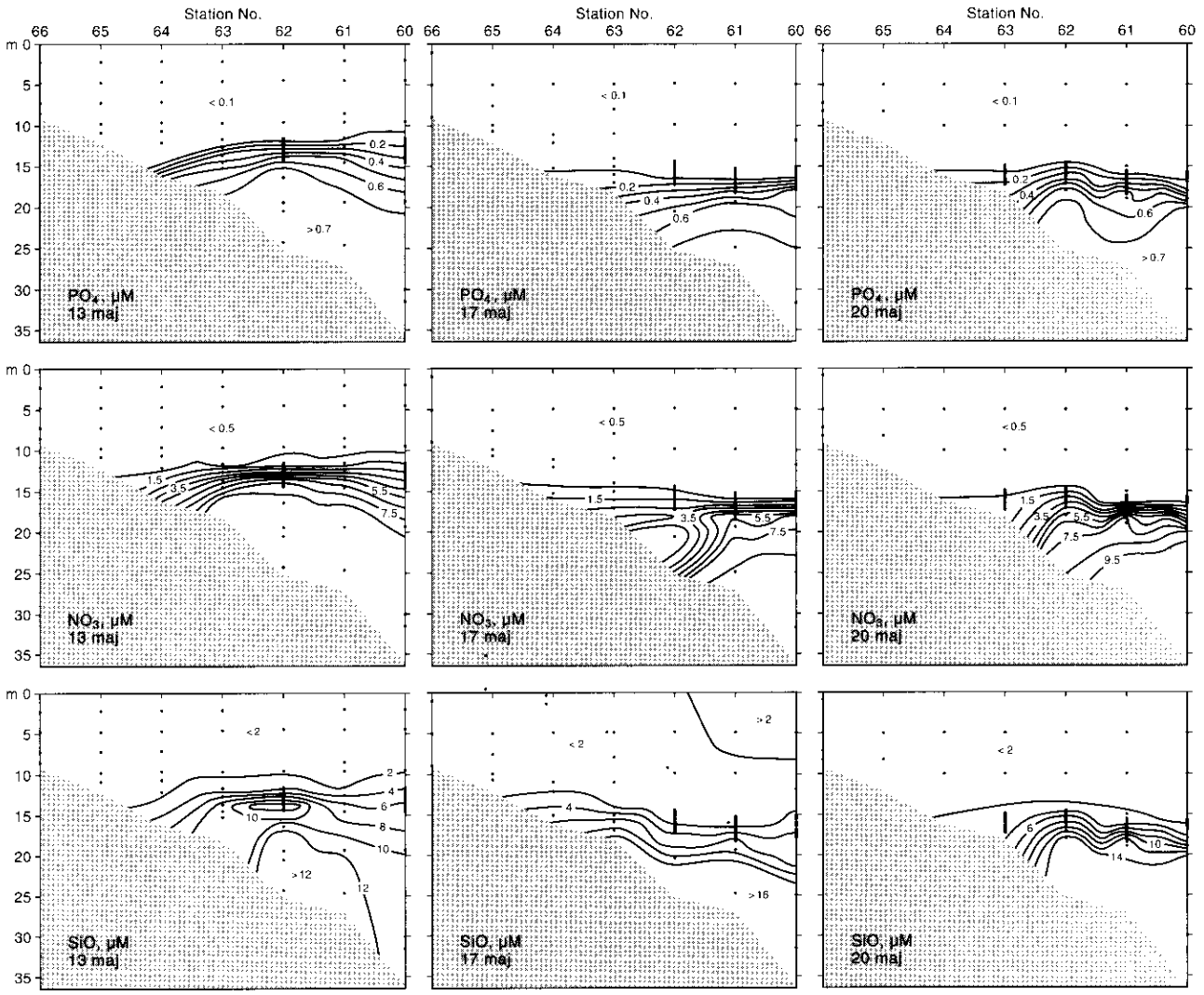



***Figur 6.2.*** *Den vertikale fordeling af a) temperatur,°C, b) salinitet, ‰, og c) densitet i forbindelse med de tre gennemsejlinger af transektet.*

### 6.2.2 Næringssalte

*Reduktion i dybden af nutriklinen*

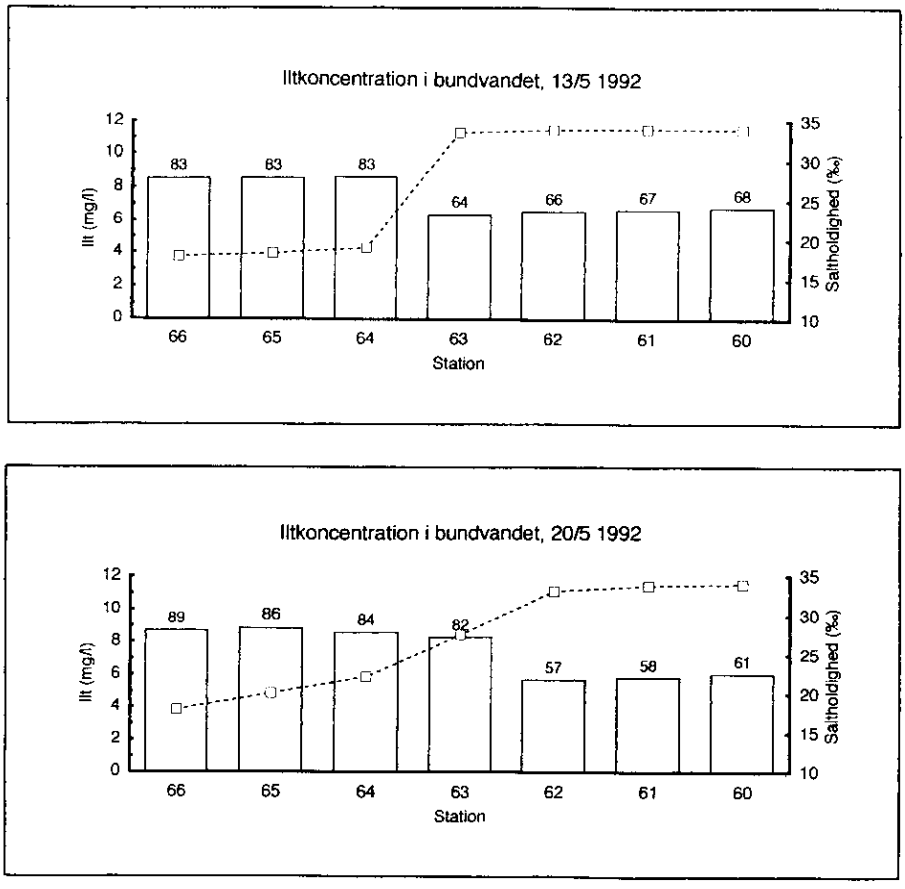
Koncentrationen af næringssalte over springlaget var generelt meget lavt (Figur 6.3.a-c). I løbet af de tre gennemsejlinger blev der registreret en reduktion i dybden af nutriklinen. Under den første gennemsejling var der ved 33‰ isolinien hhv. 0,4, 4,5 og 6 µM fosfat, nitrat og silikat (Figur 6.3. a-c), hvor de tilsvarende parametre ved den sidste gennemsejlning var redu ret til 0.1, 0,5 og 3 µM (Figur 6.3.a.3-c.3). Årsagen til dette er sandsynligvis et forbrug i perioden efter første gennemsejling.




***Figur 6.3.*** *Den vertikale fordeling af næringssalte langs med transektet under de tre gennemsejlinger a) fosfat, µM, b) nitrat, µM og c) silikat, µM.*

### 6.2.3 Iltkoncentrationen ved bunden

Iltkoncentrationen i bundvandet fulgte mønsteret observeret under marts-togtet med de højeste koncentrationer på de kystnære opblandede stationer (ca. 8,6 ± 0,2 mg ilt liter$^{-1}$) og lave koncentrationer på undersiden af springlagt (Figur 5.4). Iltkoncentrationen blev kun undersøgt i forbindelse med den første og den sidste transektundersøgelse. I løbet af denne 7 dages periode blev iltkoncentrationen i bundvandet reduceret fra 6,6 ± 0,2 mg ilt liter$^{-1}$ ved starten af togtet til 5.9 ± 0.2 mg ilt liter$^{-1}$ ved gennemsejlningen 20. maj (Figur 5.4.c). Dette svarer til et fald i iltmætningen på 10%.




***Figur 6.4.*** *Iltkoncentration ( mg ilt liter$^{-1}$, søjler) og saltholdigheden (‰, stiplede linie) lige over bunden i under de to transekt gennemsejlinger a) 13. maj og b) 20. maj, værdierne over søjlerne angiver iltmætningen i %.*

Under døgnundersøgelserne blev iltforbruget i og omkring springlaget undersøgt ved inkubation af vandprøver (Tabel 6.1).

***Tabel 6.1.*** *Iltforbruget omkring skillefladen på de to døgnstationer.*

| Station | Salinitet ‰ | Temperatur °C | Iltforbrug µM ilt døgn$^{-1}$ |
|---|---|---|---|
| 60 | 19.37 | 6 | 3.55 |
| | 23.21 | 6 | 5.38 |
| | 24.75 | 6 | 6.72 |
| | 27.18 | 6 | 3.84 |
| 63 | 21.81 | 6 | 7.08 |
| | 28.11 | 6 | 7.56 |
| | 29.40 | 6 | 6.12 |
| | 29.38 | 6 | 5.4 |
| | 30.82 | 6 | 6.0 |

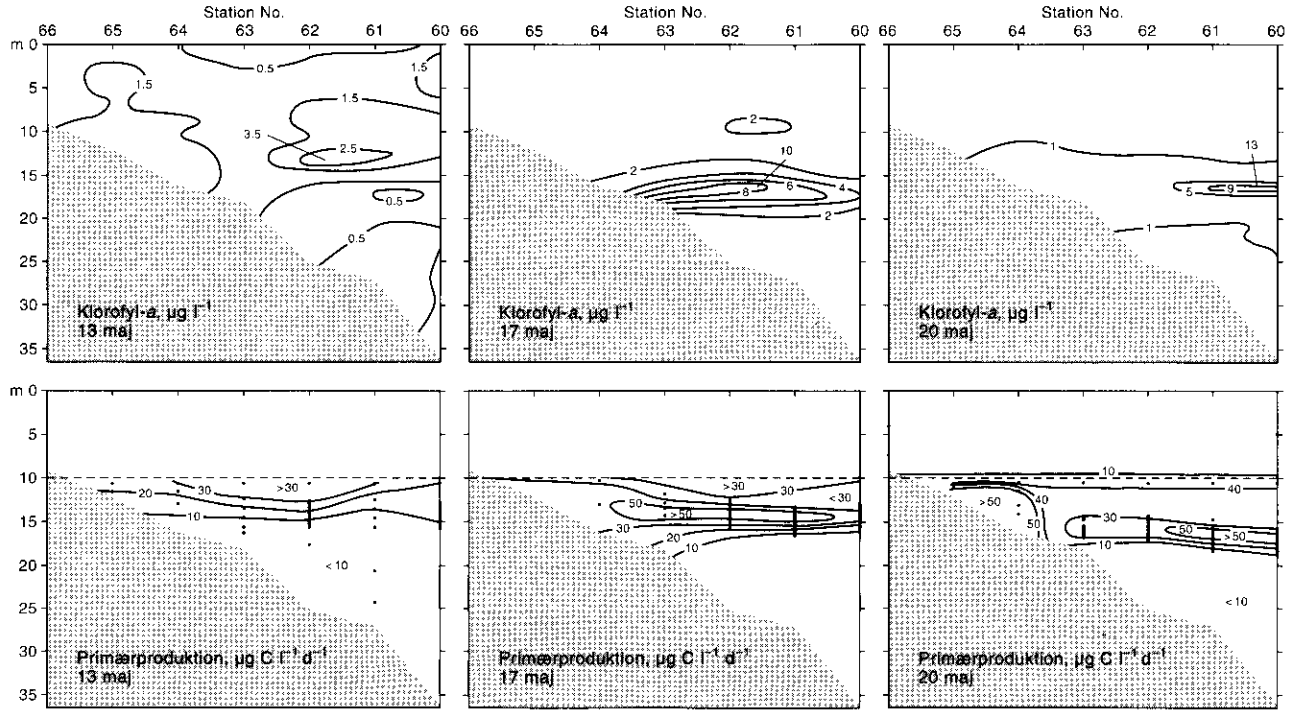
### 6.2.4 Fytoplanktonbiomasse og -produktion

Under den første gennemsejlning af transektet var der ca. 1 µg klorofyl liter$^{-1}$ i overfladevandet. Der blev registreret et dybmaksimum på undersiden af springlaget sammenfaldende med 33‰ salinitetisolinien på station 62 og 63. Biomassen blev her målt til 3,5 µg klorofyl liter$^{-1}$ (Figur 6.4.a.1). Den 17. maj var klorofylniveauet over springlaget ca. dobbelt så højt som ved den første gennemsejlning. På undersiden af pyknoklinen, ved 33‰ isolinien og midt i nutriklinen, blev et maxima med klorofylkoncentrationer på 6 - 10 µg liter$^{-1}$ registreret (Figur 6.4.a.2). Den vertikale fytoplanktonfordeling under det tredje transekt svarede til observationerne den 17. maj (Figur 6.4.a.3).

*Kiselalger dominerede*

Algebiomassen var domineret af kædedannende kiselalger (*Skeletonema costatum, Thallassiosira anguste-lineata, T. nordenskioldii*) og dinoflagellater (*Dinophysis norvegica, Ceratium longipes* og *C. lineatum*) og ikke som forventet af nanoflagellater.

Efter den første transektgennemsejlning udvikledes en primærproduktionstop på oversiden af algelaget på de yderste dybe stationer. Produktionen her var større end 50 µg C liter$^{-1}$ dag$^{-1}$ (Figur 6.4.c.2 & 3).




***Figur 6.5.*** *Den vertikale fordeling af a) fytoplankton biomasse (µg klorofyl a liter$^{-1}$) og b) primærproduktion (µg C liter$^{-1}$ dag$^{-1}$) langs med transektet under de tre gennemsejlinger. Målingerne over den stiplede linie på de to første transekter stammer fra laboratorie- inkubationer mens de resterende stammer fra grøntlysinkubatoren, hvorfor de ikke er direkte sammenlignelige ( se afsnit 2.4.2).*

### 6.2.5 Bakterieplankton og heterotrofe nanoflagellater

Biomassen af bakterier varierede mellem 15 og 50 µg C liter$^{-1}$. Biomassen var generelt lavere i bundvandet end i springlag og overfladelag (Figur 6.5.a).

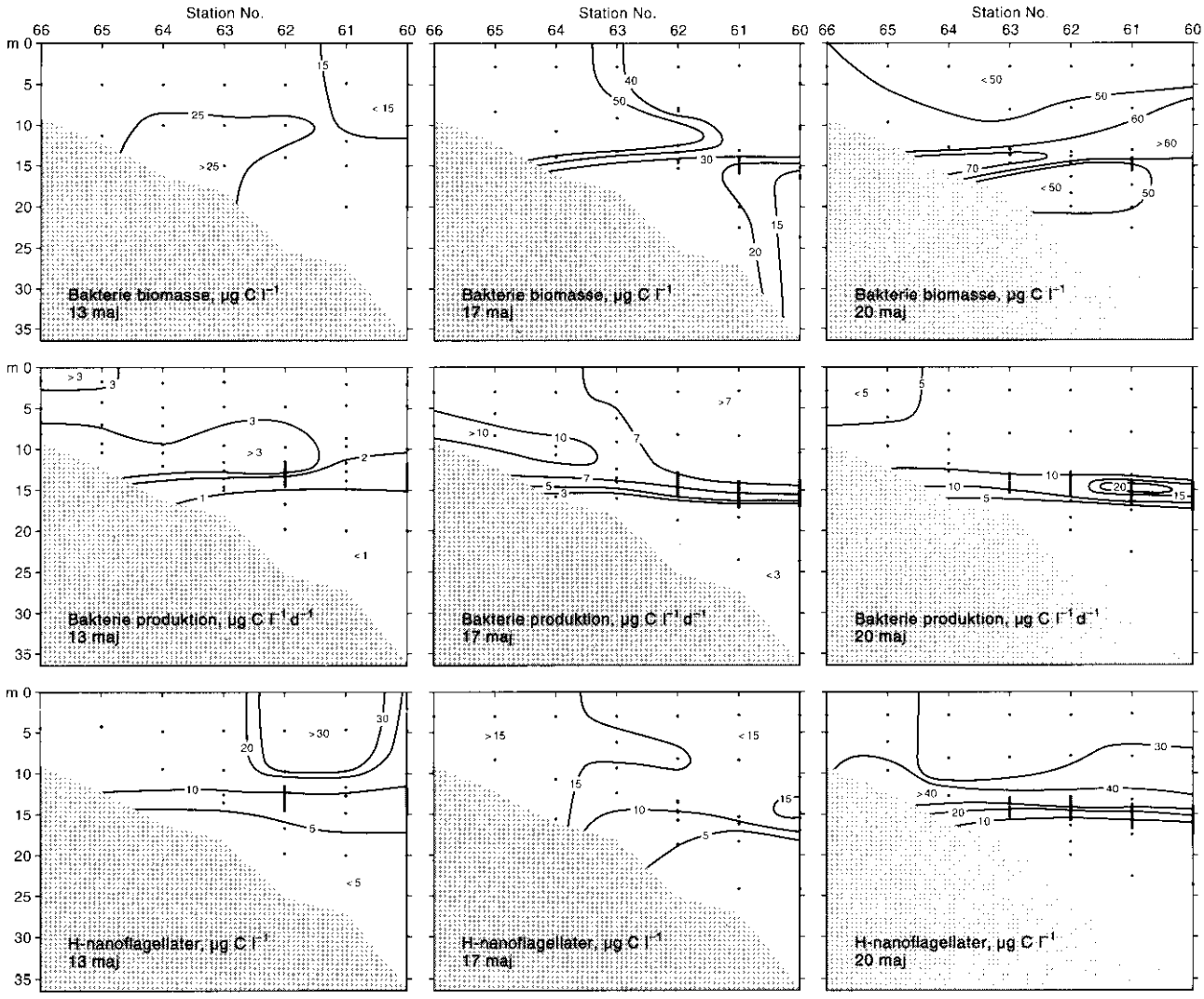
Bakterieproduktionen steg i løbet af togtet fra ca 2 til 10 µg C liter$^{-1}$. Produktionen var generelt højest i eller over springlaget; under den sidste gennemsejlning var produktionen i klorofylmaksimumlaget 15-20 µg C liter dag$^{-1}$. Denne høje produktion var sammenfaldende med et dybmaksimum i biomassen af heterotrofe nanoflagellater (Figur 5.3.c.3.).

Biomassen af heterotrofe nanoflagellater var høj i overfladevandet (15-30 µg C liter$^{-1}$) og faldt til under 5 µg C på undersiden af springlaget (Figur 6.5.c).

### 6.2.6 Mikrozooplankton

*Dominans af heterotrofe dinoflagellater*

Biomassen af mikrozooplankton i overfladen varierede mellem 2 og 4 µg C liter$^{-1}$. I modsætning til martstogtet var mikrozooplanktonsamfundet domineret af heterotrofe dinoflagellater (Figur 6.6). De nøgne former var bio-massemæssigt de mest betydende (*Gyrodinium spirale, G. dominans* og *G. glaucum*) mens de thekate former kun udgjorde 10 - 20% af biomassen



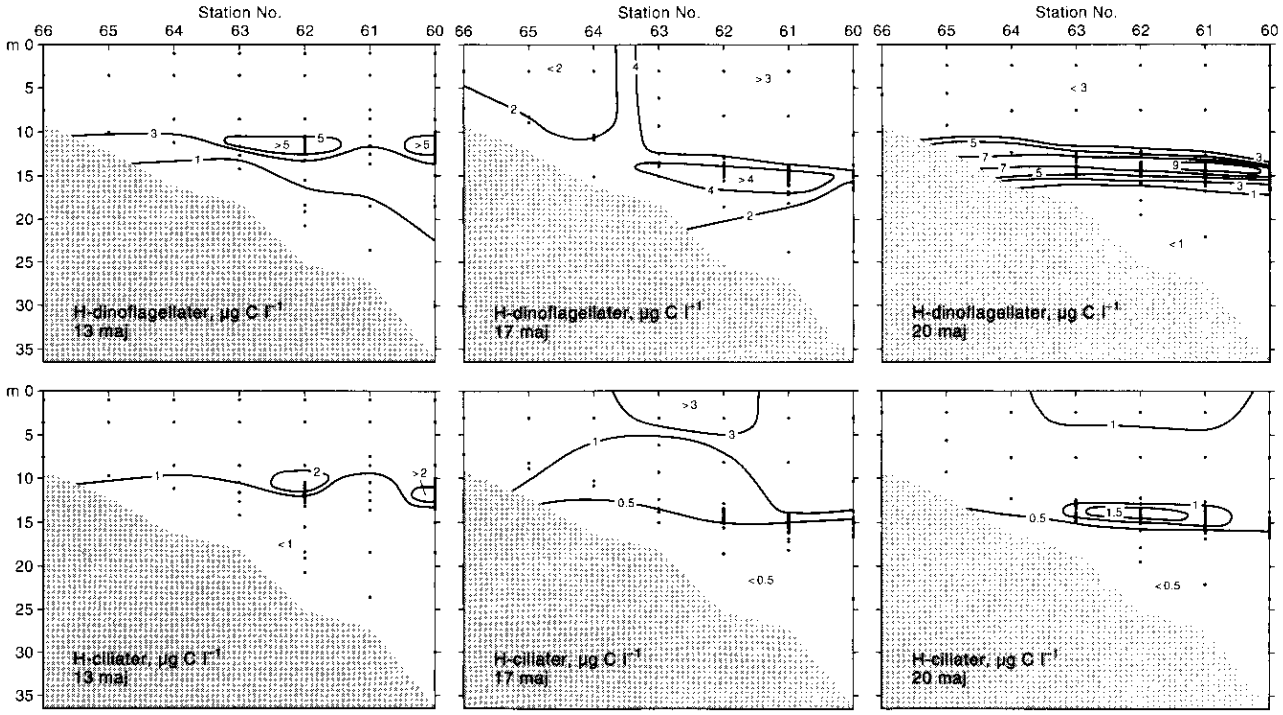

***Figur 6.6.*** *Den vertikale fordeling af bakterieplanktonets a) biomasse (µg C liter $^{-1}$) og b) produktion (µg C liter$^{-1}$ dag$^{-1}$) samt af c) biomassen af heterotrofe nanoflagellater (µg C liter$^{-1}$) langs med transektet.*

(*Protoperidinium depressum* og *P. bipes*). Under de to sidste transekter var der en kraftigt stigning i biomassen af de heterotrofe dinoflagellater sammenfaldende med det dybtliggende maksimum af kiselalger (Figur 6.1.a.2 & 3).

Biomassen af ciliater var meget lavere end på det foregående togt (1-3 µg C liter$^{-1}$), men den vertikale fordeling viste fortsat de højeste biomasser i overfladelaget. Ciliatsamfundet var domineret af nøgne ciliater (*Laboea coronata*, *Strombidium* spp. 20-40 µm, *Tontonia* spp. og rovciliaten *Didinium* spp.). I forbindelse med den sidste transekt-gennemsejlning var der et maksimum i ciliatbiomassen sammenfaldende med klorofyltoppen i springlaget (Figur 6.6.b.3).

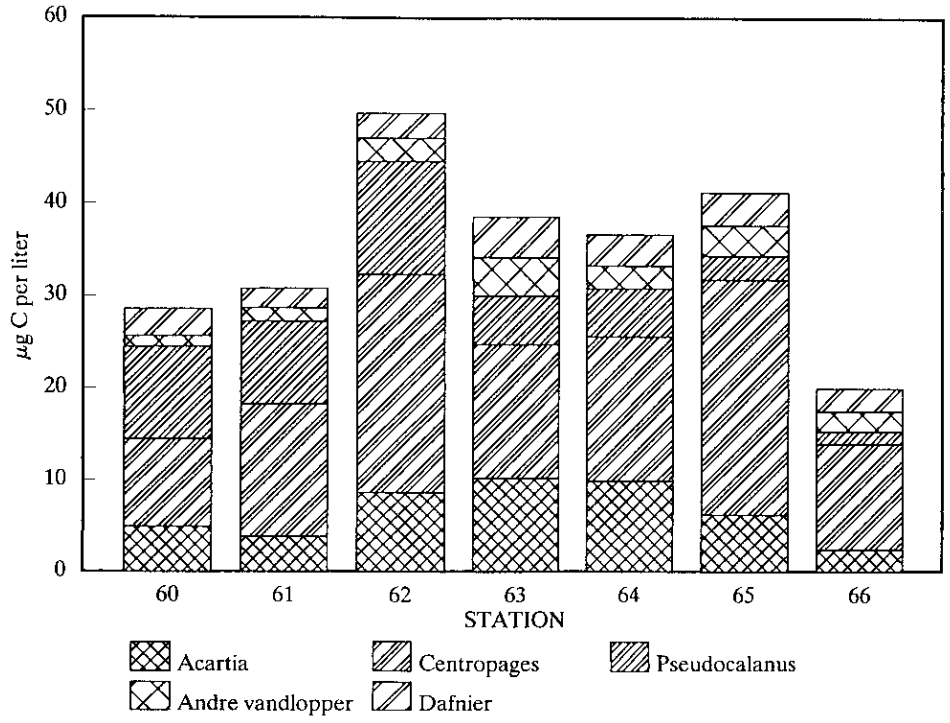
### 6.2.7 Mesozooplankton

Mesozooplanktonets biomasse langs med transektet den 20. maj er vist på Figur 6.8. Den gennemsnitlige biomasse var 38 ± 8 µg kulstof liter$^{-1}$. Biomassen toppede på station 62 med 48 µg kulstof liter$^{-1}$ og var generelt høj




***Figur 6.7.*** *Den vertikale fordeling af mikrozooplankton langs med transektet under de tre gennemsejlninger: a) hetero/mixotrofe ciliater µg C liter$^{-1}$ og b) heterotrofe dinoflagellater µg C liter$^{-1}$*

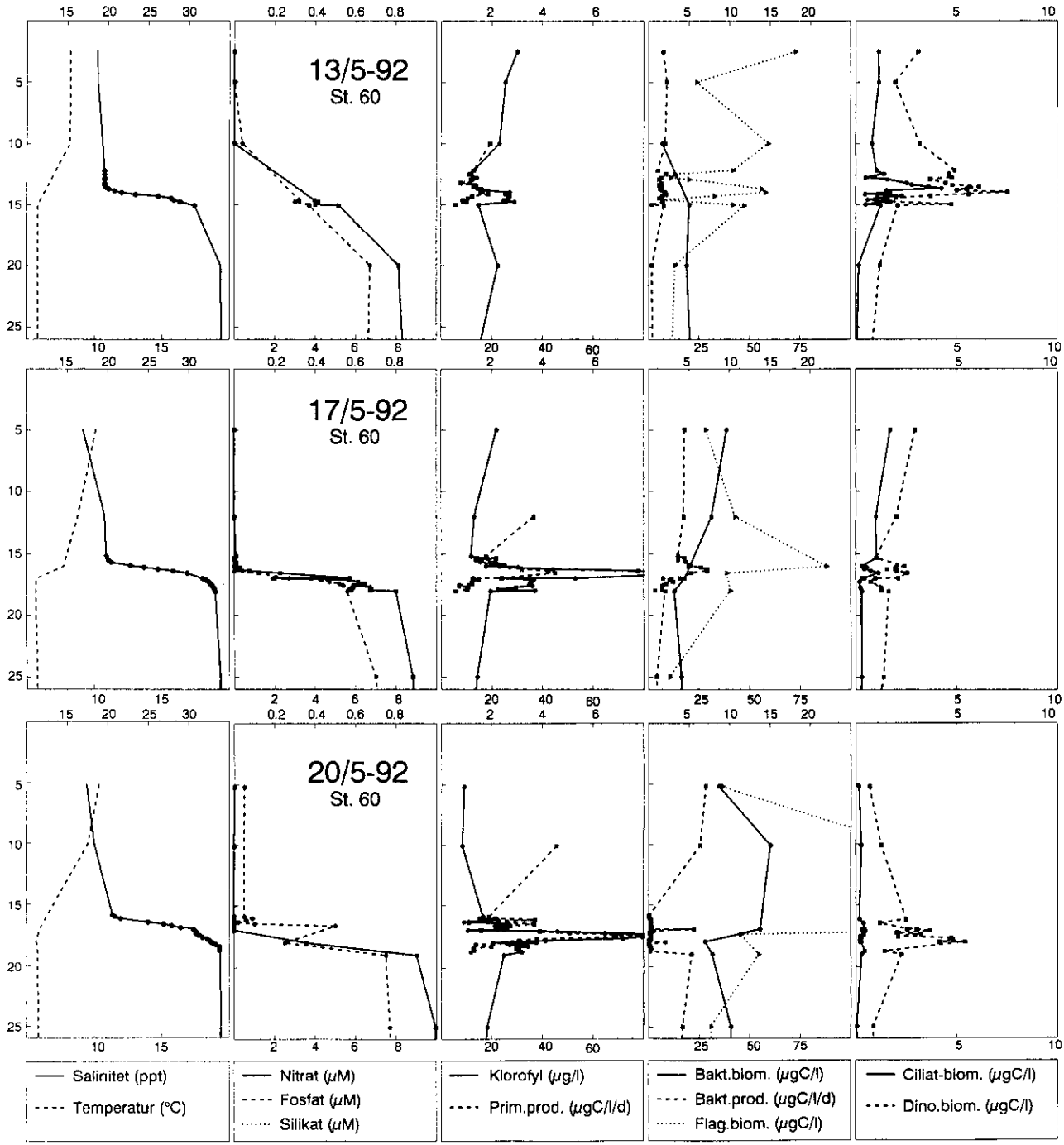
i det området, hvor springlaget var i kontakt med bunden (station 62 - 65, Figur 6.2.a.3-c.3). Biomassen var domineret af vandlopper og dafnier, som udgjorde 98 ± 1 % af biomassen. Tre vandloppeslægter *Acartia*, *Centropages* og *Pseudocalanus* og dafnien *Evadne* udgjorde 89±2% af den samlede mesozooplanktonbiomasse. De øvrige grupper repræsenteret i mesozooplanktonet var muslinge-, sneglelarver og hjuldyr.




***Figur 6.8.*** *Den gennemsnitlige biomasse af mesozooplankton (beregnet udfra pumpeprøverne) langs med transektet den 20 maj.*

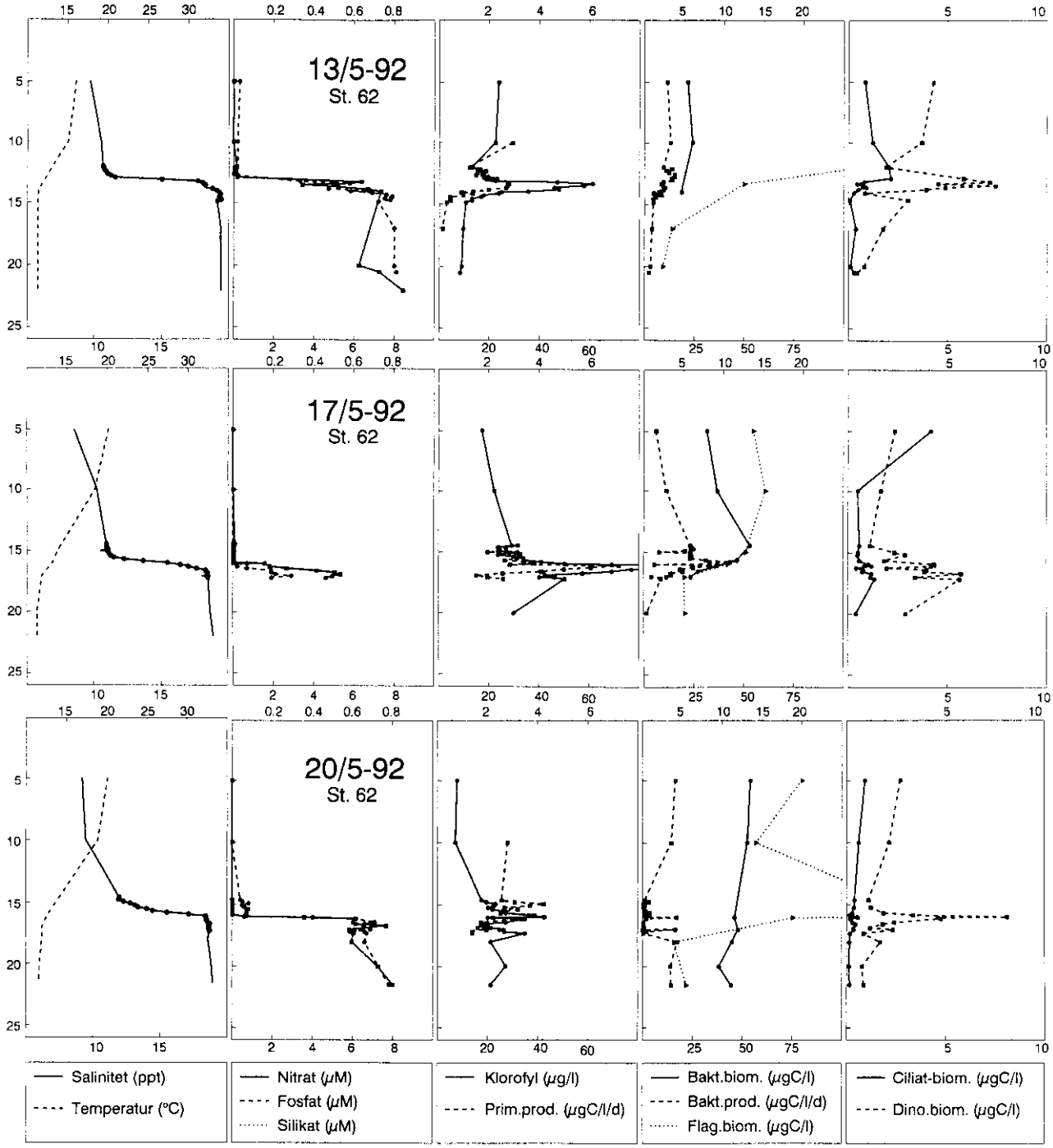
### 6.2.8 Dybdeprofiler for station 60 og 62

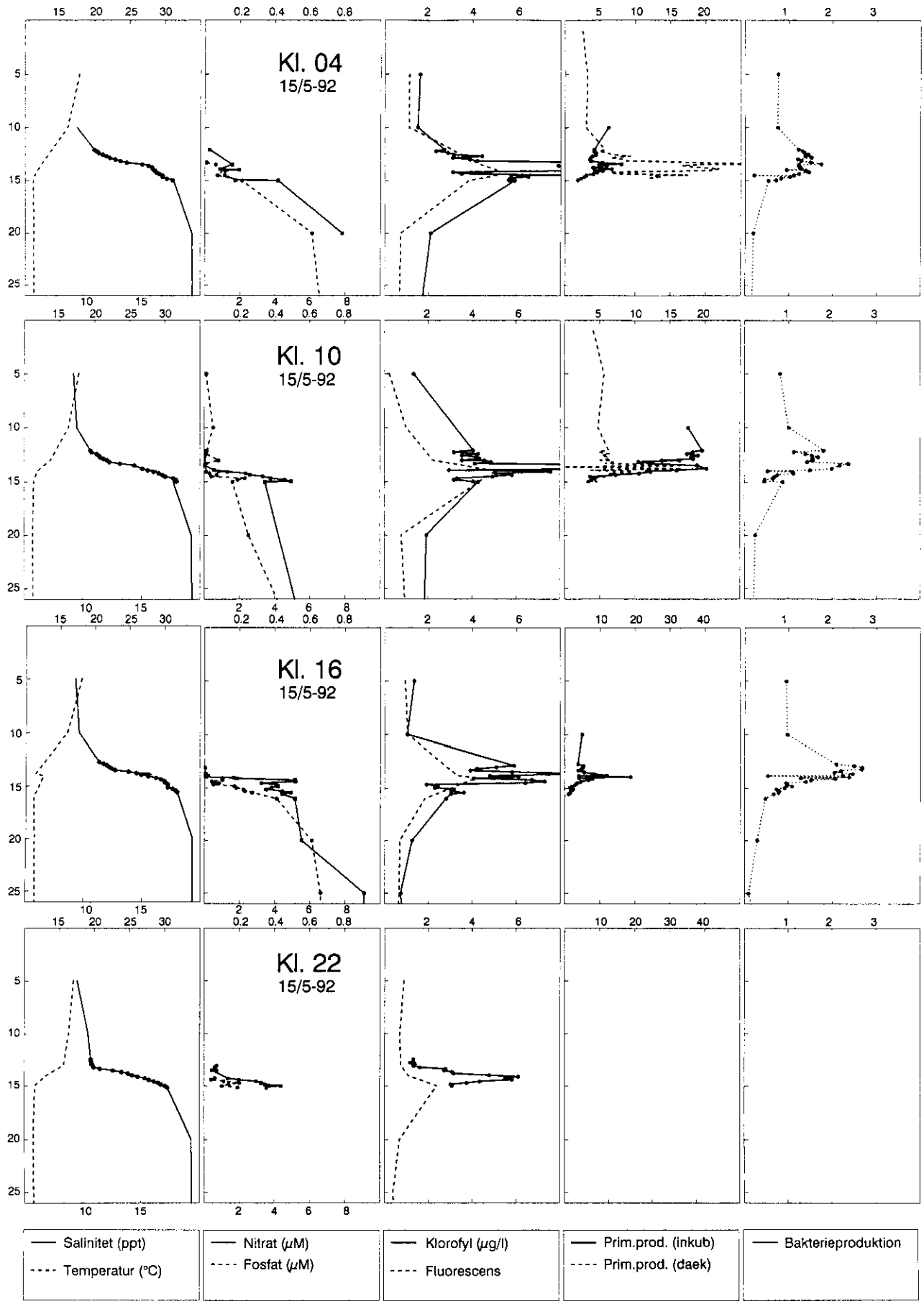
Dybdeprofiler af de målte parametre fra stationerne 60 og 62, hvor gradientvandhenteren oftest blev anvendt, er vist for de tre gennemsejlinger i Figur 6.9. Profilerne viser de meget skarpe gradienter i salinitet og næringssalte (f.eks. nitratgradienten på 6 µM over 0,3 m på station 62 d. 20 maj 92) og de markante dybmaksima i klorofyl, primærproduktion og i visse tilfælde dinoflagelatbiomasse.




*Figur 6.9. Dybdeprofiler af måleværdier fra station 60 og 62 for de tre transektgennemsejlinger. De øverste skalaer refererer til salinitet, fosfat, klorofyl, bakterieproduktion og flagellatbiomasse.*

***Figur 6.9.*** *(fortsat).*





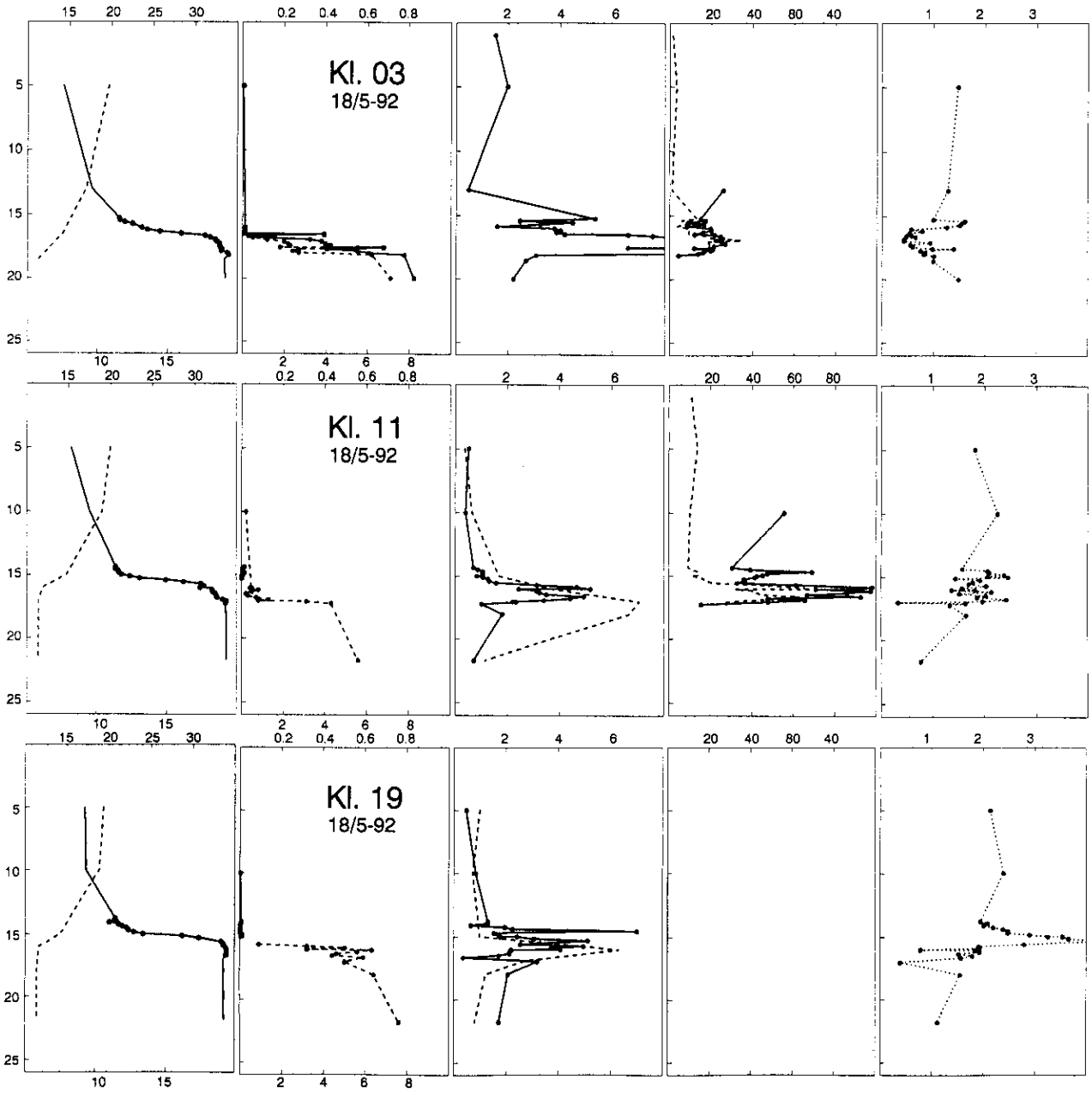

***Figur 6.10.*** *Døgnundersøgelse på station 60. De nederste skalaer refererer til temperatur og nitrat. Primærproduktion og bakterieproduktion er beregnet for 6 timers perioder, f.eks. kl. 04 - 10.*

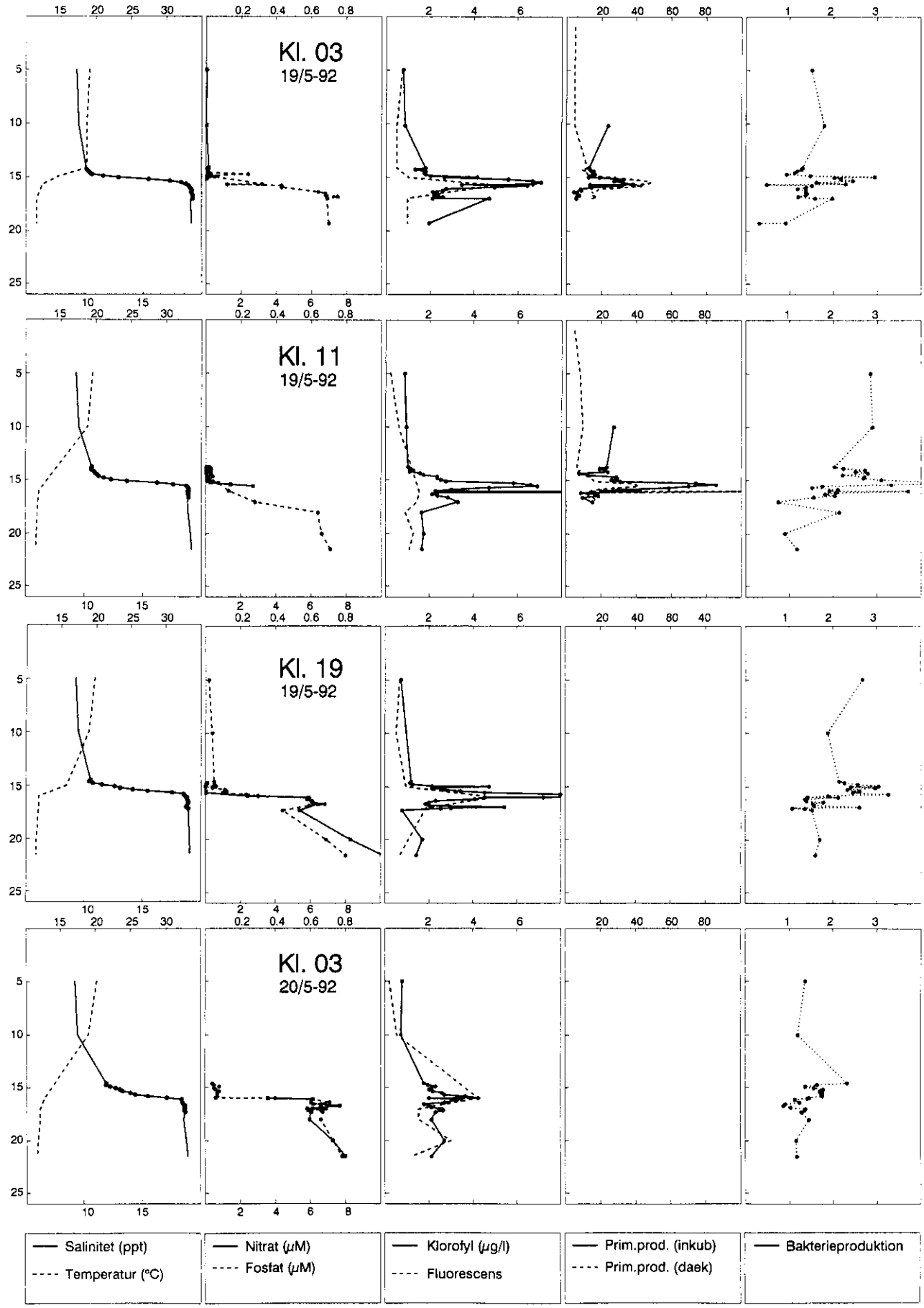
## 6.3 Døgnundersøgelser

Under transektgennemsejlingerne måtte prøvetagningen nødvendigvis foretages på forskellige tidspunkter på dagen, og sammenligneligheden mellem data fra stationerne langs transektet kan derfor være påvirket af døgnvariationer i måleparametrene. Dette gælder især målingerne af de biologiske processer.

