

Havforskning fra Miljøstyrelsen

Nr. 38 1994

Sedimentations- processer i et kystvandssystem



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 gennemførelse, 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 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 nedsatte 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.

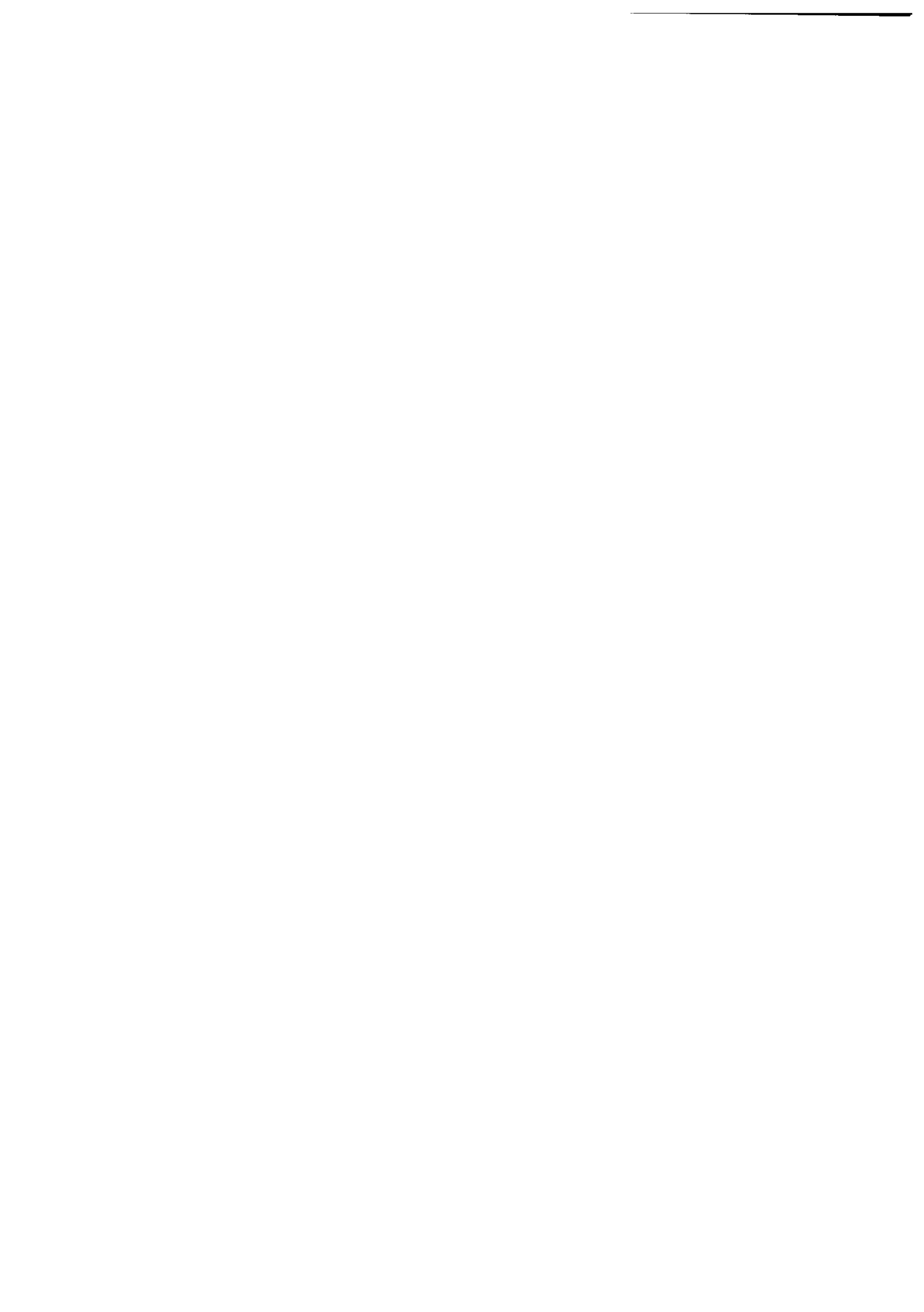
Havforskning fra Miljøstyrelsen

Nr. 38 1994

Sedimentations- processer i et kystvandssystem

Claus Lundsgaard
Michael Olesen

Marinbiologisk Laboratorium, Københavns Universitet



Indholdsfortegnelse

Forord	5
Sammendrag	7
English Summary	9
1. Indledning	11
1.1 Faglig problemstilling	11
1.2 Metodisk problemstilling og forsøgenes formål	13
2. Materialer og metoder	15
2.1 Undersøgelsesområde	15
2.2 Opsætning af plastindhegninger	15
2.3 Forsøgsplan for opblomstringsforsøg	15
2.4 Forsøgsplan for resuspensionsforsøg	16
2.5 Prøvetagning	16
2.6 Målinger og analyser	16
3. Opblomstring i sække uden sedimentkontakt	19
3.1 Forløb af opblomstringer	19
3.2 Sedimentation	25
3.3 Stofbalance	31
3.4 Sedimentering af ny produktion målt ved ¹⁵ N-nitratindbygning	35
3.5 Samlet beskrivelse af opblomstringer og sedimentation	38
4. Sækkeforsøg med sedimentkontakt og kunstig ophvirvling	41
4.1 Fytoplankton-sammensætning, biomasse og sedimentation	41
4.2 Koncentration af klorofyl og fæopigment i sammenligning med <i>Prorocentrum minimum</i>	43
4.3 Suspension og sedimentation af partikulært kulstof og kvælstof samt tørstof og glødetab vurderet i forhold til <i>Prorocentrum minimum</i>	46
4.4 Sammenfatning og konklusion	48
5. Referencer	51

Forord

Projektets baggrund

Denne rapport indgår i den del af Hav90 aktiviteterne, hvis formål det er at undersøge kvantitative og kvalitative sammenhænge mellem den planktoniske struktur og sedimentation. Sedimentation udgør en af de vigtigste mekanismer for stoftransporten fra de belyste produktive vandmasser til bunden. De fysiske og biologiske forhold i de danske farvande gør, at vi befinder os på grænsen mellem en situation, hvor bunddyrene nyder godt af denne "regn" af næringspartikler, og en situation, hvor den giver anledning til iltsvind og derfor har katastrofale følger for de selvsamme bunddyr. Det har været disse projekters hovedformål af forstå baggrunden for sedimentation samt de mange skikkelser den forekommer i: aggregater ("marint sne"), ekskrementer og rester af døde dyr, intakte alger, ugenkendelig detritus o.s.v.

Finansiering

Dette arbejde har været finansieret af Havforskningsprogram 90, administreret af Miljøstyrelsen, og denne rapport udgør en del af afrapporteringen for projekterne "Marin sne: Dannelse og betydning for stofomsætningen i de frie vandmasser og stoftransporten til bunden" (nr. 2.31), "Mikrobiel produktion i relation til aggregatdannelsen" (nr. 2.40B) og "Zooplanktons rolle for aggregatdannelsen" (nr. 2.40C).

Taksigelser

Vi ønsker især at takke miljøtekniker Janne Ravensholt for et omfattende og engageret arbejde såvel i felten som i laboratoriet, samt Susanne Simonsen og Marianne Østergaard Jensen for algetælling. Desuden skylder vi Bo Riemann (VKI) og hans stab en stor tak, idet rammerne for disse forsøg blev planlagt af VKI som en aktivitet under MAST-projektet "Structure and Function of Coastal Ecosystems" (SAFE). Blandt SAFE projektets deltagere har vi specielt haft et godt fagligt samarbejde med Niels Sloth (Århus Universitet) samt Giovanni Daneri og Linda Godfrey (School of Ocean Sciences, University of North Wales), der velvilligt har suppleret os med data.

Sammendrag

Mesocosmos forsøg

Sedimentation af planktonisk produceret materiale i et kystvandssystem blev undersøgt vha. mesocosmos forsøg. Plastsække på ca. 5 m³ med og uden sedimentkontakt blev opsat i Knebel Vig i juli 1992 og blev studeret i ca. 2 uger. Til nogle af sækkene uden sedimentkontakt blev der tilsat uorganiske næringsstoffer (N og P eller N, P og Si), mens nogle af sækkene med sedimentkontakt kunstigt fik resuspenderet det øverste lag af sedimentet. Udviklingen i det planktoniske system og sedimentationen blev herefter fulgt i de manipulerede sække og i kontrolsække.

Formål

Forsøget havde to hovedformål:

- 1) at studere sedimentationsdynamikken i sammenhæng med den planktoniske struktur. Forsøget udførtes for forskellige typer af algesammensætning.
- 2) at undersøge hvordan ophvirvlingen af sediment påvirker det pelagiske system, herunder effekten af resuspension på sedimentationen af autochtont materiale fra dette.

Sedimentation fra det pelagiske system

I forsøg 1 vedr. sedimentationen fra det pelagisk system forårsagede tilsætning af næringssalte som forventet en hurtig opvækst af alger, primært kiselalger og furealger. Udviklingen i suspenderet POC, PON og klorofyl *a* viste sig forholdsvis ens i sækkene: PON og klorofyl *a* toppede samtidig med at koncentrationerne af opløst uorganisk N og P var bragt ned på detektionsgrænsen, mens POC koncentrationen og algebiomassen toppede en dag senere. Dette indikerer at væksten var ubalanceret og at kulstof og kvælstof indbyrdes var afkoblet.