For at belyse, dette blev der under togtet udført døgnundersøgelser på station 60 og 62. Døgnundersøgelsen på station 60 fandt sted den 15. - 16. maj med prøvetagning hver 6 time. Døgnundersøgelsen på station 62 fandt sted den 18. - 20. maj med prøvetagning hver 8 time.

Under døgnundersøgelsen på station 60 var der en skarp haloklin og nutriklin omkring 14 m ved alle prøvetagninger (Figur 6.10). Dybmaksima af klorofyl og primærproduktion ses i den øverste del af skillefladen. Dybmaksimummet af bakterieproduktion er bredere end primærproduktionsmaksimummet, og bakterieproduktionen stiger i løbet af dagen.






***Figur 6.11.*** *Døgnundersøgelse på station 62. De nederste skalaer refererer til temperatur og nitrat. Primærproduktion og bakterieproduktion er beregnet for 8 timers perioder, f.eks. kl. 03 - 11.*

Under døgnundersøgelsen på station 62 ses, som for døgnundersøgelsen på station 60 en skarp haloklin og nutriklin i 15 m dybde (Figur 6.11). Dybmaksima af klorofyl og primærproduktion er placeret sammenfaldende med skillefladen. Dybmaksimum i bakterieproduktionen forekommer kun ved nogle af prøvetagningerne.

For begge døgnundersøgelser gælder det, at ændringerne i løbet af døgnet er små, og der synes derfor ikke at være store problemer ved at sammenligne prøver taget på forskellige tidspunkter af døgnet.

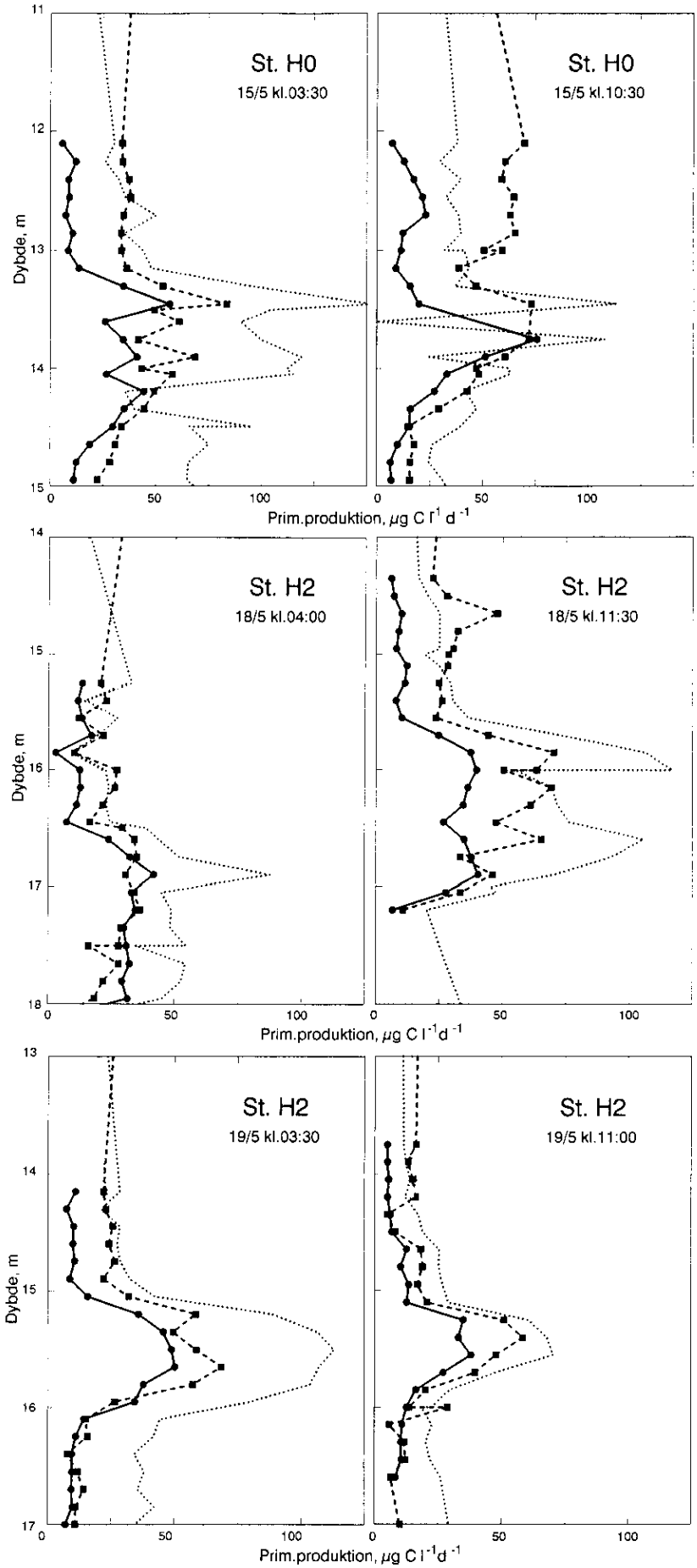
### 6.3.1 Sammenligning af mål for primærproduktionen

Døgnstationerne og det rolige vejr gav mulighed for at bestemme primærproduktionen ved *in situ* inkubationer, hvor planktonprøver fra gradientvandhenteren efter tilsætning af $^{14}C$ blev hængt ud i de oprindelige dybder i fire timer. Indbygningen af $^{14}C$ under *in situ* inkubationerne, hvor fytoplanktonet var underlagt de naturlige lysforhold og temperatur, blev sammenlignet med resultaterne fra grøntlys- og dækinkubatorerne, hvor lysforholdene var simulerede og temperaturen holdt konstant. Laboratorieinkubatoren med hvidt lys var desværre ude af drift under døgnundersøgelserne. De anvendte fremgangsmåder er beskrevet i afsnit 2.4.2.

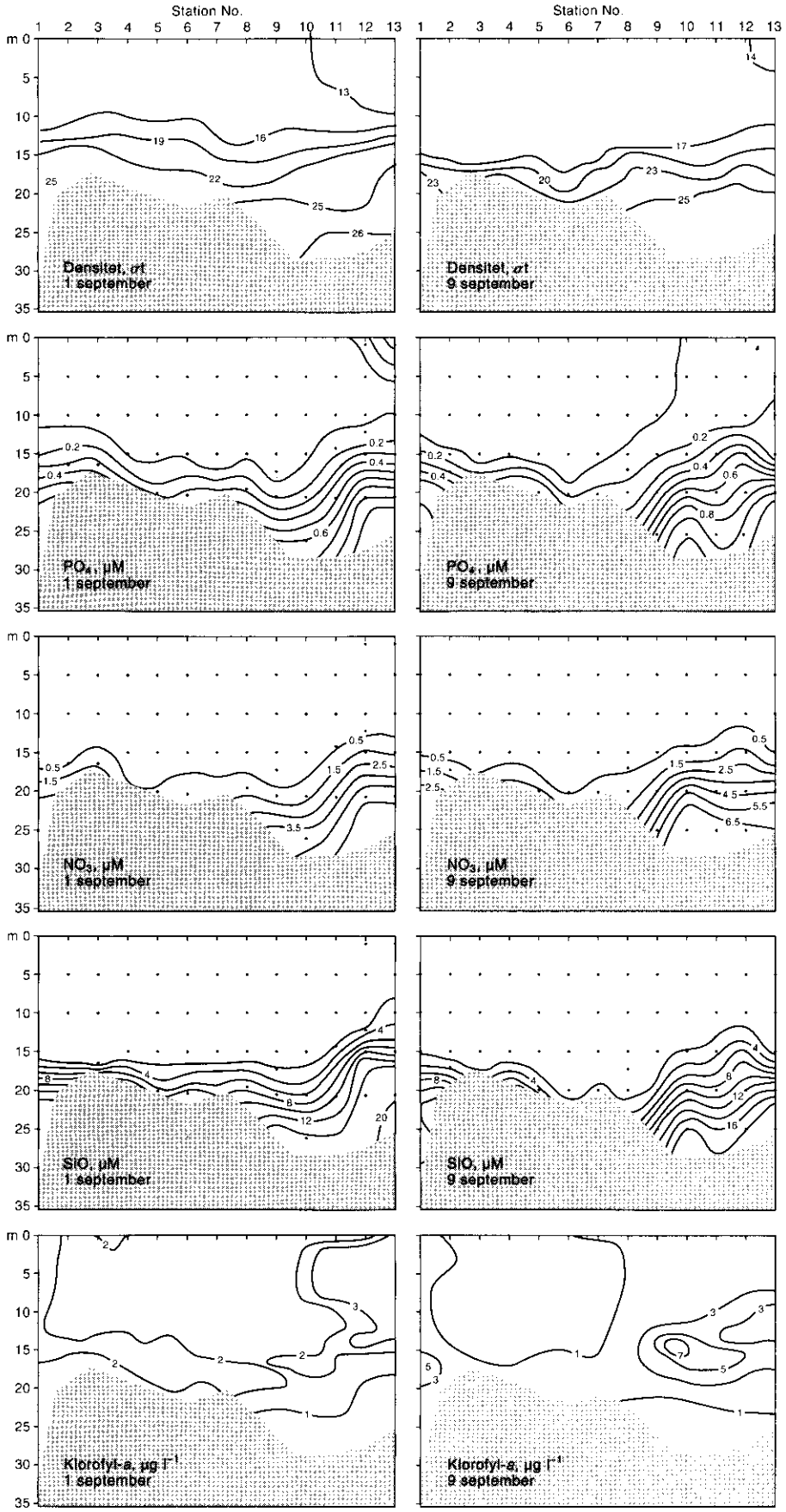
De sammenlignende målinger blev udført den 15., 18. og 19. maj hhv. formiddag og eftermiddag. I alle 6 situationer blev der registreret et markant dybmaksimum i primærproduktionen med alle tre metoder (Figur 6.12). De tre metoder stemte yderligere overens med hensyn til placeringen af den maksimale primærproduktion, men afveg markant i estimeringen af primærproduktionens størrelse.

Estimaterne fra dækinkubatoren var således konsekvent højere end de fra de to andre metoder. Dette kan skyldes den afvigende spektralfordeling af lyset i dækinkubatoren, hvor overfladelyset er dæmpet med neutral-filtre, i forhold til spektralfordelingen på dybt vand, hvor den det grønne lys dominerer. Endvidere var dækinkubatoren termostateret med overfladevand, som var ca. 5°C varmere end *in situ* temperaturen.

Resultaterne fra grøntlysinkubatoren stemte godt overens med *in situ* inkubationerne for de nederste prøvedybder, men var konsekvent højere for de øverste prøver. Dette skyldes sandsynligvis, at resultaterne fra grøntlysinkubatoren er beregnet under antagelse af proportionalitet mellem lysintensitet og primærproduktion. Antagelse af en konveks relation ville give bedre overensstemmelse med *in situ* inkubationerne.




***Figur 6.12.*** *Estimater for primærproduktionen (µg C liter$^{-1}$d$^{-1}$) beregnet udfra* in situ *inkubationer (———), laboratorieinkubationer med grønt lys (----) og dækinubationer (·····). Tidspunkterne for prøvetagning er angivet.*




***Figur 7.1.*** *Den vertikale fordeling af a) densitet, b) fosfat, µM, c) nitrat, µM, d) Silikat, µM og fytoplankton biomasse µg klorofyl a liter$^{-1}$, langs med randen på tværs af det sydlige Kattegat 1) den 1. september og 2) den 9. September. Prøvedybderne er vist som punkter.*

# 7 Pyknoklintogt III, september 1992

## 7.1 Randbetingelser

*Togt 124*

Togtet varede fra 1. til 10. september 1992. Lagdelingen var ikke så skarp som i forbindelse med majtogtet, ved den første gennemsejlning var der en pyknoklin i 10-20 meters dybden (Figur 7.1.a.1).Ved den anden gennemsejlning var pyknoklinen blevet skarpere og observeredes noget dybere i 15-20 meter (Figur 7.1.a.2.).

### 7.1.1 Næringssalte

Næringssaltkoncentrationen i overfladelaget var lav, nutriklinen lå i underkanten af pyknoklinen (Figur 7.1). Der var dog høje fosfatkoncentrationer ved overfladen i den østlige side af randen (Figur 7.1.c). Midt i pyknoklinen ved 23 densitetisolinien (svarende til 29‰), var koncentrationen af fosfat, nitrat og silikat hhv. 0,2-0,3, 0,5 og 6 µM. I forbindelse med

*Intet silikat i overfladen*

dette togt var overfaldekoncentrationerne af silikat generelt < 2 µM, hvilket er det laveste, som er blev registreret i forbindelse med denne undersøgelse.

### 7.1.2 Klorofyl

Klorofylkoncentrationerne var mindre end 2 µg liter$^{-1}$ på det midterst stykke af transektet. De højeste klorofylværdier blev observeret i den østlige og vestlige del af transektet. Ved den første gennemsejlning var der et dybmaksimum i Storebælt på 7 µg klorofyl *a* liter$^{-1}$ (Figur 7.1.e.1). Ved anden gennemsejlning var der et dybmaksimum af klorofyl i skillefladen i Storebæltsiden på 5 µg liter$^{-1}$. I Øresundssiden af randen var der et pyknoklinmaksimum på 5-7 µg klorofyl liter$^{-1}$.

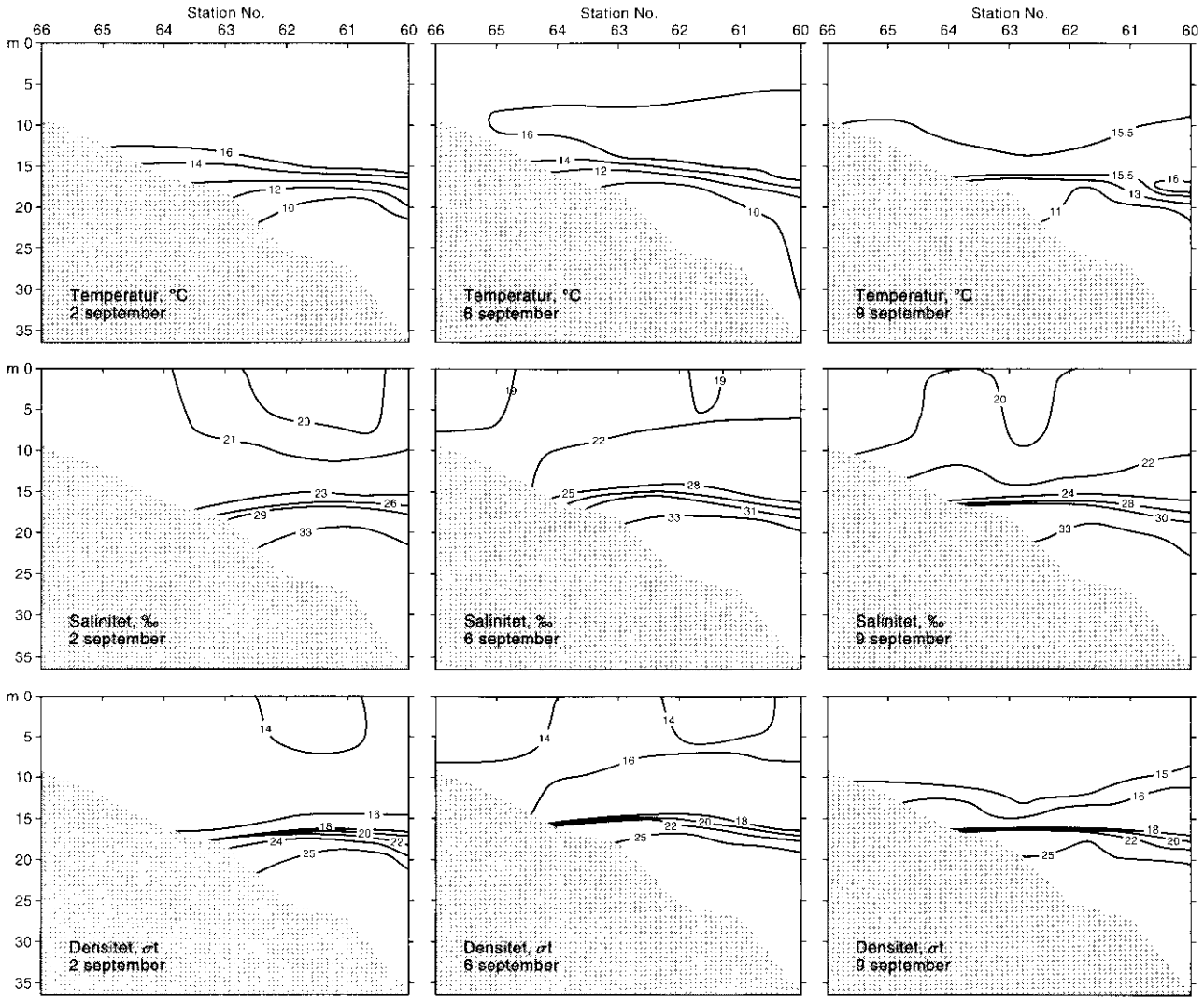
### 7.1.3 Iltindhold ved bunden

Under den første gennemsejlning var den gennemsnitlige iltkoncentration langs med randen 5,1 ± 0,5 mg ilt liter$^{-1}$, svarende til en iltmætning på 57 ± 7%. De laveste koncentrationer blev målt på den østlige halvdel af randen. Ved den anden gennemsejlning var den gennemsnitlige iltkoncentration i bundvandet mere varieret, 5,4 ± 1,1 mg ilt liter$^{-1}$ (svarende til en iltmætning på 61 ± 14% ). De højeste iltkoncentrationer blev registreret i den midterste del af randen hvorfra den aftog ud mod Øresund og Storebælt.

## 7.2 Transektundersøgelserne

### 7.2.1 Hydrografi

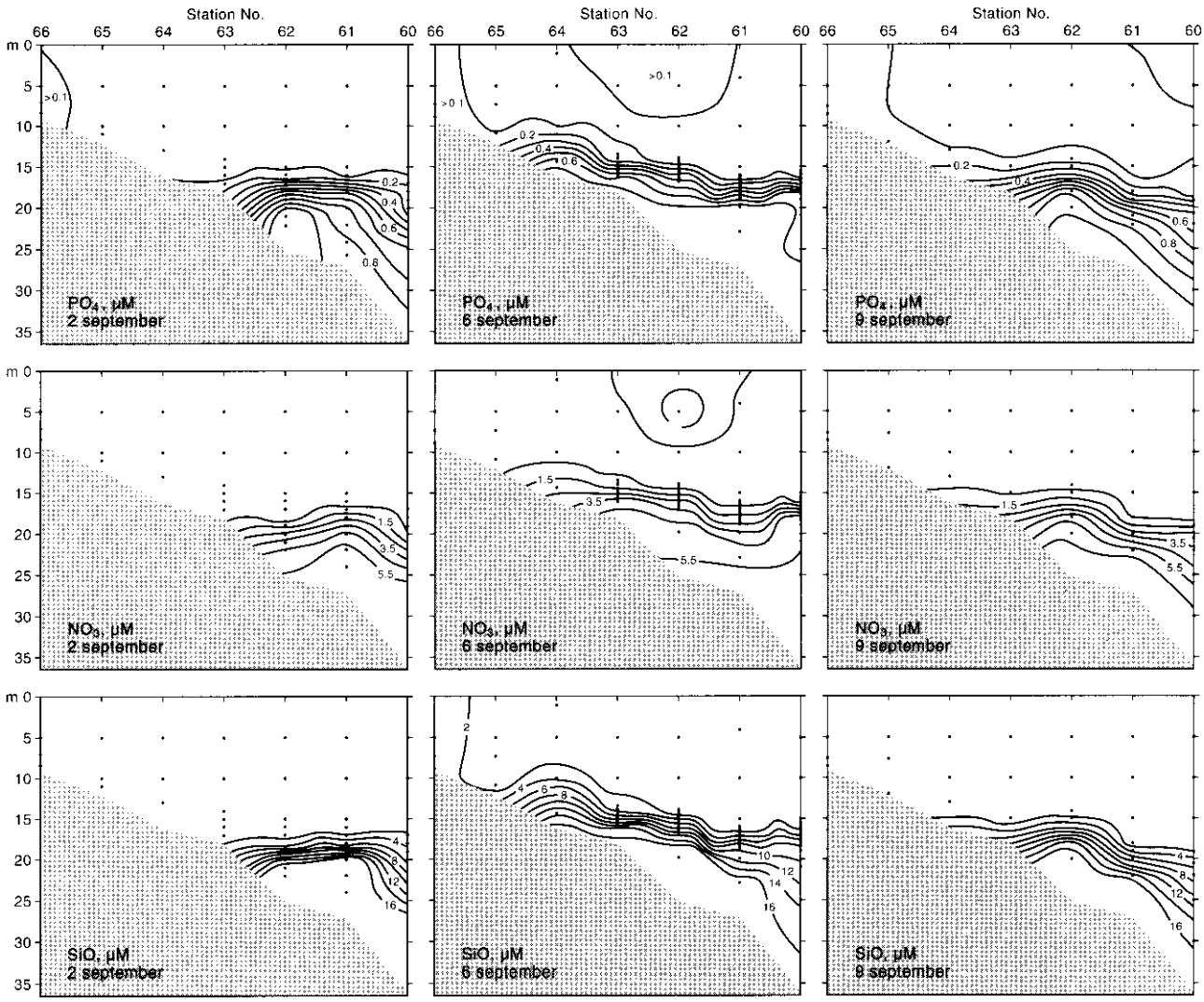
Perioden var karakteriseret af et stabilt springlag i 16-20 meters dybde. I forbindelse med den anden gennemsejlning blev springlaget løftet ind mod land . Temperaturen i overfladelaget var 15,5 - 16,5 °C, mens temperaturen i bundvandet var < 10°C.




***Figur 7.2.*** *Den vertikale fordeling af a) temperatur,°C, b) salinitet, ‰, og c) densitet under de tre gennemsejlinger af transektet.*

### 7.2.2 Næringssalte

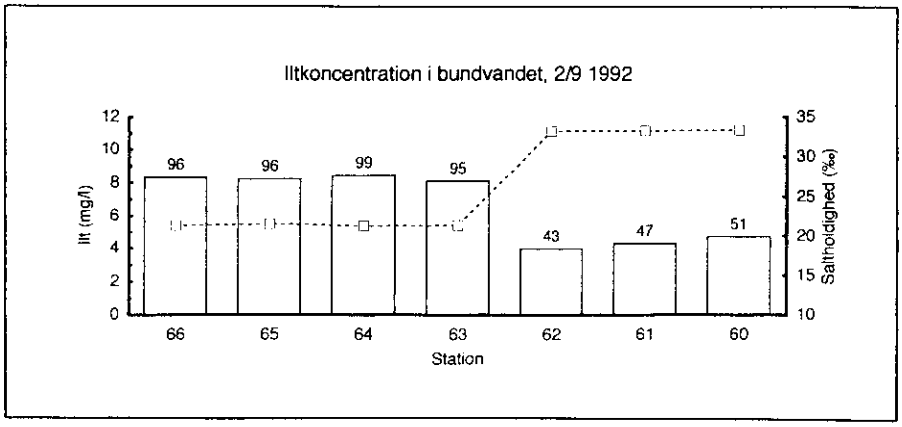
Sammenlignet med de to foregående togter lå nutriklinen dybere i forhold til springlaget (Figur 7.2 & 7.3). Næringssaltkoncentrationen var nær detektionsgrænsen på oversiden af saltspringlaget (Figur 7.3.a-c), koncentrationen af fosfat var omkring 0,1 µM, hvorimod nitrat og silikat var under detektionsgrænsen i overfladen. I modsætning til togtet i maj var der intet silikat over 23‰ isolinien (Figur 7.3.c).

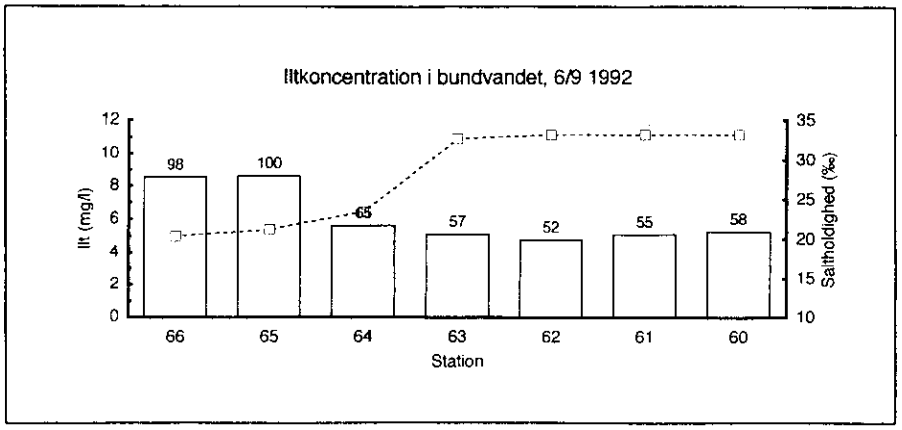


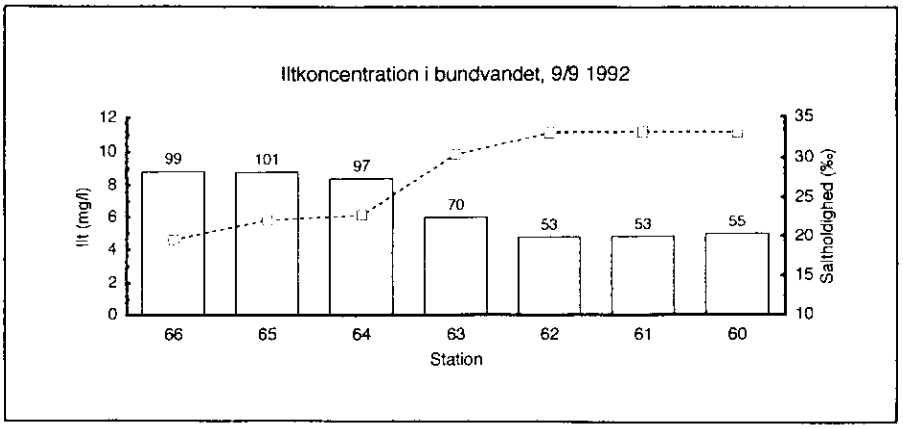

***Figur 7.3.*** *Den vertikale fordeling af næringssalte langs med transektet under de tre gennemsejlinger a) fosfat, µM, b) nitrat, µM og c) silikat, µM.*

### 7.2.3 Iltkoncentrationen ved bunden

Iltkoncentrationen umiddelbart over bunden fulgte mønsteret fra de tidligere transektundersøgelser. I modsætning til majtogtet var bundvandet på de opblandede stationer nær kysten dog næsten fuldmættede, 98 ± 2%, svarende til 8,5 ± 0,2 mg ilt liter$^{-1}$, mens iltkoncentrationen i bundvandet på undersiden af springlaget var reduceret til 4,7 ± 0,4 mg ilt liter$^{-1}$ svarende til 52 ± 4% iltmætning (Figur 7.4). I forbindelse med skillefladeløftet under den anden transektgennemsejlning blev det iltfattige bundvand ført helt ind på station 64 (Figur 7.4.b).




***Figur 7.4.*** *Iltkoncentration (mg ilt liter$^{-1}$, søjler) og saltholdigheden (‰, stiplede linie) lige over bunden under de tre transekt gennemsejlinger. Værdierne over søjlerne angiver iltmætningen i %.*

I forbindelse med døgnstationerne blev iltforbruget omkring skillefladen målt (Tabel 7.1). Desværre er der ikke målt saltholdighed på respirations forsøgene fra station 60. Men der er ikke den store forskel mellem respirationen i de forskellige lag, når temperaturforskellene tages i betragtning.

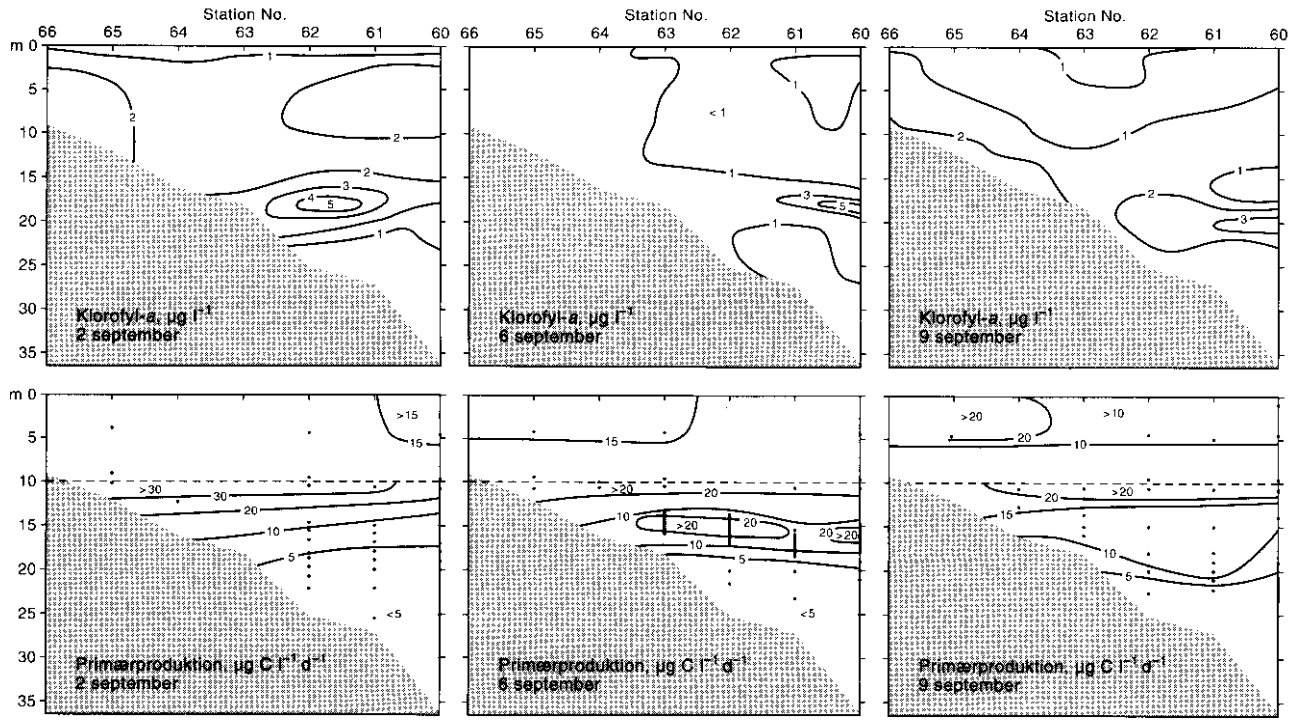
***Tabel 7.1.** Iltforbruget omkring skillefladen på de to døgnstationer.*

| Station | Salinitet ‰ | Temperatur °C | Iltfotbrug µM ilt døgn$^{-1}$ |
|---|---|---|---|
| 60 | | 16 | 8.46 |
| | | 16 | 11.6 |
| | | 11 | 4.8 |
| | | 11 | 5.5 |
| | | 11 | 3.3 |
| 63 | 23.8 | 16 | 10.2 |
| | 27.6 | 16 | 15.9 |
| | 29.3 | 11 | 4.6 |
| | 30.2 | 11 | 10.1 |
| | 31.9 | 11 | 7.5 |

### 7.2.4 Fytoplanktonbiomasse og -produktion

Gradientvandhenteren blev kun anvendt i forbindelse med de to sidste gennemsejlninger af transektet, Klorofylkoncentrationerne var lave i overfladen; ved transektundersøgelsen 2. september var der et klorofyl dybmaksimum på station 61-62 med koncentrationer på op til 5 µg liter$^{-1}$ sammenfaldende med 31‰ isolinien (Figur 7.4.a.1.). Ved den anden gennemsejlning (Figur 7.4.a.2) blev der registreret et dybmaksimum på de to yderste stationer sammenfaldende med 32‰ isolinien. Den 9. september blev de højeste klorofylkoncentrationer observeret på undersiden af springlaget. Fytoplanktonet var domineret af den pennate kiselalge *Nitzschia pseudodelicatisima* og dinoflagellaterne *Prorocentrum micans*, *P. minimum*, *Ceratium* spp. og *Dinophysis* spp.

De høje algebiomasser, observeret i springlaget under den første og tredie gennemsejlning, resulterede ikke i et respons i primærproduktionen. De høje fytoplanktonkoncentrationer gav imidlertidigt et respons under den anden transektgennemsejlning. Hvor der blev registreret et dybmaksimum i primærproduktion i oversiden af algelaget af samme størrelse som produktionen i overfladen (Figur 7.4.b.2).

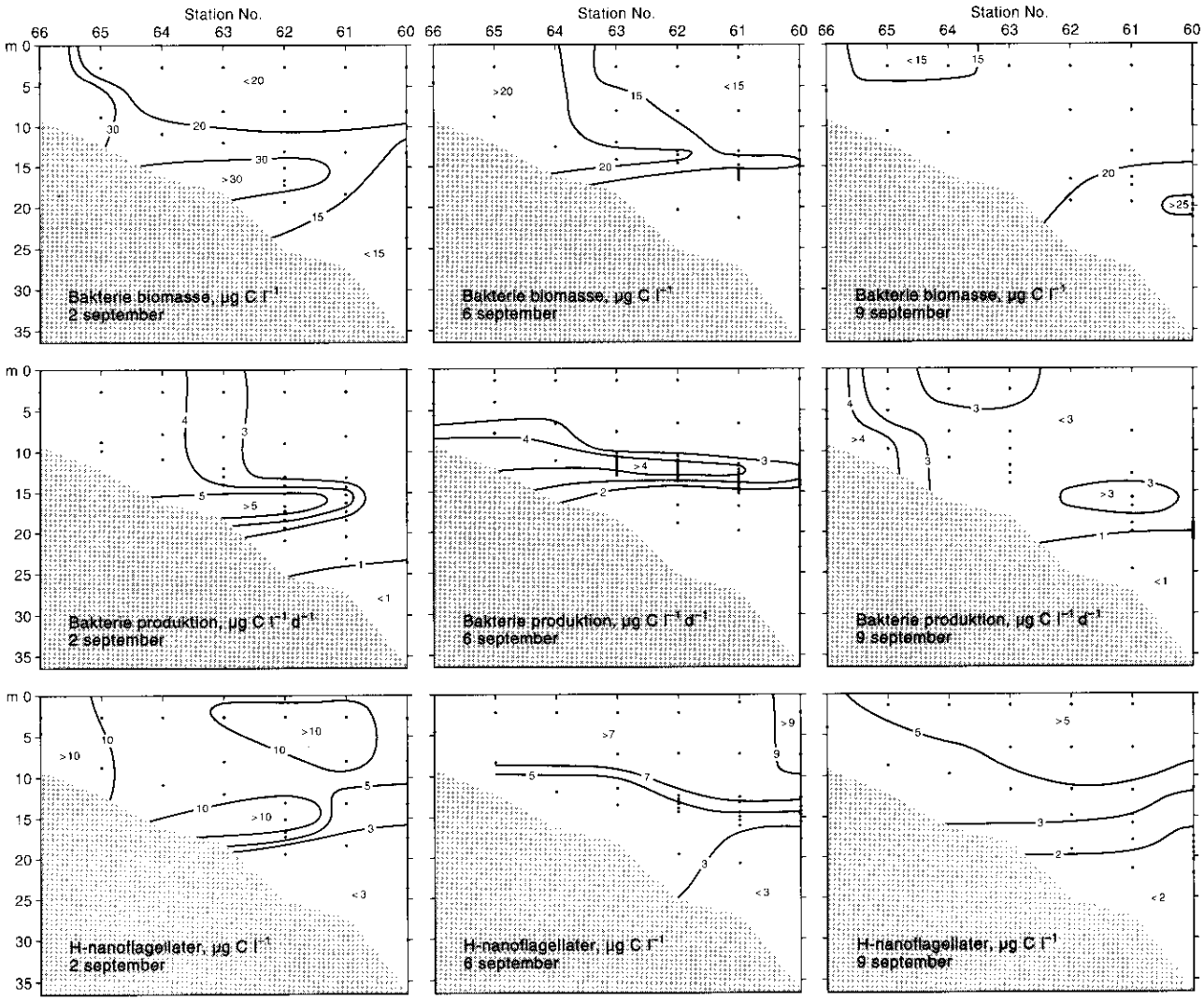



***Figur 7.5.*** *Den vertikale fordeling af a) fytoplankton biomasse (µg klorofyl a liter$^{-1}$) og b) primærproduktion (µg C liter$^{-1}$ dag$^{-1}$) langs med transektet under de tre gennemsejlinger. Målingerne over den stiplede linie stammer fra laboratorie inkubationerne mens de resterende stammer fra grøntlysinkubatoren, hvorfor de ikke er direkte sammenlignelige ( afsnit 2.4.2).*

### 7.2.5 Bakterieplankton og heterotrofe nanoflagellater

Den vertikale fordeling af bakterieplanktonbiomasse var homogen under hele togtet, 15-30 µg C liter$^{-1}$ (Figur 7.6.a). Bakterieproduktionen var højest i og over skillefladen. Produktionen var størst på de kystnære stationer. Under de to første gennemsejlninger blev der observeret et respons i bakterieproduktionen på de høje algebiomasser i skillefladen (Figur 7.5.b.1 & 2).

Biomassen af heterotrofe nanoflagellater var højest på oversiden af springlaget, 5-10 µg C liter$^{-1}$ (Figur 7.5.c).




***Figur 7.6.*** *Den vertikale fordeling af bakterioplanktonets a) biomasse (µg C liter $^{-1}$) og b) produktion (µg C liter$^{-1}$ d$^{-1}$) samt c) biomassen heterotrofe nanoflagellater (µg C liter$^{-1}$) langs med transektet.*

### 7.2.6 Mikrozooplankton

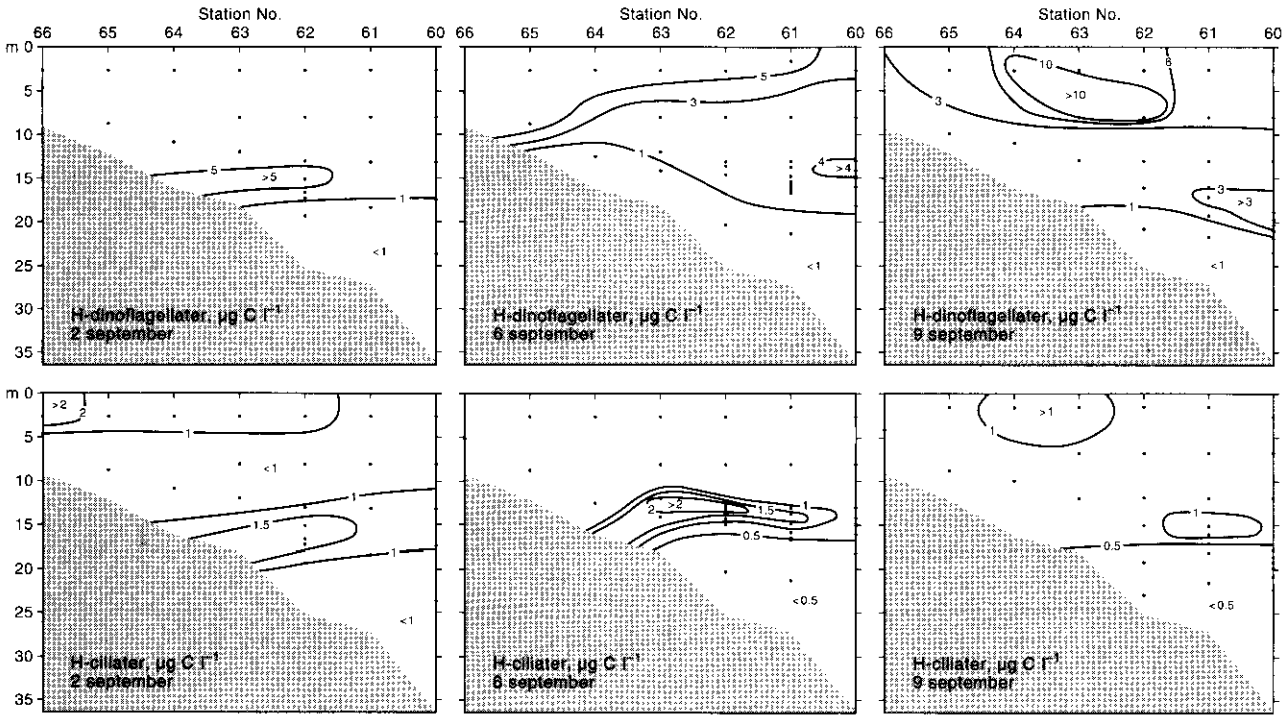
Mikrozooplanktonets biomasse var højere end på majtogtet, 2-10 µg C liter$^{-1}$ (Figur 7.7). Som under majtogtet dominerede de heterotrofe dinoflagellater biomassen (Figur 7.6.a)

I modsætning til de to foregående togter var dinoflagellatsamfundet dominerede af thekate former. Af disse udgjorde *Protoperidinium divergens* og *P. steinii* hovedparten af biomassen. De mest betydende af de nøgne dinoflagellater var de store arter *Gyrodinium glaucum* og *G. spirale.*

Høje biomasser af heterotrofe dinoflagellater blev observeret i springlaget og ved overfladen under den sidste gennemsejlning i en lomme af brakt vand med høj klorofykoncentration (Figur 7.6.a).

Biomassen af ciliater var højest i og på oversiden af springlaget. Sammenlignet med de tidligere togter er der sket et kvalitativt skift i sammensætningen af ciliatsamfundet. I modsætning til de foregående togter dominerede tintinnide ciliater, specielt *Helicostomella subulata*, *Salpingella* spp., *Stenosomella* spp. og *Tintinnopsis parvula*.

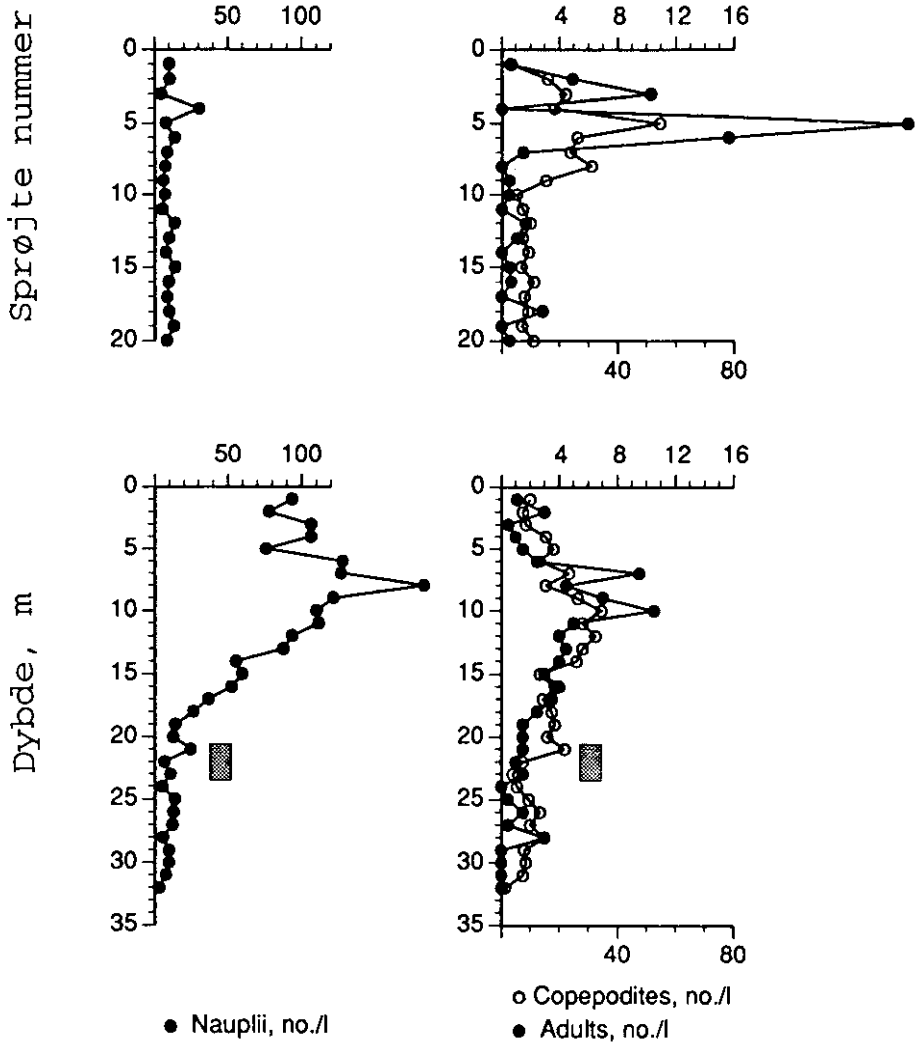
I forbindelse med alle tre togter var der høje ciliatbiomasser i springlaget, domineret af små nøgne former ( *Lohmaniella oviformis* og *Strombidium* spp.).