Den samlede opgørelse over suspenderet biomasse samt fraførsel ved sedimentation viser, at biomasseopbygningen af kiselalger var størst i sækken med silikattilsætning. Den store forskel mellem sækkene med og uden silikat var, at kiselalgerne (*Rhizosolenia fragilissima*) under opblomstringsfasen sank signifikant hurtigere i sækken med silikatberigelse, og sedimentationen svarede til et dagligt tab fra vandsøjlen på 18% af den stående biomasse af denne algeart. Til sammenligning var sedimentationstabt af såvel *Rhizosolenia fragilissima* i sækkene uden silikatberigelse som de dominerende furealger i samtlige sække under 2% pr. dag under opblomstringen, og under 6% pr. dag for alle dominerende arter efter bloommaximumet, uafhængigt af den initiale næringsstofsammensætning. De små, talrige furealger *Prorocentrum minimum* sank ikke som levende celler, men deres tomme theca udgjorde en stor del af de synkende fækalielignende aggregater. Tabet af algebiomasse via den heterotrofe omsætning i vandmassen var for de dominerende arter 10-31% pr. dag (minimumsestimer, da samtidig primærproduktion ikke er indregnet) i perioden efter bloom-maksimum. Produkter fra den heterotrofe omsætning udgjorde den største del af sedimentationen.

Ved berigelse med ¹⁵N-mærket nitrat i kombination med fosfat og silikat kunne det konstateres, at organisk materiale dannet af tilsatte næringsstoffer sank hurtigere i de første dage af opblomstringen end i den efterfølgende periode, hvilket formentligt skyldes en tilsvarende kiselalgeudsynkning som den netop omtalte. Det nyproducerede PON

sank dog altid langsommere end materialet indeholdende kvælstof stammende fra Knebel Vig (fra opsætningen af sækkene).

Resuspension og primærsedimentation

Hypotesen for forsøget vedr. resuspensions indflydelse på primærsedimentationen var, at ophvirvling af partikler fra sedimentet og en deraf følgende kraftig opkoncentrering af partikler i vandmassen, ville øge sedimentationen af de planktoniske komponenter betydeligt. En øget partikelkoncentration vil nemlig i følge teorien give anledning til en eksponentiel stigning i partikelkoagulering og sedimentation. Resultaterne viste imidlertid ingen direkte effekt af resuspension på sedimentationen af fytoplankton, hvilket muligvis kan skyldes en tilpasning hos plankton-organismene til turbide miljøer. Der sås til gengæld nogle sekundære effekter på den pelagiske biomasseudvikling, nemlig en hæmning af væksten i sække med kunstig ophvirvling i forhold til kontrolsække. Årsagen var at fosfat tilsyneladende blev bundet til de ophvirvlede og hurtigsynkende partikler, som bl.a. omfattede store mængder bentiske mikroalger. Omvendt talte en generelt højere fytoplanktonbiomasse i sækkene med sedimentkontakt end i kontrolsækkene, der var afnøret fra bunden, om en positiv effekt af sedimentkontakten på det planktoniske system. Dette tolkes som et resultat af, at mobilisering af næringssalte fra sedimentet i kystvande typisk øges med stigende opblanding af vandmassen. I dette forsøg opvejede denne positive virkning af opblanding tilsyneladende de ledsagende negative virkninger fra bl.a. øget skygning og bentisk filtrering. Konklusionen er, at resuspensionens betydning for det planktoniske system især skyldes de medfølgende ændringer i næringssaltdynamikken, mens den direkte betydning i form af en øget aggregatdannelse og sedimentation ikke spiller nogen fremtrædende rolle.

English Summary

Mesocosm experiments

The pattern of sedimentation of planktonic matter in a coastal area was investigated with mesocosm experiments. Enclosures of transparent plastic (5 m³) with and without contact to the sediment was established in Knebel Vig in July 1992 and was studied during two weeks. Knebel Vig is a shallow embayment close to the Bay of Aarhus. Nutrients were added to some of the enclosures without sediment contact, and the upper layer of the sediment was artificially resuspended in some of the enclosures with sediment contact. The changes in the pelagic system and in sedimentation was followed in the manipulated enclosures and in control enclosures.

Aims of the study

The principal aims was to:

- 1) study the sedimentation in relation to the structure of the planktonic system. This was studied with different planktonic communities, and
- 2) study the effect of resuspension on the sedimentation of planktonic matter.

Sedimentation from the pelagic system

In experiment 1 concerning sedimentation from the pelagic system the nutrient additions caused blooms of phytoplankton, especially diatoms and dinoflagellates. The development in suspended POC, PON and chlorophyll *a* was nearly the same in all bags: PON and chlorophyll *a* reached maximum when concentrations of dissolved inorganic N and P was reduced to near the detection limit, while POC and phytoplankton biomass reached maximum one day later. This indicates that the growth was unbalanced and that there was an uncoupling between carbon and nitrogen.

The total suspended plus sedimented biomass of diatoms was highest in the bag where also silicate was added. The major difference between the bags was that diatoms (*Rhizosolenia fragilissima*) sedimented much faster during the growth phase in the bag with silicate addition than in the bags without. This sedimentation corresponded to a loss of 18% per day of the suspended biomass of this species. Compared to this the daily loss of as well *Rhizosolenia fragilissima* in the bags without silicate addition as the dinoflagellates in all bags was less than 2% in the growth phase. After the bloom maximum the daily sedimentary loss of the dominating species was less than 6% in all bags. The small, abundant dinoflagellates *Prorocentrum minimum* did not sink as live cells, but their empty theca comprised a large part of the sinking faecal aggregates. Estimates of the grazing loss of the dominating phytoplankton species was 10-31% per day in the period after the bloom maximum (minimum estimates while primary production was not included). The products from the heterotrophic community comprised the major part of the sedimentation.

One bag was enriched with ¹⁵N-labeled nitrate in addition to phosphate and silicate, and from this experiment it was seen, that the material produced from the added nutrients had the highest sedimentation velocity in the first days of the growth phase. This is assumed to be caused by the fast sedimentation of *Rhizosolenia fragilissima* as seen in

the other silicate enriched bag. Compared to this "new" material the particles containing nitrogen enclosed with the water from Knebel Vig at the start of the experiment always had a higher sedimentation velocity.

*Resuspension and
primary sedimentation*

The hypothesis for the experiment on the effect of resuspension on the primary sedimentation was that resuspension of sediment and the following enhanced particle concentration in the water mass would increase the sedimentation of planktonic matter. According to classical coagulation theory collision rate increases exponentially with increasing particle concentration, and an increase of the size of particles will imply an exponential increase of the sinking velocity (Stokes Law). However, no direct effect of resuspended material on the sinking rates of phytoplankton was observed. The phytoplankton was dominated by the small motile dinoflagellate *Prorocentrum minimum*, a common species in turbid waters during summer. After the artificially induced resuspension the biomass of phytoplankton did not increase as fast and to the same extent as in the control bags. The phosphate concentration declined to below detection limit immediately after the resuspension and was probably swept out of the water column by adhering to the fast sinking resuspended particles including large numbers of benthic microalgae. On the other hand the concentration of phytoplankton was generally higher in the enclosures with sediment contact compared to the enclosures separated from the sediment. The conclusion is that resuspension has a strong impact on the nutrient dynamics and therefore also on the planktonic system, whereas resuspension does not show any pronounced effect on the aggregation and sedimentation of phytoplankton.

1. Indledning

1.1 Faglig problemstilling

*Aggregatdannelse og
iltsvind*

Der er på det seneste, i udlandet som herhjemme, føjet væsentlige aspekter til vores gryende erkendelse af mekanismerne bag sedimentationen i neritiske havområder. Tidligere er det således blevet sandsynliggjort, at størstedelen af det organiske materiale, der via sedimentation transporteres til bunden i Kattegat, udgøres af produkter fra den heterotrofe omsætning (Olesen & Lundsgaard, 1992). Endvidere viste disse undersøgelser at stoftransporten ingenlunde var koncentreret til forårsopblomstringens henfald, men fordelte sig jævnt igennem hele sommerperioden. Endelig men ikke mindst vidner resultaterne om, at aggregatdannelse er en afgørende proces for stoftransporten til bunden. Selv om disse observationer i nogen grad strider imod den traditionelle opfattelse af sedimentationsmønsteret i vore farvande, er de i langt bedre overensstemmelse med det faktum, at iltsvindhændelser hovedsageligt forekommer i sensommeren.