***Figur 7.7.*** *Den vertikale fordeling af mikrozooplankton langs med transektet under de tre gennemsejlninger a) hetero/mixotrofe ciliater (µg C liter$^{-1}$) og b) heterotrofe dinoflagellater (µg C liter$^{-1}$).*

### 7.2.7 Mesozooplankton

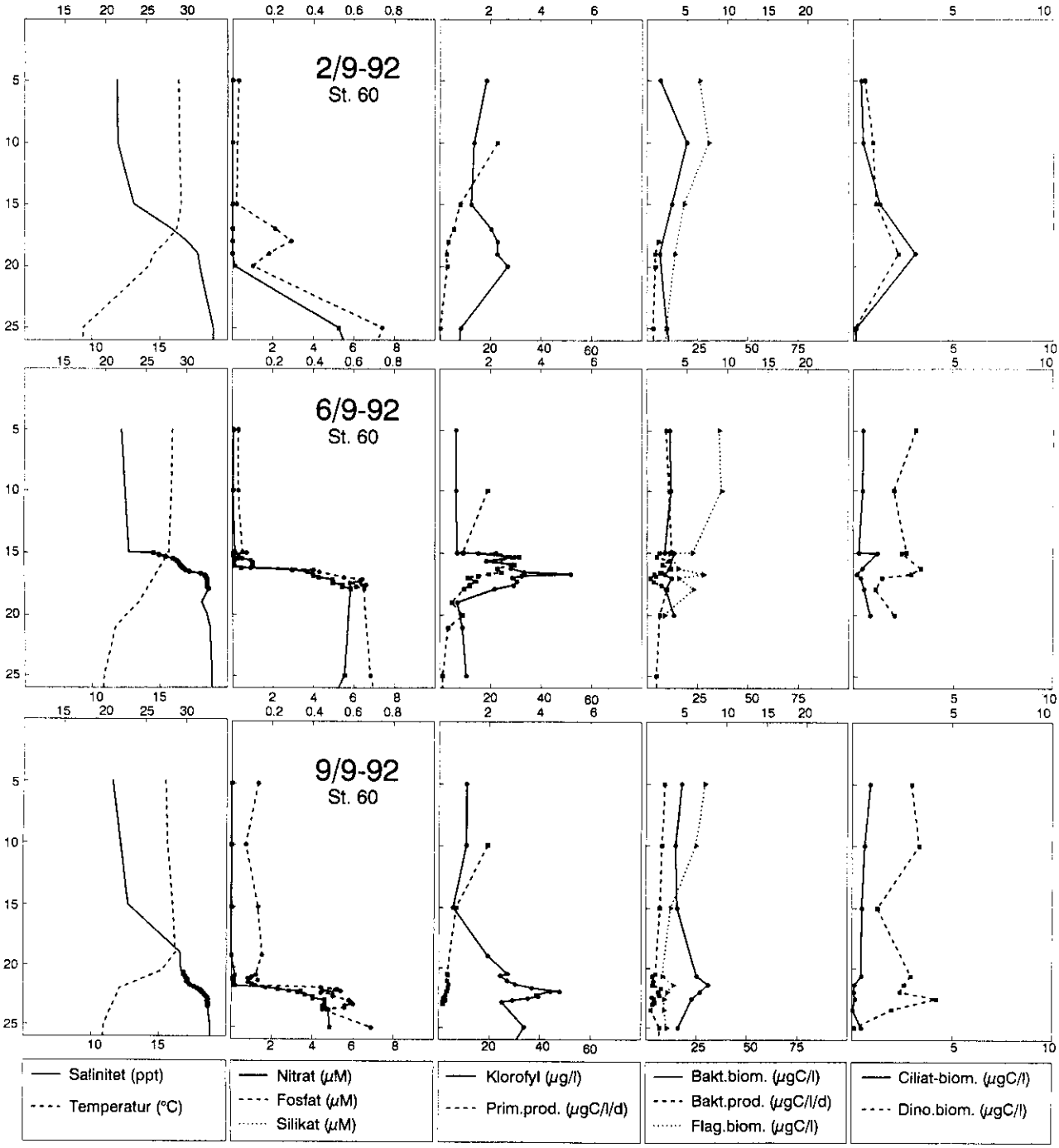
I forbindelse med døgnundersøgelsen på station 60 blev den vertikale fordeling af vandlopper undersøgt ved prøvetagning i 1 meters intervaller med rosettevandhenteren og med 15 cm's opløsning på tværs af springlaget med den store gradientvandhenter (Figur 7.8). Biomassen var domineret af *Oithona* spp., *Paracalanus*, *Acartia* og *Pseudocalanus*. Vertikalfordelingen viste at vandlopperne hovedsagelig fandtes i den øverste del af springlaget hvor, de højeste algebiomasser blev registreret. De største tætheder af nauplier blev observeret i de øverste 10 meter af vandsøjlen, mens de ældre stadier var mere jævnt fordelt ned gennem springlaget. Gradientvandhenteren og rosettevandhenteren viste det samme vertikal fordelings mønster for både nauplier og copepoditter, men den absoluttte biomasse af copepoditter var højest i prøverne fra gradientvandhenteren.




***Figur 7.8.*** *Den vertikale fordeling af de forskellige vandloppestadier med a) 1 meters opløsning med rosette vandhenteren og b) med 15 cm's opløsning med den store gradientvandhenteren. Det skraverede område på a) angiver placeringen af den store gradientvandhenter vist neden for. (fra Tiselius et al, 1994)*

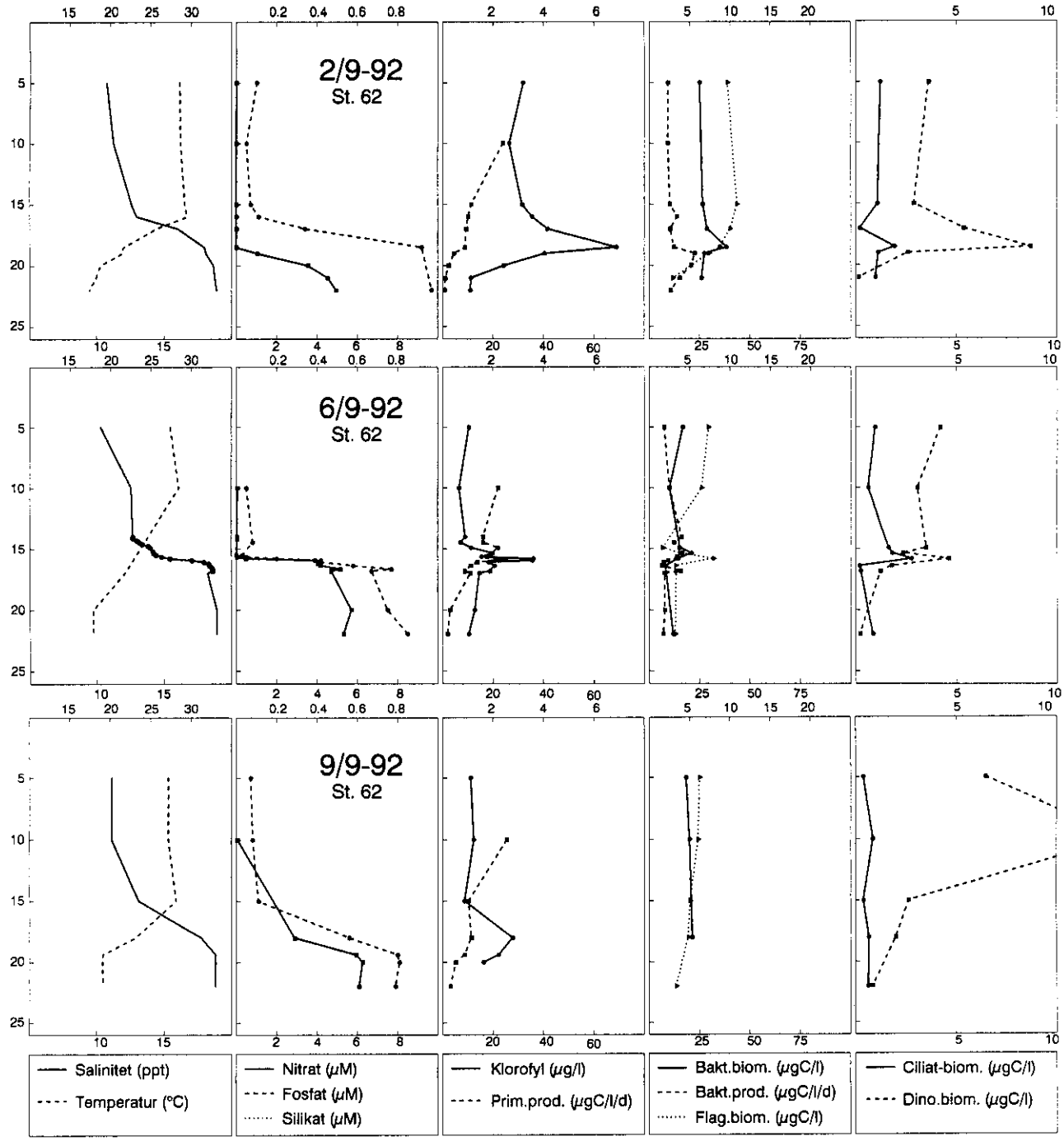
### 7.2.8 Dybdeprofiler for station 60 og 62

På Figur 7.9 er den vertikale fordeling af de kemiske og biologiske parametre på station 60 og 62 vist. På disse stationer blev gradientvandhenterene anvendt hyppigst. På alle de viste profiler var der et dybmaksimum i klorofyl, som den 6.9 også afspejledes i primær- og bakterieproduktion. Biomassen af mikrozooplankton var højest i dybmaksimummet af fytoplankton.




*Figur 7.9. Vertikalprofiler af målværdier fra station 60 og 62 for de tre transektgennemsejlinger. De øverste skalaer refererer til salinitet , fosfat, klorofyl, bakterieproduktion og flagellatbiomasse.*

*Figur 7.9. (fortsat).*



# 8 Lagdeling og advektion i det sydlige Kattegat

## 8.1 Indledning

*Lagdeling*

Kattegat beskrives ofte som et to-lagssystem med et lavsalint øvre lag og et mere salint nedre lag med saliniteter på hhv. 15 - 25‰ og 30 - 35‰. Det nedre lag udgøres primært af Nordsøvand, mens det øvre lag er dannet af udstrømmende Østersøvand, der blandes med Kattegatvand. Skillefladen mellem det øvre og nedre lag betegnes den primære skilleflade. Med blandingen i Kattegat stiger Østersøvandets salinitet.

*Primære skilleflade*

*Forskellige vandmasser*

Indtil det udstrømmende Østersøvand er blandet op, adskiller sig det sig fra Kattegatvandet, ved at være mindre salt, have et andet gulstof indhold og ofte have en anden temperatur (Højerslev, 1989). Dette vand findes i Storebælt og Øresund og kan genfindes langt oppe i Kattegat som et lavsalint overfladelag med saliniteter ned til 12‰. En del af Østersøvandet lægger sig hen over det sydlige Kattegat (Bo Pedersen, 1991). Derved opstår der her en intern lagdeling af det øvre lag. Densitetsforskellene i det øvrelag er mindre end densitetsforskellene over den primære skilleflade, hhv. 1 - 5 kg $m^{-3}$ og 10 - 15 kg $m^{-3}$. Densiteten er vandets vægtfylde og afhænger af salinitet, temperatur og tryk. I danske farvande er salinitetsforskellene op til 20‰, mens temperaturdifferenserne er op til 15°C. Det giver densitetsforskelle på hhv. 15 kg $m^{-3}$ og 3 kg $m^{-3}$. Saliniteten er dermed afgørende for densitetsvariationer i danske farvande.

*Intern lagdeling*

*Dette afsnit*

Hvordan de forskellige vandmasser kan følges i fluorescens og næringssalte gennemgås nedenfor sammen med de hydrografiske forhold, der er nødvendige for at forstå den tidslige variation i algeforekomsterne på hovedtransektet mellem Hesselø og Hundested. Gennemgangen bygger i høj grad på resultaterne i Rasmussen (1994), hvor den interne lagdeling og fluorescens-værdier gennemgås detaljeret i forhold til advektion, vind og vandstand, samt strømretning i Storebælt for at fastlægge blandingsmekanismerne i det sydlige Kattegat. Resultaterne i Rasmussen (1994) bygger på alle målinger foretaget under togterne i 1992, herunder specielt målingerne af variationen på tværs i det indre område. Det indre område betegner farvandet imellem Hesselø og Nordsjælland fra Storebælts- til Øresundssiden.

*Det indre område*

## 8.2 Pyknoklintogt I, marts 1992

### 8.2.1 Vind- og strømforhold

*Skiftende strømretninger*

I løbet af togtet er vinden fra skiftende retninger med vindstyrker på 4 - 11 m $s^{-1}$. Fra aftenen den 27. til den 30. marts er strømmen østlig med hastigheder på 0,1 - 0,2 m $s^{-1}$. Med en kraftig østlig vind under togtets to afsluttende døgn skifter strømretningen i det øvre lag til vestlig og tiltager i styrke. Under den primære skilleflade i det nedre lag er hastigheden en faktor 1 1/2 - 2 mindre end i det øvre lag under hele togtet.

### 8.2.2 Den ydre rand

*Varmt Storebæltsvand og lavsalint Øresundsvand*

To-lagsstrukturen findes over hele den ydre rand med et tungt og næringsrigt nedre lag og et lettere og næringsfattigt øvre lag, Figur 5.1 Det øvre lag er imidlertid ikke homogent, hverken m.h.t. densitet, næringssalte eller fluorescens. På den ydre rand findes let Øresundsvand med densiteten 9-12 kg $m^{-3}$ på station 11 til 13. Det adskiller sig fra overfladevandet mod vest på stationerne 5 til 10 i temperatur og fosfat-, nitrat- og silikatkoncentration. På stationerne nærmest Storebælt har vandet en større densitet og er lidt varmere, op til 4.6°C, end overfladelaget mod øst. Fosfat- og nitratkoncentrationerne er lave, hhv. mindre end 0,1 µM og 0,75 µM, mens silikatkoncentrationen er moderat, 4-6 µM. Det lettere overfladelag på stationerne 5 til 10 er dannet under en tidligere udstrømning.

*Intern lagdeling*

Vinden har ikke kunnet blande det øvre lag op (ned til den primære skilleflade) på stationerne 5 til 10. I begyndelsen af togtet findes der en intern lagdeling. Densiteten stiger jævnt fra dybden 6 m ned til den primære skilleflade. Den interne lagdeling bibeholdes til den anden gennemsejling af den ydre rand den 30. marts, Figur 5.1. En kraftig blæst den 28. marts med vindstyrker op til 10 m $s^{-1}$ formår ikke at nedbryde den interne lagdeling. Dermed er vindens medrivning fra det nedre lag fortsat afkoblet. På de afsluttende togtdage den 31. marts og 1. april blandes hele det øvre lag op, så det er homogent, og vinden kan her give en medrivning af saltere og næringsrigt nedrelags vand.

*Høj fluorescens i vest*

Fluorescensen varierer på tværs af Kattegat. De største værdier findes i blandingsvandet ved Storebælt, mens værdierne mod øst er lave under begge gennemsejlinger af den ydre rand. De lave næringsstofkoncentrationer i Storebælts øvre lag kan derfor formentlig forklares ved algers forbrug af næringssalte. Tilsvarende findes der store fluorescensværdier i den vestlige del af det indre område, mens koncentrationerne er lave mod øst. Algerigt vand føres i løbet af nogle døgn fra vest hen til hovedtransektet.

### 8.2.3 Målinger på hovedtransektet

*Oprindelse i øst*

På hovedtransektet genfindes den interne lagdeling af det øvre lag. Over et dybdeinterval på 10 m; fra dybden 8 m ned til 18 m stiger saliniteten fra 16‰ til 26‰, Figur 5.2. Salinitet, temperatur og fluorescens viser, at vandet har sin oprindelse i den østlige del af det sydlige Kattegat, med lave fluorescensværdier i det øvre lag og et skillefladem aksimum som ved station 9 og 10. Det lavsaline overfladevand, 12 - 15‰, i øst har den 25. marts endnu ikke nået stationerne på hovedtransektet, Figurer 5.1 og 5.2.

*Intrusion fra vest*

Som på den ydre rand findes den interne lagdeling den 29. marts fortsat på hovedtransektet ( Figur 5.2. over samme dybdeinterval, 8 til 18 m). Fra øst er der strømmet et mindre salint overfladelag, 15‰, til. Det findes på stationerne 60 til 64. Under overfladelaget er varmere og algerigt Storebæltsvand strømmet til i dybden 12 m som en intrusion fra vest i løbet af den 28. marts. Den østlige strømning genfindes i hastighedsmålingerne. Det intruderende varmere vand lægger sig hen over fluorescensmaksimummet i den primære skilleflade. I den primære skilleflade er fluorescensmaksimummet fordoblet. Denne fordobling kan ligeledes forklares ved advektion af algerigere vand fra vest. Algemaksimummet fra det intruderende vand og i den primære skilleflade kan adskilles fra hinanden i et døgns tid. Herefter er de sammenfaldende. De store algekoncentrationer og det varmere vand fra Storebæltssiden har den 30. marts spredt sig fra vest til øst og findes nu i hele det indre område i det sydlige Kattegat. På den

ydre rand er fluorescensværdierne derimod fortsat lave mod øst, og vandet er koldere, Figur 5.1.

*Skillefladeløft*

I løbet af aftenen den 30. marts går vinden i øst og tiltager i styrke. Den østlige vind giver en vandstuvning mod vest, og skillefladen presses ned mod Storebælt, mens den løftes mod øst. Med østenvinden skifter strømretningen fra øst- til vestlig. Strømstyrken i det øvre lag stiger, så Corioliskraften muliggør et skillefladeløft langs kysten, Figur 5.2. Corioliskraften presser vandet til højre i forhold til sin bevægelsesretning. Med den vestlige strømning sænkes vandspejlet derfor langs kysten den 31. marts, og skillefladen kan derved løftes op langs kysten. Det nedre lags vand findes nu på de inderste stationer som et salt og næringsrigt lag. Strømningen fører det algerige vand mod vest, og der findes kun skillefladem aksima vest for hovedtransektet. På hovedtransektet og øst herfor findes algefattigt vand, som det er fundet på den ydre rand den 30. marts. Den kraftige vind under de afsluttende dage øger blandingen af vandsøjlen. Den interne lagdeling nedbrydes, og densitetsgradienten findes nu over et mindre dybdeinterval. Først nu giver vinden en medrivning fra det nedre lag. I perioden fra den 24. marts til den 31. marts anvendes vindens energi til at nedbryde den interne lagdeling af det øvre lag. De observerede skillefladem aksima den 29. marts fordeles dermed ikke kun over det øvre lag af vindens blanding, men flyttes samtidig mod vest af strømningen. De lave fluorescensværdier på hovedtransktet den 1. april er algefattigt vand, der er strømmet til fra øst.

## 8.3 Pyknoklintogt II, maj 1992

### 8.3.1 Vind- og strømforhold

*Svag vind og vestlig strøm*

I løbet af togtet er vinden svag. Efter den 16. maj er der en jævn udstrømning fra Østersøen gennem Storebælt og Øresund. Indtil den 16. maj er strømningen gennem bæltet og sundet skiftende. Vejret er stille og solrigt. Mellem Hesselø og Nordsjælland er strømningen under hele togtet vestlig i det øvre lag. Nær Hesselø er retningen NV, mens den nærmere kysten er vestlig. I det nedre lag varierer strømretningen en del. Middelværdien af strømhastighederne i det øvre lag er 0,10 m $s^{-1}$ indtil den 16. maj, mens den er 0,15 m $s^{-1}$ efter den 16. Vandet fra den ydre rands østlige stationer når dermed ind til hovedtransektet i løbet af 3 døgn.

### 8.3.2 Den ydre rand

*Lavsalint Øresundsvand*

Som ved martstogtet har det lavsaline overfladevand den 12. maj, Figur 6.1, sin oprindelse i Øresundssiden. Efter skiftende ud- og indstrømning fra Østersøen i begyndelsen af togtet er densiteten i Storebælts øvre lag og hele den vestlige del af det sydlige Kattegat ens. Fra Storebælt genfindes der derfor ikke nogen lækage af mindre salint overfladevand. Med den kortere passagetid i Øresund findes mindre salt vand i den østlige del af Kattegat under hele togtet, trods de skiftende strømretninger i begyndelsen af togtet.

*Høj fluorescens i øst*

Den primære skilleflade på tværs af Kattegat findes i dybden 10 til 15 m. Øresundsvandet adskiller sig, som ved martstogtet, ved en mindre salinintet end det øvrige Kattegatvand. Modsat martstogtet findes de største algeforekomster nu ikke i Storebæltsvandet, men i Øresundsvandet. I det udstrømmende overfladelag og i den primære skilleflade på stationerne 9 til 13 er fluorescensen høj. Vest for station 9 er der moderate fluorescensmaksima i skillefladen.

*Skillefladem aksima*

Under den anden gennemsejling af den ydre rand den 16 maj, Figur 6.1 er det øvre lag næsten homogent ned til den primære skillefladen. Der er kun en svag stigning i saliniteten på 1‰ ned til skillefladen. Fluorescensværdierne oven for skillefladen er reduceret, og fluorescensværdierne i de øverste 10 m af vandsøjlen er lave. I skillefladen er fluorescensværdierne øget, så der nu er store værdier i Storebælts- og Øresundsvandet. Kun i den centrale del af det sydlige Kattegat nord for Hesselø er værdierne fortsat lave. Med den vestlige strømning i det indre område har kun de fluorescensmaksima i skillefladen, der kommer fra Øresundssiden, betydning for målingerne på hovedtransektet. Algerigere vand fra nordøst når hovedtransektet i løbet af togtet.

### 8.3.3 Hovedtransektet

*Svag intern lagdeling*

I perioden op til togtet har vinden været kraftigere og givet det homogene øvre lag, der er fundet under den første gennemsejling af hovedtransektet den 13. maj, Figur 6.2. Etableringen af en intern lagdeling er mere synlig på hovedtransektet. Den interne lagdeling dannes af solens varmeindstråling og af tilstrømmende lavsalint overfladevand, der efter den 13. maj strømmer til hovedtransektet fra øst. Saltforskellen ned gennem det øvre lag bliver 1 - 2‰. Det giver en densitetsforskel i det øvre lag på 0,8 - 1,6 kg $m^{-3}$. Den 13. maj er temperaturen af det øvre lag 9°C. Med solskinsdagene i resten af togtet stiger det øvre lags temperatur til 10°C den 17. maj, Figur 6.2. Den 20. maj er overfladelagets temperatur 12-13°C ned til dybden 4 m, Figur 6.2. En del af temperaturstigningen neden for dybden 4 m skyldes advektion af varmere vand fra øst. Temperaturen falder ned gennem det øvre lag med et par grader Celsius. Det giver kun et lille densitetsspring på op til 0.2 kg $m^{-3}$. De små salinitets- og temperaturforskelle kan kun overleve hele togtet, fordi vinden er meget svag og derfor ikke giver nogen blanding af betydning.

*Algerigt vand mod øst*

Som beskrevet ovenfor er det øvre lag homogent i begyndelsen af togtet. Skillefladen er skarp ind mod kysten, mens den er bredere på de yderste stationer. Vandet på de yderste stationer 60 - 61 er den 13. maj, Figur 6.2. magen til vandet på vestlige stationer på den ydre rand. Nær kysten har vandet en anden oprindelse, dets salinitet og temperatur genfindes ikke på den ydre rand, men derimod øst for hovedtransektet. De store fluorescensværdier fra den østlige del af den ydre rand genfindes i den nordøstlige del af det indre område. Således er fluorescensværdierne i den primære skillefladen en faktor 2-3 større m.h.t. maksimal værdi og den dybdeintegrerede værdi 7 km nordøst for hovedtransektet. Nærmere kysten er fluorescensen lav. Tilstrømningen bringer det algerige vand fra nordøst til hovedtransektets station 60 i løbet af den 14. maj.

*Passage af algerigt vand*

En del af det algerige vand fra nordøst når station 62 den 17. maj, Figur 6.2. og bidrager til algemaksimummet i den primære skillefladen. På station 60 reduceres fluorescensværdierne, oprindelsen af vandet her kan ikke fastslås med sikkerhed, men det kan stamme fra den ydre rands stationer 7 eller 8.

*Algerigt vand mod vest*

Den 19. maj har vandet med de store algeforekomster fra den 14. maj passeret hovedtransektet, og de største fluorescensværdier findes nu vest for hovedtransektet. Mod øst er der stadig maksima i skillefladen, der strømmer til station 61 fra øst. Det er således ikke det algerige vand nær kysten på station 62 den 17. maj, der er strømmet fra kysten og ud til station 61 den 20. maj, Figur 6.2. På station 62 er fluorescensen lavere end den 17. maj. Det kan skyldes mindre variationer i strømretningen af den kystparallelle vestlige strømning. Den 17. maj bevæger skillefladen sig et par meter ned.

Det efterlader en rest af mere salt vand nær bunden på de kystnære stationer, uden at der dog er høje næringssaltkoncentrationer i dette. Med de lave hastigheder i vandet og det stille vejr blandes dette vand ikke op.

## 8.4 Pyknoklintogt III, september 1992

### 8.4.1 Vind- og strømforhold

*Kraftig vind og strøm*

Under den første gennemsejling er vinden svag. Herefter tiltager vinden og når styrker på 8 - 10 m $s^{-1}$ fra nordøst. Under togtet er der korte perioder med ud- og indstrømning til Østersøen. Der er således ikke en jævn udstrømning som under afslutningen af togtet i maj. I det sydlige Kattegat er strømningen i det øvre lag periodevis kraftig med hastigheder op til 0,6 m $s^{-1}$. Ved hovedtransektet er strømretningen i det øvre lag V. Nordøst for hovedtransektet på den ydre rand er strømretningen SV, mens den vest for er NV. Vandet strømmer dermed ind til det indre område fra nordøst øst for Hesselø, mens det forlader området vest for Hesselø. Strømhastigheden giver en middelopholdstid på 3 - 4 døgn. I løbet af 1 til 1 1/2 døgn når vandet fra den ydre rand til hovedtransektet. Vandskiftet er derfor betydeligt under hele togtet, hvorfor der kan ikke holdes regnskab med de forskellige vandmasser som under de forudgående togter.

### 8.4.2 Den ydre rand

*Lavsalint Øresundsvand*

Med den svage vind i begyndelsen af togtet ligger den primære skilleflade i samme dybde på tværs af Kattegat, Figur 7.1. Kun under det lettere Øresundsvand løfter skillefladen sig nogle meter. Løftet her svarer til et hydrostatisk respons på densitetsforskellene i det øvre lag. Skillefladen strækker sig over et dybdeinterval på 5 m. I skillefladen findes de største fluorescensværdier i Storebæltsvandet, 5 - 7 µg $l^{-1}$, mens fluorescensen er ens og lavere, 2 µg $l^{-1}$, på stationerne 5 til 9 over hele vandsøjlen. I Øresundsvandet er fluorescensen ligeledes høj, 3 µg $l^{-1}$. Her er der ikke et skillefladeмaksimum, men høje værdier over hele det øvre lag. I næringssaltene findes der forhøjede fosfatkoncentrationer, 0,4 µM, i det udstrømmende Øresundsvand, mens fosfatkoncentratioen er lav i det øvrige Kattegat. Skillefladeudstrækningen reduceres fra den 1. til den 9. september, Figurer 7.1. Vindens blanding homogeniserer det øvre lag. Ligesom under den første gennemsejling af den ydre rand findes de største fluorescensværdier i Storebælts- og Øresundsvandet, mens fluorescensen er lav på stationerne 3 til 9. Billedet fra de foregående togter gentages dermed. Vandet fra Storebælt og Øresund viser dermed de største algebiomasser for alle tre togter.

### 8.4.3 Hovedtransektet

*Skillefladehældning*

Under gennemsejlingerne af hovedtransektet er strømningen vestlig. Dermed løftes skillefladen op langs kysten af Corioliskraften, som det også var tilfældet under martstogtet.

*Advektion af algerigt vand*

I temperatur og salinitet findes en intern lagdeling af øvre lag, Figur 7.2. Densitetsforskellene er små. Fluorescensværdierne på hovedtransektet er moderate og størst i området, hvor skillefladen skærer bunden. I løbet af natten den 2. september fordobles fluorescensen på den kystnære station. Den nattelige stigning i fluorescensen skal ikke forklares ved en lokal produktion i farvandet, hvor skillefladen skærer bunden, men derimod ved tilstrømning af algerigere vand fra øst. Det algerige vand passerer hovedtransektet og i løbet af den 3. og 4. september reduceres fluorescensværdierne igen med tilstrømning af algefattigere vand fra øst i det indre område.

Den 5. september genfindes det algerige vand vest for hovedtransektet, mens fluorescensværdierne øst for hovedtransektet er lave. Det lavsaline og algerigere Øresundsvand har ikke nået hovedtransektet.

*Tilstrømning fra NØ ?*

På trods af den kraftige vind op til den 6. september er der fortsat en intern lagdeling af det øvre lag, Figur 7.2 Den opretholdes af tilstrømningen af mindre salint overfladevand fra øst og de store hastigheder, der bringer 22‰ vand hen til hovedtransektet. Vindens friktion på overfladen bremser overfladevandet og hastigheden her er mindre. Mod øst er fluorescensværdierne som nævnt lave. Stigningen i fluorescensen i skillefladen på station 61 kan derfor ikke forklares ved advektion fra øst. Mod nordøst på den ydre rand er fluorescensværdierne den 9. september store. I vand med samme salinitet og temperatur findes på den ydre rand tilsvarende fluorescensværdier i skillefladen som på hovedtransektet den 6. september. Det kan dermed være tilført fra stationerne 8 - 10 på den ydre rand, men det kan ikke afgøres med sikkerhed.

*Reduktion af fluorescens*

Ligesom på den 6. findes der fortsat en intern lagdeling af det øvre lag den 9. september, Figur 7.2, nu blot over et mindre dybdeinterval. Fluorescensværdierne er størst i skillefladen på station 60; igen kan det skyldes advektion, men dette kan ikke afgøres med sikkerhed. Det er muligt, at algerigt vand fra Øresundssiden når hovedtransektet og forårsager disse skillefladem aksima.

*Skillefladem aksima*

Fra den 6. september reduceres fluorescensværdierne i det øvre lag, Figur 7.2. Derved øges sigtdybden og en større del af lyset kan nå skillefladen og muligvis give anledning til skillefladem aksima. Reduktionen i fluorescensværdierne kan, som nævnt ovenfor, forklares ved advektion. Med den kraftige vind under hele togtet kunne der ellers forventes en stigning i fluorescensen i det øvre lag, som følge af vindens medrivning af næringsrigt nedre lags vand. Når dette ikke er tilfældet, kan det forklares ved den interne lagdeling, der reducerer vindens medrivning fra det nedre lag.

## 8.5 Hydrografi og fytoplankton forekomster i det indre område

### 8.5.1 Lagdeling

*Det øvre og nedre lag*

Det øvre og nedre lag kan identificeres på salinitet, temperatur og næringssalte. De viser alle adskillelsen imellem salt Nordsøvand og mindre salt Østersøvand, der er blandet med det nedre lags vand.

*Intern lagdeling*

Under samtlige togter er der en intern lagdeling af det øvre lag over store dele af det sydlige Kattegat. Den interne lagdeling fra marts og maj er dannet ved skift fra udstrømning til indstrømning til Østersøen samt blanding. Den interne lagdeling i det sydlige Kattegat opretholdes med det lettere Øresundsvand, der spredes over det sydlige Kattegat, mens ældre Kattegatvand danner en intrusion under overfladelaget fra Øresund. På hovedtransektet er der ikke fundet overfladevand fra Storebælt. Storebælts betydning for den interne lagdeling af det øvre lag er lille under samtlige togter. Vindens opblanding øger saliniteten i overfladelaget ved en medrivning af saltere vand nedenfor overfladelaget. Vandet fra en efterfølgende udstrømning er mindre salt og lægger sig hen over det ældre Kattegatvand. Den kan følges i salinitet og temperatur, men ikke i næringssaltene.

*Afkobling af vindens medrivning*

Den interne lagdeling i marts og maj afkobler vindens medrivning fra det nedre lag, indtil den interne lagdeling er brudt ned, og hele det øvre lag er homogent. Først da kan vinden give en medrivning af næringsrigt vand fra det nedre lag til det øvre lag. I marts betyder det, at vinden først under de afsluttende døgn af togtet giver en medrivning af det nedre lags vand. I maj er vinden svag og bidrager ikke til den vertikal transport af næringssalte omkring den primære skilleflade. For septembertogtet er det usikkert, hvor meget vinden giver af medrivning fra det nedre lag. En ren to-lags model, hvor der ikke indgår en intern lagdeling af det øvre lag, er ikke egnet til at beskrive det dynamiske billede af medrivning og transport af næringssalte og dermed af fytoplanktonforekomster i det sydlige Kattegat for de gennemgåede, korte måleserier. Tidligere undersøgelser har vist, at to-lagsmodellen giver passende resultater for modelleringer af Kattegat (Jacobsen & Hansen, 1985) og de indre danske farvande (Bo Pedersen & Møller, 1981; Hansen *et al.*, 1990). Modelleringerne dækker årsvariationer over større farvandesdele og kan ikke overføres til lokale betragtninger for dynamikken i det sydlige Kattegat.

### 8.5.2 Advektion

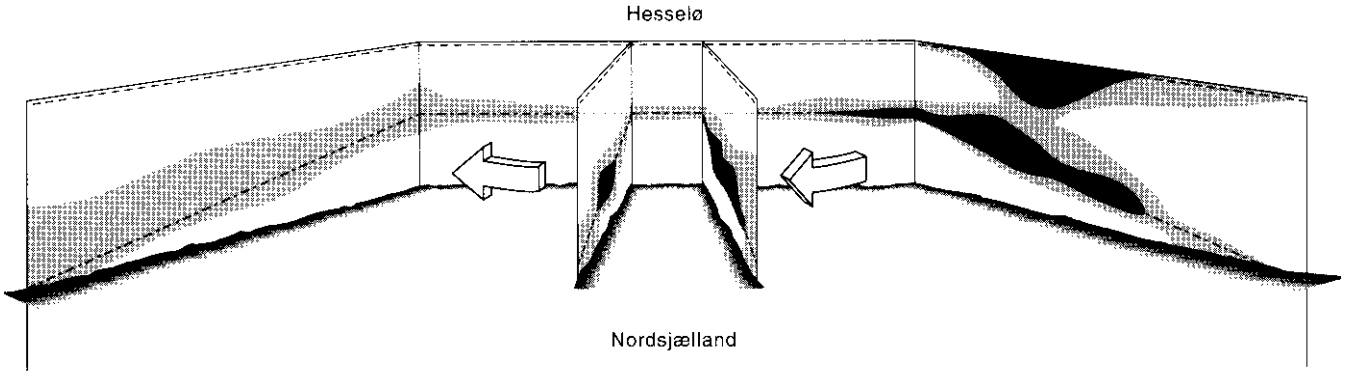
*Vest- og østlig strømning*

Strømretningen langs hovedtransektet er enten vestlig eller østlig. Hvad der styrer strømretningen er ikke afklaret. Skift i strømretningen, som fra vestlig til østlig strømning, har ikke nogen simpel sammenhæng med vandstandsforskelle imellem Hornbæk og Sjællands Odde, densitetsforskelle på tværs af Kattegat eller ind- og udstrømning gennem Storebælt og Øresund. Kun i marts kan en vestlig strømning i det øvre lag forklares med en tiltagende østlig vind.

### 8.5.3 Advektion og fluorescensmaksima

*Horisontale variationer*

I Storebælts- og/eller Øresundsvandet er der under alle tre togter fluorescensværdier, der er væsentligt større end værdierne i det indre område (Figur 8.1). Fluorescensen i det indre område følger dette billede ved stigende fluorescens mod Storebælt og/eller Øresund. Advektion af fytoplanktonrigt eller -fattigt vand kan forklare stigende og aftagende fluorescensværdier på hovedtransektet i marts og maj. I september er vandskiftet for stort til, at forskellige vandmasser kan følges i det indre område. Her kan en sammenhæng imellem fytoplanktonforekomsten i det indre område og den ydre rand dog sandsynliggøres.




***Figur 8.1.*** *Advektionen er bestemmende for de tidslige variationer i algebiomasser langs med hoved - transektet. På ovenstående skitse fører en vestlig strømning vand med højt fytoplanktonindhold fra Øresund langs med Nordsjællands kyst, eksemplificeret ved majtogtet 1992.*

*Lokal produktion vs. tilført biomasse*

Som nævnt ovenfor, kan de tidslige ændringer i fytoplanktonmængden i stor udstrækning forklares ved advektion af fytoplanktonrigere eller -fattigere vand. Storebælts og Øresunds rolle for algeforekomsterne i Kattegat er essentiel. En en-dimensional, vertikal beskrivelse af fluorescensmaksima i skillefladen er utilstrækkelig til at forstå de observerede variationer. Strømforholdene og lagdelingen i det fytoplanktonfattigere vand er ikke væsensforskellig fra det, der observeres i det fytoplanktonrigere vand. Næringssaltværdierne i det nedre lag er ens. Der er således ikke væsentlige forskelle i den vertikale transport af næringssaltene, der kan forklare de store horisontale variationer i fytoplanktonforekomsterne. I forhold til advektionen spiller den lokale fytoplanktonproduktion i det sydlige Kattegat derfor kun en mindre rolle for størrelsen af de fytoplanktonmaksima, der er observeret i skillefladen. Ændringer i fytoplanktonbiomasse i løbet af togterne kan ikke anvendes til estimater over fytoplanktonproduktionen, idet advektionens rolle er for stor. Idet store fluorescensværdier i skillefladen forekommer på såvel Storebælts- og Øresundssiden uafhængigt af den interne lagdeling, kan de ikke forklares ved forskelle i medrivningen på tværs af Kattegat. Høje værdier i Storebælts- og Øresundsvandet skal nærmere forklares ved blanding i selve Storebælt og Øresund og udstrømning af lavsalint vand fra Østersøen.

*Ens vertikal transport*

*Kystnær blanding*

Betydningen af den kystnære blanding for fytoplanktonforekomsterne på hovedtransektet er lille i forhold til transporten på tværs af hovedtransektet af fytoplanktonrigere og -fattigere vand fra Storebælts- eller Øresundssiden af det sydlige Kattegat. På basis af målingerne kan det ikke afklares, hvorvidt den kystnære blanding har generel betydning for fytoplanktonforekomsterne i skillefladen.

### 8.5.4 Sammenfatning

*Væsentligste mekanismer*

I det sydlige Kattegat optræder der på alle tre togter en intern lagdeling af det øvre lag, dannet af tilstrømmende lavsalint overfladevand og varmeindstråling. Først når den interne lagdeling er brudt ned, kan der ske en egentlig medrivning fra det nedre lag. Uden hensyntagen til den interne lagdeling kan den vindinducerede medrivning fejlestimeres og dermed give en forkert størrelse af næringssalttransporten fra det nedre lag til det øvre lag. Undersøgelserne viser advektionens store rolle for forståelsen af fluorescensmaksima i skillefladen og etableringen af en intern lagdeling i det sydlige Kattegat. Fytoplanktonrigt vand findes på alle tre togter i Storebælts- og/eller Øresundsvandet. Storebælts og Øresunds rolle for algeforekomsterne i det sydlige Kattegat er essentiel.

# 9 Kvælstofomsætningen

Kvælstofomsætningen er undersøgt på stationerne langs hovedtransektet nord for Hundested. Formålet med undersøgelsen var at belyse hvilke kvælstofnæringssalte, der danner grundlag for væksten i dybtliggende algemaksima, samt hvorvidt den relative betydning af nitrat og ammonium ændres med afstanden til kysten. Sidstnævnte tager udgangspunkt i en af hypoteserne bag pyknoklinundersøgelsen, nemlig at der langs kysten sker en blanding af nitratrigt bundvand og næringsfattigt overfladevand, og at dette nitratrige blandingsvand føres langs pyknoclinen ud i Kattegat (se Rasmussen, 1994). Nitrat forventes dermed at have størst betydning for primærproduktionen i kystzonen, mens der gradvist sker et skifte fra overvejende nitratbaseret produktion (ny produktion) til overvejende ammoniumbaseret produktion (regenereret produktion), når vandet bevæger sig langs pyknoklinen ud i Kattegat. Generelt anses nitratbaseret produktion i åbne havområder for at være ensbetydende med ny produktion (=produktion baseret på næringssalte tilført udefra modsat næringssalte dannet ved remineraliseringsprocesser i vandet), og dermed produktion af organisk stof, der for en stor del vil eksporteres ud af systemet, f.eks. til bunden, hvor det kan være medvirkende årsag til iltsvind.

Kvælstofundersøgelsen indgik i de tre pyknoklintogter i marts, maj og september 1992. Målingerne skete på udvalgte stationer, hvor nitratoptagelse samt ammoniumoptagelse og - remineralisering blev målt i én dybde i det dybtliggende algemaksimum og i det opblandede vand ved kysten. For at kunne beregne optagelsen i flere dybder blev relationen mellem kvælstofoptagelse og lysintensitet undersøgt ved hver prøvetagning. I det følgende præsenteres resultaterne på 3 niveauer: som timeværdier (=gennemsnitsoptagelsesrater i inkubationsperioden), samt estimerede døgnværdier og dybdeprofiler. Kvælstofomsætningen er sammenholdt med primærproduktionen målt ved dækinkubation, da disse forsøg er udført parallelt under de samme betingelser.

## 9.1 Lysafhængighed i kvælstofoptagelsen

Nitratoptagelsen er ligesom primærproduktionen afhængig af lysintensiteten, og nitratoptagelsens relation til lysintensiteten (NI-I-relationen) kan beskrives efter samme model som primærproduktionen (se kap.2). Tabel 9.1 og 9.2 giver parametrene fra tilpasningen til modellen af de enkelte lysserie-målinger i marts, maj og september. Af tabellerne fremgår det, at tilpasningen til modellen til tider er dårlig ($r^2$ meget lav) eller ikke kan gennemføres. Dette skyldes, at nitratkoncentrationerne og nitratoptagelserne var meget lave på disse stationer/tidspunkter.

*Tilpasning til lave lysintensiteter*

Algerne fra pyknoklinen var ikke bedre tilpasset til nitratoptagelse ved lave lysintensiteter end algerne fra overfladevandet på kyststationerne. Algernes tilpasning til lave lysintensiteter kan vurderes udfra stigningsgraden i optagelsen ved de laveste lysintensiteter ($\alpha$) og $I_k$ (= $V_{max}/\alpha$), og ingen af de to parametre giver indikationer på forskelle i adaptationen mellem pyknoklinalgerne og algerne fra overfladevandet. $I_k$ er i alle tilfælde er mindre end 100 µmol $m^{-2}$ sekund$^{-1}$, og både pyknoklin- og overfladealgerne synes derfor effektive til at optage nitrat ved meget lave lysintensiteter.

***Tabel 9.1.*** *Nitratoptagelsens (Ni) sammenhæng med lysintensiteten (I) i marts og maj. Karakteriserende parametre for Ni-I relationen ved tilpasning til* $V = V_s \cdot (1-exp^{(-\alpha I/Vs)} \cdot exp^{(-\beta I/Vs)})$, *hvor* $V_s$ *er den empiriske maksimale optagelsesrate og* $\alpha$ *og* $\beta$ *er udtryk for henholdsvis stigningen i optagelsen ved lave lysintensiteter og hæmningen af optagelsen ved høje lysintensiteter.* $A_{max}$ *er det absolutte optag, dvs den specifikke optagelse gange klorofylkoncentrationen.* $I_k$ *er udtryk for ved hvilke lysintensiteter maksimal optagelsesrate nås og* $I_b$ *er udtryk for graden af lyshæmning ved de høje lysintensiteter. Enheder:* $V_s$*: µg* $NO_3$*-N µg klorofyl*$^{-1}$ *time*$^{-1}$, $\alpha$ *og* $\beta$*: (µg* $NO_3$*-N µg klorofyl*$^{-1}$ *time*$^{-1}$*)/(µmol fotoner m*$^{-2}$ *sekund*$^{-1}$*),* $A_{max}$*: µg* $NO_3$*-N liter*$^{-1}$ *time*$^{-1}$, $I_k$ *og* $I_b$*: µmol m*$^{-2}$ *sekund*$^{-1}$. $<< = r^2 < 0{,}05$.

| A. MARTS | $V_s$ | $\alpha$ · 100 | $\beta$ · 1000 | $r^2$ | n | $A_{max}$ | $I_k$ | $I_b$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| stn 60 27.3 | 0,053 | 0,278 | | 0,98 | 4 | 0,127 | 19,0 | |
| 28.3 | 0,038 | 0,087 | | 0,71 | 4 | 0,053 | 43,1 | |
| 1.4 | 0,019 | 0,029 | | 0,06 | 4 | 0,038 | 65,8 | |
| stn 62 31.3 | 0,045 | 0,396 | | 0,92 | 4 | 0,179 | 11,3 | |
| 31.3 | 0,006 | 1,673 | | << | 4 | 0,058 | 0,4 | |
| stn 63 29.3 | 0,006 | 1,000 | 0,006 | 0,96 | 5 | 0,055 | 0,6 | 1,1 |
| stn 66 29.3 | 0,023 | 0,044 | 0,006 | 0,49 | 5 | 0,093 | 48,5 | 3,6 |
| 1.4 | 0,023 | 0,400 | | 0,76 | 5 | 0,104 | 5,6 | |

| B. MAJ | $V_s$ | $\alpha$ ·100 | $\beta$ ·1000 | $r^2$ | n | $A_{max}$ | $I_k$ | $I_b$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| stn 60 13.5 | 0,019 | 8,135 | | << | 4 | 0,034 | 0,2 | |
| 15.5 | 0,160 | 0,214 | 0,086 | 0,41 | 3 | 0,702 | 62,9 | 1,9 |
| 15.5 | 0,151 | 0,284 | 0,451 | 0,94 | 3 | 0,527 | 33,6 | 0,3 |
| 16.5 | 0,061 | 1,190 | | 0,04 | 5 | 0,195 | 5,2 | |
| 17.5 | 0,066 | 1,048 | 0,119 | 0,96 | 5 | 0,229 | 0,6 | 0,6 |
| 20.5 | 0,109 | 1,560 | 0,335 | 0,98 | 5 | 0,637 | 6,3 | 0,3 |
| stn 62 17.5 | 0,091 | 0,237 | 0,453 | 0,92 | 4 | 0,319 | 22,8 | 0,2 |
| 18.5 | 0,119 | 0,457 | 0,329 | 0,92 | 4 | 1,132 | 20,0 | 0,4 |
| 18.5 | 0,178 | 1,266 | 0,713 | 0,96 | 5 | 0,908 | 11,2 | 0,2 |
| 19.5 | 0,164 | 1,049 | 0,398 | 0,88 | 4 | 0,377 | 13,3 | 0,4 |
| stn 63 13.5 | kurve- | tilpasning | ikke | mulig | | | | |
| 20.5 | 0,002 | 0,030 | | << | 5 | 0,013 | 6,9 | |
| stn 65 13.5 | 0,081 | 3,710 | | 0,79 | 5 | 0,014 | 2,1 | |
| stn 66 20.5 | 0,009 | 0,060 | | 0,58 | 5 | 0,016 | 15,6 | |

*Høje lysintensiteter*

Høje lysintensiteter var især hæmmende på nitratoptagelsen i maj, idet $I_b$ (= $V_s/\beta$) på dette tidspunkt var lavere end i marts og september. Sammenlignes stationerne er det karakteristisk, at optagelsen ikke eller kun i ringe grad blev hæmmet af høje lysintensiteter på de inderste station 65 og 66, hvor vandsøjlen var helt opblandet. Den manglende hæmning på station 60 og 62 i marts skal tages med forbehold, da lysintensiteten under inkubationerne var meget lav.

***Tabel 9.2.*** *Nitratoptagelsens sammenhæng (Ni) med lysintensiteten (I) i september. Karakteriserende parametre for Ni-I relationen ved tilpasning til* $V = V_s \cdot (1-exp^{(-\alpha I/Vs)} \cdot exp^{(-\beta I/Vs)})$, *hvor* $V_s$ *er den empiriske maksimale optagelsesrate og* $\alpha$ *og* $\beta$ *er udtryk for henholdsvis stigningen i optagelsen ved lave lysintensiteter og hæmningen af optagelsen ved høje lysintensiteter.* $A_{max}$ *er det absolutte optag, dvs den specifikke optagelse gange klorofylkoncentrationen.* $I_k$ *er udtryk for ved hvilke lysintensiteter maksimal optagelsesrate nås og* $I_b$ *er udtryk for graden af lyshæmning ved de høje lysintensiteter. Enheder:* $V_s$*: µg* $NO_3$*-N µg klorofyl*$^{-1}$ *time*$^{-1}$, $\alpha$ *og* $\beta$*:(µg* $NO_3$*-N µg klorofyl*$^{-1}$ *time*$^{-1}$*)/(µmol fotoner m*$^{-2}$ *sekund*$^{-1}$*),* $A_{max}$*: µg* $NO_3$*-N liter*$^{-1}$ *time*$^{-1}$, $I_k$ *og* $I_b$*: µmol m*$^{-2}$ *sekund*$^{-1}$.

| C SEPTEMBER | $V_s$ | $\alpha$ ·100 | $\beta$ ·1000 | $r^2$ | n | $A_{max}$ | $I_k$ | $I_b$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| stn 60 2.9 | 0,035 | 0,264 | 0,070 | 0,78 | 4 | 0,061 | 11,7 | 0,5 |
| 6.9 | 0,068 | 0,423 | 0,412 | 0,81 | 5 | 0,145 | 11,5 | 0,2 |
| 8.9 | 0,060 | 0,771 | 0,101 | 0,86 | 5 | 0,202 | 7,8 | 0,6 |
| 8.9 | 0,065 | 0,803 | 0,104 | 0,86 | 5 | 0,226 | 7,5 | 0,6 |
| 9.9 | 0,103 | 0,270 | 0,441 | 0,86 | 5 | 0,267 | 23,8 | 0,2 |
| stn 62 2.9 | kurve | tilpasning | ikke | mulig | | | | |
| 3.9 | kurve | tilpasning | ikke | mulig | | | | |
| 3.9 | 0,023 | 0,082 | 0,044 | 0,67 | 5 | 0,028 | 23,0 | 0,5 |
| 9.9 | 0,023 | 0,079 | 0,049 | 0,50 | 5 | 0,041 | 23,4 | 0,5 |
| stn 63 6.9 | 0,012 | 0,035 | | 0,67 | 4 | 0,025 | 34,3 | |
| stn 65 2.9 | kurve | tilpasning | ikke | mulig | | | | |
| 6.9 | 0,016 | 0,056 | | 0,98 | 4 | 0,022 | 27,5 | |
| 9.9 | 0,022 | 0,100 | | 0,88 | 4 | 0,021 | 22,0 | |

*Ammoniumoptagelsens afhængighed af lysintensiteten*

Ammoniumoptagelsen viser ingen entydig relation til lysintensiteten, selvom der på nogle stationer blev målt en lavere optagelse ved de laveste lysintensiteter. I Figur 9.1-9.3 er ammoniumoptagelsen for hver lysserie derfor midlet. De højeste klorofylspecifikke optagelsesrater (dvs. optagelse pr. klorofylenhed pr. time) er målt i september på station 62, 63 og 65, hvor optagelsen varierede mellem 0,096-0,156 µg N-$NH_4$ µg klorofyl$^{-1}$ time$^{-1}$. På samme tidspunkt var den absolutte optagelse ligeledes høj, 0,18-0,58 µg N-$NH_4$ liter$^{-1}$ time$^{-1}$. De gennemsnitlige klorofylspecifikke optagelsesrater var i marts 0,018 (SE=0,005), i maj 0,017 (SE=0,005) og i september 0,054 (SE=0,013) µg N-$NH_4$ µg klorofyl$^{-1}$ time$^{-1}$. De gennemsnitlige absolutte rater var i marts 0,088 (SE=0,04), i maj 0,056 (SE=0,02) og i september 0,150 (SE=0,041) µg N-$NH_4$ liter$^{-1}$ time$^{-1}$.

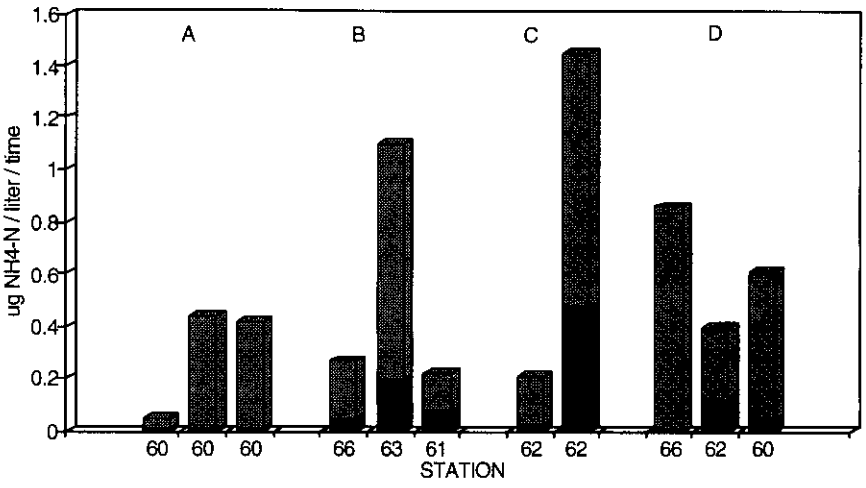
*Remineralisering*

Remineraliseringen af ammonium varierede gennem døgnet uden nogen entydig relation til lysintensiteten eller tidspunktet på døgnet. Remineraliseringen og ammoniumoptagelsen under inkubationerne var generelt ikke i balance (Figur 9.2-9.4). Kun enkelte målinger den 2., 3. og 6. september viser ligevægt i forholdet mellem de to rater. På samme datoer sås enkelte tilfælde, hvor ammoniumoptagelsen var dobbelt så stor som remineraliseringen, men ellers blev mindre end 60% af det remineraliserede ammonium umiddelbart optaget i plankton. Specielt i maj er misforholdet stort.

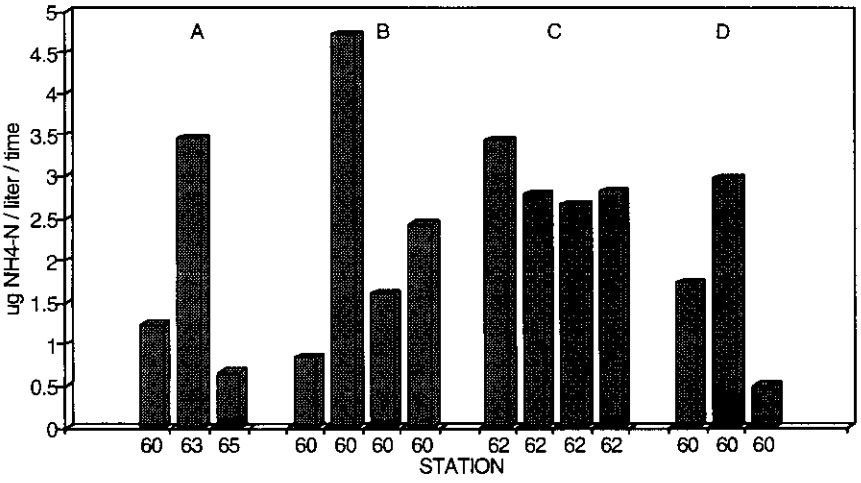
*Beregning af døgnrater*

På grundlag af P-I og Ni-I relationerne er optagelsen over døgnet beregnet.For at kunne sammenligne værdierne er alle døgnrater beregnet for en lysintensitet på 3% af overfladeindstrålingen. Døgnrater for ammonium er i maj og september beregnet ved at gange den midlede optagelse med antallet af lystimer, idet målinger af mørkeoptagelsen indikerer meget lave

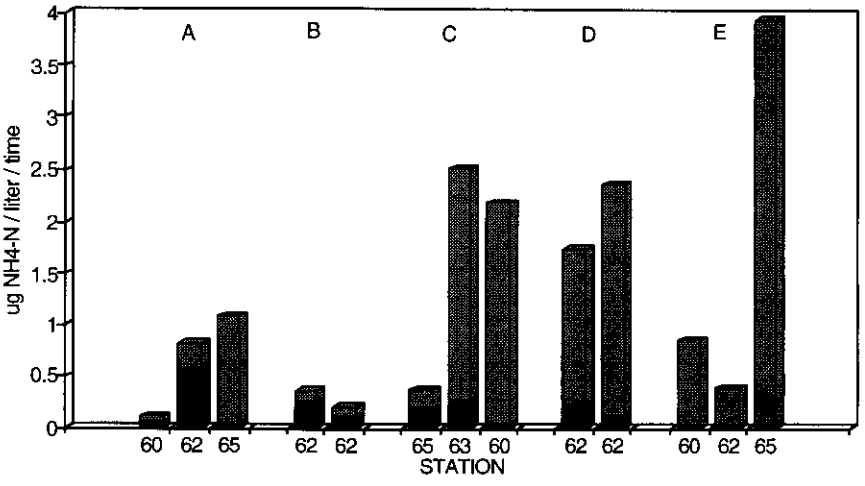
eller ikke-målelige optagelsesrater om natten (ikke vist). I marts er timeraterne ganget med 24, fordi mørkeoptagelserne her var på niveau med lysraterne. Remineraliseringen er ikke omregnet til døgnrater, da det ikke var muligt at opstille relationer for døgnvariationen.




*Figur 9.1. Ammoniumoptagelse (mørk søjle) og - remineralisering (lys søjle) i marts 1992. A: døgnundersøgelse 27.-28. marts, prøvetagning 11.58,17.45,7.50 GMT -tid, B: transektundersøgelse 29. marts, C: døgnundersøgelse 30.-31. marts, prøvetagning 5.15, 10.37 GMT -tid, D: transektundersøgelse 1. april.*




*Figur 9.2. Ammoniumoptagelse (mørk søjle) og -remineralisering (lys søjle) i maj 1992. A: transektundersøgelse 13. maj, B: døgnundersøgelse 15.-17. maj, prøvetagning 3.30, 10.22, 3.36, 4.52 GMT-tid, C: døgnundersøgelse 17.-19.maj, prøvetagning 12.30, 3.20,11.34,11.10 GMT -tid, D: transektundersøgelse 20. maj.*




*Figur 9.3. Ammoniumoptagelse (mørk søjle) og -remineralisering (lys søjle) i september 1992. A: transektundersøgelse 2. september,B: døgnundersøgelse 3. september, prøvetagning 4.55, 10.47 GMT -tid, C: transektundersøgelse, L: døgnundersøgelse 8. september, prøvetagning 4.21, 8.45 GMT-tid,D: transektundersøgelse 9. september.*

## 9.2 Forholdet mellem kulstof- og kvælstofoptagelse

*Specifikke timerater*

De højeste klorofylspecifikke optagelsesrater for kvælstof ($NO_3$+$NH_4$) og kulstof under inkubationerne blev målt i september (Figur 9.5). Det højeste målte kvælstofoptag var 0,22 µg N µg klorofyl$^{-1}$ time$^{-1}$ og blev målt på stn. 61. Den højeste målte assimilationsraten var 2,5 µg C µg klorofyl$^{-1}$ time$^{-1}$, målt på stn. 65. Tages hensyn til klorofylkoncentrationen på de enkelte stationer er de maksimale målte rater 1 µg N liter$^{-1}$ time$^{-1}$ og 5,2 µg C liter$^{-1}$ time$^{-1}$ respektivt. Tabel 9.3 giver de gennemsnitlige kvælstofoptagelses- og assimilationsrater samt C:N-forhold i optagelsen fundet på togterne i marts, maj og september.

***Tabel 9.3.*** *Gennemsnit og standard error for assimilationsraten (AR, µg C optaget µg klorofyl$^{-1}$ time$^{-1}$), kvælstofoptagelsesraten (µg N optaget µg klorofyl$^{-1}$ time$^{-1}$) og C:N-forholdet på de tre togter i marts, maj og september 1992.*

| | N | AR | SE | Noptag | SE | C:N | SE |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| MARTS | 34 | 0,66 | ±0,05 | 0,03 | ±0,002 | 25 | ±2,1 |
| MAJ | 58 | 0,44 | ±0,03 | 0,07 | ±0,005 | 7,4 | ±0,6 |
| SEPTEMBER | 61 | 0,89 | ±0,06 | 0,08 | ±0,006 | 14,5 | ±1,5 |

*C:N-forholdet under inkubationen*

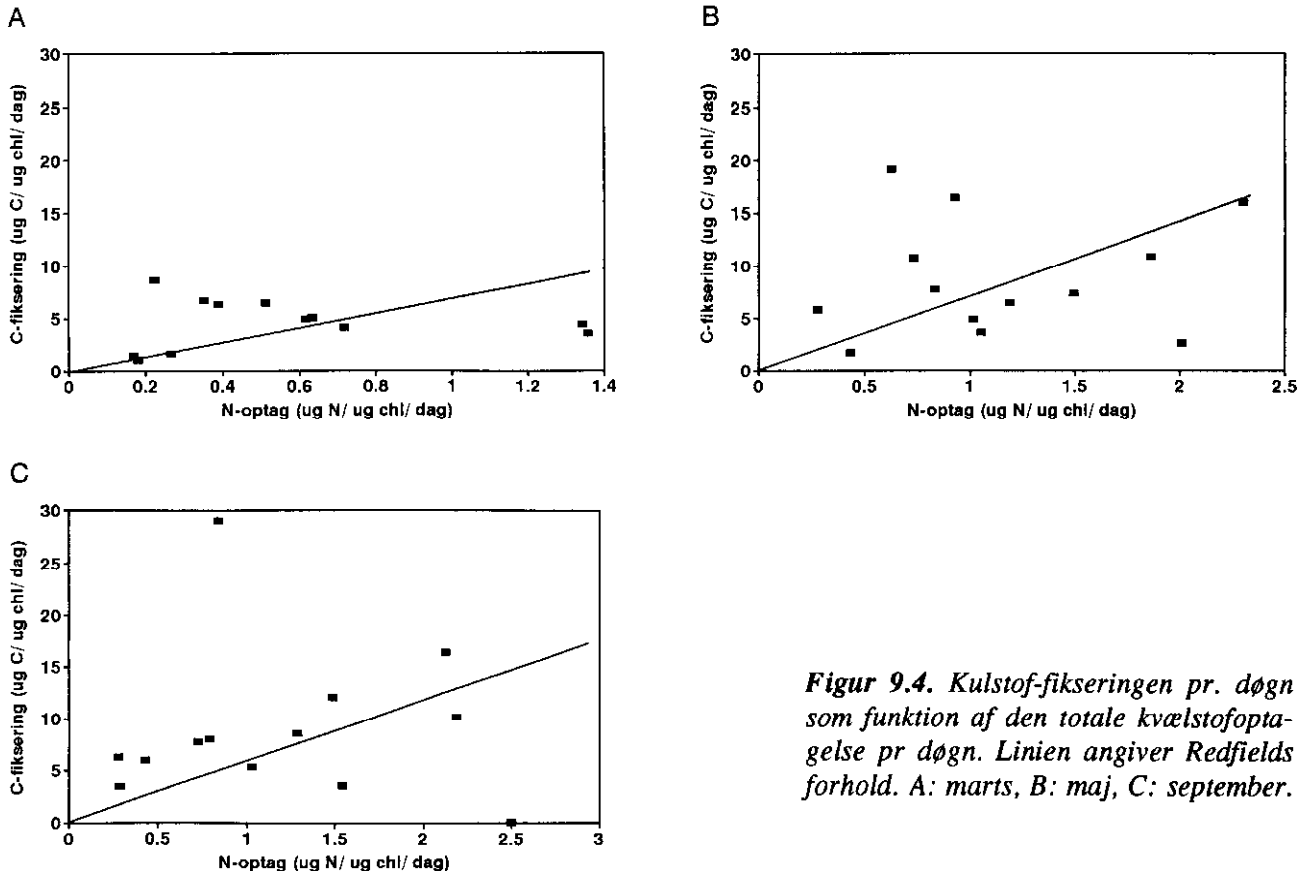
Forholdet mellem kulstofoptagelsen og kvælstofoptagelsen (C:N-forholdet) under inkubationerne er både i marts, maj og september større end Redfields forhold (C:N=6 på vægtbasis) (Tabel 9.4 og Figur 9.5). Den bedste overensstemmelse med Redfields forhold fandtes i maj på stationerne 60 og 62 (Figur 9.5), sammenfaldende med at nitrat her udgjorde den dominerende kvælstofkilde (f-forholdet i Tabel 9.4). På station 62 i maj kan relationen mellem kulstof og kvælstofoptagelsen beskrives ved C-optag = 4,5·$(NO_3+NH_4)_{optag}$ + 0,16 ($r^2$=0,48). På de kystnære stationer (63-66) er spredningen i C:N-forholdet stor.

*C:N-forholdet pr. døgn*

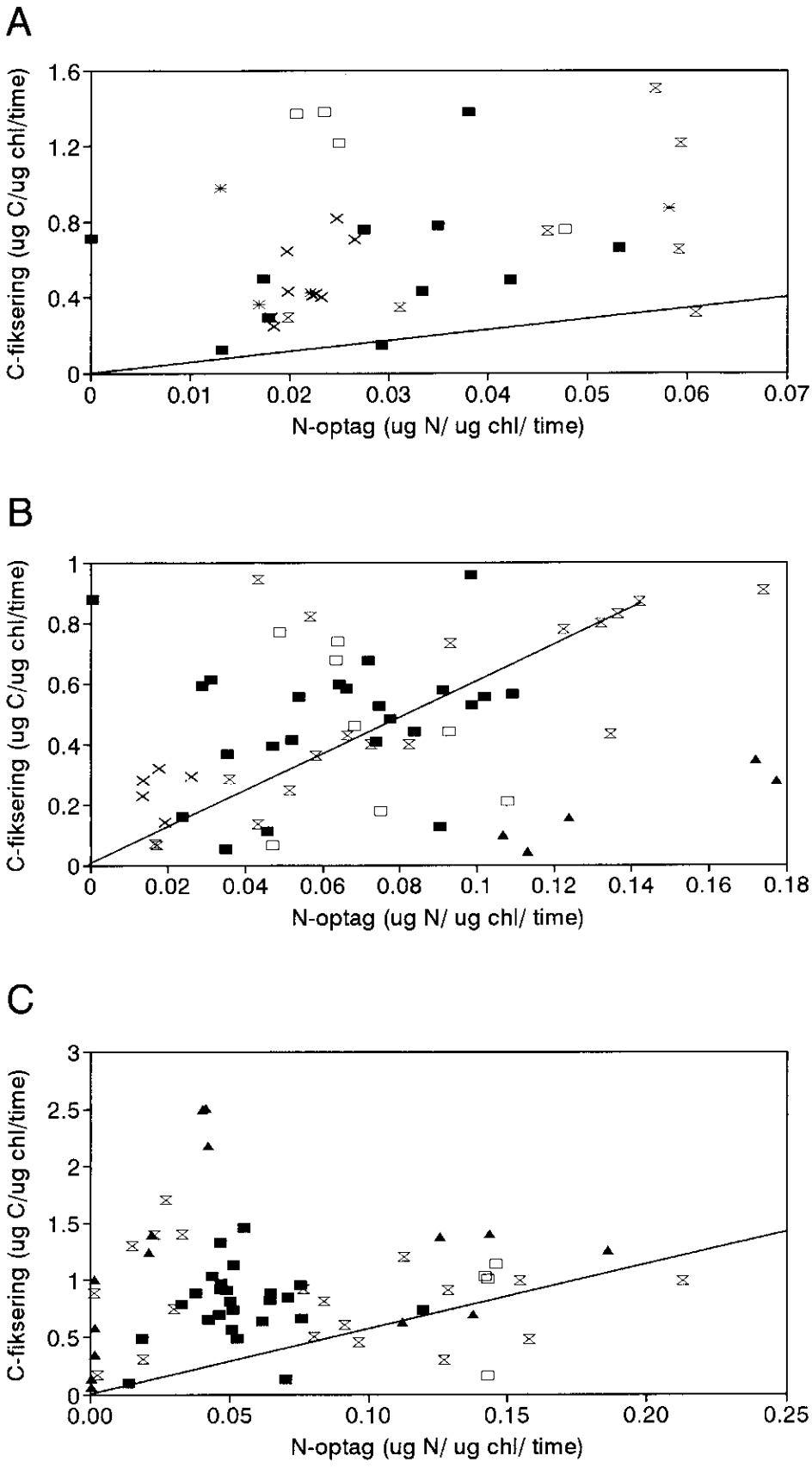
Den bedre balance i kulstof- og kvælstofoptagelsen ved større relativ betydning af nitrat skyldes sandsynligvis, at nitratoptagelsen, som tidligere vist, ligesom kulstofoptagelsen er afhængig af lysintensiteten, mens optagelse af ammonium kan ske med samme rate gennem hele lysperioden/døgnet. Omregnes til døgnrater fås en bedre overensstemmelse med Redfields forhold og specielt i september, hvor ammonium var den dominerende kvælstofkilde (se nedenfor), er forholdet mellem kulstof- og kvælstofoptagelsen nær 6:1 (Figur 9.4).

***Tabel 9.4.*** *Gennemsnit og standard error (SE) i C:N-forhold og f-forhold på de enkelte stationer besøg under pyknoklintogterne i marts, maj og september 1992. f-forholdet = optagelse af nitrat divideret med den totale kvælstofoptagelse (nitrat plus ammonium). Baseret på timeværdier.*

| | stn: | 60 | 62 | 63 | 65 | 66 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| MARTS | C:N | 18,5 | 15,1 | 47,3 | - | 22,0 |
| | SE | 2,6 | 1,7 | 9,9 | | 7,0 |
| | f | 0,6 | 0,5 | 0,2 | - | 0,7 |
| | SE | 0,09 | 0,09 | 0,04 | | 0,2 |
| | n | 16 | 16 | 5 | - | 10 |
| MAJ | C:N | 7,9 | 6,5 | 6,9 | 1,2 | 14,8 |
| | SE | 0,9 | 0,7 | 1,7 | 0,3 | 2,4 |
| | f | 0,9 | 0,9 | 0,3 | 0,6 | 0,4 |
| | SE | 0,03 | 0,03 | 0,12 | 0,04 | 0,04 |
| | n | 28 | 45 | 10 | 5 | 5 |
| SEPTEM- | C:N | 12,8 | 16,0 | 5,8 | 16,9 | - |
| BER | SE | 1,2 | 4,3 | 1,4 | 4,7 | |
| | f | 0,7 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | - |
| | SE | 0,06 | 0,02 | 0,003 | 0,04 | |
| | n | 16 | 21 | 5 | 15 | - |




***Figur 9.4.*** *Kulstof-fikseringen pr. døgn som funktion af den totale kvælstofoptagelse pr døgn. Linien angiver Redfields forhold. A: marts, B: maj, C: september.*




***Figur 9.5.*** *Kulstof-fikseringen pr. time som funktion af den totale kvælstofoptagelse pr. time. Målinger fra alle målinger på togterne i A: marts, B: maj og C: september 1992. Linien angiver Redfields forhold. Stationmarkeringen er: station 60= udfyldt firkant, 61= asteriks, 62= timeglas, 63= åben firkant, 65= trekant, 66= kryds.*

## 9.3 Betydningen af nitrat og ammonium

*f-forholdet*

Betydningen af nitrat i kvælstofoptagelsen udtrykkes hyppigt ved f-forholdet, som er optagelsen af nitrat i forhold til den samlede optagelse af nitrat og ammonium ($g(NO_3)/g(NO_3+NH_4)$) (Dugdale & Goering 1967). f-forholdet under inkubationerne stiger i alle tre måneder med stigende relativ betydning af nitrat i vandets kvælstofpulje (udtrykt ved k= $NO_3$-koncentrationen divideret med ($NO_3+NH_4$)-koncentrationen) (Figur 9.6). I september er f-forholdet lavt i enkelte tilfælde selvom nitratkoncentrationen er relativt høj (k=0,6 og 0,7). Dette skyldes sandsynligvis, at planktonet ikke udnytter de høje nitratkoncentrationer på grund af samtidige høje ammoniumkoncentrationer. Tendensen i f-forholdet beregnet på basis af døgnværdierne er ligeledes, at betydningen af nitrat for kvælstofoptagelsen stiger ved stigende andel af nitrat i kvælstof-næringssaltpuljen (Figur 9.7).

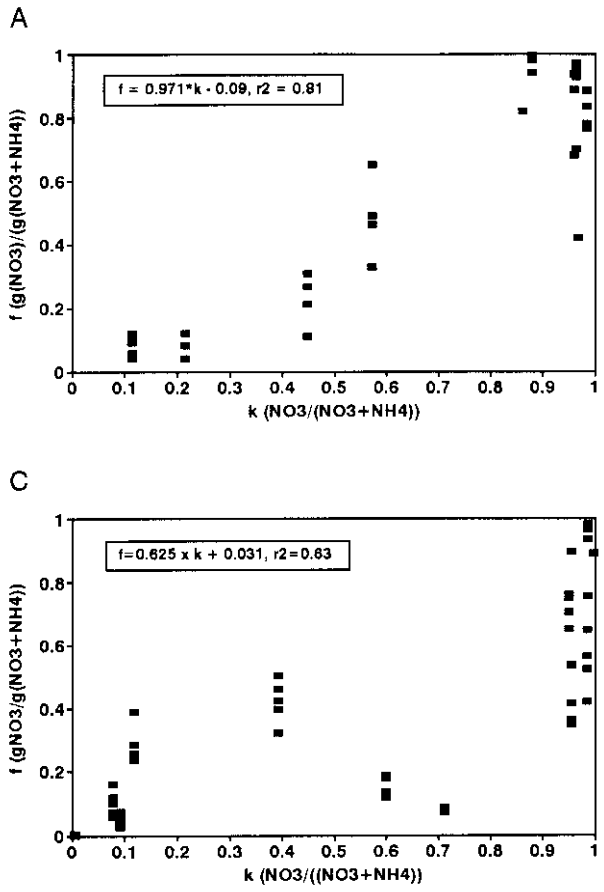
Sammenlignes døgnraterne på de 3 pyknoklintogter har nitrat størst betydning for kvælstofoptagelsen i maj (Figur 9.8). Specielt i pyknoklinen på station 60 og 61 er f-forholdet højt, 0,56-1. I samme måned er f-forholdet i området hvor pyknoklinen rammer bunden, station 63, 0,03-0,05 og på de kystnære stationer 0,45-0,59. I marts varierer f-forholdet mellem 0 og 0,95 med et gennemsnit på 0,36. De høje værdier forekom først på togtet (27.-28. marts) i pyknoklinen på de yderste stationer, og sidst på togtet (1. april) på kyststationen station 66. I september varierer f-forholdet mellem 0 og 0,771 med et gennemsnit på 0,28. De højeste forhold ses sidst på togtet (8.-9. september), hvor værdien ved transektgennemsejlingen falder fra pyknoklinen yderst på station 60 til det opblandede vand på kyststationen station 66.

*Absolutte døgnrater i prøvetagningdybder*

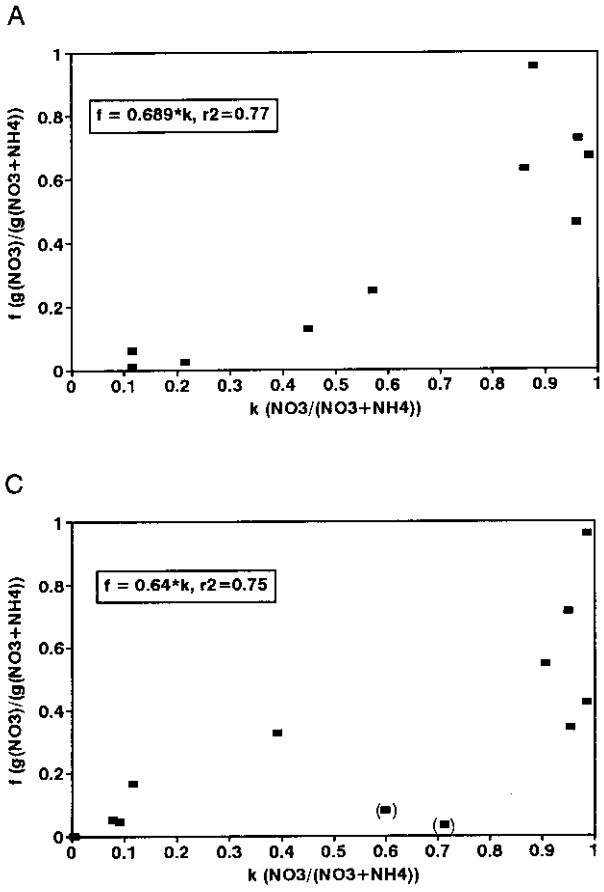
I absolutte værdier var optagelse af kvælstof ($NO_3$ + $NH_4$) over døgnet i prøvetagningsdybderne størst i maj. Her var optagelsen i gennemsnit 5,3 µg N $liter^{-1}$ $dag^{-1}$ hvoraf 4,2 µg blev optaget i form af nitrat og 1,1 µg i form af ammonium. De næsthøjeste optagelser blev målt i september og de laveste i marts. I september var den gennemsnitlige optagelse 3,1 µg N $liter^{-1}$ $dag^{-1}$ fordelt med 0,7 µg på nitratoptagelse og 2,4 µg på ammoniumoptagelse. I marts var den gennemsnitlige optagelse var 1,9 µg $liter^{-1}$ $dag^{-1}$ fordelt med 0,6 på nitratoptagelse og 1,3 på ammoniumoptagelse.

*Døgnundersøgelser*

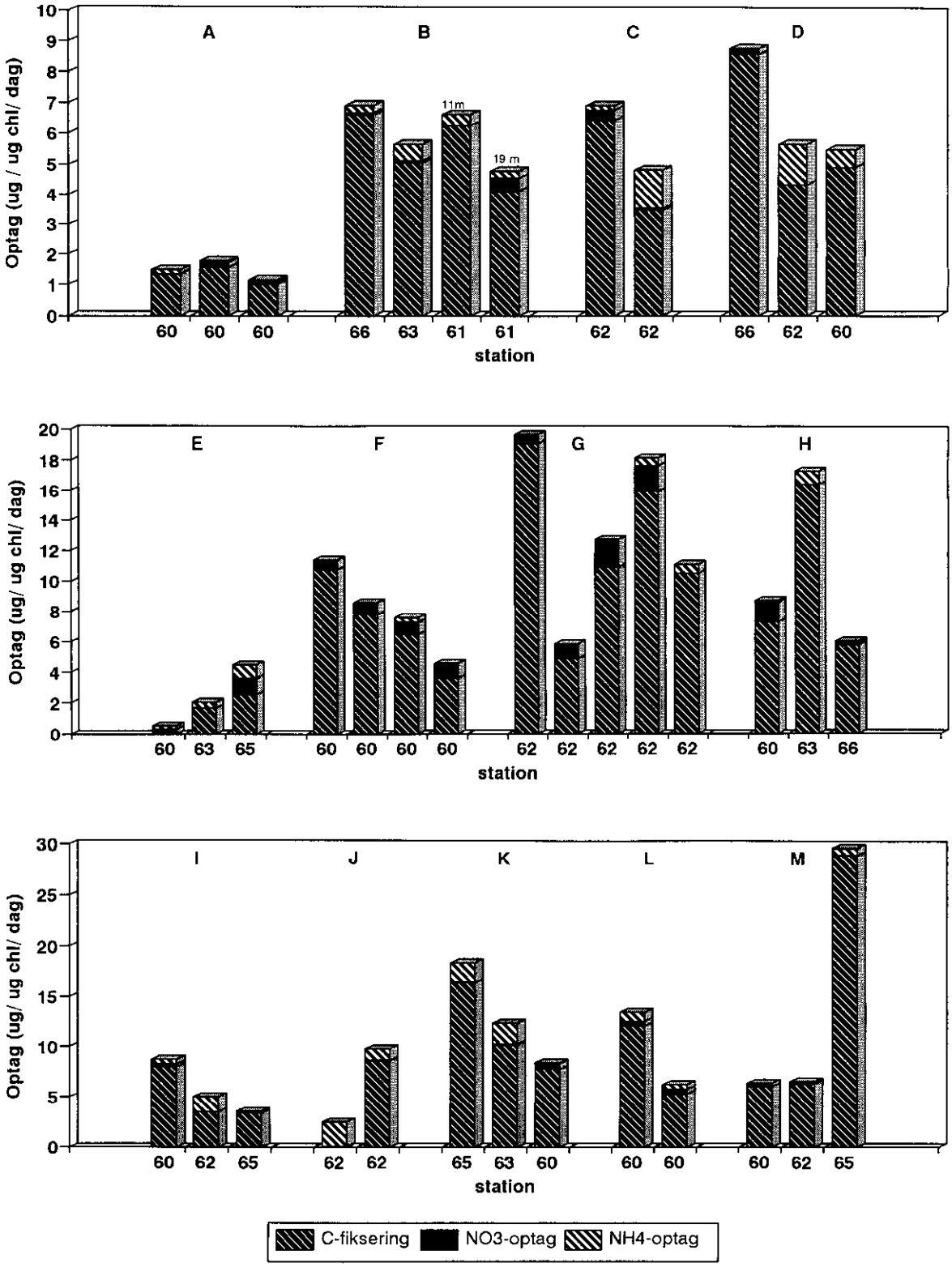
På stationerne 60 og 62 er der foretaget flere prøvetagninger indenfor samme døgn. Figur 9.8 viser døgnraterne beregnet på grundlag af målinger på forskellige tidspunkter af døgnet, og det ses at optagelsesraten varierer afhængigt af hvilken prøvetagning de beregnes på. Denne variation er snarere udtryk for variationer i koncentrationerne af næringssalte, d.v.s. for at det ikke er det samme vand prøverne er taget fra, end for en egentlig døgnvariation. På station 62 i marts ses et markant skifte i den relative betydning af nitrat- og ammonium for kvælstofoptagelsen. Dette skifte skyldes en ændring i koncentrationerne, idet nitratkoncentrationen var meget lavere og ammoniumkoncentrationen højere ved prøvetagningen 10.37 GMT-tid (Figur 9.8, Marts, C).




***Figur 9.6.*** *Betydningen af nitrat i kvælstofoptagelsen (f-forholdet) som funktion af andelen af nitrat i vandets kvælstofpulje (k) i A: marts, B: maj, C: september. Baseret på timeværdier.*



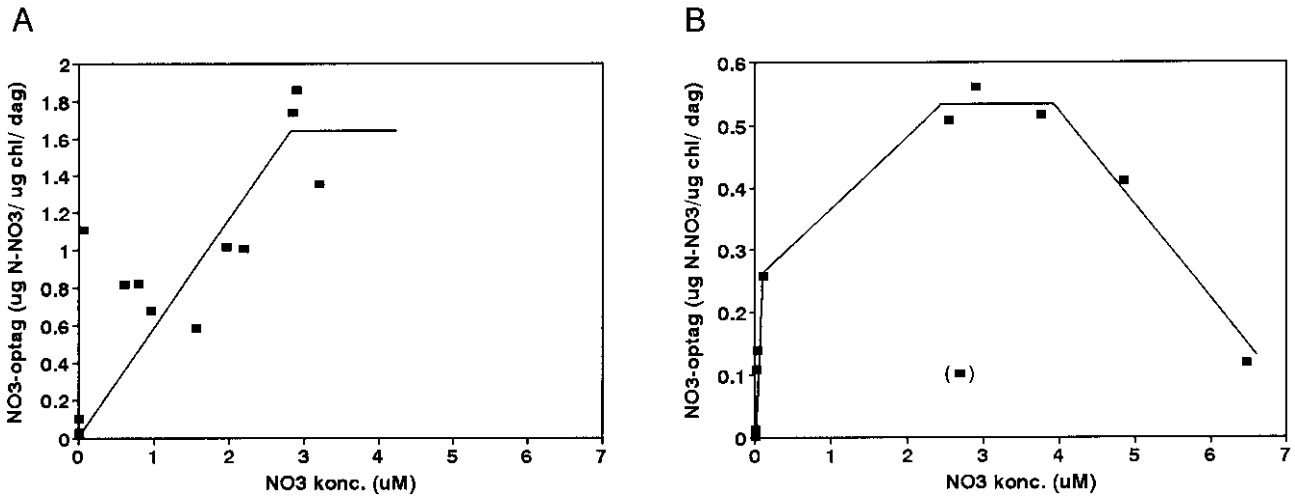

***Figur 9.7.*** *Betydningen af nitrat i kvælstofoptagelsen (f-forholdet) som funktion af andelen af nitrat i vandets kvælstofpulje (k) i A: marts, B: maj, C: september. Baseret på døgnværdier.*




***Figur 9.8.*** *Optagelsen af kulstof, nitrat og ammonium i µg C respektivt N µg klorofyl$^{-1}$ dag$^{-1}$ på stationerne undersøgt i marts, maj og september 1992. Stationerne er angivet kronologisk i den rækkefølge de er besøgt. Marts. A: døgnundersøgelse 27.-28. marts, prøvetagning 4.58, 11.58, 7.50 GMT-tid, B: transektundersøgelse 29. marts, C: døgnundersøgelse 30.-31. marts, prøvetagning 5.15, 10.37 GMT-tid, D: transektundersøgelse 1. april. Maj. E: transektundersøgelse 13. maj, F: døgnundersøgelse 15.-17., prøvetagning 3.30, 10.22, 3.36, 4.52 GMT-tid, G: døgnundersøgelse 17.-19. maj, prøvetagning 12.30, 3.20, 11.34, 3.17, 11.10 GMT-tid, H: transektundersøgelse 20. maj. September. I: transektundersøgelse 2. september, J: døgnundersøgelse 3. september, prøvetagning 4.55, 10.47 GMT-tid, K: transektundersøgelse, L: døgnundersøgelse 8. september, prøvetagning 4.21, 8.45 GMT-tid, M: transektundersøgelse 9. september.*

*Nitratoptagelsen som funktion af nitrat-koncentrationen*

Sammenholdes de beregnede døgnrater med de tilsvarende nitratkoncentrationer ses det, at nitratoptagelsen i maj og september stiger med stigende koncentrationer optil henholdsvis ca 3,0 og 2,5 µM $NO_3$ (Figur 9.9). I sidstnævnte måned ses en særlig markant stigning ved de helt lave nitratkoncentrationer, 0-0,1 µM. Nitratoptagelsen er i september konstant fra ca 2,5 µM til ca. 4 µM for så at falde til lavere værdier. Faldet i optagelsesraten ved de høje nitratkoncentrationer bestemmes af 2 målinger og kan være et artifakt, men i betragtning af, at algerne i disse tilfælde er taget dybt i algemaksimummet, hvor væksten er lysbegrænset, kan det være udtryk for, at algerne her er i dårligere fysiologiske tilstand. I maj er de høje nitratkoncentrationer desværre ikke dækket ved prøvetagningen. I marts er tendensen som i september stigende optagelse ved de lave koncentrationer og et fald ved de høje koncentrationer, men der er stor spredning på værdierne (ikke vist). Ammoniumoptagelsen øges ligeledes ved stigende koncentrationer af ammonium (ikke vist).