*Aggregatdannelse og
algeopblomstring*

Dannelse af aggregater resultere i en radikal forøgelse af de integrerede partiklers synkehastighed. I forbindelse med forårsopblomstringen af kiselalger observeres ofte aggregater (Riebesell, 1989; Olesen, 1993). Meget tyder på at dannelsen af fytoplanktonaggregater hænger sammen med kiselalgernes klæbrighed, og at denne er en fysiologisk styret proces (Kiørboe *et al.*, 1990). Hvordan klæbrigheden mere præcist afhænger af algeart og vækstforhold forekommer imidlertid meget kompliceret (Kiørboe *et al.*, 1994). Aggregatdannelse kan dog tolkes som en overlevelsesstrategi for kiselalger. I estuarielignende havområder som de indre danske farvande kan det oplagt have sine fordele hurtigt at synke til bunden i forbindelse med forringede livsvilkår. Overvintring af kiselalger på bunden vil selvsagt være af afgørende betydning for den efterfølgende koloniseringen med fytoplankton i den fotiske zone. Forårsopblomstringens udviklingsmønster vil på mange måder determinere det pågældende års trofiske struktur. Aggregaternes rolle i denne cyklus er praktisk taget ikke undersøgt. Endvidere vil en øget klæbrighed hos fytoplankton antagelig være et resultat af en udskillelse af exopolymerer, hvilket i sig selv kan beskytte mod potentielle græssere (Decho, 1990). Endelig kan afsondrede mucuspartikler fra fytoplankton fungere som selvstændige klæbrige partikler af betydning for aggregatdannelsen (Kiørboe & Hansen, 1993).

Fytoplanktonodynamik

Det forekommer umiddelbart paradoksalt at sedimentationen ikke følger biomassefordelingen gennem året. Den største partikelbundne biomasse i den fotiske zone er næsten altid knyttet til en kort og hektisk periode i det tidlige forår, mens algebiomassen gennem resten af året synes relativ beskedent. En undersøgelse af produktiviteten i de øvre vandlag i Kattegat har dog vist at forårsopblomstringen tegner sig for under 20% af årsprimærproduktionen (Richardson & Christoffersen, 1991). Samtidigt er det påvist at der sker en betydelig kvælstoftilførsel til den fotiske zone i løbet af sommeren og ikke som hidtil antaget at denne næsten alene er et produkt af opblandingen i vinterhalvåret (Hansen *et al.*, 1990). Da fytoplankton i Kattegat i den produktive del af året efter al sandsynlighed er kvælstofbegrænset, har vi med andre ord at gøre med en be-

tydelig ny produktion i sommerhalvåret. Selv om koblingen mellem regenereret og "eksport" produktion er dårligt kendt, er det blevet påvist at bunden modtager en stofmængde svarende til ny produktion (Olesen & Lundsgaard, 1992).

Heterotrof sedimentation

Det sedimenterende materiale i sommerperioden indeholder kun lidt klorofyl *a* (svarende til mindre end 10% af algebiomassen). Det er en nærliggende mulighed at materialet forinden har været gennem en heterotrof omsætning. Tilstedeværelsen af en betydelig heterotrof biomasse i de øvre vandlag i Kattegat om sommeren er dokumenteret (Thomsen *et al.*, 1992; Hansen & Nielsen, 1992; Kiørboe & Nielsen, 1992). I lighed hermed vidner den lille sommer-algebiomasse i kombination med en høj primær-produktivitet om en effektiv græsning.

Sekundær ny produktion

Studier af den heterotofe pelagiske stofomsætning viser, at denne ofte er ledsaget af en effektiv remineralisering. Næringsalte vil på denne måde atter blive gjort tilgængelige for en yderligere primærproduktion i en såkaldt regenereret produktion. Der vil dog aldrig være tale om et totalt lukket stofkredsløb og rimeligvis vil også en del af den sekundære produktion i den fotiske zone gå tabt til bundvandet. Størrelsen af dette tab vil rimeligvis stå i forhold til produktiviteten (Wassmann, 1990). Ydermere ser det ud til at kvælstof remineraliseres mere effektivt end kulstof i den heterotrofe omsætning (Blackburn, 1986; Olesen & Lundsgaard, 1992). Sedimentationsundersøgelsen i Kattegat viste, at C/N forholdet var ca. 30 % højere for det sedimenterende materiale end for det suspenderede og næsten 50 % højere end Redfield-forholdet i hvilket algerne formodes at indbygge kulstof og kvælstof. Den heterotrofe omsætning vil således give anledning til en yderligere sedimentation af organisk stof og hermed øge iltforbruget i bundvandet.

Mekanismer bag heterotrof aggregatdannelse

Det er imidlertid uklart hvad mekanismerne bag den heterotrofe partikeldannelse er. Synlige rester af dyr eller fækaler udgør nemlig kun en mindre del af materialet opsamlet i sedimentfælder om sommeren i Kattegat. Ekskretionsprodukter fra eksempelvis ciliater, der synes at spille en afgørende rolle i den pelagiske stofomsætningen i Kattegat, udskilles på en form der næppe i sig selv synker. Tilsvarende består hovedparten af fældematerialet i sommerperioden af partikler på under 10 μm , der derfor må formodes at være sedimenteret i aggregeret form. Følgende må det derfor antages at aggregatdannelse er af afgørende betydning for sedimentationen i Kattegat. Herudover vil en partikeldannelse i sig selv kunne indvirke på den trofiske struktur i pelagialet, dels som et ideelt substratgrundlag for en mikrobiel omsætning dels som fødepartikler for mesozooplankton (Alldredge & Silver, 1988).