***Figur 9.9.*** *Nitratoptagelsen pr. døgn ved 3% lysintensitet som funktion af nitratkoncentrationen. A: maj, B: september.*

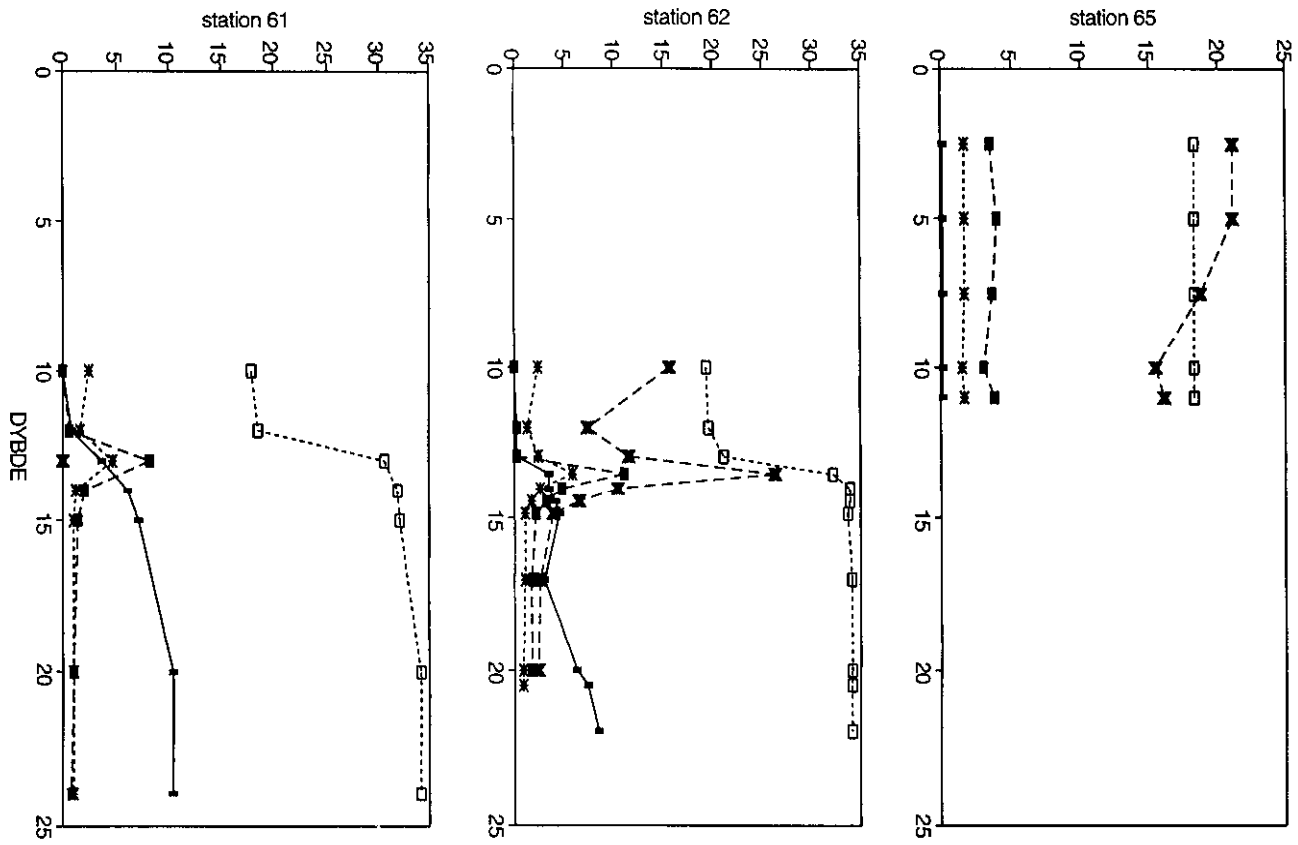
*En nitrat-model*

På grundlag af relationerne mellem nitratoptagelse og lysintensitet samt nitratoptagelse og nitratkoncentration kan der opstilles en model, som gør det muligt at beregne nitratoptagelsen i flere dybder. Modellen er kun brugt for nitratoptagelsen i maj og september, idet spredningen på målingerne i marts er for stor til at rimelige relationer kan etableres. Da dybdeprofilerne for ammoniumkoncentrationerne er meget usikkert bestemt, er der ikke gjort forsøg på at beregne dybdeprofiler for ammoniumoptagelsen.

For stationerne 60, 61 og 62 er der i alle dybder, hvor der findes målinger for nitratkoncentrationen, etableret en relation mellem den daglige nitratoptagelse og nitratkoncentrationen ved først at beregne optagelsen pr. døgn i alle prøvetagningsdybder ved den lysintensitet, der fandtes i den dybde for hvilken relationen skal etableres. Derefter er optagelsen relateret til nitratkoncentrationen i følge Figur 9.9., idet relationen mellem optagelse og koncentration er fundet ved lineær regression. I maj antages optagelsesraten at have nået makimum omkring 3 µM, og maksimumraten er beregnet som gennemsnittet af de 3 målinger mellem 2,5 og 3,5 µM. Der er ikke indregnet et fald i optagelsen ved høje koncentrationer (se Figur 9.9). For september antages relationen at være tredelt med stigning i raten indtil ca 2,5 µM, maksimumrate mellem ca 2,5 og 4 µM og et fald ved de højere

koncentrationer. Maksimumraten er beregnet som gennemsnittet af målingerne ved koncentrationerne mellem 2,5 og 4 µM. For koncentrationer mindre end 0,1 µM er brugt den midlede optagelsesrate målt ved nitratkoncentrationer < 0,1 µM.

På kyststationerne 65 og 66 er nitratkoncentrationen altid lav og konstant ned igennem vandsøjlen. Her er nitratoptagelsen beregnet udfra lysintensitetsprofilerne og den fundne Ni-I relation. For alle stationer er dybdeprofiler for primærproduktionen beregnet ud fra lysintensitetsprofiler og den fundne P-I relation.

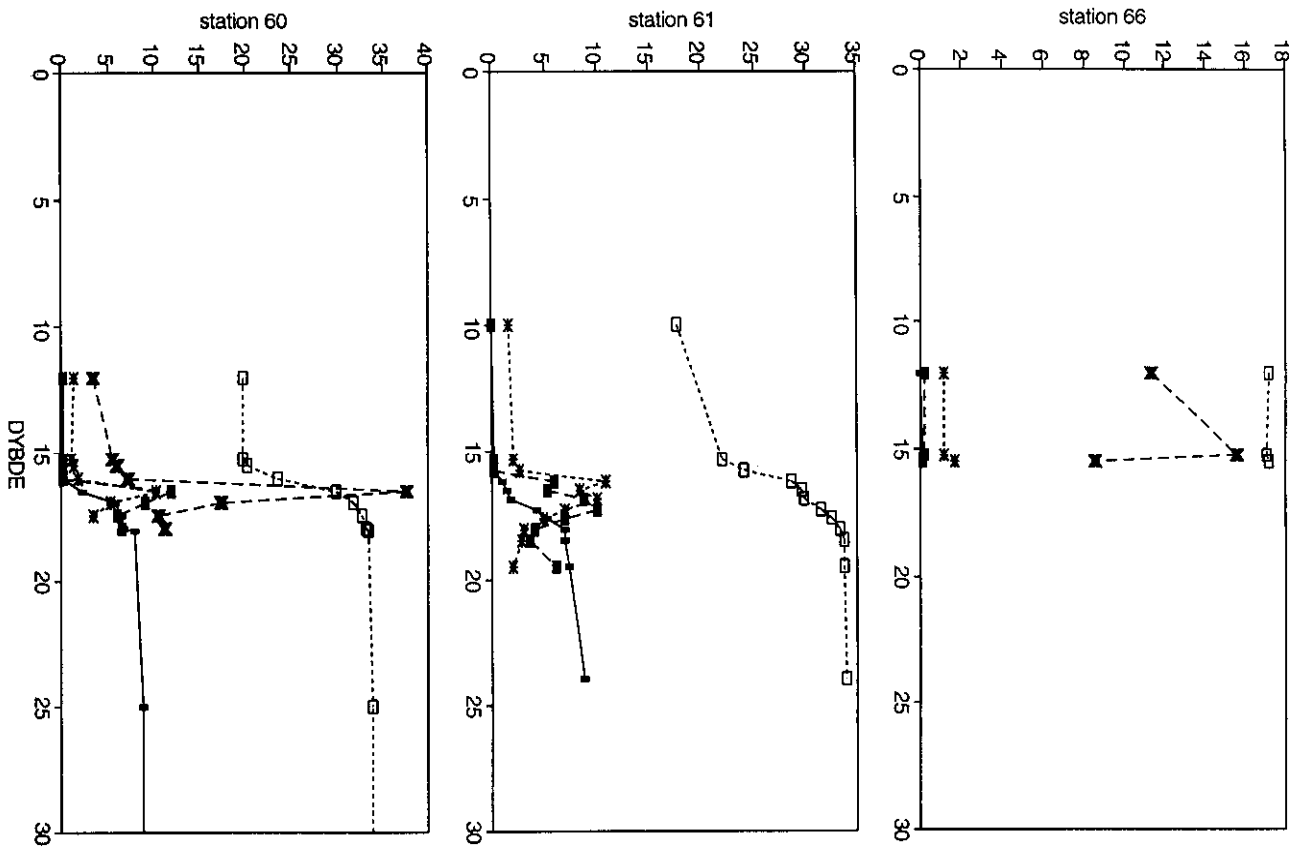



***Figur 9.10.*** *Vertikale profiler af nitratoptagelse (udfyldte firkanter, µg $NO_3$-N liter$^{-1}$ dag$^{-1}$), salinitet (åbne firkanter, promille), nitratkoncentration (vertikale streger, µM), klorofyl (asteriks, µg liter$^{-1}$) og primærproduktion (kryds, µg C liter$^{-1}$ dag$^{-1}$). Station 61, 62 og 65 den 13. maj 1992. Primærproduktionsmåling mangler for station 61.*

*Vertikale profiler*

*Maj*

Vertikale profiler for transektgennemsejlinger i maj og september er vist i Figur 9.10-9.14. Generelt var nitratoptagelsen i pyknoklinen højest i maj. I de fleste tilfælde findes maksimal nitratoptagelse, klorofylkoncentration og primærproduktion i samme dybde. Algetoppen har en begrænset vertikal udstrækning og er placeret midt i nutriklinen. I den nederste del af algetoppen overstiger nitratoptagelsen det ud fra Redfields forhold (C:N = 6, g:g) beregnede behov, hvilket kan skyldes, at der ikke er regnet med en faldende optagelse ved høje nitratkoncentrationer.




***Figur 9.11.*** *Vertikale profiler af nitratoptagelse (udfyldte firkanter, µg $NO_3$-N liter$^{-1}$ dag$^{-1}$), salinitet (åbne firkanter, promille), nitratkoncentration (vertikale streger, µM), klorofyl (asteriks, µg liter$^{-1}$) og primærproduktion (kryds, µg C liter$^{-1}$ dag$^{-1}$). Station 60, 61 og 66 den 17. maj 1992. Primærproduktionsmåling mangler for station 61.*

*September*

I september har dybmaksimummet af klorofyl en større vertikal udbredelse og det findes længere nede i vandsøjlen. Nitratoptagelsen er i alle dybder lav i forhold til primærproduktionen. I de fleste situationer er klorofylmaksimummet sammenfaldende med nutriklinen, og fordelingen i klorofylkoncentration, nitratoptagelse og primærproduktion følges ad. På station 61 ligger klorofylmaksimummet højt i forhold til nutriklinen på 1. og 3. gennemsejling af transektet, og den maksimale nitratoptagelse er som følge heraf forskudt nedad i forhold til klorofyltoppen.

*Kyststationerne*

På kyststationerne er betydningen af nitratoptagelsen i alle situationer begrænset, og variationen ned gennem vandsøjlen er lille. Den opstillede hypotese om, at nitrat har størst betydning i det opblandede kystvand og faldende betydning i skillefalden med afstanden fra kysten, kunne således ikke eftervises i denne undersøgelse.

*Intrusions-teorien*

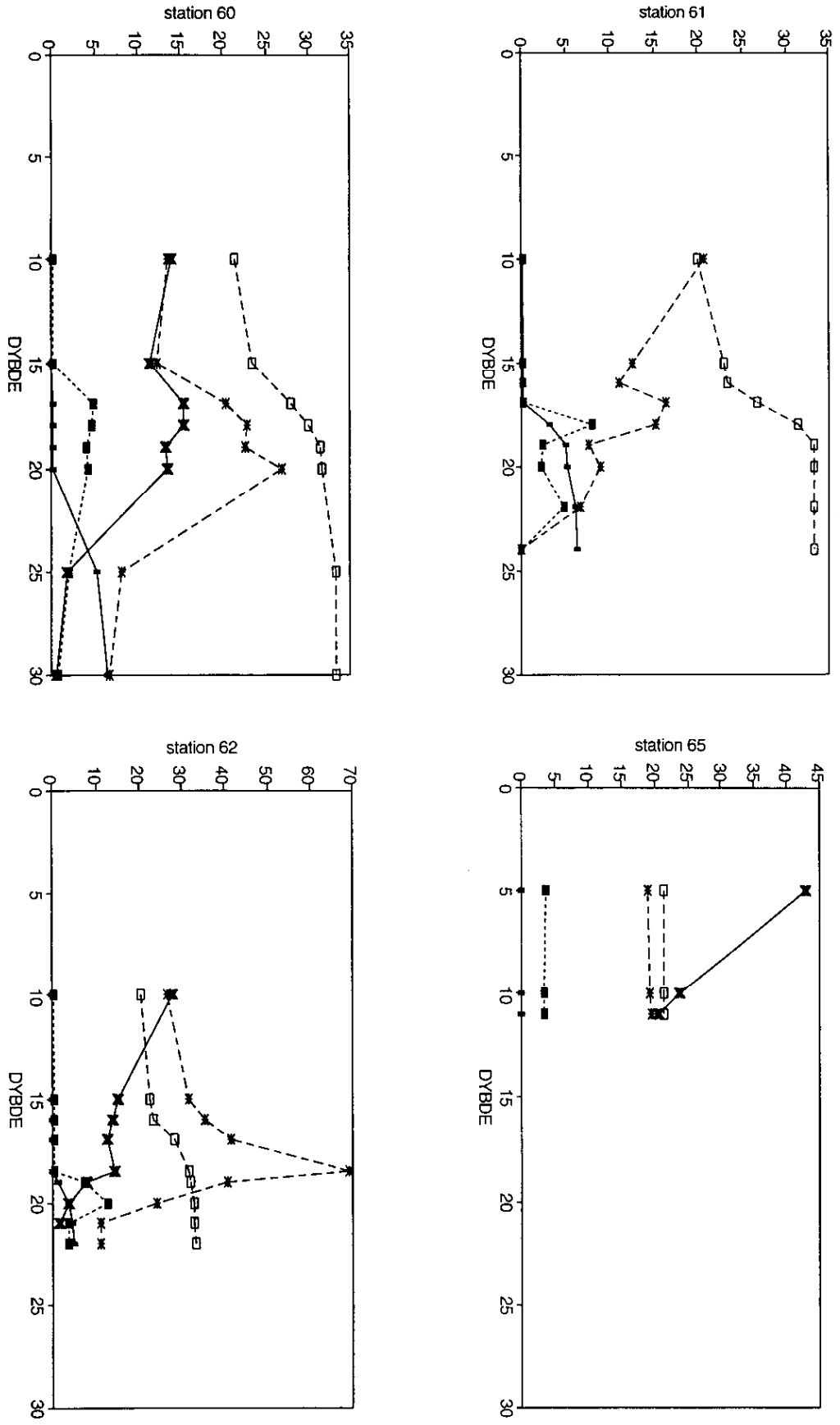
*Integreret optag*

Den totale kvælstofoptagelse pr. kvadratmeter dyb-maksima er størst i september. Integreres primærproduktionen over algetoppen (10-20m) og antages C:N-forholdet i optagelsen at være 6:1 (Redfields forhold), fås totale kvælstofoptagelser på 7,5 til 91,4 mg N m$^{-2}$ dag$^{-1}$ med et gennemsnit på 43,3 mg i september, mens de i maj beregnes til 19,4 til 40,9 og et gennemsnit på 31 mg m$^{-2}$ dag$^{-1}$. De højere værdier i september skyldes dels en højere primærproduktion dels en større vertikale udbredelse af dyb-klorofylmaksimummet.

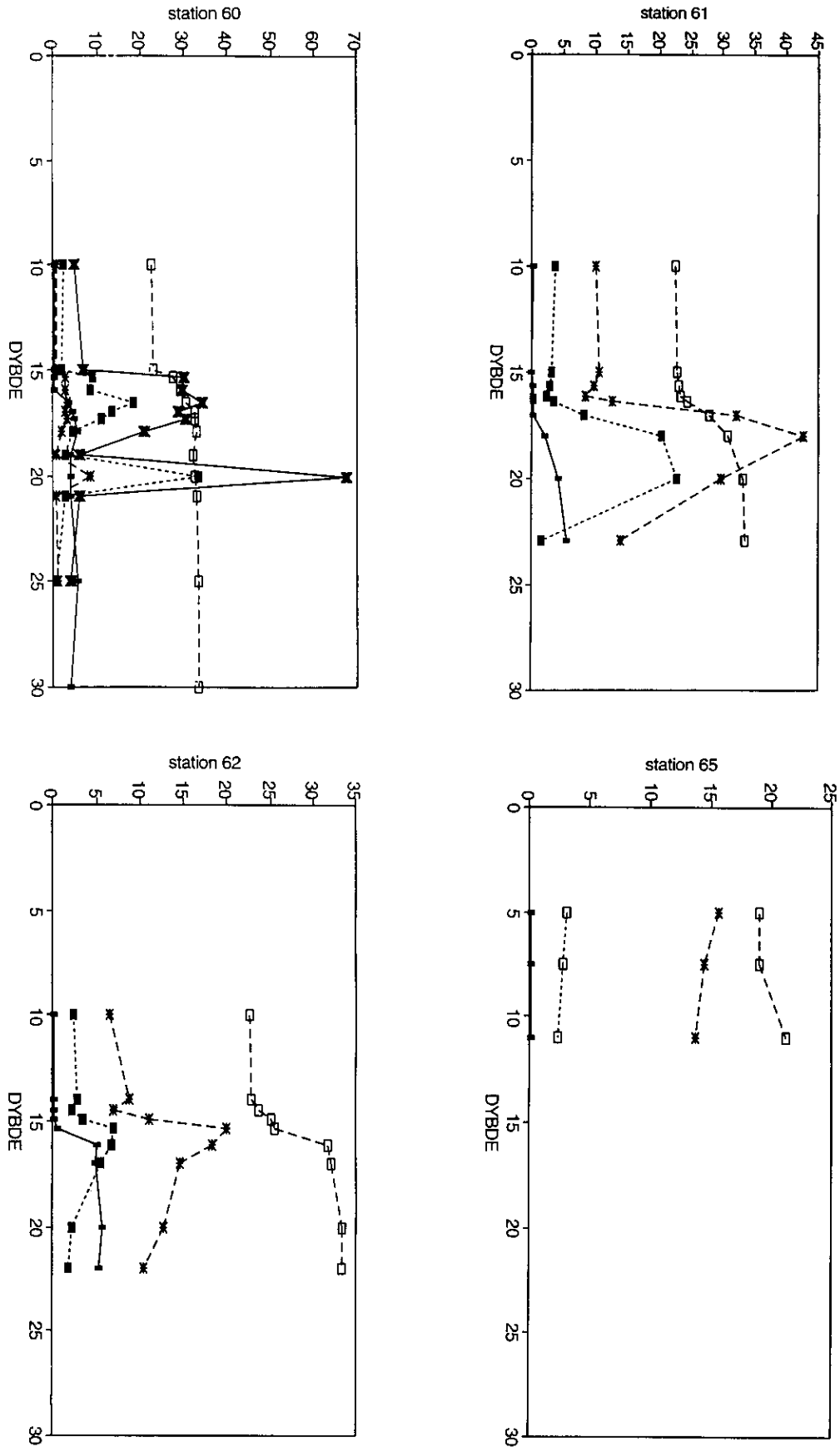
Både den absolutte nitratoptagelse pr. kvadratmeter dyb-maksima og den relative betydning af nitrat er størst i maj. I Tabel 9.5 er primærproduktionen og nitratoptagelsen på de 2 pyknoklin-stationer 60 og 62 integreret over intervallet 10-20 m. f-forholdet er beregnet ved at antage et C:N-forhold i kulstof:kvælstof-optagelsen på 6:1. Nitratoptagelsen overstiger i maj det estimerede behov, mens det i september kan dække 0-25% af kvælstofbehovet. Udfra de beregnede f-forhold synes primærproduktionen således primært at være baseret på nitrat i maj, mens ammonium er den vigtigste kvælstofkilde i september.

***Tabel 9.5.*** *Estimater for primærproduktion (mg C $m^{-2}d^{-1}$) og nitrat-optag (mg N $m^{-2}d^{-1}$) integreret over dybdeintervallet 10 - 20 m. f-forholdet er nitratoptagelsen i forhold til det totale kvælstofbehov, hvor sidstnævnte er beregnet ved at antage et kulstof:total kvælstof-behov på 6:1 (g:g).*

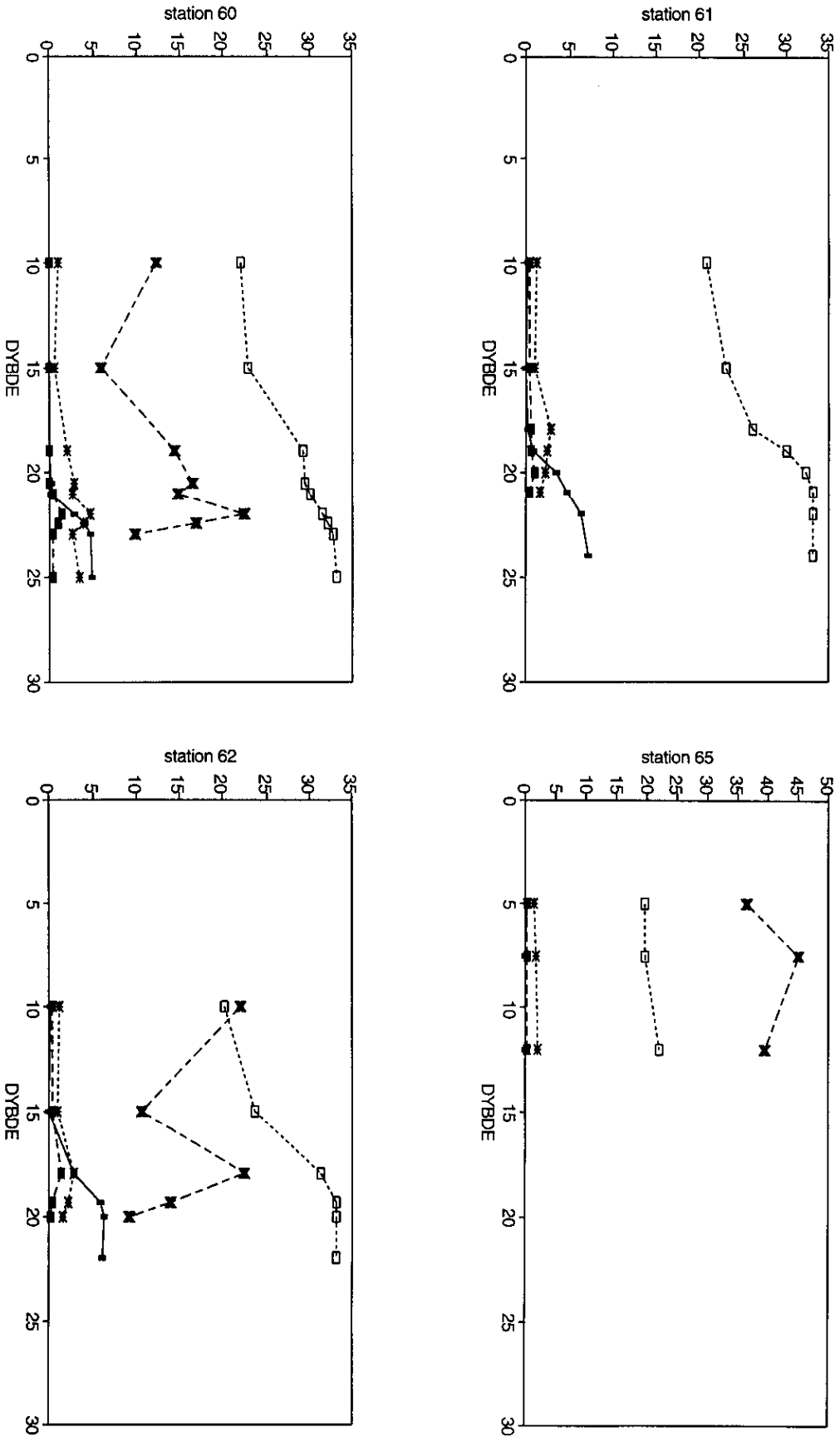
| Dato | Station | Primær-produktion | Nitrat-optag | f-forhold |
|---|---|---|---|---|
| 13/5-92 | 62 | 71,4 | 19,4 | 1,00 |
| 17/5-92 | 60 | 79 | 28 | 1,00 |
| 2/9-92 | 60 | 50,9 | 1,6 | 0,19 |
| 2/9-92 | 62 | 151 | 1,5 | 0,06 |
| 6/9-92 | 60 | 116 | 6,2 | 0,25 |
| 6/9-92 | 62 | 128 | 3,8 | 0,10 |
| 9/9-92 | 60 | 100 | ≈0 | 0,00 |
| 9/9-92 | 62 | 163 | 5,7 | 0,21 |




***Figur 9.12.*** *Vertikale profiler af nitratoptagelse (udfyldte firkanter, µg $NO_3$-N liter$^{-1}$ dag$^{-1}$), salinitet (åbne firkanter, promille), nitratkoncentration (vertikale streger, µM), klorofyl (asteriks, µg liter$^{-1}$) og primærproduktion (kryds, µg C liter$^{-1}$ dag$^{-1}$). Station 60, 61, 62 og 65 den 2. september 1992. Nitratoptagelsen og korofylkoncentrationen er ganget med 10. Primærproduktionsmåling mangler på station 61.*




***Figur 9.13.*** *Vertikale profiler af nitratoptagelse (udfyldte firkanter, µg $NO_3$-N liter$^{-1}$ dag$^{-1}$), salinitet (åbne firkanter, promille), nitratkoncentration (vertikale streger, µM), klorofyl (asteriks, µg liter$^{-1}$) og primærproduktion (kryds, µg C liter$^{-1}$ dag$^{-1}$). Station 60, 61, 62 og 65 den 6. september 1992. Nitratoptagelsen er ganget med 10. Klorofylkoncentrationen er ganget med 10 for station 61-65. Primærproduktionsmåling mangler for station 61 og 65.*




***Figur 9.14.*** *Vertikale profiler af nitratoptagelse (udfyldte firkanter, µg $NO_3$-N liter$^{-1}$ dag$^{-1}$), salinitet (åbne firkanter, promille), nitratkoncentration (vertikale streger, µM), klorofyl (asteriks, µg liter$^{-1}$) og primærproduktion (kryds, µg C liter$^{-1}$ dag$^{-1}$). Station 60, 61, 62 og 65 den 9. september 1992. Primærproduktionsmåling mangler for station 61.*

# 10 Planktondynamik i pyknoklinen

I kapitlerne 4 - 7 og 9 er præsenteret målinger af biologiske og kemiske parametre med høj vertikal opløsning omkring springlaget. Målingerne viser at dybmaksima af klorofyl er et ofte forekommende fænomen i Kattegat i sommermånederne. Mulighederne for at analysere det omfattende datamateriale er på tidspunktet for denne afrapportering langt fra udtømt. I dette kapitel ønsker vi at åbne en diskussion om følgende tre aspekter ved undersøgelsen:

1) hvorvidt fytoplanktonet i de observerede dybmaksima af klorofyl er passive eller aktivt producerende, om dybmaksimaene er dannet ved *in situ* produktion eller ved advektion og udsynkning, og betydningen af alge-dybmaksima for størrelsen af den planktoniske primærproduktion;

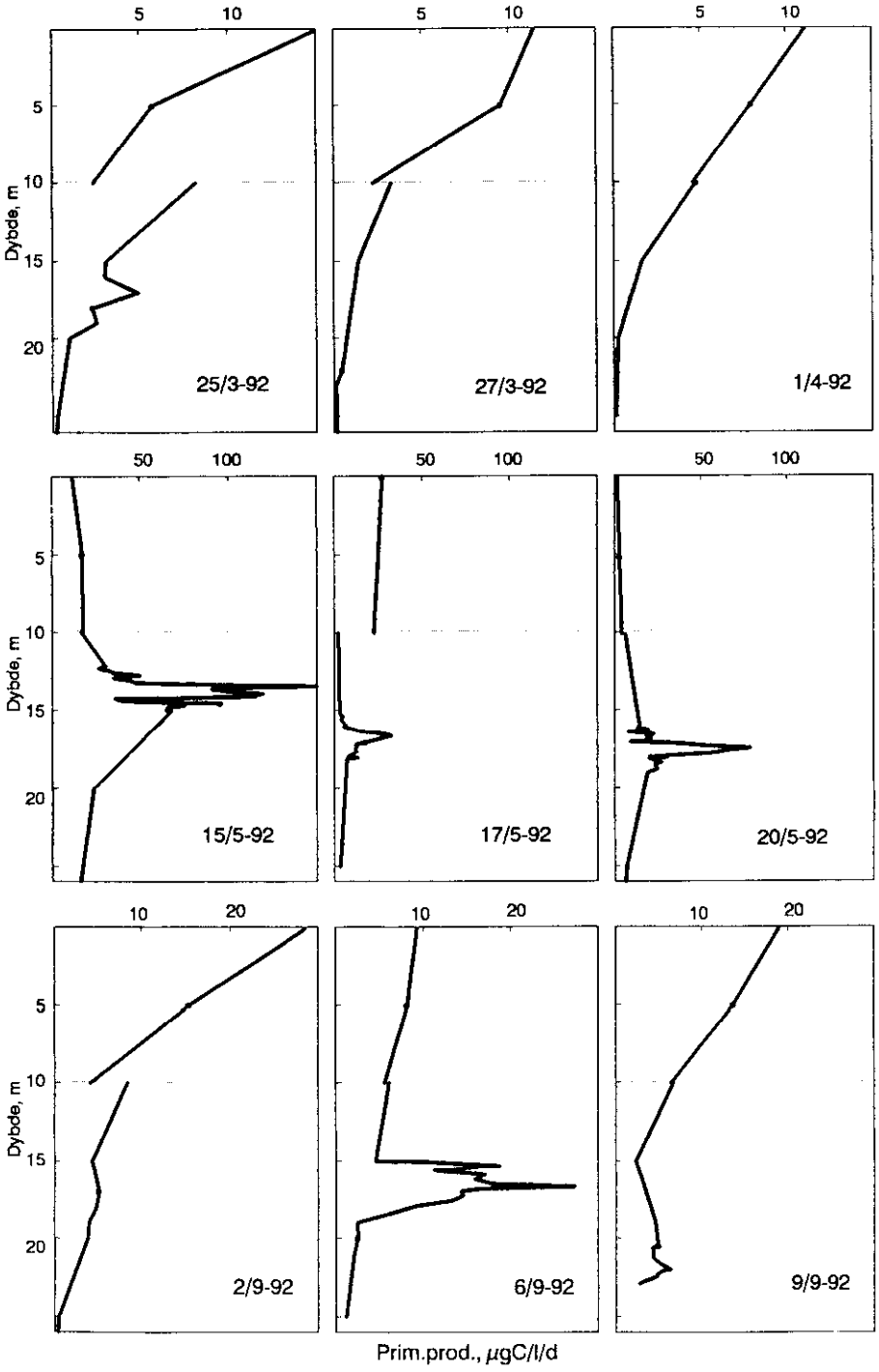
2) graden af heterotroft respons på de forøgede algetætheder omkring pyknoklinen, herunder i hvilken udstrækning de observerede dybmaksima af fytoplankton omsættes på stedet;

3) omfanget af ny produktion omkring pyknoklinen, herunder betydningen for næringssalt-dynamikken, og eksporten af organisk materiale til bunden og bundvandet med deraf følgende iltforbrug ved nedbrydningen.

## 10.1 Primærproduktion omkring pyknoklinen

Flere forskellige mekanismer er blevet foreslået til at forklare forekomsten af dybmaksima af fytoplankton, herunder: 1) passiv akkumulering af alger under udsynkning, som 'bremses' i pyknoklinen/nutriklinen (Bienfang *et al.*, 1983); 2) passiv akkumulering af alger ved advektiv transport, f.eks. ved intrusion af mellemsalint vand fra et område med høj produktion ( Richardson & Kullenberg, 1987); 3) øget primærproduktion i nutriklinen som følge af den kombinerede effekt af de modsatrettede vertikalfordelinger af lys og næringssaltkoncentration; 4) reduceret græsningstryk fra zooplankton (Fiedler, 1982); 5) aktiv bevægelse og placering af fytoplanktonorganismerne i forhold til salinitetsgradienten (Rasmussen & Richardson, 1989).

De to sidstnævnte mekanismer synes umiddelbart at være af mindre betydning for dannelsen og opretholdelsen af de dybmaksima, som blev observeret under dette projekt. For de skalaer i tid og rum som er relevante her (d.v.s. dm-m og h-d) spiller selvbevægelse fortrinsvis en rolle for de store furealger. De dybmaksima, som er beskrevet i de foregående kapitler, indeholdt generelt kiselalger og små flagellater. Reduceret zooplankton-biomasse blev ikke observeret i forbindelse med de observerede dybmaksima af fytoplankton; tværtimod viser zooplanktonet ofte et positivt respons på de forøgede algetætheder, som beskrevet nedenfor. Hæmning af zooplanktonets aktivitet kræver sandsynligvis høje tætheder af toksiske alger, og er således en mekanisme der kan bidrage til at opretholde snarere end at danne dybmaksima.

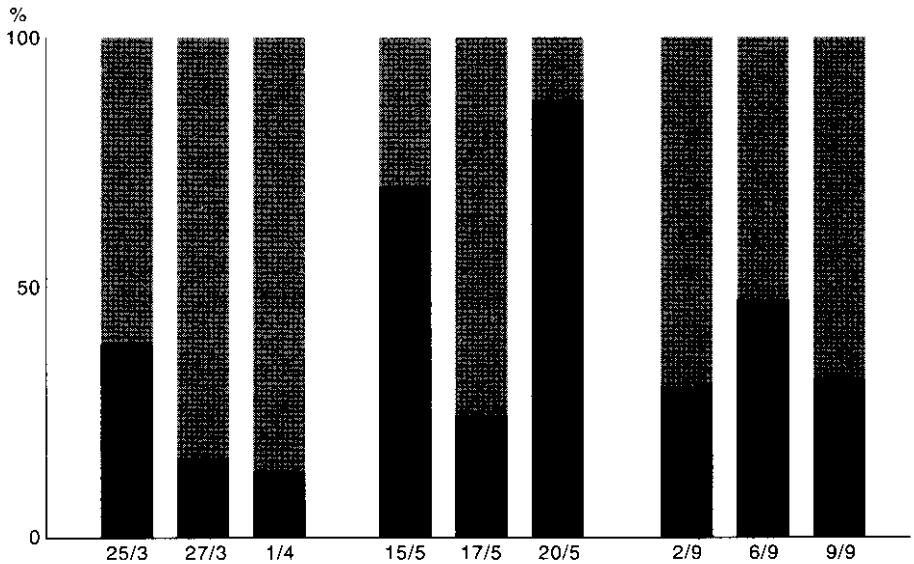



***Figur 10.1.*** *Profiler af primærproduktionen på station 60 beregnet udfra dæk-inkubationer af vandprøver fra 5 m dybde og fra algetoppen.*

I kapitel 8 er det dokumenteret at der under alle de tre intensive undersøgelser i det sydlige Kattegat i 1992 var en betydelig horisontal variation i forekomsten af klorofyldybmaksima, og at advektiv horisontal transport af vandmasser er en afgørende faktor for forståelse af ændringer i den vertikale fordeling på en given målestation. Dette udelukker dog ikke, at aktiv fotosyntese på stedet kan bidrage betydeligt til dannelsen af klorofyl dybmaksima.

Under overvågningstogterne i Kattegat 1991 - 1992 blev der fundet dybmaksima af primærproduktionen i halvdelen af situationerne med dybmaksimum af klorofyl. Under pyknoklintogterne i det sydlige Kattegat blev der fundet markante dybmaksima af primærproduktionen i maj og september, mens dybmaksimummet af klorofyl i marts var mindre produktivt.

Dette billede fremgår også af Figur 10.1, der viser profiler af primærproduktion for station 60 for de datoer, hvor der findes inkubator-målinger for både overfladevandet og for dybmaksimummet. Primærproduktionen i den del af vandsøjlen, som ligger dybere end 10 m, udgør en meget varierende del af vandsøjlens samlede primærproduktion: omkring en femtedel i marts, mere end halvdelen i maj og omkring en tredjedel i september (Figur 10.2). Til sammenligning har Richardson & Christoffersen (1991) beregnet, at dybmaksima af fytoplankton bidrog med omkring 30% af årsproduktionen og omkring 40% af sommerproduktionen i Kattegat i 1989.




***Figur 10.2.*** *Forholdet mellem primærproduktionen i 0 - 10 m dybde (uskraveret) og dybere end 10 m dybde (skraveret) på station 60, jvf. Figur 10.1.*

## 10.2 Heterotroft respons

I forbindelse med undersøgelser i det sydlige Kattegat er biomasse og produktion af de forskellige heterotrofe organisme grupper undersøgt. Den mest intensive prøveserie stammer fra 1989 hvor en station i det sydlige Kattegat blev besøgt 55 gange (Fenchel, 1992). Den vertikale opløsning hvormed prøverne blev indsamlet var størst for bakterioplankton, som blev indsamlet i tre dybder hhv. 2,5 m , springlag/fluoroscens top og 25 m, mens mikrozooplankton blev indsamlet i de to øverste dybder og mesozooplankton-prøver blev indsamlet som en integreret prøve fra bund til overflade. I forbindelsen med oparbejdningen blev hovedvægten lagt på overfladelaget, da der tilsyneladende ikke var nogen forskel på biomasser eller vækst af bakterier og mikrozooplankton mellem de forskellige vandlag. På grund af den lille vinterpopulationer og den lave temperatur var der intet numerisk respons i mesozooplanktonbiomassen på den forøgede fytoplanktonmængde i forbindelse med forårsopblomstringen. Biomassen steg langsomt mod den maksimale værdi i sensommeren for derefter at aftage til vinterniveauet i november (Kiørboe & Nielsen, 1994).

I modsætning til mesozooplanktonet var mikrozooplanktonet i stand til at udnytte den forøgede algemængde i forbindelse med forårsopblomstringen. Specielt biomassen af de heterotrofe dinoflagellater fulgte udviklingen i algebiomassen (Hansen, 1991). I sommerperioden var vandlopperne som dominerede mesozooplanktonet i stand til at kontrollere biomassen af mikrozooplanktonet (Nielsen & Kiørboe, 1994). I forbindelse med efterårsopblomstringen af furealger blev der igen observeret et respons i biomassen af mikrozooplankton.

Den sæsonmæssige variation bakterieplanktonproduktionen fulgte nøje udviklingen i fytoplanktonet med et respons i bakterieproduktionen på forårsopblomstringen med ca. en uges forsinkelse (Bjørnsen *et al.*, 1992).

Kun i forbindelse med specielle hændelser (f.eks. opblomstringer af *Chrysochromulina polylepis*, *Ceratium* spp. eller *Gyrodinium aureolum*) blev vertikalfordelingen af heterotroft plankton undersøgt mere detaljeret end oven for anført. Disse undersøgelser kan resultere i en ensidig opfattelse af betydningen af springlagsopblomstringer for den pelagiske kulstofomsætning, idet de viser at det heterotrofe plankton undgår fytoplankton opblomstringer i skillefladen (når algerne er giftige eller meget store).

Når forekomsten af fytoplankton dybmaksima er så regelmæssig og udbredt et fænomen, som beskrevet i denne rapport, er det vigtigt også at få en god beskrivelse af "normal"-situationen.

Med udgangspunkt i erfaringerne fra Bøjeprojektet (Fenchel, 1992) og de begrænsede prøvevolumina, som kan indsamles med gradientvandhenteren, valgte vi i forbindelse med denne undersøgelse koncentrere os om bakterieplankton og nano- og mikrozooplankton. Disse grupper har potentielt samme væksthastighed, som fytoplankton og har derfor mulighed for et numerisk respons på ændringer i fytoplanktonbiomassen.

I modsætning til undersøgelserne omtalt i kapitel 1. blev der hverken under overvågnings- eller pyknoklintogter observeret opblomstringer af giftige alger. I forbindelse med planlægningen af pyknoklintogterne i 1992 blev togterne lagt i perioder hvor vi forventede at fytoplanktonnet var domineret

af h.h.v. kiselalger, autotrofe nanoflagellater og store furealger. Det viste sig dog at fytoplanktonet i forbindelse med alle tre togter var domineret af kiselalger (Kapitel 5-7).

*Bakterioplankton*

Bakteriebiomassen var relativt konstant gennem året. Bakterieproduktionen viste i 1991 dog et tydeligt respons på forårsopblomstringen (GT-104). I forbindelse med pyknoklintogterne var bakterieproduktionen højest under de to sidste togter, hvor der blev observeret dybmaksima på oversiden af skillefladen (kapitel 6 & 7).

*Mikrozooplankton*

Den sæsonmæssige udvikling i mikrozooplanktonet fulgte det samme mønster på overvågningstogterne 1991 og under pyknoklintogterne i 1992: høje biomasser (20-50 µg C liter$^{-1}$) om foråret (GT-104 og GT-118), mens vandtemperaturen stadig var omkring 5°C. Biomassen var domineret af store ciliater og nøgne dinoflagellater (ciliaterne *Cyclotrichium* spp., *Laboea strobila*, *Didinum* spp. og dinoflagellaten *Gyrodinium spirale*). På togterne i sommermånederne (GT-106, GT-107 og GT-119) var biomassen af mikrozooplankton væsentlig lavere (1-5 µg C liter$^{-1}$) og domineret af små former (ciliaterne *Strombidium* spp. og den nøgne dinoflagellate *Gyrodinium glaucum*). I forbindelse med efterårstogterne var biomassen af mikrozooplankton steget til 5-20 µg C liter$^{-1}$ i forbindelse med et kvalitativt skift i samfundet til dominans af store thekate dinoflagellater (*Protoperidinium* spp.) og en mindre forekomst af tintinnide ciliater (*Helicostomella subulata*).

Ud fra de foreløbigt oparbejdede prøver er den vertikale opløsning endnu ikke tilstrækkelig til, at detaljer i vertikalfordelingen af mikrozooplankton i forbindelse med overvågnings togterne kan beskrives. Det generelle billede er dog, at biomasserne i og ovenfor skillefladen er højere. Her viser prøverne fra pyknoklintogterne derimod et relativt entydigt mønster i den vertikale udbredelse af mikroplanktonet. Generelt findes de højeste biomasser af ciliater over springlaget, hvilket formodentlig skyldes, at de observerede fytoplankton dybmaksima hovedsageligt bestod af store kiselalger, som ciliaterne ikke er i stand til at udnytte. Biomassen af de heterotrofe dinoflagellater var derimod korreleret til den horisontale og vertikale fordeling af fytoplankton. Dette er i overensstemmelse med at dinoflagellaterne, imodsætning til ciliaterne, er istand til at græsse de dominerende kiselalger.

*Vandlopper*

Biomassen af vandlopper er undersøgt i maj og september med h.h.v. pumpe og den store gradientvandhenter. På grund af lave tætheder er det ikke muligt at estimere biomassen af mesozooplankton udfra prøverne taget med den lille gradientvandhenter. Ud fra resultaterne fra Bøjeprojektet (Kiørboe & Nielsen 1994) er biomassen i marts estimeres til ca 10% af biomassen sidst i maj. På basis af ægproduktionsmetoden blev det i marts 1989 estimeret, at vandlopperne, som dominerer mesozooplanktonet, kun var istand til at græsse h.h.v. 10 og 20% af algebiomassen og primærproduktionen per dag. Dette lave prædationstryk i det tidlige forår, hvor vandtemperaturen er lav 5-6°C, er formodentlig årsagen til de store biomasser af mikrozooplankton kan forekomme.

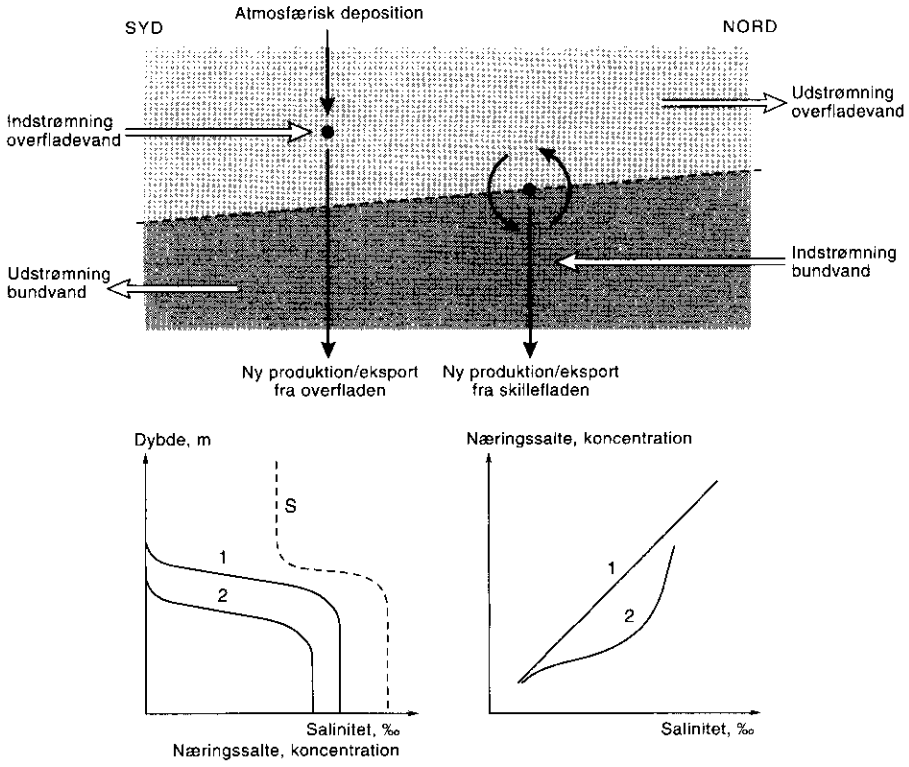
Biomassen af mesozooplankton i maj 1992 svarer til hvad tidligere undersøgelser i det sydlige Kattegat har vist. På denne årstid var vandlopperne istand til at græsse 60% af algebiomassen per dag (Kiørboe & Nielsen, 1994). Biomassen af vandlopper var i september af samme størrelsesorden

som i maj, men domineret af små vandlopper tilhørende slægten *Oithona* spp., der ikke er kan græsse de store kiselalger, som dominerende fytoplankton. Til gengæld er de istand til at græsse det mindre mikrozooplankton, hvilket kan forklarer skiftet i størrelses sammensætningen af mikrozooplanktonet i denne periode.