Det teoretiske grundlag for aggregatdannelsen

Aggregering er et resultat af en sammenhæftning af kolliderende partikler i en proces der kaldes koagulering. Ud fra eksisterende koagulerings-teori er det muligt at vurdere betydningen af partikkelkoncentration og -klæbrighed for aggregatdannelse i de frie vandmasser.

Man anser tre mekanismer som værende hovedansvarlig for den mekanisk betingede kollision mellem suspenderede partikler (O'Melia, 1980):

- 1) Brownske bevægelse, som dækker over den tilfældige varmedrevne bevægelse af vandmolekyler. Da det overvejende vil være partikler på over 1 μm , der indgår i en aggregatdannelse, vil Brownske be-

vælgelser ikke spille nogen betydende rolle i denne sammenhæng.

- 2) Differentiel synkehastighed som er resultatet af tyngdekraftens virkning på partikler af forskellig massefylde, størrelse og geometri.
- 3) Hastighedsgradienter i vandbevælgelser (laminar eller turbulent fluid shear).

I de fleste naturlige miljøer vil hastighedsgradienter være den vigtigste kontaktskabende mekanisme. Kollisionshyppigheden vil ud over hastighedsgradienter også være afhængig af partikelkoncentrationen i anden potens og -diametere i tredje potens. Ved kollision vil en efterfølgende sammenhæftning afhænge af de medvirkende partiklers klæbrighed.

Sedimentets indvirkning på pelagiske processer

Som konsekvens af ovenstående vil også andre typer af partikler end fytoplankton deltage i koaguleringsprocesserne, hvilket selvfølgelig vil være mest udpræget i turbide kystområder. Målinger af partikelkoncentration, aggregering, sedimentering og turbulens i Isefjorden (Kjørboe *et al.*, 1994), antydede således en sammenhæng mellem resuspenderet stof og aggregatdannelse. Ydermere er det blevet påvist, at en ophvirvling af partikler kan hæmme fytoplanktons vækst ved dels at begrænse lysets gennemtrængelighed (Hellström, 1991) og dels ved "udvaskning" af partiklerne (Stolzenbach, 1993). Turbiditeten synes således at øve en betydelig fysisk effekt på planktoniske organismer, hvilket typisk må forventes at være tilfældet i lavvandede havområder med hyppige resuspensionshændelser.

De biologiske implikationer af sedimentkontakten på de pelagiske omsætningsprocesser er imidlertid stadig et relativt ukendt område. Selv om kystvandenes planktonorganismer oplagt må være under kraftig påvirkning af forhøjet turbiditet, partikelbinding til sedimentet og frigivelsen af slimstoffer fra sedimentoverfladen, mangler der stort set en kvantitativ og kvalitativ forståelse for disse velkendte fænomeners betydning for vandmassens trofiske struktur.

1.2 Metodisk problemstilling og forsøgenes formål

Horisontal strømning i havet

Det marine pelagiske system er bl.a. karakteriseret ved at vandet er i evig bevægelse. Den horisontale bevægelse skyldes bl.a. tidevandsstrømning, lokal vandoverskud som følge af afstrømning fra land, udligning af horisontale densitetsforskelle samt vindgenererede strømninger (Pedersen, 1991).

Heterogenitet i tid og rum

En anden karakter ved det marine system er, at der er en ujævn fordeling med hensyn til stof og omsætning på alle betragtnings niveauer fra mikrometer- til kilometerskalaen. Ved biologiske undersøgelser i felten er det af praktiske årsager almindeligt at have faste undersøgelsesstationer hvor man følger den tidsmæssige udvikling. På en sådan station lever man altid med den usikkerhed, at vandmassen hele tiden flytter sig, og at de ændringer man måler ikke er forårsaget af de fysiske og biologiske processer på stedet, men snarere skyldes heterogeniteten i de passerende vandmasser.

*Horisontal versus
vertikal transport*

Dette er således ofte et problem ved undersøgelser af vertikal transport i det pelagiske system. Den horisontale transport af suspenderede partikler har en hastighed, der er mellem 10^2 og 10^6 gange højere end den gravitationsbestemte vertikale transport. Materialet, der opsamles i sedimentfælder over tid, kan i værste fald stamme fra meget forskellige vandmasser, der har passeret stationen under eksponeringen. Problemet viser sig specielt, når sedimentationen skal relateres til stofmængderne og de sedimentationsregulerende processer i vandsøjlen.

Problemløsning

De mulige løsningsmuligheder er at vælge undersøgelsesområder med så homogene og stillestående vandmasser som muligt, at anvende sedimentfælder i flydende ophæng, der følger strømmen (teknisk vanskeligt), eller at måle på kunstig afgrænsede vandmasser.