De heterotrofe komponenter i det marine fødenet er i stand til at udnytte springlagsopblomstringerne af fytoplankton. Ofte findes vandsøjlens højeste biomasser af bakterioplankton samt nano-, mikro- og mesozooplankton netop i disse afgrænsede vandlag. Dette understreger vigtigheden af at pyknoklinen og eventuelle fytoplankton dybmaksima inkluderes i prøvetagningsprogrammer hvis planktondynamikken i et lagdelt farvand som kattegat skal undersøges.

## 10.3 Næringssalt-dynamik og ny produktion i skillefladen

Den mest kritiske periode for iltsvindshændelser er sensommeren. derfor er omfanget af ny-produktion samt eksport af organisk materiale til havbunden gennem sommermånederne af særlig interesse. Ifølge den traditionelle opfattelse er ny-produktion og dermed eksport af organisk materiale fra vandsøjlen i Kattegat hovedsageligt begrænset til forårsmaksimummet og kun delvist til efterårsopblomstringerne. I disse perioder tilføres "nye" næringssalte til den fotiske zone som følge af afstrømning fra land og opblanding af vandsøjlen. At ny-produktion især er væsentlig i de øvre vandlag om foråret støttes af undersøgelser af kvælstofomsætningen i de øvre vandlag (Kaas *et al.*, 1990).




***Figur 10.3.*** *Øverst en skematisk fremstilling af kilderne til ny produktion i Kattegat under sommerlagdelingen. Nederst til venstre dybdeprofiler af salinitet (S) og næringssalt-koncentration (1, 2). Til højre relationen mellem næringssalt-koncentration og salinitet.*

Om sommeren er hovedparten af den fotiske zone afskåret fra det næringsrige bundvand som følge af lagdelingen (jvf. afsnit 1.1), og tilførslen af "nye" næringssalte fra bundvandet sker hovedsageligt gennem medrivning over skillefladen.

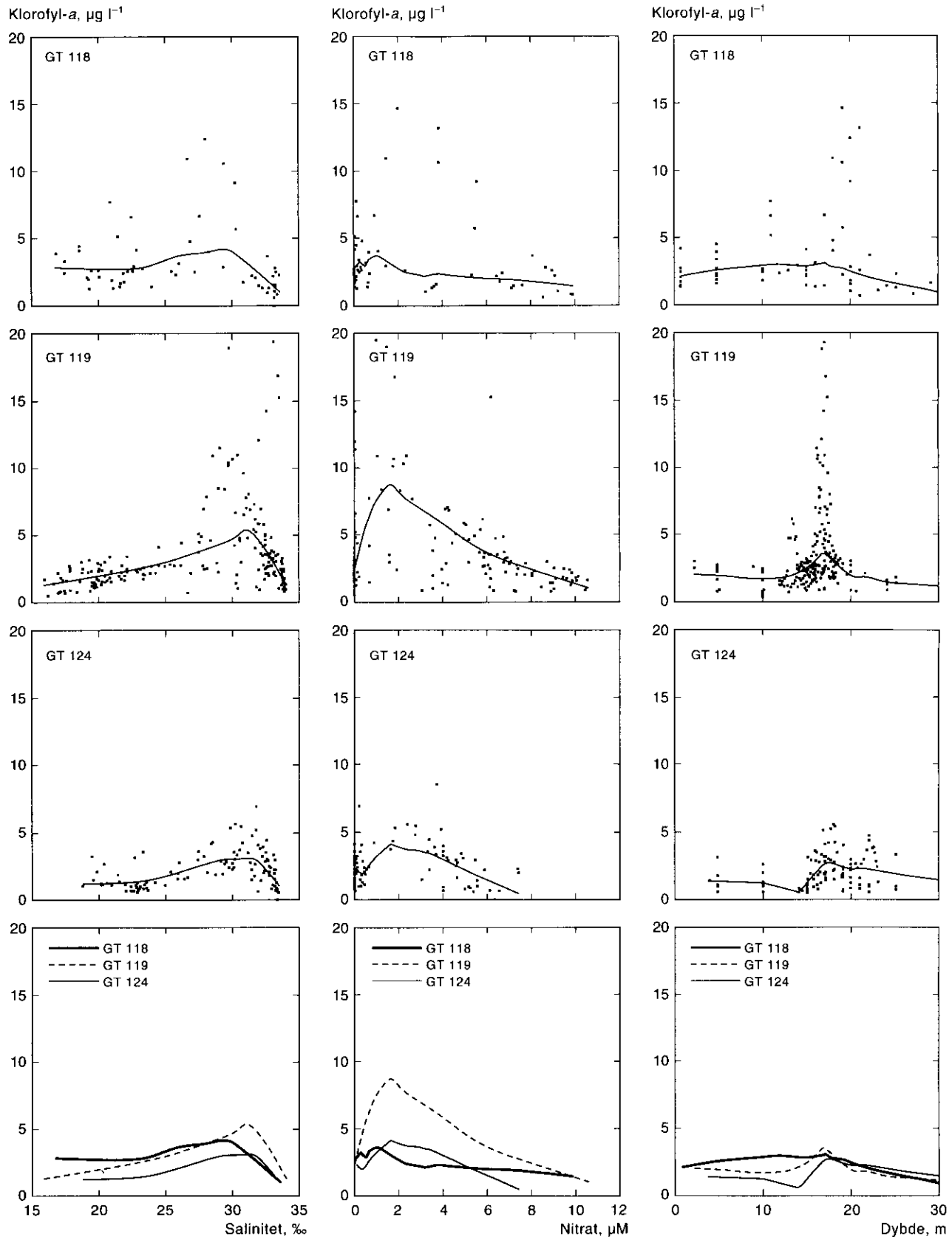
Dybmaksima af fytoplankton omkring skillefladen udgør således et potentiale for et betydeligt bidrag til ny-produktion i sommermånederne, idet algerne er placeret tæt ved det næringsrige bundvand (Harrison, 1990). Samtidigt kan fytoplanktonet i springlaget muligvis virke som et filter for den opadrettede transport af næringssalte fra bundvandet (Banse, 1987).

En simpel teoretiske model af grundlaget for ny produktion under sommerlagdelingen er vist i Figur 10.3. Ny produktion i overfladevandet er her antaget at være kontrolleret af tilførslen af næringssalte fra det indstrømmende overfladevand og ved atmosfærisk deposition, mens dybmaksima af fytoplankton i skillefladen antages at udnytte de høje næringssaltkoncentrationer i bundvandet til ny produktion. Da nitrat er det dominerende kvælstofnæringssalt i bundvandet antages, ny-produktionen hovedsageligt være baseret på nitrat (Dugdale & Goering, 1967).

I Kattegat synes dybmaksima ikke ensidigt at bygge på en momentan tilførsel af nitrat, idet undersøgelser viser, at den relative betydning af nitrat og ammonium, og dermed af ny- og regenereret produktion, varierer i tid og rum. På det undersøgte transekt nord for Sjælland var nitrat den dominerende kvælstofkilde i maj 1992, mens ammonium dominerede kvælstofoptagelsen i september. På en tidligere undersøgt station i det sydlige Kattegat (Bøjestationen) varierede betydningen af de to kvælstof-salte ligeledes (Kaas *et al.*, 1992). I den afsluttende fase af pyknoklin-opblomstringen af *Chrysochromulina* i Kattegat i 1988 var primærproduktionen hovedsageligt baseret på ammonium (Kaas *et al.*, 1991).

Tilførslen af "nye" næringssalte til dybmaksima fra det næringssrige bundvand i Kattegat kan ske ved medrivning (opblanding) og ved forskydning af dybmaksima nedad i vandsøjlen efterhånden som næringssaltene opbruges. Medrivningen kan enten ske lokalt eller adskilt i tid og rum fra det momentant observerede dyb-maksima. *In situ* medrivning kan opstå ved tilførsel af turbulent energi, når vandmasserne over og under skillefladen strømmer med forskellig hastighed og retning. P.g.a. generelt lave strømhastigheder og dermed små hastighedsforskelle anses denne lokale medrivning for at være lav i forhold til den medrivning vinden i perioder kan give. Sammen med den påviste afkobling af vindens mdrivning p.g.a den interne lagdeling kunne de høje nitratoptagelsesrater fundet i denne og tidligere undersøgelser kunne imidlertid indikere, at denne medrivning ikke er ubetydelig.

Hyppigt er medrivningen vindinduceret. Den vindinducerede medrivning kan give anledning til øget produktion i overfladelaget, og den kan medføre produktion i dybmaksima, der er adskilt i tid og rum fra selve medrivningsprocessen (Bo Pedersen, 1990). Ved stærk vind blandes næringsrigt, salt bundvand op i overfladelaget, og overfladevandet ændrer derved densitet. Hvis der ved blandingen opstår horisontale densitetgradienter, kan blandingsvandet transporteres bort fra medrivningsområdet og danne et intrusionslag med næringssalte og/eller alger. Indholdet af næringssalte og alger i intrusionsvandet vil umiddelbart afhænge af mængden af næringssalte i det medrevne bundvand og mængden af alger i




***Figur 10.4.*** *Sammenhørende måleværdier af algebiomasse (målt som fluorescens og omregnet til klorofylenheder) og saliniet, samt nitratkoncentration og vanddybde for station 60, 61 og 62 på togterne GT-118, GT-119 og GT-124. Kurverne er tilpasset ved running average.*

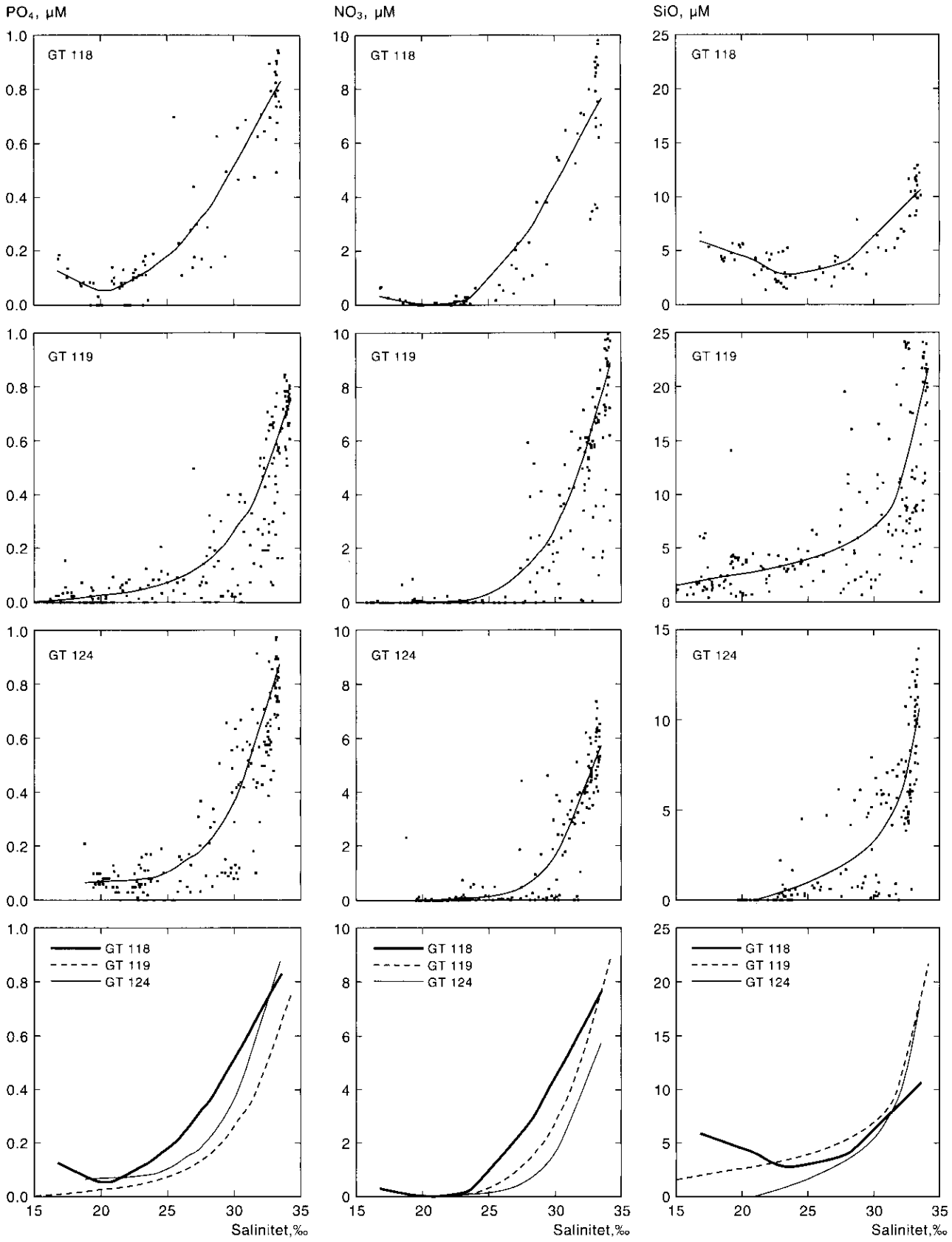
overfladevandet, samt af den umiddelbare primærproduktionen i blandingsvandet, der sker i blandingsvandet inden intrusionen dannes. Fordelingen mellem næringssalte og alger og mellem ny og regenereret produktion i intrusionslaget vil afhænge af "alderen" af vandet, intrusionsdybden samt af størrelsen af *in situ* primærproduktionen.

Mere permanente medrivningsprocesser findes i Storebælt samt i divergenszonen ved Øresunds udløb i Kattegat, hvor der sker en betydelig opblanding af næringsrigt bundvand ( Stigebrandt, 1983). Vandet, med dets indhold af næringssalte og alger, føres fra disse blandingsområder som intrusionsstrømme langs skillefladen ind i det sydlige Kattegat. Et eksempel på dette sås f.eks. under togtet i marts 1992, hvor algerigt Storebælts-vand dannede en intrusion ovenfor den primære skilleflade og i maj, hvor med høje algekoncentrationer blev ført fra Øresund mod Storebælt (Rasmussen, 1994).

En tredje mekanisme, der kan tilføre næringssalte (og alger) til dybmaksima, er blanding mellem overflade- og bundvand tæt ved kysten (Rasmussen, 1994). Efter blanding ved kysten føres vandet ud i Kattegat langs undersiden af skillefladen. Denne proces er kendt for andre kystområder, og et af formålene med denne undersøgelse var at påvise denne mekanisme i Kattegat. Selvom hverken den hydrografiske analyse eller næringsstofundersøgelsen kunne underbygge hypotesen, anses det stadig for at være en mulig kilde til ny produktion i Kattegat (Rasmussen, 1994).

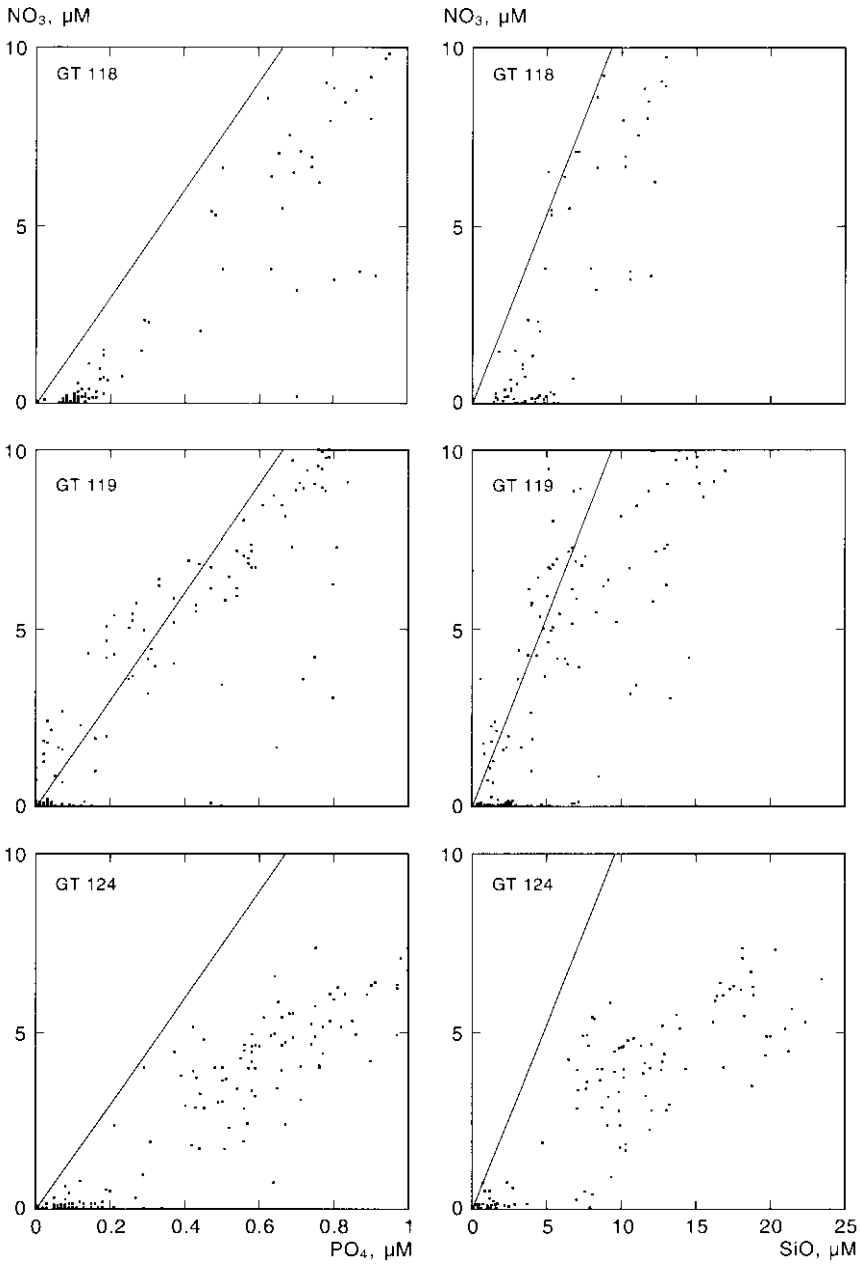
"Nye" næringssalte kan ligeledes "tilføres" ved, at dybmaksimummet følger den nedadrettede forskydning af nutriklinen, som opstår ved forbrug af næringssaltene. En teoretisk fremstilling af denne situation er givet i Figur 10.3. Umiddelbart efter forårsopblomstringen vil næringssaltene i overfladevandet være brugt op, og skillefladerne for salinitet og næringssalte vil være sammenfaldende, d.v.s. at der er en lineær sammenhæng mellem salinitet og næringssalt-koncentration (kurverne mærket '1' i Figur 10.3). Ved medrivning vil salt og næringssalte blandes med samme forhold, og relationen mellem de to parametre vil derfor ikke påvirkes. Relationen påvirkes heller ikke af regenereret produktion, idet der ikke sker nogen nettoændring af næringssalt-koncentrationen. Ved ny produktion vil der forbruges næringssalte, og næringssalt-skillefladen vil forskydes nedad i forhold til salinitets-skillefladen, hvilket vil vise sig som en konkavitet på næringssalt-salt plottet (kurverne mærket '2' i Figur 10.3). I den udstrækning bundstrømmen er i stand til at opblande bundlaget vil næringssaltforbruget på undersiden af skillefladen medføre et generelt fald i bundvandets næringssalt-koncentration, hvilket er antydet på Figur 10.3. Omvendt vil remineralisering ved bunden medføre stigning i næringssalt-koncentrationerne i bundvandet.

Undersøgelserne på pyknoklintogterne i 1992 indikerer at dybmaksima i Kattegat "gnaver" sig ned i det næringsrigere vand. Som normalt for Kattegat lå nutriklinen længere nede i vandsøjlen i september end i maj, og dybmaksimaet fulgte denne forskydning. Figur 10.4 angiver de sammenhørende værdier af algebiomasse og saltholdighed og nitratkoncentration. Det ses, at de maksimale algebiomasser forekommer ved højere saliniteter i september end i maj, og at biomasserne i begge måneder er højeste ved en koncentration på ca 2 µM nitrat. Sammenholdes algebiomassen med vanddybden fremgår det, at dybmaksimummet er placeret dybere i vandsøjlen i september end i maj.




***Figur 10.5.*** *Sammenhørende måleværdier af næringssalt-koncentrationer og salinitet for station 60, 61 og 62 på togterne GT-118, GT-119 og GT-124. Kurverne er tilpasset ved running average.*

I Figur 10.5 er afbildet sammenhørende værdier af næringssaltkoncentrationer og salinitet for de lagdelte stationer 60, 61 og 62 under de tre pyknoklin-togter i 1992. Punkterne er tilpasset kurver ved en non-parametrisk running average procedure. Ved at sammenholde kurverne for de tre perioder ses et klart forbrug af nitrat, medens billedet for fosfat og silikat er mindre entydigt. For fosfat ses et forbrug fra marts til maj, men ikke fra maj til september. For silikat derimod ses et forbrug fra maj til september, mens kurven for marts skærer de to andre kurver.




***Figur 10.6.*** *Sammenhørende måleværdier af nitrat-, fosfat- og silikatværdier for station 60-63 på togterne GT-118, GT-119 og GT-124. Linierne angiver det støkoimetriske forhold i fytoplanktons behov for de 3 næringssalte.*

Forbruget af nitrat fremgår yderligere, når nitratkoncentrationen afbildes som funktion af de samhørende fosfat- og silikatkoncentrationer, som det er gjort i Figur 10.6. På figurerne er det støkoimetriske forhold i fytoplanktons behov for næringssalte angivet. For hurtigvoksende marint fytoplankton vil forholdet mellem N og P optagelsen variere omkring 6 (på vægtbasis, forholdet kaldes Redfields forhold), mens forholdet mellem N og Si optagelsen er omkring 1. Specielt sidstnævnte forhold vil dog variere med artsammensætningen. Sammenholdes målingerne fra de enkelte måneder med algernes behov ses det, at der i maj er god overensstemmelse mellem forholdet mellem nitrat, fosfat og silikat og næringssaltbehovet. I september derimod observeredes et markant underskud af nitrat i forhold til såvel fosfat som silikat. Underskuddet i september indikerer, at produktionen på dette tidspunkt i højere grad er basseret på ammonium, som regenereres i vandsøjlen, samt at produktionen er kvælstofbegrænset.

Den tætte samhørighed mellem dybmaksimummet og nutriklinen indikerer umiddelbart, at det er algerne i de dybereliggende vandlag, der har forbrugt nitraten i løbet af sommeren. Det kan ikke udelukkes, at forskydningen i nutriklinen også hænger sammen med intrusioner af mere næringsfattigt vand fra kystområderne, Storebælt og/eller Skagerrak. Sidst på sommeren har det vand, der strømmer ind fra Skagerrak som bund- og mellemliggende vandlag i Kattegat, et lavere indhold af næringssalte, hvilket vil medføre at and dannet ved medrivning ligeledes har lavere næringssaltkoncentrationer.

Et mål for omfanget af ny respektivt regenereret produktion kan opnås ved at sammenligne estimater for primærproduktion udfra $^{14}C$-assimilering og nitratoptagelsen udfra $^{15}N$-assimilering i dæk-inkubationerne på pyknoklintogterne, hvis det antages at nitratoptagelsen er udtryk for ny produktion. Som det fremgår af Tabel 9.5 oversteg nitratoptagelsen ved to målinger i pyknoklinen i maj behovet for kvælstof estimeret udfra primærproduktionen, medens nitratoptaget i september dækker 0 - 25 % af det beregnede behov. Udfra disse målinger og næringssaltmålingerne synes ny produktion omkring skillefladen således at spille en betydelig rolle i maj og en mindre rolle i september. En aftagende betydning af ny produktion i springlaget gennem sommeren kan forklares dels ved at sænkningen af nutriklinen bringer det næringssalt-rige vand længere væk fra lyset, dels ved at det heterotrofe samfund etablerer sig og styrkes gennem sommeren.

Undersøgelserne på pyknoklintogterne i 1992 viste, at ammoniumoptagelsen og -remineraliseringen beregnet pr time var ikke i balance. Samme forhold er kendt fra mange undersøgelser og hænger sandsynligvis sammen med at både optagelsen og remineraliseringen varierer gennem dagen, og at variationen ikke er synkron. Glibert (1982) fandt, at remineraliseringen hyppigt oversteg optagelsesraten om natten og morgenen. I de tidlige morgentimer kunne remineraliseringsraten være en faktor 2-10 højere en optagelse, og en stor del af vores undersøgelser er foretagte i morgentimerne. Den varierende remineralisering skyldes bl.a. forskellig aktivitet hos zooplankton gennem døgnet; f.eks. har vandloppen *Calanus helgolandicus* de største eksretionrater om natten (Harris & Malej, 1986). Da det ikke var muligt at finde en entydig relation til tiden på døgnet, er der ikke gjort forsøg på at omregne de målte rater til dagsværdier.

Remineraliseringen var højest i maj. Dette er i kontrast til de lave biomasser af zooplankton og heterotrofe flagellater, der blev fundet på dette tidspunkt.

En forklaring på dette kan være at remineraliseringen skyldes bakterier. Både bakteriebiomassen og aktiviteten var høj i maj. Bakterier kan spille en vigtig rolle for remineraliseringen. Dette er bl.a. demonstreret af Harrison *et al.*, 1983, der fandt, at bakterier var ansvarlige for gennemsnitlig 74 % af den remineralisering de målte i det vestlige Atlanterhav. Ved remineraliseringen dannes ammonium, men der blev ikke målt særlig høje koncentrationer af ammonium og ammoniumoptagelsen var generelt meget lav i maj. Til gengæld var nitratoptagelsen høj. Et muligt scenario kan være at det dannede ammonium af bakterier omdannes til nitrat, som derefter optages af fytoplankton. Høje nitrificationsrater er tidligere målt, f.eks i Cheasapeake Bay og Narrangansett Bay (Berounsky & Nixon 1980, McCarthy *et al.*, 1984). Sidstnævnte sted blev rater på optil 11 µmol $NO_3$-N liter$^{-1}$ dag$^{-1}$ målt.

På baggrund af resultaterne fra pyknoklinundersøgelsen kan følgende scenario opstilles: dybmaksima i det sydlige Kattegat dannes ved en kombination af advektiv transport og *in situ* algevækst. Væksten er baseret på tilførsel af "nye" næringsalte (ny produktion), og på et - til tider stort - genbrug af næringssaltene (regenereret produktion). "Nye" næringssalte tilføres ved advektiv transport fra f.eks. Storebælt, Øresund og Nordsjællands kyst, samt ved "gnavning" på nitrat-klinen. Dybmaksima udgør en væsentlig ny produktion og dermed en mulig kilde til transport af organisk stof til havbunden om sommeren.

# 11 Modellering af plankton-dynamikken

## 11.1 Indledning

Computermodellering er en relativt ny teknik, men alligevel gør mange oceanografer allerede udstrakt brug af hydrografiske og biologiske modeller, og betydningen af disse værktøj for oceanografien er voksende. Mange naturlige processer involverer adskillige faktorer og afhængighedsforhold, hvis indbyrdes samspil ikke kan belyses uden anvendelse af numerisk modellering.

*Hydrografiske modeller*

Gennem de seneste tyve år er de hydrografiske undersøgelser af Kattegat i stigende grad blevet modelbaseret. Modeller af de fysiske og kemiske processer i Kattegat er beskrevet af bl.a. Svansson (1972); Stigebrandt (1983) og Jacobsen & Hansen (1985). Strukturen og detaljeringsniveauet i disse modeller varierer, men de fleste fokuserer på den tidsmæssige og rumlige fordeling af næringssalte i overflade- og bundvandet i Kattegat. Modellering har specielt været anvendt til at undersøge de hydrografiske forholds indvirkning på forekomsten af iltsvind i bundvandet.

*Biologiske modeller*

Sideløbende med modelleringen af de hydrografiske processer er der sket betydelige fremskridt indenfor modellering af de biologiske processer. Siden de banebrydende fytoplanktonmodeller af Riley *et al.* (1949); Steele (1958) og Cushing (1959) er de marine økosystemmodeller blevet betydeligt mere komplekse. De biologiske modeller omfatter nu også højere trofiske niveauer, mere præcise udtryk for de hydrografiske betingelser, eksplicit adskillelse af enkelte arter og populationer, og i nogle tilfælde også flere dimensioner (jvf. Fransz *et al.*'s 1991 review over økologiske modeller for Nordsøen). På trods af denne mangfoldighed i udbuddet af modeller findes der kun få (f.eks. Malmgren-Hansen, 1984) biologiske modeller for Kattegat.

De tilbagevendende skilleflade-opblomstringer af fytoplankton i Kattegat, som er beskrevet i denne rapport, er et oplagt emne for en dynamisk modellering. Siden slutningen af 50'erne har biologiske oceanografer studeret og modelleret de fysiske og biologiske betingelser for dannelsen af dybmaksima af fytoplankton og klorofyl.

I forsøgene på at forklare dannelsen af klorofyl dybmaksima lægger nogle forfattere vægt på betydningen af en dybde-afhængig synkehastighed for fytoplanktonorganismerne (f.eks. Jerlov, 1959, og Steele & Yentsch, 1960). Når fytoplanktoncellerne næringssaltbegrænses synker, de hurtigt ned gennem overfladevandet, men synkehastigheden nedsættes, når algerne når det næringsrige bundvand. Denne fysiologiske mekanisme forstærkes af at det salte bundvand har en højere vægtfylde end overfladevandet, hvilket yderligere nedbringer synkehastigheden.

Ifølge Herbland & Voituriez (1979) kan øgningen i vandets densitet ved skillefladen, og den heraf følgende reduktion i algernes synkehastighed, ikke alene forklare dannelsen af dybmaksima af fytoplankton. De påpeger, at i tropiske havområder findes dybmaksima af klorofyl ofte under termoklinen. I stedet anfører de *in situ* produktion som den bedste forklaring på dannelse af klorofyl dybmaksima: med mindre de ringe lysforhold forhindrer vækst

er algerne nær pyknoklinen optimalt placeret i forhold til næringssalte og lys. Resultater fra en model udviklet af Jamart *et al.*, (1977) for det nordøstlige Stillehav understøtter konklusionen, at *in situ* produktion er nødvendig for dannelse af fytoplankton dybmaksima.

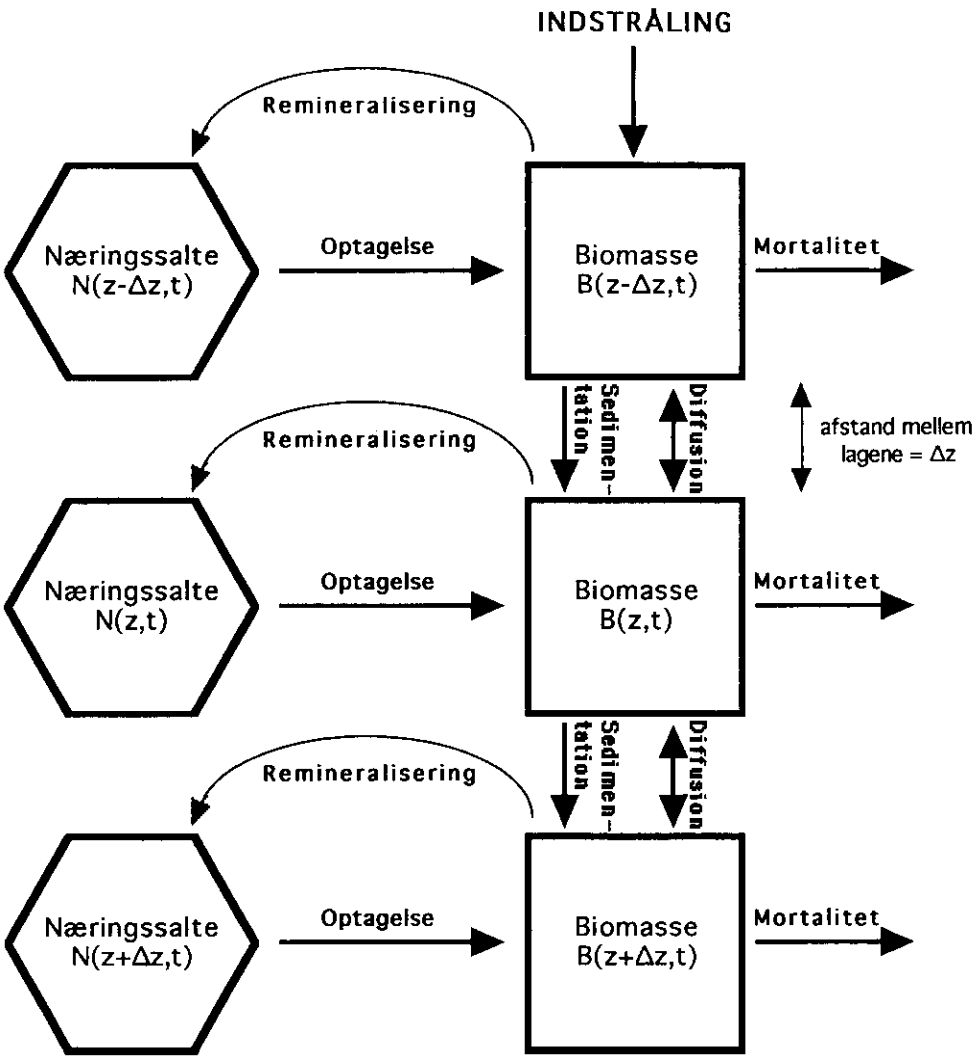
Nogle opblomstringer af fytoplankton i skillefladen er sandsynligvis ikke kun drevet af fytoplanktonets egen dynamik, men snarere af andre mekanismer i det lokale miljø. I frontområder for eksempel kan dannelsen af dybmaksima være et direkte resultat af hydrodynamiske mekanismer, hvis fytoplankton produceret i overfladen transporteres til dybere vandlag af nedstrømmende vand ('downwelling', Pingree, 1978; Pingree *et al.*, 1975). Andre planktongrupper kan også bidrage til dannelsen af fytoplankton dybmaksima. Således målte Fidler (1982) reduceret zooplanktongræsning omkring et dybmaksimum af dinoflagellaten *Gymnodinium splendens*. Reduceret zooplankton-græsning er næppe i sig selv tilstrækkeligt til at forårsage dannelsen af et fytoplankton dybmaksimum, men reduceret græsning kan påvirke størrelsen, varigheden og artssammensætningen af et allerede dannet dybmaksimum.

Andre forfatter påpeger at et dybmaksimum af klorofyl ikke altid repræsenterer et dybmaksimum af algebiomasse. Ifølge Steele (1964) kan en reduktion i algernes kulstof:klorofyl ratio, betinget af lyshæmning, i visse tilfælde give anledning til et klorofylmaksimum.

Det fremgår klart, at flere fysiske såvel som biologiske mekanismer kan influere dannelsen og dynamikken af klorofyl dybmaksima. Forfatterne til denne rapport har arbejdet med at udvikle en todimensional model (dybde vs. tid) for at undersøge de kontrollerende faktorer for dannelse af fytoplankton dybmaksima i Kattegat. Modellen er i princippet en forenklet udgave af modellen udviklet af Jamart *et al.*, (1977). Den er opbygget som et system af differentialligninger med to afhængige variable: fytoplankton biomasse og koncentrationen af det begrænsende næringssalt, som begge varierer med tid og dybde. Fytoplanktonets biomasse varierer som følge af vertikal diffusion, udsynkning, vækst, respiration og græsning. Koncentrationen af næringssalt varierer som følge af diffusion, fytoplanktonets forbrug og remineralisering gennem respiration og græsning.

*Dette kapitel*

Dette kapitel beskriver modellen og præsenterer resultater af en række foreløbige verifikationer. Modellens grundlæggende 'opførsel' (herunder konvergens) og sensitivitet blev testet med tilfældigt valgte startbetingelser. Yderligere simuleringer blev kørt med startbetingelser svarende til målte data fra en station i det sydlige Kattegat fra maj 1992. Resultaterne fra disse simuleringer blev sammenlignet med faktiske måledata fra samme station 5 - 10 dage senere end startmålingerne for at teste modellens forudsigelsesevne.




***Figur 11.1.*** *Diagram over variable og flow-processer inkluderet i modellen. Z refererer til dybden (m) og t til tiden (t).*

## 11.2 Modellens opbygning

I modellen indgår to afhængige variable fytoplanktonbiomassen B(z,t) og koncentrationen af det begrænsende næringssalt (f.eks. nitrat plus ammonium) N(z,t) afhængige af tiden (t, målt i timer) og dybden (z, målt i meter). For at forenkle beregningerne udtrykkes både B og N i kulstofenheder (idet omregning fra nitrogen til kulstof følger Redfield forholdet). Modellens opbygning er skitseret i Figur 11.1. Den anvendte version af modellen har benyttet lineære approksimationer til at løse nedenstående system af to ikke-lineære partielle differentialligninger som udtrykker hvorledes B og N afhænger af t og z.

1.) $$\frac{\partial B}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}(D_z \frac{\partial B}{\partial z}) - S\frac{\partial B}{\partial z} + (\alpha(MIN(Imax,I))\frac{N}{N+Km} - R - M)B$$

2.) $$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}(D_z \frac{\partial N}{\partial z}) - (\alpha(MIN(Imax,I))\frac{N}{N+Km} - R)B$$

Lysets svækkelse med dybden er udtrykt i flg. ligning:

$$\frac{dI}{dz} = -(A_b B + A_w)I, \quad I(z=0) = I_o$$

Følgende konstanter indgår i differentialligningerne:

Dz vertikal turbulent diffusivitet ($m^2h^{-1}$)

S fytoplanktoncellernes synkehastighed ($m\ h^{-1}$)

$\alpha$ specifik fotosyntetisk kapacitet ($m^2s\ \mu mol^{-1}h^{-1}$)

Imax lysintensitet ved mætning ($\mu mol\ m^{-2}s^{-1}$)

Km halvmætningskoncentration for det begrænsende næringssalt ($\mu gC\ l^{-1}$)

R specifik respirationsrate ($h^{-1}$)

M specifik tabsrate som følge af græsning og udsynkning af aggregater ($h^{-1}$)

Ab biomassebetinget lysabsorption ('selvskygning') ($m^2\ \mu gC^{-1}$)

Aw vandets lysarbsorption ($m^{-1}$)

Io lysindstrålingen ved overfladen

MIN(x,y) er en funktion der beregner minimum af x og y.

Den første partielle differentialligning beskriver ændringen i fytoplanktonbiomassen $\delta B/\delta t$ i en given dybde z. Det første led i ligningen, $\delta/\delta z(Dz*\delta b/\delta z)$, udtrykker ændringen i biomassen som følge af vertikal turbulent diffusion. Dette led vil bidrage til en udfladning af maksima i biomassen, men flytter ikke placeringen (dybden) af den maksimale biomasse.

Det andet led i ligningen, $S*\delta B/\delta z$, beskriver ændringen i biomasse som følge af udsynkningen af de enkelte algeceller og kan betragtes som en lodret advektion. Dette led bidrager til at flytte evt. biomassemaksima nedad gennem vandsøjlen, men ændrer ikke deres form.

Det sidste led i ligningen beskriver biomasseændringen forårsaget af biologiske processer *in situ*. Dette led tager hensyn til algernes produktion som funktion af lysintensitet og næringssalt-koncentration, samt til respiration (R) og mortalitet (M). Alge-produktionens afhængighed af lysintensiteten antages at følge et rektilineært forløb, dvs. at produktionen er proportional med lysintensiteten indtil en given mætningsværdi Imax og derefter konstant. Dette udtryk tager således ikke højde for en eventuel reduktion af algeproduktionen ved høje lysintensiteter (lyshæmning).

Algeproduktionens afhængighed af næringssaltkoncentrationen antages at følge et konvekst hyperbolsk forløb med en halvmætningskoncentration Km.

De to tabsled, R og M, repræsenterer de akkumulerede effekter af respiration, græsning og udsynkning af aggregater. R repræsenterer 'midlertidige' tab fra biomasse-puljen, som remineraliseres på stedet og dermed er tilgængelige for regenereret produktion, medens M repræsenterer varige tab fra biomassepuljen. Zooplanktonets græsning er repræsenteret i både R og M, idet græssernes respiration er inkluderet i R-leddet, medens udsynkningen af fækaliepiller er omfattet af M-leddet.

Den anden ligning i systemet beskriver ændringen i næringssalt-koncentrationen med tiden. Det første led i ligningen beskriver spredningen af næringssaltet som følge af turbulent diffusion, svarende til første led af den første ligning. Det andet led i ligningen er symmetrisk til det sidste led af første ligning, idet tilvækst i biomasse er ensbetydende med forbrug af næringssalte. Mortalitetsleddet M er ikke inkluderet i den anden ligning, idet dette led som nævnt repræsenterer varige tab af biomasse/næringssalt.

Den sidste ligning beskriver lysets nedtrængning gennem vandsøjlen og absorptionen forårsaget af algebiomassen og af vandet selv.

## 11.3 Startbetingelser og konstanter

Modellen blev indstillet til at beskrive udviklingen i de øverste 30 m af vandsøjlen. I de indledende kørsler, hvor modellens generelle opførsel, stabilitet og sensitivitet blev testet, blev der anvendt startværdier for biomasse og næringssalt på hhv 15 og 600 µgC $l^{-1}$, uafhængigt af dybden. Efterfølgende kørsler til test af modellens forudsigelsesevne blev foretaget med målte data fra en station i det sydlige Kattegat.

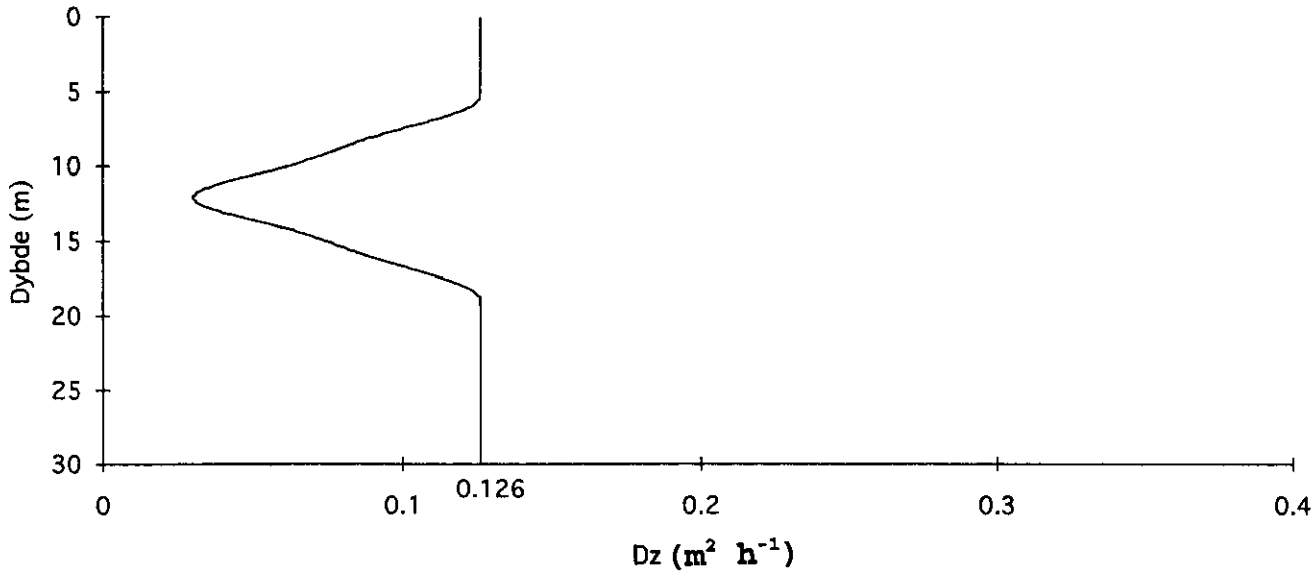
Resultaterne af de indledende kørsler viste sig at afhænge betydeligt af de indgående konstanter, og det er derfor nyttigt at gennemgå grundlaget for de valgte værdier og usikkerhedsmarginen omkring dem. De værdier, som er anvendt som standard i modelkørslerne, er sammenfattet i Tabel 11.1.

***Tabel 11.1.*** *Start værdier anvendt under simuleringerne.*

| Symbol | Definition | Start værdi | Enhed |
|---|---|---|---|
| α | Specifik fotosyntetisk kapacitet | 0,001 | $m^2$ s $\mu mol^{-1}$ $h^{-1}$ |
| Ab | Biomassebetinget lysabsorption | $6,0 \cdot 10^{-7}$ | $m^2$ $\mu gC^{-1}$ |
| Aw | Vandets lysarbsorption | 0,2 | $m^{-1}$ |
| Dz | Vertikal turbulent diffusivitet | 0,126 | $m^2$ $h^{-1}$ |
| Io | Lysindstråling ved overfladen | 750,00 | µmol $m^{-2}$ $s^{-1}$ |
| Km | Halvmætningskoncentration | 72,0 | µgC $l^{-1}$ |
| M | Specifik tabsrate | 0,005 | $h^{-1}$ |
| R | Specifik respirationsrate | 0,005 | $h^{-1}$ |
| S | Fytoplanktonscellernes synkehastighed | 0,005 | m $h^{-1}$ |

### 11.3.1 Vertikal turbulent diffusivitet, Dz

Modellen blev først kørt med en konstant (dvs. dybde-uafhængig) diffusivitet på 0.126 $m^2h^{-1}$. denne værdi svarer til den højeste værdi beregnet af Kullenberg (1977) for forår og sommer i Kattegat. Modellens følsomhed overfor valget af diffusivitet blev testet ved at variere Dz gennem hele det af Kullenberg (1977) opgivne interval: 0.036 - 0.126 $m^2h^{-1}$. Under sommerlagdelingen i Kattegat vil den vertikale turbulente diffusivitet være reduceret omkring skillefladen, hvor densitetsgradienten stabiliserer vandsøjlen, medens der vil være en betydelig turbulens i de homogene lag (både overfladelag og bundlag) drevet af strømmen). For at give en mere realistisk repræsentation af diffusiviteten blev modellen endvidere kørt med en dybdeafhængig Dz, som vist i Figur 11.2. Denne Dz-profil er modificeret fra Parker (1991). Der er behov for mere viden om diffusivitetens dybdeafhængighed i lagdelte vandsøjler og i Kattegat specifikt før denne del af modellen kan gøres mere realistisk.




*Figur 11.2. Vertikal profil af diffusivitet (Dz) anvendt til nogle af simuleringerne for at simulerer en skarp pyknoklin.*

### 11.3.2 Algernes synkehastighed, S

Algernes udsynkning gennem vandsøjlen afhænger af flere faktorer, herunder artssammensætningen, algernes fysiologiske tilstand f.eks. i forhold til næringssalt-tilgængelighed, sammenklumpning af algeceller til aggregater og vandets densitet. Visse algearter er endvidere selvbevægelige og kan foretage vertikale vandringer på op til flere m per døgn som respons på faktorer i deres omgivelser (f.eks. lys, salinitet og næringssalte). For ikke at komplicere modellen blev der imidlertid anvendt en konstant synkehastighed på 5 $10^{-3}$m $h^{-1}$ (Bienfang *et al.*, 1982). Modellens følsomhed overfor denne konstant blev testet ved at variere S fra 0 - 5 $10^{-2}$m $h^{-1}$.

### 11.3.3 Fotosyntetisk kapacitet, α

Den fotosyntetiske kapacitet udtrykker den maximale fytoplankton produktivitet i forhold til lysindstrålingen. Ved optimal næringssalt-tilgængelighed er den fotosyntetiske kapacitet således et udtryk for hvor effektivt fotosyntesepigmenterne opfanger og omsætter lysenergien. Den fotosyntetiske kapacitet blev sat til $10^{-1}m^{-2}s$ $\mu mol^{-1}m^2h^{-1}$ under antagelse af en kulstof:klorofyl ratio på 30 (Bjørnsen *et al.*, 1993). I det marine miljø varierer denne ratio indenfor intervallet 20 - 100. Følsomheden blev testet ved at variere α fra 2 $10^{-5}$ - 5 $10^{-3}m^{-2}s$ $\mu mol^{-1}m^2h^{-1}$.

### 11.3.4 Halvmætningskoncentration for næringssalt, Km

Km blev sat til 72 µgC $l^{-1}$ i alle kørsler (Eppley *et al.*, 1969).

### 11.3.5 Respirationsrate, R, og mortalitetsrate, M

Disse to konstanter repræsenterer samtlige tabsprocesser og bør diskuteres samlet. I alle kørsler blev både R og M sat til 5 $10^{-3}h^{-1}$ (Harris, 1978, og Bjørnsen *et al.*, 1993). Det er vanskeligt at vurdere disse konstanter fordi de begge dækker over flere uafhængige processer. En eksplicit inddragelse af græsserpopulationen ville kunne give en mere realistisk model, men ville samtidigt komplicere modellen betydeligt.

### 11.3.6 Fytoplankton selvskygning, Ab

Denne konstant, som udtrykker lysabsorptionen fra algernes pigmenter, er sat til 6 $10^{-7}m^2\mu gC^{-1}$ (Taylor *et al.*, 1986) under antagelse af en kulstof:klorofyl ratio på 30.

### 11.3.7 Vandsøjlens lysabsorption, Aw

Vandets absorptionskoefficient er sat til 0.2 $m^{-1}$ (Weast, 1975). Aw vil påvirkes af opløst organisk materiale (især gulstof) og af partikulært detritus.

### 11.3.8 Overflade-indstrålingen, Io

Lysindstrålingen ved vandoverfladen er sat til 750 µmol $m^{-2}s^{-1}$ i alle kørsler, svarende til døgnmiddel for Kattegat om sommeren (Bjørnsen *et al.*, 1993). For forårssituationerne er denne værdi omkring 25% for høj. En oplagt forbedring af modellen vil være at udtrykke overfladeindstrålingen som funktion af breddegrad, dato og klokkeslæt.

### 11.3.9 Omregningsforhold mellem næringssalt, kulstof og klorofyl

Der er anvendt faste omregningsforhold på 7 gC:gN (Redfield, 1958) og 30 gC/g klorofyl, selv om begge forhold reelt varierer med en række omgivelsesfaktorer, herunder næringssaltkoncentrationen (Jamart *et al.*, 1977). Olesen (1992) fandt C:N forhold (på vægtbasis) om sommeren i Kattegat på 5.9 i planktonet og 7.1 i materiale opsamlet i sedimentfælder.

## 11.4 Numeriske beregningsmetoder

Modellen blev implementeret som et program skrevet i sproget 'C' på en VAX 6420 computer. Differentialligningerne blev løst gennem finitesimal tilvækst. De rumlige partielle afledte er udtrykt som anden ordens tilnærmelser baseret på middel-forskelle. Tids-skridtene blev først foretaget ved en direkte Euler's metode, men denne metode viste sig at være ustabil for høje værdier af S (fytoplanktonets synkehastighed). Tidsskridtene blev herefter foretaget gennem en 4.ordens Runge-Kutta algoritme. Denne metode sikrede stabilitet og akkurathed, men er næppe optimal udfra et effektivitetshensyn.

Testkørsler viste at et tidsskridt (dt) på 0.1 time og et dybdeinterval (dz) på 0.25 m er tilstrækkeligt fine til at sikre at modellen konvergerer med de startværdier som er vist i Tabel 11.1. Yderligere reduktion af dt eller dz medførte kun marginale (<1%) ændringer i den beregnede biomasse eller næringssaltkoncentration efter 10 dage fra start. Modellens stabilitet er dog følsom overfor valget af S (algernes synkehastighed). Ved høje værdier af S skal der vælges mindre dybdeintervaller, ved en synkehastighed på 0.05 m $h^{-1}$ må dz således være mindre end 0.025 m for at opnå stabilitet af modellen.

## 11.5 Resultater af testkørsler

Tre kategorier af testkørsler vil blive beskrevet:

- kørsler med startværdier som vist i Tabel 11.1;
- kørsler hvor startværdierne varieres enkeltvis for at teste modellens følsomhed;
- kørsler med startværdier fra målinger i Kattegat.

De fleste kørsler simulerede 10 dages perioder med henblik på at sammenligne med den observerede udvikling over 10 dages måleperioder i Kattegat.

### 11.5.1 Indledende kørsler

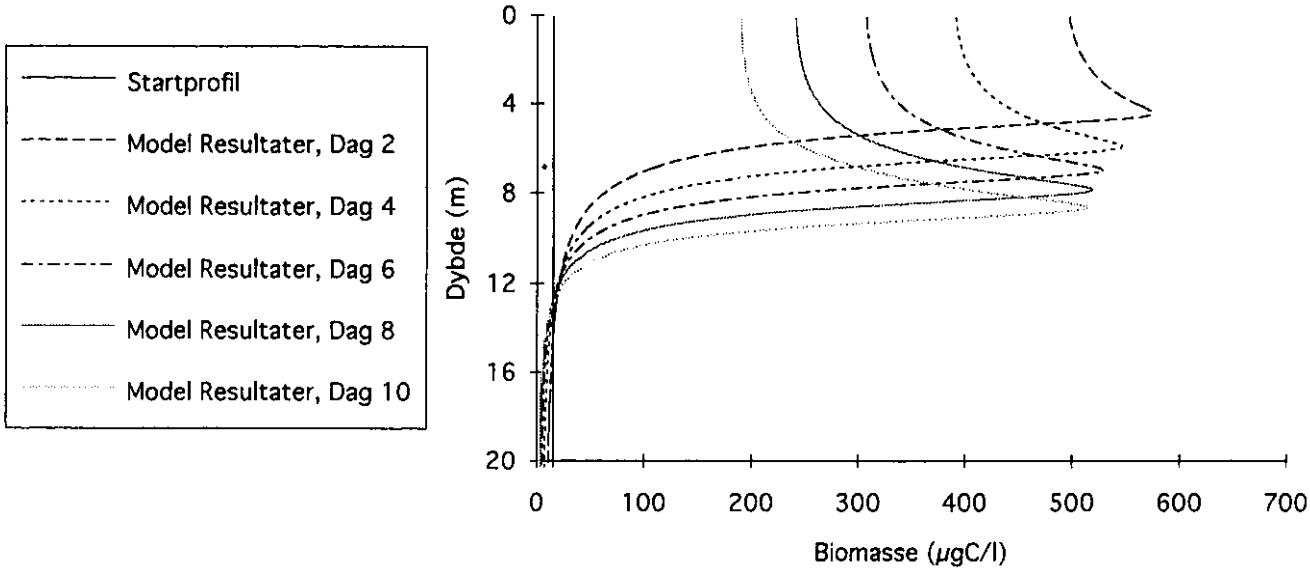
Figurerne 11.3 og 11.4 viser udviklingen i profiler af biomasse og næringssalte under en 10 dages simulering med startværdier som angivet i Tabel 11.1. Som udgangspunkt er biomasse og næringssalt-koncentration konstante gennem vandsøjlen. På andendagen er der som følge af en betydelig algeproduktion i overfladen (hvor der er både lys og næringssalt) dannet en høj biomasse i de øverste 4 m af vandsøjlen (Figur 11.3), som samtidigt er næsten tømt for næringssalt (Figur 11.4). Efter yderligere to dage er biomasse-maksimummet blevet smallere og er begyndt at flytte nedad gennem vandsøjlen. På den tiende dag er biomassen samlet omkring 10 m dybde, sammenfaldende med en skarp nutriklin (skilleflade i næringssalt-koncentrationen).

Modellen gengiver det forventede hændelsesforløb startende med en produktion nær overfladen, opbrug af næringssaltende ved overfladen, og derefter dannelsen af en nutriklin og et sammenfaldende dybmaksimum af biomasse, som begge flytter sig ned gennem vandsøjlen. Herunder bliver lysforholdene naturligvis gradvist ringere, og før eller siden vil dybmaksimummet nå den såkaldte kompensationsdybde, hvor fytoplanktonets produktion opvejes af tabsprocesserne, og dybmaksimummet vil følgeligt

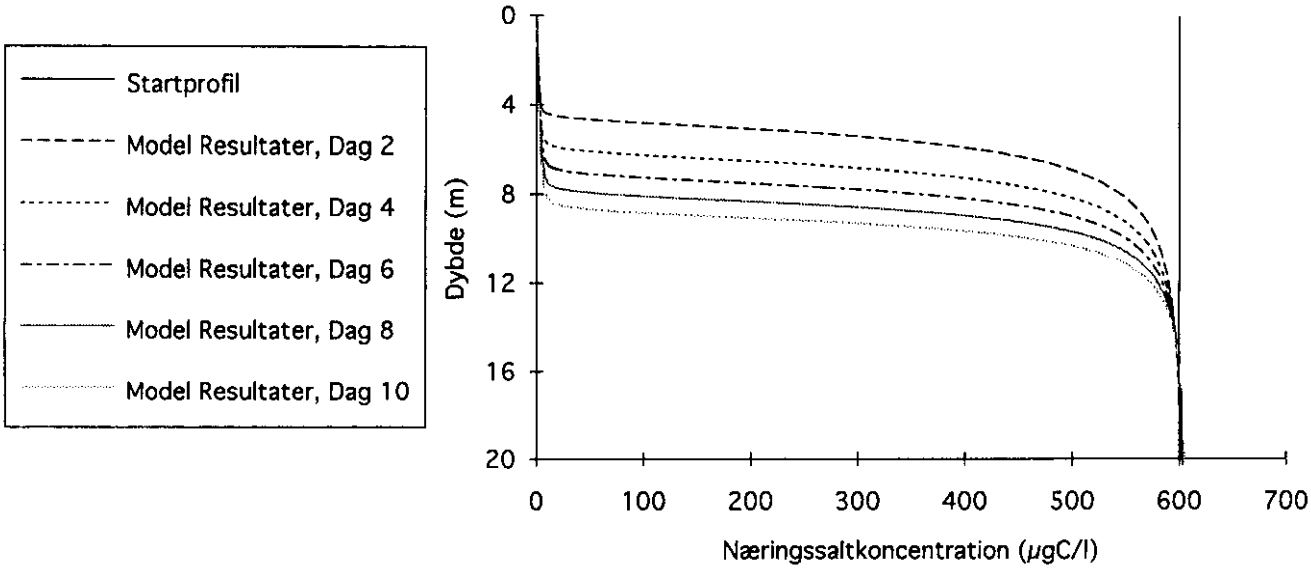
aftage og forsvinde. En mindre reduktion i den maksimale biomasse kan allerede ses under de første 10 dages simulering (Figur 11.3).

### 11.5.2 Test af modellens følsomhed

En test af modellens følsomhed overfor de forskellige konstanter giver et indblik i hvilke faktorer der styrer modellen og som måske også har en betydning i det naturlige system. Endvidere giver det anledning til at være særlig påpasselig med valget af værdier for disse kritiske faktorer i modelleringen.

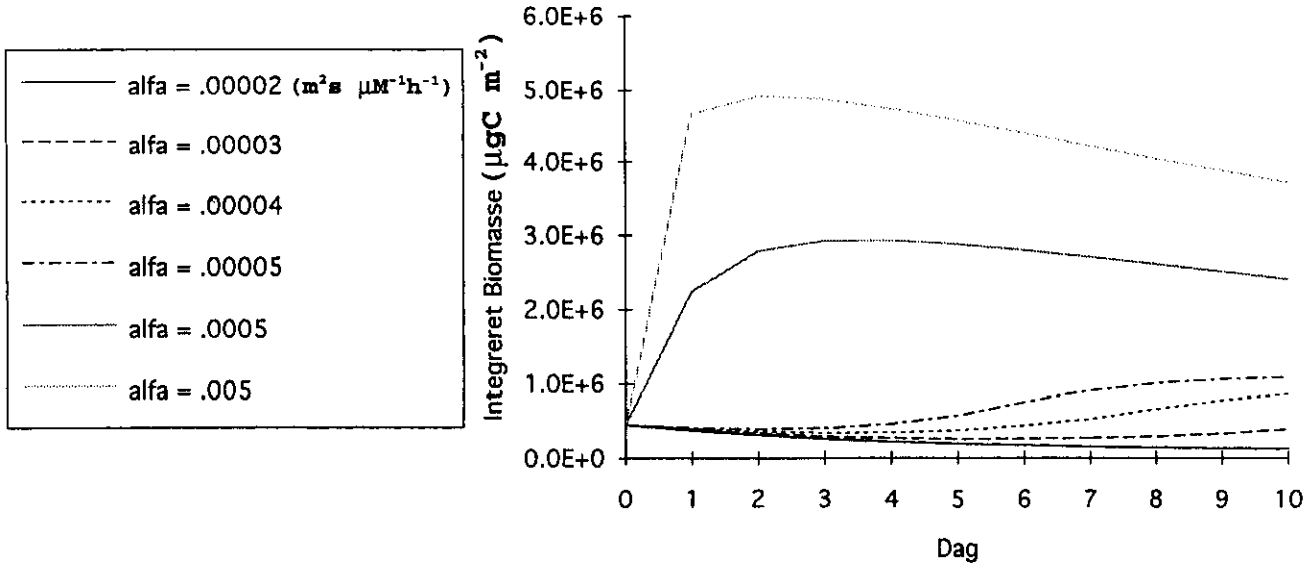



*Figur 11.3. Vertikal fordeling af biomasse under en 10 dages simulering med udgangs punkt i værierne fra Tabel 11.1.*



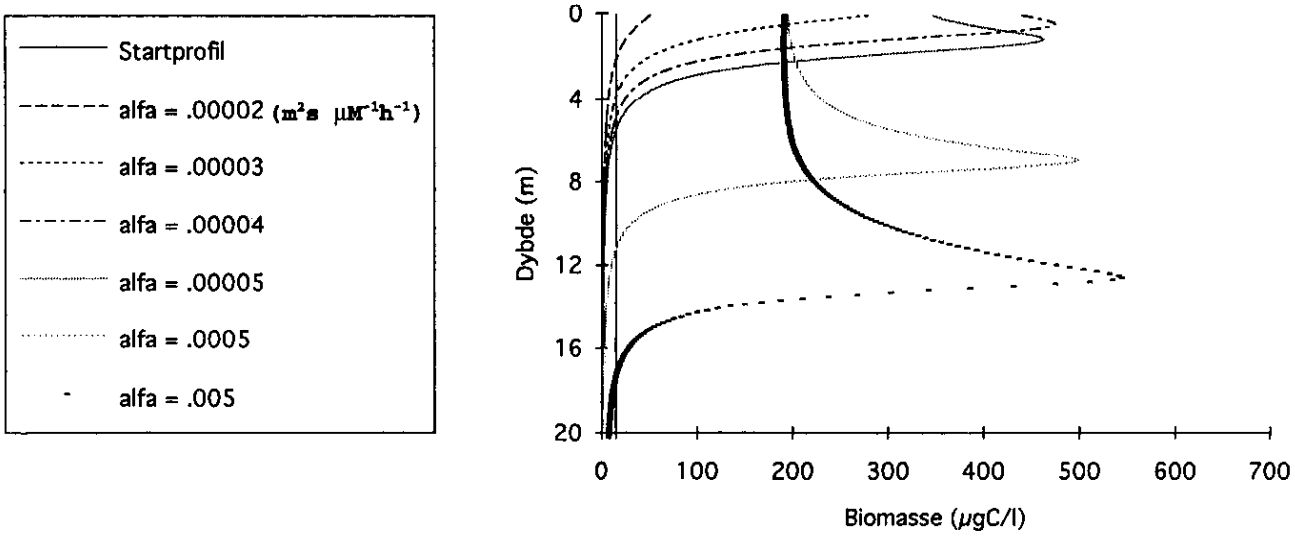

*Figur 11.4. Vertikal fordeling af næringssalte under en 10 dages simulering, start værdierne er listet i Tabel 11.1.*

Udgangspunktet for testen var en simulering med startværdier som givet i Tabel 11.1. Tre af de vigtigste faktorer - den fotosyntetiske kapacitet (α), algernes synkehastighed (S) og den turbulente diffusivitet (Dz) - blev herefter hver især ændret indenfor et rimeligt interval, og resultaterne af de forskellige simuleringer blev sammenlignet og vurderet.

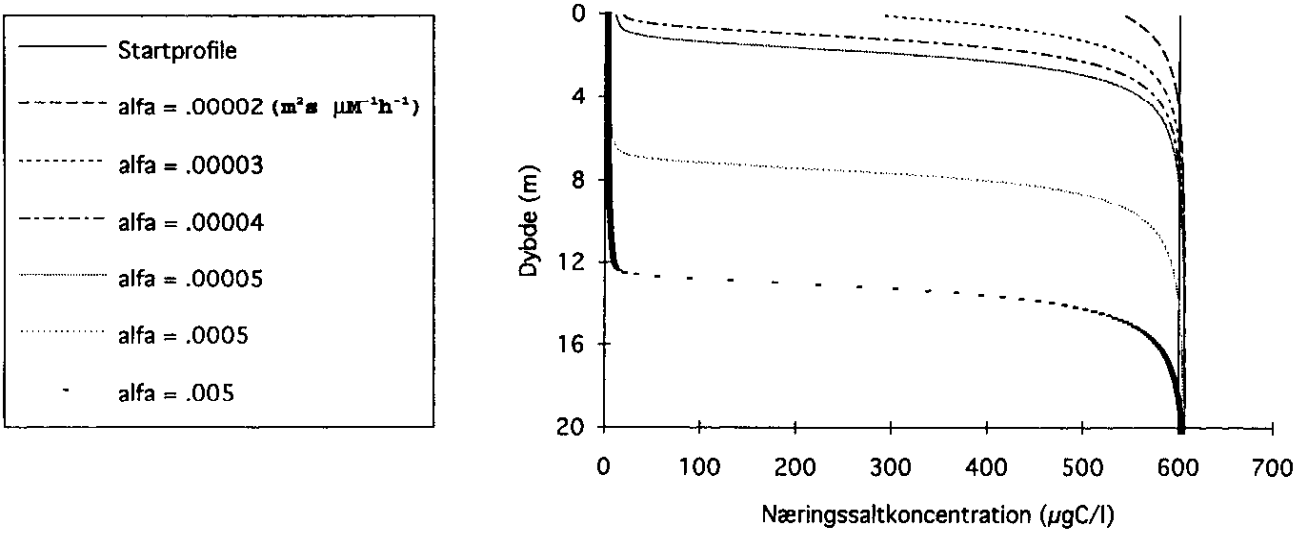



***Figur 11.5.*** *Tidsserie af integrerede biomasser (μg C $m^{-2}$) for stigende værdier af fytoplanktonproduktivitet, α, med de øvrige parametre som anført i Tabel 11.1.*

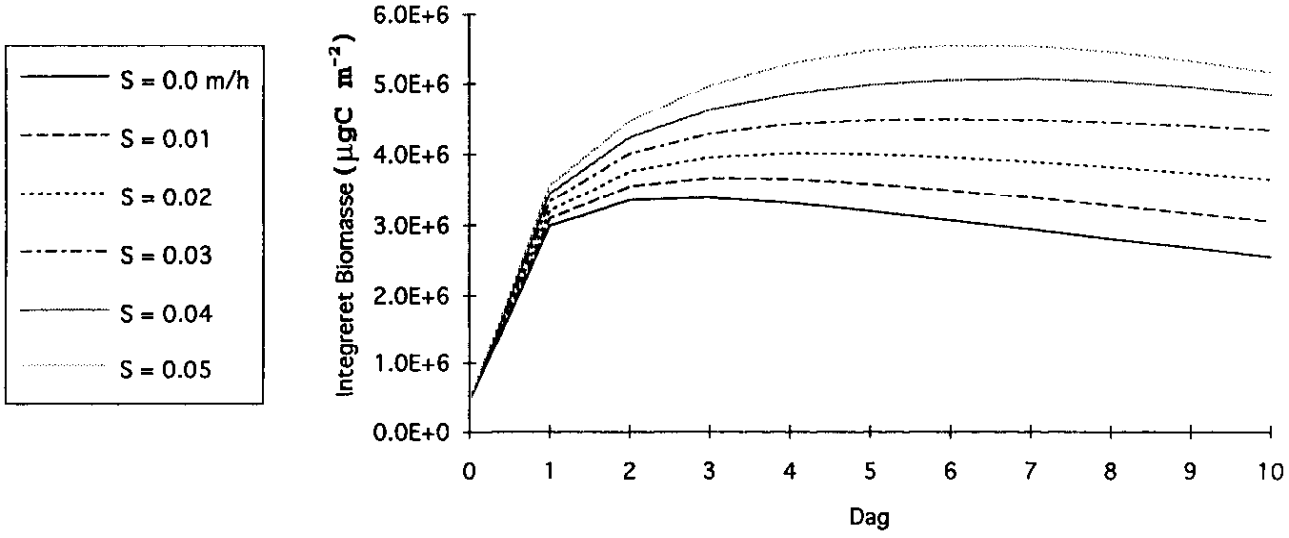
Modellen viste sig at være mest følsom overfor fytoplanktonets fotosyntetiske kapacitet, α. En øgning af α fra 2 $10^{-5}$ til 5 $10^{-5}$ $m^{-2}s$ $\mu mol^{-1}h^{-1}$ resulterede således i en 7-dobling af den samlede biomasse (integreret over dybden) efter 10 dages simulering (Figur 11.5). Betydningen af α for modellen er yderligere illustreret i Figurerne 11.6 og 11.7, som viser de beregnede profiler af biomasse og næringssaltkoncentration efter 10-dages simuleringer med forskellige værdier af α. Højere værdier af α resulterer i hurtigere dannelse af dybmaksimum og nutriklin, og i højere maksimal biomasse.




***Figur 11.6.*** *Vertikalfordeling af biomasse efter seks 10 dages simuleringer med stigende fytoplanktonproduktivitet, α, de øvrige parametre som i Tabel 11.1.*



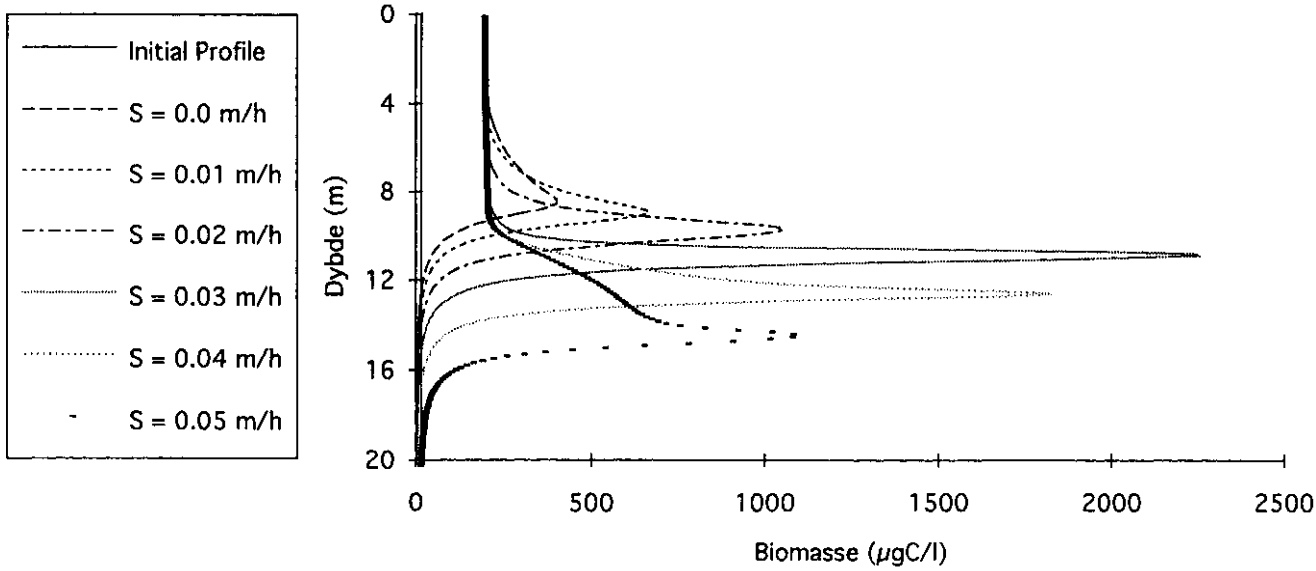

***Figur 11.7.*** *Vertikalfordeling af næringssalte efter seks 10 dages simuleringer med stigende fytoplanktonproduktivitet, α, de øvrige parametre som i Tabel 11.1.*



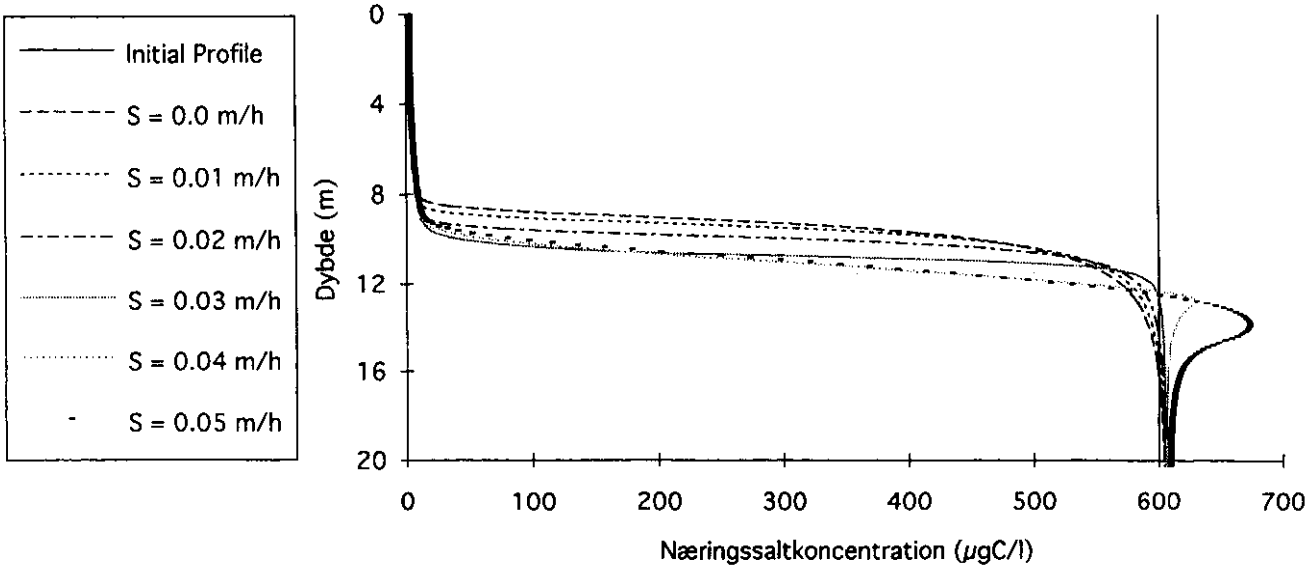

***Figur 11.8.*** *Tidsserie af integrerede biomasser (µg C $m^{-2}$) for stigende værdier af fytoplanktonsynkerate, S, med de øvrige parametre som anført i Tabel 11.1.*

Som nævnt ovenfor har værdien af S (algernes synkehastighed) stor betydning for valget af dybdeinterval dz for opnåelse af stabilitet. Sålænge stabiliteten er sikret, er modellen imidlertid forholdsvis ufølsom overfor S. En 5 ganges forøgelse af S (fra 0.01 til 0.05 m $h^{-1}$) medfører 70% stigning i den dybde-integrerede biomasse efter 10 dage (Figur 11.8).

Selv når S sættes til nul dannes der et markant dybmaksimum og en nutriklin efter 10 dage (Figur 11.9 og 11.10), så S er ikke afgørende for modellens generelle opførsel, men som forventet medfører en øgning af S at dybmaksimummet og nutriklinen ligger dybere efter 10 dages simulering (Figur 11.9 og 11.10). Øgning af S medfører også øget maksimal biomasse op til en kritisk værdi af S. For højere værdier af S bliver den maksimale biomasse igen mindre (algernes udsynkning er for hurtig i forhold til produktionen). Høje værdier af S kan også føre til en positiv netto-remineralisering, dvs. algerne optager næringssalte i et lag af vandsøjlen, synker til lag med ringere lysforhold og udskiller (respirerer) næringssalt i dette lag (jvf. Figur 11.10).



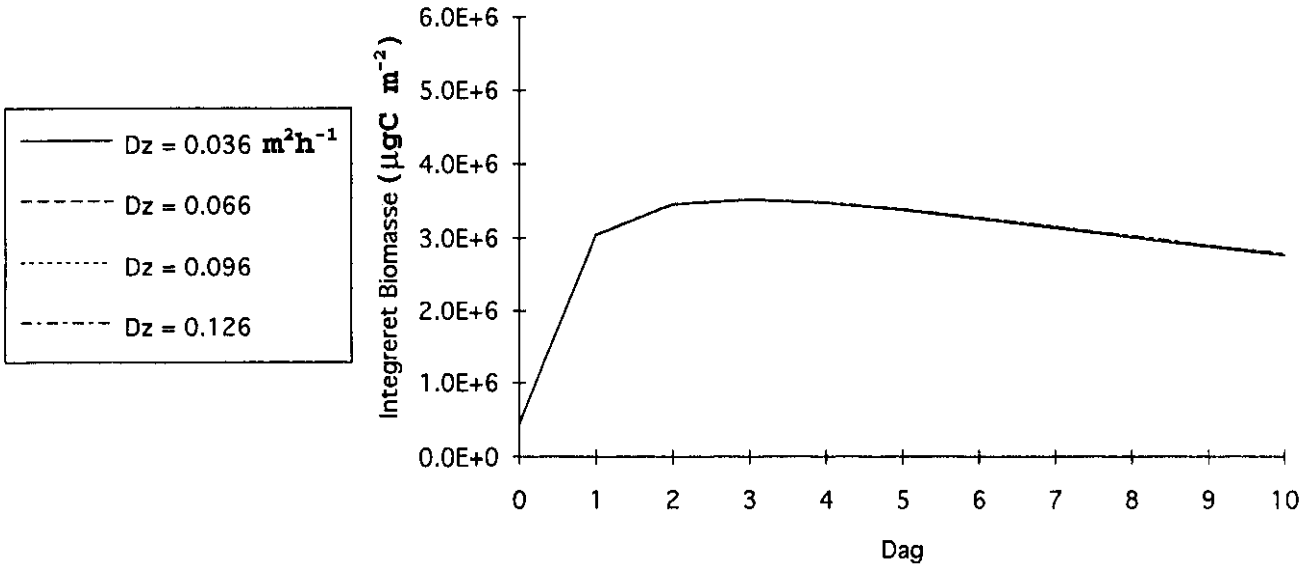

***Figur 11.9.*** *Vertikalfordeling af biomasse efter seks 10 dages simuleringer med stigende fytoplankton synkerate, S, de øvrige parametre som i Tabel 11.1.*




***Figur 11.10.*** *Vertikalfordeling af næringssalte efter seks 10 dages simuleringer med stigende fytoplankton synkerate, S, de øvrige parametre som i Tabel 11.1.*

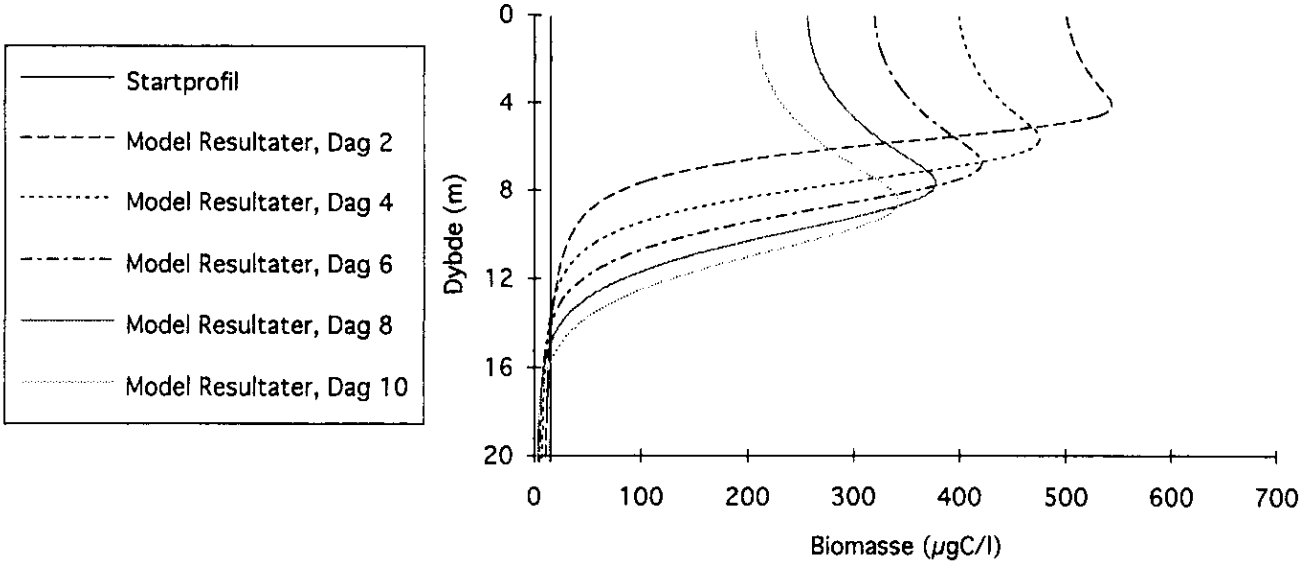
Det ville være interessant at undersøge betydningen af en variabel udsynkningshastighed (f.eks. som funktion af lys- eller næringssalt-forhold og af vandets densitet) samt af vertikal vandring af algerne. Visse furealger kan foretage vertikale døgnvandringer på op til 20 m (Edler & Olson, 1985), og dette kunne have stor betydning for dannelsen og opretholdelsen af dybmaksima i Kattegat.

I betragtning af den ringe viden om dybdeafhængigheden af den turbulente diffusivitet Dz, og det åbenbart urealistiske i at operere med en dybde-uafhængig Dz, er det heldigt at modellen er relativt ufølsom overfor Dz. En øgning af Dz fra 0.036 til 0.126 $m^2h^{-1}$ (dvs. over hele det af Kulleberg, 1977 opgivne interval for overfladelaget i Kattegat gennem forår og sommer) resulterede i mindre end 1% afvigelse i den integrerede biomasse efter 10 dage (Figur 11.11).

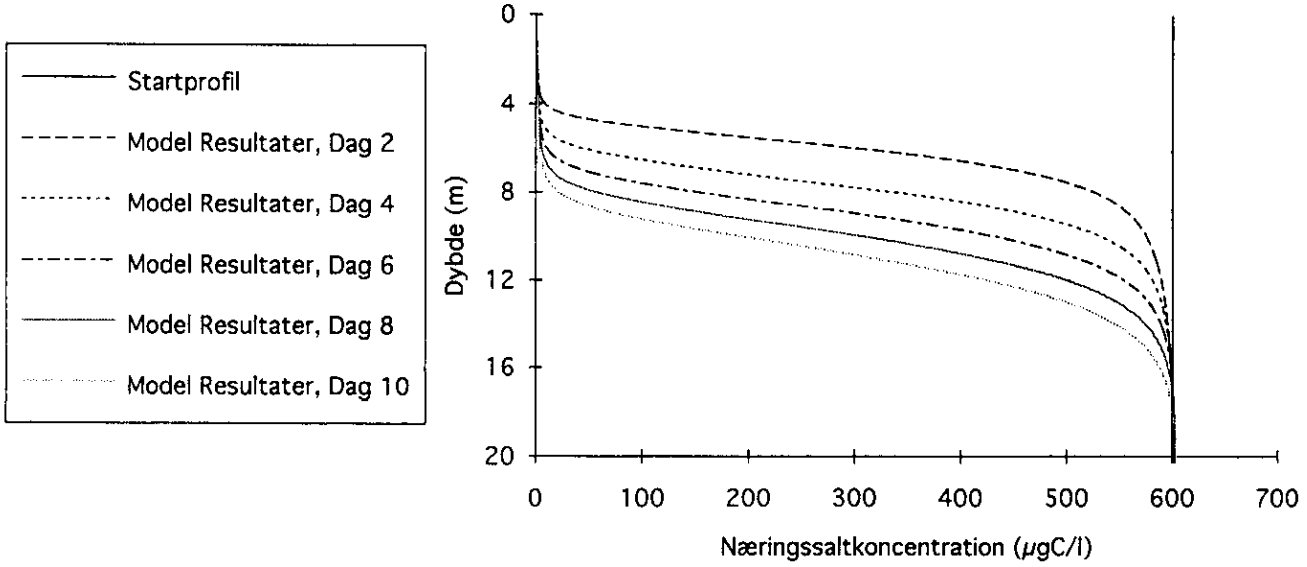



***Figur 11.11.*** *Tidsserie af integrerede biomasser (µg C $m^{-2}$) for stigende værdier af vertikal diffusivitet, Dz, med de øvrige parametre som anført i Tabel 11.1.*

En testkørsel med en Dz på 3.6 $m^2h^{-1}$ viste at en høj vertikal turbulent diffusivitet kan forhindre dannelsen af et dybmaksimum (Figur 11.12 og 11.13). Modellen simulerer en betydelig algeproduktion ved overfladen i de første dage (Figur 11.12), men den producerede algebiomasse fordeles hurtigt til hele vandsøjlen. Den dannede nutriklin er også mindre skarp (sammenlign Figur 11.4 og Figur 11.13).

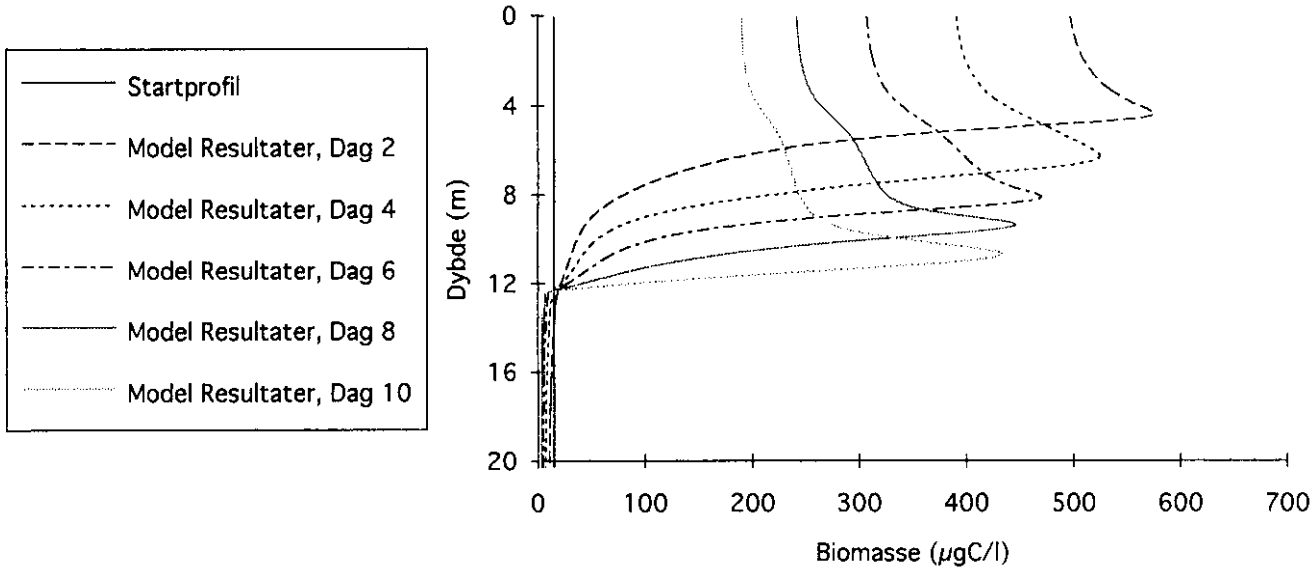



***Figur 11.12.*** *Vertikalfordeling af biomasse efter 10 dage for seks simuleringer med stigende vertikal diffusivitet, Dz, de øvrige parametre som i Tabel 11.1.*

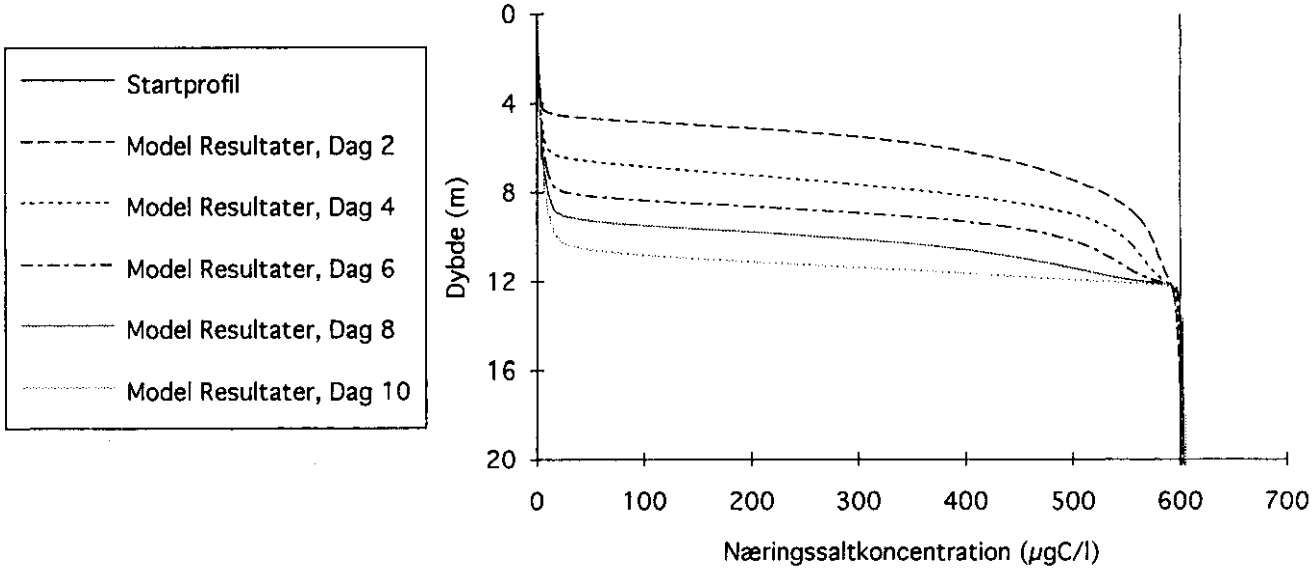



***Figur 11.13.*** *Vertikalfordeling af næringssalte efter 10 dage for seks simuleringer med stigende vertikal diffusivitet, Dz, de øvrige parametre som i Tabel 11.1.*

Som nævnt ovenfor er det næppe realistisk at antage, at Dz er konstant gennem vandsøjlen. Omkring pyknoklinen vil densitetsgradienten stabilisere vandsøjlen og dermed reducere turbulensen. Modellen blev derfor kørt med en Dz profil som vist i Figur 11.2 med et minimum omkring pyknoklinen. I den resulterende simulering er der en tendens til at dybmaksimummet i biomasse fastholdes lige over pyknoklinen med en skarp nedre afgrænsning (Figur 11.14). Den skarpe nedre afgrænsning af biomasseprofilen er i overensstemmelse med feltobservationer fra Kattegat, men biomassemaksimummet er placeret for højt i vandsøjlen i forhold til pyknoklinen. Muligvis er den valgte profil for Dz ikke korrekt, men der mangler mere præcis information om dybdevariationen af turbulent diffusivitet for lagdelte vandsøjler før modellen kan forbedres på dette punkt. Det er dog interessant at notere, at selvom modellen synes ret ufølsom overfor den absolutte størrelse af Dz, har dybdevariationer i Dz mærkbar betydning for det simulerede dybmaksimums placering og form.