*Simulering af naturen
eller processtudier*

I denne undersøgelse er det valgt, at indhegne vandmasserne, for bedst at kunne relatere sedimentationen til processerne og stofmængden i systemet. En fuldstændig simulering af forholdene i det naturlige system kan dog ikke opnås på denne måde. Det skyldes bl.a. de ændrede lys og omrøringsforhold, tilstedeværelsen af indhegningens faste overflade, der tillader vækst af fasthæftede organismer, samt muligheden for at få en "skæv" planktonisk sammensætning ved opsætning af sækken pga. det naturlige systems heterogenitet. Indhegningerne er derimod bedre egnede til specifikke processtudier og til undersøgelse af korttidseffekter af manipuleringer.

Disse forsøg har to hovedformål:

Sedimentationsdynamik

1) at studere sedimentationsdynamikken og de regulerende faktorer for sedimentationen under algeopblomstringer. Ved at stimulere væksten ved tilsætning af næringsalte inkl/excl. silikat forventes, at der opnås to forskellige scenarier med og uden dominans af kiselalger. Ved tilsætning af ^{15}N mærket nitrat undersøges dynamikken i omsætningen af frie næringsstoffer og koblingen til sedimentation af partikulært organisk materiale.

Effekt af resuspension

2) at undersøge hvordan ophvirvlingen af sediment påvirker det pelagiske system, herunder effekten af resuspension på sedimentationen af autochton materiale fra dette.

2. Materialer og metoder

2.1 Undersøgellesområde

Geografi og hydrografi

Undersøgelserne blev udført i Knebel Vig på østsiden af Kalø Vig i juli måned 1992. Knebel Vig er en næsten lukket bugt med et overfladeareal på 7,5 km². De dybeste områder (maksimum 16 m) findes i vigens centrale del og i den smalle åbning til Kalø Vig. Placeringen af plastindhegningerne var på 3,5-3,8 m vand, 200 m fra vigens nordlige kystlinie, hvilket minimerede vind- og bølgeeksponeringen. Der er en tidevandsforskel på 30-40 cm, men vindgenererede regionale vandstandsforskelle kan være meget større. Saliniteten og temperaturen i Knebel Vig er stærkt påvirket af forholdene i de tilstødende områder. Da vindeksponeringen er svag, findes der i det meste af året en salt og temperatur lagdeling i de dybeste dele af vigen. På forsøgstidspunktet var temperaturen på stationen ca. 17°C og saliniteten omkring 20‰.

Bundforhold

På forsøgsstationen bestod bunden af mudret sand med en veludviklet bentisk flora bestående af kiselalger og trådførmede blå-grønner, der i forskellig grad dannede algeområder på bunden.

For yderligere beskrivelse af Knebel Vig se Christiansen *et al.* (1981).

2.2 Opsætning af plastindhegninger

Beskrivelse af sækkene

Der blev i alt opsat 24 plastindhegninger monteret på række på en øst-vest orienteret pontonbro. Hver sæk havde en diameter på 1,5 m og en dybde på 3-3,5 m (volumen 5-6 m³) og blev ved opsætningen fyldt med vand fra vigen. Nogle sække var åbne mod sedimentet, mens andre var snurret sammen i bunden. I de fleste sække var monteret en vindmølle, der direkte overførte vindenergien til omrøring i sækkens vand. De yderste to sække blev ikke anvendt til forsøg pga. de lidt anderledes lys- og bølgeførhold de var udsat for. De øvrige indhegninger blev manipuleret på forskellige måder mht. næringsstoftilsætning og sedimentophvirvling. Dette projekt arbejdede i 8 af sækkene.

Sækkenes betegnelser

Hver sæk betegnedes ved et nummer kombineret med en bogstavkombination, der indikerede de aktuelle manipuleringer. Ved næringsstoftilsætning var forbogstaverne N, P og Si, mens sækkene med sedimentkontakt havde forbogstavet S efterfulgt af S eller C afhængigt af, om der var kunstig sedimentophvirvling eller ej.

2.3 Forsøgsplan for opblomstringsforsøg

Næringsstoftilsætning

I sækkene NPSi7, NP20, NPSi21 og NP22 fulgtes den planktoniske udvikling og sedimentationen efter inducering af algeopblomstringer ved tilsætning af nitrat og fosfat samt i NPSi7 og NPSi21 også af silikat. Det blev tilstræbt, at koncentrationerne i sækkene skulle svare til vinterkoncentrationer i Knebel Vig, dvs. 20 µM nitrat, 10 µM silikat og 2 µM fosfat. NP20 blev sat op og næringsstofberiget den 14. juli, men blev først fulgt fra den 16. juli NPSi21 og NP22 blev fulgt fra opsætningen og

næringsstofberigelsen den 19. juli, mens NPSi7 blev fulgt fra starten den 20. juli. Silikatberigelsen i NPSi21 blev suppleret med ca. 16 μM den 21. juli, da silikatet ved første tilsætning var udfældet og derfor sedimenterede i sækken. I sæk NPSi7 bestod 50% af nitrattilsætningen af ^{15}N mærket nitrat.