***Figur 11.14.*** *Vertikal fordeling af biomasse for en 10 dages simulering med en dybde afhængig vertikal diffusivitet, Dz, de øvrige parameter som i Tabel 11.1. Funktionen for Dz(z) anvendt under denne simulering er vist i Figur 11.2.*



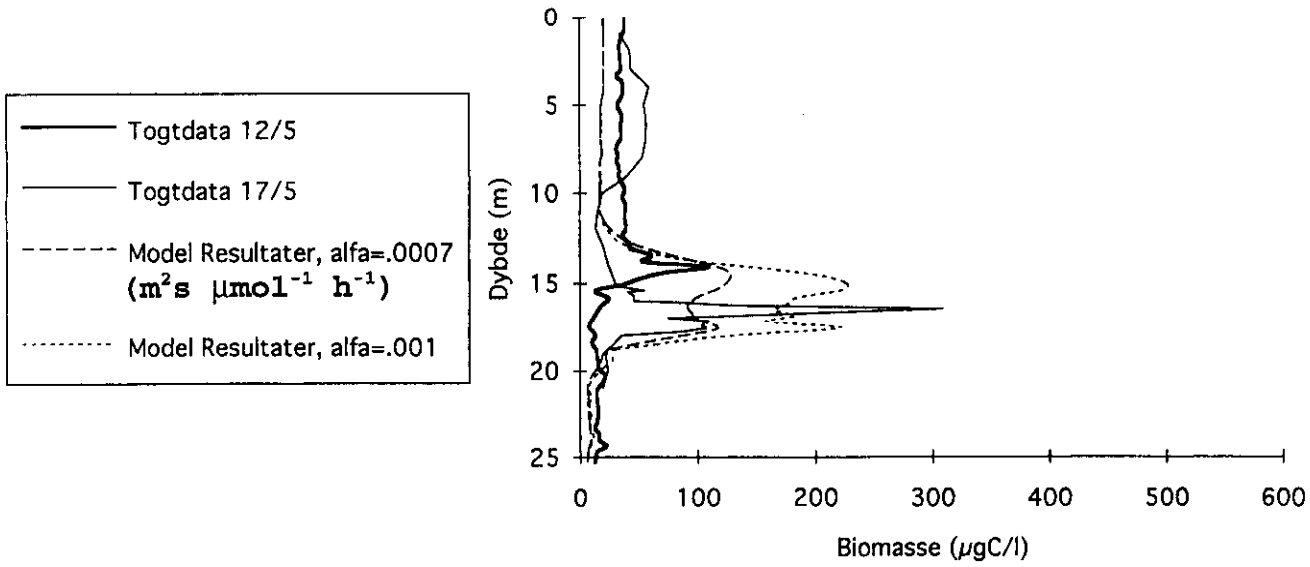

***Figur 11.15.*** *Vertikal fordeling af næringssalte for en 10 dages simulering med en dybde afhængig vertikal diffusivitet, Dz, de øvrige parameter som i Tabel 11.1. Funktionen for Dz(z) anvendt under denne simulering er vist i Figur 11.2.*

### 11.5.3 Kalibrering af modellen

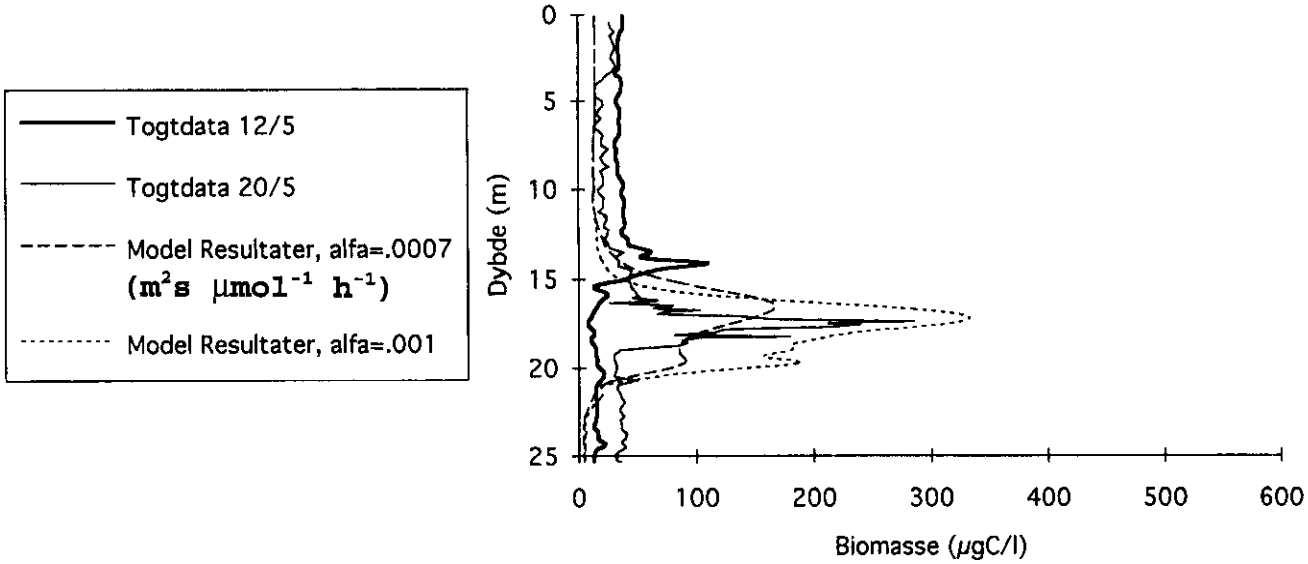
Empirisk kalibrering er ofte anvendt indenfor numerisk modellering som en indirekte måde til at estimere konstanter i modellen. Kørsler med varierende værdier af de indgående konstanter sammenlignes med faktiske observationer, og det sæt af værdier som giver den mest vellignende simulering vælges.

Med henblik på at kalibrere modellen og for at få et indtryk af dens evne til at beskrive reelle situationer og hændelsesforløb, blev der gennemført en række kørsler med feltmålinger fra Kattegat som startværdier. Tre 10-dages togter i det sydlige Kattegat i hhv. marts, maj og september 1992 udgjorde potentielle datasæt for disse kørsler. En analyse af datasættene fra marts og september viste imidlertid, at der i disse perioder havde været en betydelig horisontal advektiv transport af biomasse og næringssalte, hvilket den foreliggende model med kun en rumlig dimension (dybden) ikke kan tage

højde for. Det blev derfor besluttet at fokusere på datamaterialet fra majtogtet, hvor den horisontale advektion var mindre udtalt.



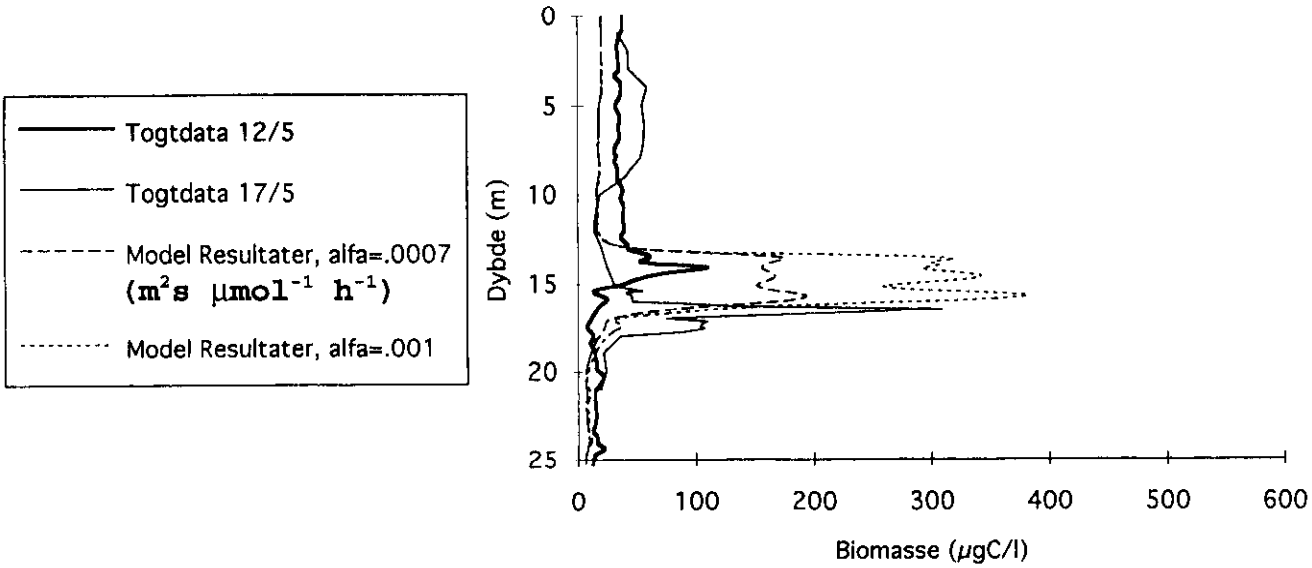

*Figur 11.16. Sammenligning af den målte fytoplankton biomasse (17 maj 1992 station 60) og dag 5 model forudsigelsen, for to værdier af α og S = 0,03 (m h$^{-1}$), med de øvrige parametre i Tabel 11.1.*



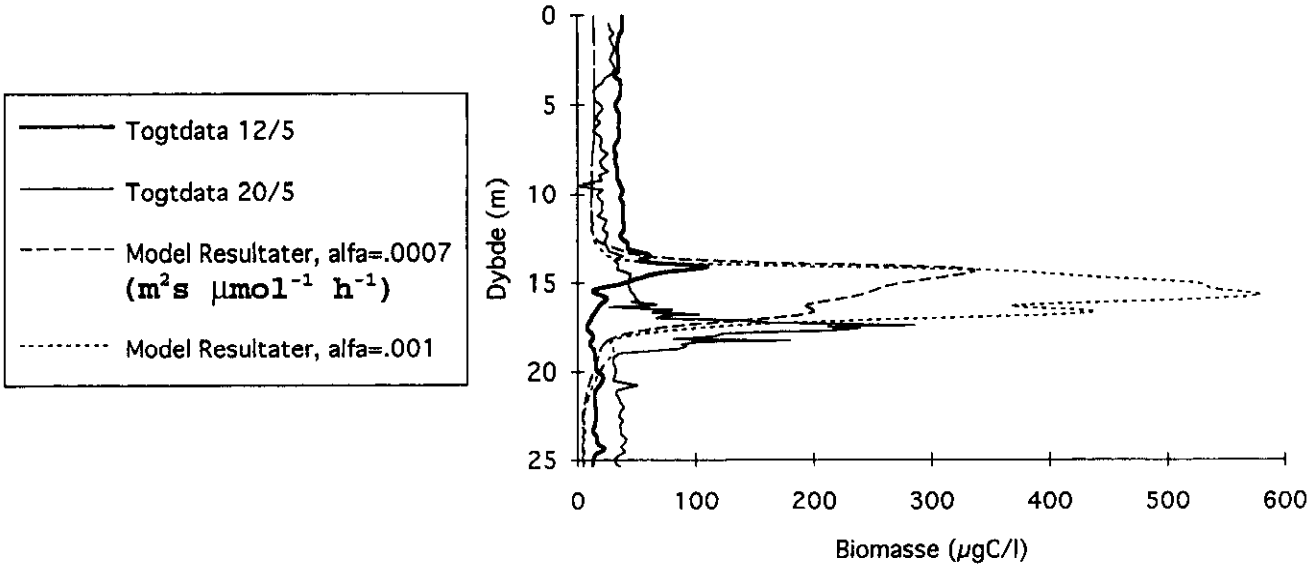

*Figur 11.17. Sammenligning af den målte fytoplankton biomasse (20 maj 1992 station 60) og dag 8 model forudsigelsen, for to værdier af α og S = 0,03 (m h$^{-1}$), med de øvrige parametre i Tabel 11.1.*

Modelkørslerne blev startet med værdier fra station 922 d. 12 maj 1992 og de simulerede biomasseprofiler efter 5 og 8 dage blev sammenlignet med observationer fra samme station d. 17 og 20 maj. Modellen blev først kørt med en algeudsynkningshastighed (S) på 0.03 m h$^{-1}$, en konstant diffusivitet (Dz) på 0.126 m$^2$h$^{-1}$ og varierende algeproduktivitet (α). Værdier for α på mellem 0.0007 og 0.001 m$^2$s µmol$^{-1}$h$^{-1}$ synes at give de mest realistiske simuleringer (Figur 11.16 og 11.17). Modellen forudsiger korrekt en betydelig algeproduktion i dybmaksimummet og beskriver også at algemaksimummet bevæger sig ned gennem vandsøjlen fra d. 12 til d. 17 maj. Det observerede algemaksimum er imidlertid betydeligt smallere end modellens forudsigelse, og det bevarer sin position i vandsøjlen fra d. 17 til

d. 20 maj, hvor modellen forudsiger en yderligere nedsynkning gennem vandsøjlen. Simuleringer med andre valg af α, S og Dz gav ikke bedre forudsigelser end de her viste.




***Figur 11.18.*** *Sammenligning af den målte fytoplankton biomasse (17 maj 1992 station 60) og dag 5 model forudsigelsen, med vertikal varierende diffusivitet og to værdier af α og S = 0,03 (m $h^{-1}$), med de øvrige parametre i Tabel 11.1. Funktionen for Dz(z) er vist i Figur 11.2.*




***Figur 11.19.*** *Sammenligning af den målte fytoplankton biomasse (20 maj 1992 station 60) og dag 8 model forudsigelsen, med vertikal varierende diffusivitet og to værdier af α og S = 0,03 (m $h^{-1}$), med de øvrige parametre i Tabel 11.1. Funktionen for Dz(z) er vist i Figur 11.2.*

Modelsimuleringer med dybdeafhængig diffusivitet (jvf. Figur 11.2) gav interessante resultater (Figur 11.18 og 11.19). For begge værdier af α forudsiger modellen et markant biomassemaksimum i 13 m dybde, svarende til minimummet i diffusivitet (Figur 11.2), som igen skulle svare til midten af pyknoklinen. Endvidere ses det, at biomassemaksimummet holder sig i samme dybde efter hhv. 5 og 8 dage. Dette svarer godt til de observerede biomasseprofiler, hvor dybmaksimummet synes at gå i stå i eller lige under pyknoklinen. Indbygningen af en variabel diffusivitet i modellen bidrager således til at simulere en fastholdelse af dybmaksimummet omkring

pyknoklinen, i overensstemmelse med de faktiske observationer. De hydrodynamiske forhold omkring pyknoklinen kan således være af afgørende betydning for opretholdelsen af dybmaksima omkring pyknoklinen.

## 11.6 Diskussion

I betragtning af modellens enkelhed og generalitet er det ikke mærkværdigt, at dens simulering af udviklingen på en given station i Kattegat i en given periode ikke er perfekt. Modellen giver en del indblik i de faktorer som styrer dannelsen og udviklingen af fytoplankton dybmaksima. Modellen viser således, at dannelsen af dybmaksima kan forklares udfra relativt simple mekanismer (tilgængelighed af lys og næringssalte og heraf følgende algeproduktion) uden at inddrage dybdeafhængig udsynkning, græsning eller diffusivitet. Det er dog også klart, at en mere præcis forudsigelse af dybmaksimummets form og størrelse forudsætter mere forfinede udtryk for modellens variable, herunder f.eks. dybdeafhængig diffusivitet.

En analyse af modellens følsomhed viser at algernes produktivitet er den mest afgørende faktor for simuleringen af dannelsen af dybmaksima, men at også algernes udsynkningshastighed påvirker dybmaksimummets størrelse og placering i vandsøjlen. Ved lav algeproduktivitet (eller lav lysindstråling) forbliver algebiomassen i overfladen, fordi der kun kan finde nettoproduktion sted her. Højere produktivitet/indstråling tillader dannelse af et dybmaksimum. En høj udsynkningshastighed stimulerer en hurtigere dannelse af et dybmaksimum, men fremskynder også maksimummets forfald når det når kompensationsdybden for nettoproduktion. Modellen er mindre følsom overfor størrelsen af den turbulente diffusivitet, dog kan stabiliseringen af vandsøjlen omkring pyknoklinen påvirke dybmaksimummets placering og form.

Førend modellen kan anvendes til at drage specifikke konklusioner om dannelsen af dybmaksima i Kattegat, er flere forbedringer af modellen påtrængende. Mest nærliggende er indbygning af en tidsafhængig overfladeindstråling, mere præcise dybdeafhængige variable (herunder diffusivitet og udsynkningshastighed) samt en eksplicit predator-biomasse og græsning.

# 12 Konklusioner

## 12.1 Betydningen af fytoplankton dybmaksima

Feltundersøgelserne og analysen af de sidste fem års overvågningsdata fra Kattegat viser at dybmaksima af fytoplankton er et almindeligt forekommende fænomen efter forårsopblomstringen.

Fytoplankton-dybmaksima er oftest placeret i den nederste del af haloklinen og på oversiden af nutriklinen.

Ofte er dybmaksima af klorofyl ledsaget af dybmaksima i primærproduktionen, hvilket indikerer at fytoplanktonet i dybmaksima er aktivt producerende alger, tilpasset de lave lysintensiteter omkring skillefladen.

Resultaterne i dette projekt bekræfter at dybmaksima bidrager væsentligt til primærproduktionen i Kattegat. I forbindelse med de tre pyknoklintogter var primærproduktionens bidraget fra dybmaksima (primærproduktion dybere end 10m's dybde) h.h.v. 20, 50 og 33% af vandsøjlens samlede primærproduktion.

I løbet af sommeren sker der tilsyneladende en adskillelsen af haloklin og nutriklin hvilket tyder på en anselig ny-produktion omkring skillefladen. Dette underbygges af direkte målinger med $^{15}N$, som viser at hovedparten fytoplanktonets kvælstofkrav i maj blev dækket af nitrat (ny-produktion) og ca 25% af kvælstofbehovet under septembertogtet ligeledes blev dækkket af nitrat.

I modsætning til tidligere undersøgelser af springlagsopblomstringer i Kattegat, som har fokuseret på giftige alger, blev der i forbindelse med dette projekt ikke observeret opblomstringer af giftige alger. Oprindeligt var pyknoklintogterne planlagt således at vi forventede at fytoplankton var domineret af h.h.v. kiselalger, nanofalgellater og dinoflagellater, det viste sig dog at kiselalger dominerede fytoplankton under alle tre togter.

I forbindelse med dette projekt var der ofte et respons i de heterotrofe organismer på dybmaksima af fytoplankton, især i biomassen af heterotrofe dinoflagellater.

## 12.2 Relevante skalaer i tid og rum

Den vertikale udstrækning af dybmaksima er typisk én - få meter.

Den horisontale udstrækning af dybmaksima kan variere fra at omfatte hele Kattegat (f.eks *Chrysochromulina* opblomstringen i 1988) til meget lokale fænomener med en udstrækning på få kilometer.

Undersøgelser i forbindelse med dette projekt tyder på at advektiv transport af fytoplanktonholdigt vand fra Øresund og Storebælt er er af afgørende betydning for udviklingen af fytoplanktondybmaksima i Kattegat.

Tidsskalaen for dannelsen af dybmaksima er få dage til få uger.

## 12.3 Kontrollerende faktorer

Dannelsen, sammensætningen, opretholdelsen og omsætningen af fytoplankton-dybmaksima er betinget af et kompliceret samspil af fysiske, kemiske og biologiske faktorer.

Blandt de afgørende fysiske faktorer er:

- skillefladens dybde, betinget af regionale og lokale strøm- og vindforhold,
- lysforholdene i skillefladen, betinget af overfladeindstrålingen og lyssvækkelsen i overfladelaget og dybden af skillefladen,
- turbulent blanding i skillefladen, betinget af vind og strøm.

Blandt de afgørende kemiske faktorer er:

- næringssaltenes koncentrationer,
- forholdet mellem koncentrationerne.

Blandt de afgørende biologiske forhold:

- balancen mellem vækst og tabsprocesser (specielt græsning og udsynkning),
- konkurrencen mellem forskellige algearter, herunder deres tilpasning til lysforholdene, toksicitet, egnethed som føde, etc.

## 12.4 Overvågning og undersøgelse af dybmaksima

Overvågningen af dybmaksima vanskeliggøres af deres placering og skalaerne for deres dynamik.

Rutinemæssig prøvetagning i salinitetsskillefladen og i eventuelle fluorescensmaksima vil forbedre grundlaget for at vurdere dybmaksimaenes betydning og størrelsen af deres ny produktion.

Forbedrede mål for biologiske proceshastigheder i skillefladen er nødvendige for at kunne opnå en forståelse af relationen mellem produktion og tabsprocesser.

Forbedrede modelværktøjer er påkrævet for at kunne beskrive samspillet mellem fysiske og biologiske processer i skillefladen.

Samlet kan det konkluderes, at denne undersøgelse understreger betydningen af processer i springlaget og dermed behovet for en hensigtsmæssig prøvetagning af vandmassen omkring pyknoklinen, hvis man skal opnå en bedre forståelse af den pelagiske omsætning i et lagdelt havområde som Kattegat.

# 13 Referencer


Banse, K. (1987): Clouds, deep chlorophyll maxima and the nutrient supply to mixed layer of stratified water bodies. J. Plankton Res., 9: 1031-1036.

Barth, H. & A. Nielsen (1990): The occurrence of *Chrysochromulina polylepis* in the Skagerrak and Kattegat in May/June 1988; an analysis of extent, effect and causes. Commision of the European Communities, Luxenborurg. Water pollution research report 10.

Berounsky, V.M. & Nixon, S.W. (1980): Temperature and the annuel cycle of nitrification in waters of Narragansett Bay. Limnol. Oceanogr., 35: 1610-1617.

Bienfang, P., Szyper, J. & E. Laws. (1983): Sinking rate and pigment responses to light-limitation of a marine daitom: implications to dynamics of chlorophyll maximum layers. Ocean. Acta., 6: 55-62.

Bjørnsen, P.K. & T.G. Nielsen ( 1991): Decimeter scale heterogeneity in the plankton during a pycnocline bloom of *Gyrodinium aureolum* (Hulburt). Mar. Ecol. Prog. Ser., 73: 263-267.

Bjørnsen, P.K, Hansen, L., Løkkegaard, B. & L. Berg (1992): Bakterie-plankton og bakteriegræsning. I Fencehl, T. (red.) planktondynamik og omsætning i Kattegat. Havforskning fra Miljøstyrelsen., Nr. 10: 137-150.

Bjørnsen, P.K., Kaas, H. Kaas, H. Nielsen T.G., Olesen M. & K. Richardson (1993): Dynamics of a subsurface phytoplankton maximum in the Skagerrak. Mar. Ecol. Prog. Ser., 95: 279-294.

Bo Pedersen, F. (1990): Hydrografiske grundelementer i de indre danske farvande, kompendium, ISVA/DTH.

Bo Pedersen, F. (1991): Hydrografiske forhold i det sydlige Kattegat,- Havforskning fra Miljøstyrelsen, nr. 3, 1991, Miljøstyrelsen 100pp.

Bo Pedersen F. & J.S. Møller (1981): Diversion of the river Neva. Nordic Hydrology., 12: 1-20.

Buch, K. (1947): Kolsyrejämnvikten i Baltiske Havet. Fenia., 68 No.5.

Buck, K., Ærtebjerg, G., Larsen, J. & H. Thomsen (1993): Biomass and abundance of pelagic cyanobacteria and protists from the transition area between the Baltic Sea and the North Sea, July 1990. I Proceeding of the 12th Baltic Marine Biologists Symposium, Bjørnestad,E., Hagerman, L. & K. jensen (red).pp 35-42.

Carlberg, S.R. (1972): New Baltic Manual, with methods for sampling and analyses of physical, chemical and biological parameters. Comparative Research Report, Serie A, No 29.

Cushing, D.H. (1959): The seasonal variation in oceanic production as a problem in population dynamics. J. Cons. perm. int. Explor. Mer., 24: 455-464.

Cushing, D.H. (1973): Productivity of the North Sea. In Goldberg, E.D. (ed) North Sea Science. MIT Press, Cambridge, Massachusetts , London. pp. 249-267.

Dansk standard (1974): Oxygen opløst (titrimetrisk metode). D.S. 277

Dodge, J.D. (1985): Marine dinoflagellates of the British Isles. Her Majesty's Stationery Office, London.

Dugdale, R.C. & J.J. Goering (1967): Uptake aof neww and regenerated forms of nitrogen in primary productivity. Limnol. Ocenangr., 12: 196-206

Dugdale, R.C. & I.P. Wilkerson (1986): The use of $^{15}N$- to measure nitrogen uptake in eutrophic oceans: experimental considerations. Limnol. Oceanogr. 31: 673-689.

Eisenthal, R. & A. Cornish-Bowden (1974): The direct linear plot. A new graphical procedure for estimating enzyme kinetic parameters. Biochem. J., 139: 715-720.

Edler, L. (1979): Recommendations for marine biological studies in the Baltic Sea. The Baltic Marine Biologist Publications., No 5: 1-38.

Edler, L. & P. Olsson. (1985): Observations on diel migration of *Ceratium furca* and *Prorocentrum micans* in a stratified bay on the Swedish west coast. In Toxic Dinoflagellates, Anderson, White & Baden, Eds., Elsevier Science Publishing Co., New York, 195-200.

Eppley, R.W., Rogers, N.J. & J.J. McCarthy. (1969): Half-saturation constants for uptake of nitrate and ammonium by marine phytoplankton. Limnol Oceanogr., 14, 912-920.

Fenchel, T. (1992): Planktondynamik og stofomsætning i Kattegat. Havforskning fra Miljøstyrelsen. Nr. 10. 240pp.

Fiedler, P.C. (1982): Zooplankton avoidance and reduced grazing responses to *Gymnodium splendens* (Dynophyceae). Limnol. Oceanogr., 27: 961-965.

Fransz, H.G., Mommaerts, J.P & G. Radach. (1991): Ecological modelling of the North Sea. Netherlands J. Sea Res., 28: 67-140.

Fuhrmann, J. & F. Azam (1980): Bacterioplankton secondary production estimates for coastal waters of British Colombia, Antarctica and California. Appl. Environ. Microbiol., 39(6): 1085-1095.

Gargas,E. & I. Hare (1976): Users manual for estimating the daily phytoplankton production measured in incubator. Contribution from the Water Quality institute., No 2.

Glibert, P. (1982): Regional studies of daily, seasonal and size fraction variability in ammonium remineralization. Mar. Biol., 70: 209-222.

Grasshoff, K. (1976): Methods of seawater analysis. Weinheim, New York.

Haas, L. W. (1982): Improved epifluorescence microcopy for observing planktonic microorganisms. Ann. Inst. Oceanogr., Paris 58 (suppl.): 261-266.

Hansen I. S., Ærtebjerg G., Jørgensen L. A. & Bo Pedersen, F. (1990): Analyse af iltsænkning i Kattegat, Bælthavet og V. Østersø,- Havforskning fra Miljøstyrelsen, nr. 1, 1990, Miljøstyrelsen 136pp.

Hansen, P.J. (1991): Quantitative importance and trophic role of heterotrophic dinoflagellates in a coastal pelagial food web. Mar. Ecol. Prog. Ser., 73: 253-261.

Hansen, P.J., Nielsen, T.G. & H. Kaas (1994): Stlikalgeopblomstringen i lillebælt. vand & Jord.

Harris, G.P. (1978): Photosynthesis, productivity and growth: the physiological ecology of phytoplankton. Arch. Hydrobiol., 80: 405-457.

Harris, R.P. & A. Malej (1986): Diel patterns of ammonium excretion and grazing rhythms in *Calanus helgolandicus* in surface stratified waters. Mar. Ecol. Prog. Ser., 31: 75-85.

Harrison, W.G. (1990): Nitrogen utilization in chlorophyll and primary production maximum layers: an analysis based on the f-ratio. Mar. Ecol. Prog. Ser., 60: 85-90.

Harrison, W.G., Douglas, D., Falkowski, P., Rowe, G. & J. Vidal (1983): Summer nutrient dynamics of the middle Atlantic Bight: nitrogen uptake and regeneration. J. Plankton Res., 5: 539-556.

Herbland, A. & B. Voituriez. (1979): Hydrological structure analysis for estimating the primary production in the tropical Atlantic Ocean. J. Mar. Res., 37, 87-101.

Hobbie, J.E., Daely, R.J. & S. Jaspers (1977): Use of nuclepore filters for counting bacteria by epifluorescence. Appl. environ. Microbiol., 33: 1225-1228.

Holligan, P.M. (1979): Dinoflagellates blooms associated with tidal fronts around British Isles. I Toxic Dinoflagellate Blooms, Tayler & Seliger (red). Elsevier North Holland Inc. pp. 249-256.

Holligan, P.M., Harris, R.P.,Newell, R.C., Harbour, D.S., Head, R.N., Linley, E.A.S., Lucas, M.I., Tranter, P.R.G. & C.M. Weeley (1984): Vertical distribution and partitioning of organic carbon in mixed, frontal and stratifyed waters of the english channel. Mar. ecol. Prog. Ser., 14: 111-127.

Hundahl, H. & J. Holck (1980): A new *in situ* fluorometer for detection of Rodamine B and chlorophyll. Report No. 42, Inst. of Physcical Oceanography, Univ. of Copenhagen, p 145-154.

Højerslev N. K. (1989): Surface water-quality studies in the interior marine environment of Denmark. Limnol. Oceanogr., 34: 1630-1639.

Jacobsen T.S. & N.-E. O. Hansen (1985): Oxygen depletion in the Kattegat. Nordic Hydrology., 16: 237-256.

Jamart, B.M., Winter D.F., Banse K., Anderson G.C. & R.K. Lam. (1977): A theoretical study of phytoplankton growth and nutrient distribution in the Pacific Ocean off the northwestern U.S. coast. Deep-Sea Res., 24: 753-773.

Jespersen, A.M. & K. Christoffersen (1987): Measurenents of chlorophyll-a from phytoplankton using ethanol as extraction solvent. Arch. Hydrobiol., 109(3): 445-454.

Johansen, H. S. (1984): Improved optical analysis of traces depleted or slightly enriched in $^{15}N$. Int. J. Appl. Radiat. Isot., 35: 1039-1043.

Kaas, H., Kaas, H. & F. Møhlenberg (1990): Kvælstof og fosfor i havet. NPO-forskning fra Miljøstyrelsen. Nr 8C: 1-64.

Kaas, H., Larsen, J., Møhlenberg, F. & K. Richardson (1991): The *Chrysochromulina polylepis* bloom in the Kattegat (Scandinavia) May-June 1988. Distribution, primary production and nutrient dynamics in the late stage of the bloom. Mar. Ecol. Prog. Ser., 79:151-161.

Kaas, H., Kaas, H. & F. Møhlenberg (1992): Opadrettet transport af næringssalte til den fotiske zone. I Fenchel, T. (red.). Planktondynamik og stofomsætning i Kattegat. Havforskning fra Miljøstyrelsen., Nr. 10: 121-136.

Kahl, A.(1932): Urtiere oder protozoa. I. Wimpertiere oder Ciliata (Infusoria). 3. Spirotricha. In Dahl, F. (ed). Die Tierwelt Deutschlands und der angrenzenden Meeresteile. Gustav Fishers Verlag, Jena.

King, F.D. & A.H. Devol. (1979): Estimates of vertical eddy diffusion through the thermocline from phytoplankton nitrate uptake rates in the mixed layer of the eastern tropical Pacific. Limnol. Oceanogr., 24: 645-651.

Kiørboe, T. & Nielsen, T.G. ( 1994): Regulation of zooplankton biomass and production in a temperate, coastal ecosystem. I. copepods. Limnol. Oceanogr., 39:

Kruse, B. (1993): Measurements of plankton respiration in gas-tight plastic bags. Mar. Ecol. Prog. Ser., 94: 155-163.

Kullenberg, G. (1977): Entrainment velocity in natural stratified vertical shear flow. Est. Coast. Mar. Sci., 5: 329-338.

Lee, S. & J. A. Fuhrman (1987): Relationship between biovolume and biomass of naturally derived marine bacterioplankton. Appl.Environ. Microbilo., 53: 1298-1303.

Leegaard, C. (1915): Untersuchungen über einige plankton ciliaen des Meeres. Nyt. Mag. Naturvid., 53: 1-37

Lynn, D.J., Montagnes, D.J.S. & E.B. Small (1988): Taxonomic description of some conspicuous species in the family Strombidiidae (Ciliophora: Oligotrichida) from the Isles of Shoals, Gulf of Main. J. mar. biol. Ass. U.K., 62 (2): 252-259.

Malmgren-Hansen, A. (1984): Modelberegninger for Kattegat. Miljø-projekter nr. 59 fra Miljøministeriet, 96pp.

McCarthy, Kaplan, W. & J. L. Nevins (1984): Chesapeak Bay nutrient and plankton dynamics. 2. Sources and sinks of nitrite. Limnol. Oceanogr., 29: 84-98.

Nielsen, T.G., Kiørboe, T. & P. K. Bjørnsen (1990): Effects of a *Chrysochromulina polylepis* subsurface bloom on the planktonic community. Mar. Ecol. Prog. Ser., 62: 21-35.

Nielsen, T.G. (1991): Contribution of zooplankton grazing to the decline of a *Ceratium* bloom. Limnol. Oceanogr., 36 (6): 1191-1106.

Nielsen, T.G., Løkkegård B., Richardson K., Bo Pedersen, F. & L. Hansen (1993). The structure of the plankton communities in the Dogger Bank area ( North sea) during a stratified situation. Mar. Ecol. Prog. Ser., 95: 115-131

Nielsen, T. G. & T. Kiørboe (1994): Regulation of zooplankton biomass and production in a temperate, coastal ecosystem. II ciliates., Limnol. Oceanogr. 39.

Olesen, M. (1992): Comparison of the sedimentation of a Diatom spring bloom and of a subsurface chlorophyll maximum of *Gyrodinium aureolum.* Ph.D. report. Marinbiologisk Laboratorium, Københavns Universitet.

Olsen, V.O. & B.Lundgren (1984): A compact eight-channel continuous flow analyzer for shipboard use. Comm. Meet. Int. Counc. Explor. Sea. C.M.-ICES/C:19.

Paasche, E. & S. Kristiansen (1982): Ammonium regeneration by microzooplankton in the Oslo fjord. Mar. biol., 69: 55.63.

Parker, R.A. (1991): Eddy diffusion of phytoplankton nutrients: estimating coefficients from simulated and observed vertical distributions. J. Plankton Res., 13: 815-830.

Pettersson, H. (1934): Scattering and extinction of light in sea-water, Meddelanden Göteborgs Högskolas Oceanografiska Institution., 4b (4).

Pingree, R.D., Forster G.R., & G.K. Morrison. (1974): Turbulent convergent tidal fronts. J. Mar. Biol., 54: 469-479.

Pingree, R.D., Pugh, P.R., Holligan, P.M. & G.R. Foster (1975): Summer phytoplankton blooms and red tides along tidal fronts in the English Channel. Nature., 258: 672-677.

Pingree, R.D., Holligan G.T. & G.T. Mardell. (1978): The effects of vertical stability on phytoplankton distribtuions in the summer on the northwest European Shelf. Deep-Sea Res., 25: 1011-1028.

Rasmussen B. (1994): Blandingsmekanismer i kystnære farvande,- Havforskning fra Miljøstyrelsen, projekt nr. 2-36, Miljøstyrelsen, 147pp.

Rasmussen, J. & K. Richardson (1989): Response of *Gonyaulax tamarernsis* to the presense of a pycnocline in an artificial water column. J. Plank. Res., 11(4): 747-762.

Redfield, A.C. (1958): The Biological Control of the Chemical factors in the environment. Am. sci., 46: 205-221.

Richardson, K. & A. Christoffersen (1991): Seasonal distribution and production of phytoplankton in the southern Kattegat. Mar. Ecol. Prog. Ser., 78: 217-227.

Richardson, K. & G. Kullenberg (1987): Physical and biological interactions leading to plankton blooms: A review of *Gyrodinium aureolum* blooms in scandinavian water. Rapp. P-v. reun. Cons. Int. Explor. Mer., 87: 19-26.

Riemann, B., Bjørnsen, P.K., Newell, S. & R. Fallon (1987): Calculation of cell production of coastal marine bacteria based on measured incoporation of ($H^3$) thymidine. Limnol. Oceanogr., 32(2): 471-476.

Riley, G.A., Stommel, H. & D.F. Bumpus. (1949): Quantitative ecology of the plankton of the Western North Atlantic. Bull. Bingham Oceanogr. Coll., 12: 1-169.

Simon, M. & F. Azam (1989): Protein content and protein synthesis rates of planktonic marine bacteria. Mar. Ecol. Prog. Ser., 51: 201-213.

Steele, J.H. (1958): Plant production in the northern North Sea. J. Mar. Res., 7: 1-36.

Steele, J.H. (1964): A study of production in the Gulf of Mexico. J. Mar. Res., 22: 211-222.

Steele,J.H. & C.S. Yentch (1960): The vertical distribution of chlorophyll. Jour. of Mar. Biol. Ass. U.K., 39:217-226.

Stigebrandt, A. (1983): A model for the exchange of water and salt between the Baltic and the Skagerrak. J. Phys. Oceanogr., 13: 411-427.

Strickland, J.D. & T.R. Parsons (1972): A Practical Handbook of Seawater Analysis. Fish. Board Can. Bull. No 167, 2nd edition 310 pp.

Svansson, A. (1972): Canal models of the sea and salinity variations in the Baltic and adjacent waters. Fisheries board of Sweden. Series Hydrography rep. No. 26.

Taylor, A.H. Harris,J.R.W., & J. Aiken. (1986): The interaction of physical and biological processes in a model of the vertical distribution of phytoplankton under stratification. In Marine Interfaces Ecohydrodynamics, J.C.J. Nihoul, Ed., Elsevier Oceanography Series 42, Amsterdam, 313-331.

Tiselius, P, Nielsen, G. & T.G. Nielsen (1994): Microscale patchiness of plankton within a sharp pycnocline. J. Plank. Res.

Weast, R.C., Ed. (1975): Handbook of Chemistry and Physics. CRC Press, Cleveland. 56th Edition.

## Registreringsblad

**Udgiver:** Miljøstyrelsen, Strandgade 29, 1401 København K.

**Serietitel, nr.:**
Havforskning fra Miljøstyrelsen, nr. 33

**Udgivelsesår:** 1994

**Titel:**
Planktondynamik omkring springlaget i Kattegat

**Undertitel:**

**Forfatter(e):**
Nielsen, Torkel Gissel; Bjørnsen, Peter Koefoed; Kaas, Hanne; Rasmussen, Bjarke; Cohen, Amanda

**Udførende institution(er):**
Danmarks Miljøundersøgelser. Afdeling for Havmiljø og Mikrobiologi; Københavns Universitet. Marinbiologisk Laboratorium; Danmarks Tekniske Højskole. Instituttet for Strømningsmekanik og Vandbygning; Stanford University

**Resumé:**
Rapporten omfatter en detaljeret beskrivelse af springlagets næringssalt- og planktondynamik baseret på prøvetagning med høj vertikal opløsning. I starten af året er nutriklinen og springlaget sammenfaldende, men i takt med fytoplanktonets forbrug af næringssalte sker en rumlig adskillelse. Nyproduktion udgør en væsentlig andel af primærproduktionen ved springlaget. Hvis man skal forstå den pelagiske omsætning i et lagdelt havområde, bør prøvetagning i og omkring springlaget inkluderes, da en betydelig del af den biologiske aktivitet kan finde sted her.

**Emneord:**
plankton; dybmaksima; klorofyl; biologiske modeller; biomasse; næringssalte; springlag; Kattegat

**ISBN:** 87-7810-149-2

**ISSN:**

**Pris (inkl. moms):** 150 kr.

**Format:** A4

**Sideantal:** 162

**Md./år for redaktionens afslutning:** januar 1993

**Oplag:** 500

**Andre oplysninger:**
Rapport fra koordinationsgruppen for stofomsætningen i de frie vandmasser. Hører sammen med: Blandingsmekanismer i kystnære farvande (Havforskning fra Miljøstyrelsen, nr. 32), og: Effekter af springlagsopblomstring på benthos (Havforskning fra Miljøstyrelsen, nr. 34)

**Tryk:** Scantryk, København

Trykt på Kymoffset, 80 gram

# Havforskning fra Miljøstyrelsen

Rapporter fra Hav90 forskningsprogrammet:

Nr. 1 : Analyse af iltsænkning i Kattegat, Bælthavet og V. Østersø
Nr. 2 : Danmarks vindklima fra 1870 til nutiden
Nr. 3 : Hydrografiske forhold i det sydlige Kattegat
Nr. 4 : Kystnær omfordeling af sediment og næringssalte
Nr. 5 : Bestemmelse af phytoplanktonets totale stofproduktion
Nr. 6 : Den Jyske Kyststrøm
Nr. 7 : Skagerrak-frontens dynamik
Nr. 8 : Bornholmer Dybets hydrografi
Nr. 9 : Modelsystem for fjorde og bugter
Nr. 10 : Planktondynamik og stofomsætning i Kattegat
Nr. 11 : Plankton i de indre danske farvande
Nr. 12 : Effekter af iltsvind og tungmetaller på marine bunddyr
Nr. 13 : Nedbørforhold over Kattegat
Nr. 14 : Partikulære næringsstoffluxe i Vejle Fjord og Århus Bugt
Nr. 15 : Havbundens svovl-, jern- og mangankredsløb i Århus Bugt
Nr. 16 : Havbundens kvælstofomsætning i Århus Bugt
Nr. 17 : Fosforomsætning i sedimentet i Århus Bugt
Nr. 18 : Sedimentation og resuspension i Århus Bugt
Nr. 19 : Emission af NH3, NOx, SO2 og NMVOC til atmosfæren i Danmark
Nr. 20 : Analyse af hydrografiske data fra det sydlige Kattegat
Nr. 21 : Vind, turbulens og grænselagshøjde over Kattegat
Nr. 22 : Trådalger i Det Sydfynske Øhav
Nr. 23 : Dynamik og kompleksitet i Århus Bugt
Nr. 24 : Beskrivelse af atmosfærekemiske processer
Nr. 25 : Præsentationer ved det 7. danske havforskermøde
Nr. 26 : Processer for våddeposition
Nr. 27 : Bundfaunaens betydning for bundlevende fisk i det sydlige Kattegat
Nr. 28 : Giftige alger i danske farvande
Nr. 29 : Kvælstofreduktioners effekt på iltforhold i indre danske farvande
Nr. 30 : Fytoplankton- og makrofytudvikling i danske kystområder
Nr. 31 : Blandingsenergi fra strøm og vind i Storebælt
Nr. 32 : Blandingsmekanismer i kystnære farvande
Nr. 33 : Planktondynamik omkring springlaget i Kattegat

# Planktondynamik omkring springlaget i Kattegat

Rapporten omfatter en detaljeret beskrivelse af springlagets næringssalt- og planktondynamik baseret på prøvetagning med høj vertikal opløsning. I starten af året er nutriklinen og springlaget sammenfaldende, men i takt med fytoplanktonets forbrug af næringssalte sker en rumlig adskillelse. Nyproduktion udgør en væsentlig andel af primærproduktionen ved springlaget. Hvis man skal forstå den pelagiske omsætning i et lagdelt havområde, bør prøvetagning i og omkring springlaget inkluderes, da en betydelig del af den biologiske aktivitet kan finde sted her.

**Pris kr. 150,- (inkl. 25% moms)**

ISBN nr. 87-7810-149-2

Miljøministeriet **Miljøstyrelsen**

Strandgade 29 · 1401 København K · Tlf 32 66 01 00