2.4 Forsøgsplan for resuspensionsforsøg

Kunstig resuspension

I sækkene med sedimentkontakt (SS1, SC2, SS4 og SC5) blev der i to af disse (stormsækkene: SS1 og SS4) fremkaldt en kunstig resuspension den 13. og 18. juli. Dette blev udført med en elektrisk bådmotor i en periode på 60 min. den 13. juli og 120 min. den 18. juli. Motorpåvirkningen blev udført med størst effekt ved anden resuspension. Forud for en kunstig resuspension blev sedimentoverfladen overstrøet med små farvede glasperler, der efter resuspensionen kunne vise, hvor dyb sedimentophvirvlingen havde været. Sækken SC2 og SC5 fungerede som kontrolsække.

Udviklingen i både det pelagiske og det bentiske miljø tillige med sedimentationen blev fulgt. Kun resultater vedr. den pelagiske påvirkning præsenteres, da de bentiske studier blev varetaget af et andet projekt (Sloth *et al.*, in prep.)

2.5 Prøvetagning

Vandprøver

Vandprøver i og udenfor sækkene blev taget i 0,5, 1,5 og 2,5 m dybde med en manuelt betjent hjerteklapvandhenter. Vandet fra de tre dybder blev blandet før udtagning til diverse analyser.

Sedimentfælder

Til måling af sedimentationen blev anvendt cylindriske sedimentfælder ophængt i 1,5 og 2,5 m dybde. I hver dybde anvendtes 2-4 fælderør monteret i holdere, der sikrede en lodret orientering af rørene. Holderne var fæstnet på en lodret stålstang, der var monteret på pontonbroen.

Bundprøver

Uforstyrrede sedimentkerner blev taget med cylindriske plexiglasrør (diameter 4 cm), der fra pontonbroen manuelt kunne presses ned i sedimentet og optages vha. et langt håndtag.

Prøvetagningstider

Tidsintervallerne mellem prøvetagningerne var normalt 24 eller 48 timer, men umiddelbart efter de provokerede resuspensioner (SS1 og SS4) samt ^{15}N tilsætningen (NPSi7) blev der taget prøver med 2 eller 4 timers intervaller.

2.6 Målinger og analyser

Vind og secchi-dybde

Vindhastighed målt ved Tirstrup flyvestation af Danmarks Meteorologisk Institut, hvorfra dataene rekvireredes. Secchi-dybden blev målt direkte i sækkene.

Analyser på vand- og fældeprøver

Vandprøver blev analyseret for uorganiske næringsalte (nitrit, nitrat, ammonium, fosfat og silikat; standard metoder). Både vandprøver og sedimentfældemateriale blev filtreret på GF/C filtre og analyseret for

POC/N (Carlo Erba og Europa Scientific Roboprep C/N analysatorer), $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ (Europa Scientific massespektrometer), klorofyl *a* og fæopigment (spektrofotometrisk og fluorometrisk måling på ethanolekstrakter før og efter forsuring), samt tørstof og glødetab (gravimetrisk efter hhv. 105 og 500 graders varmebehandling). Dominerende fytoplankton organismer blev talt og målt på Lugol-fixerede prøver i sedimentationskamre, og biovolumen og kulstofbiomasse blev beregnet iflg. Edler (1987). Biovolumen og antal af den hyppigst forekommende fytoplanktonart blev yderligere bestemt ved måling af levende prøver vha. en Elzone 180 Particle Sizer. Ved beregning af sedimentationsrater blev korrigeret for fældevandets indhold af suspenderet materiale (koncentrationer fra integrerede vandprøver). Gennemsnitlig sedimentationshastighed/synkehastighed (enhed: m d^{-1}) for de enkelte stoffer eller alger blev beregnet som sedimentationsraten (enhed: $\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$) divideret med den suspenderede koncentration (enhed: mg m^{-3}).

Primærproduktion

Pelagisk primærproduktion blev målt ved *in situ* flaskeinkubation med ^{14}C -bikarbonat i 3 dybder i 1 eller 24 timer. Ved 1 times inkubationer omregnedes til døgnproduktion ved at multiplicere timeproduktionen med 10. Produktionen blev målt som ^{14}C indbygning i både partikulære og opløste puljer (Riemann & Møller, 1991).

Scanning-EM

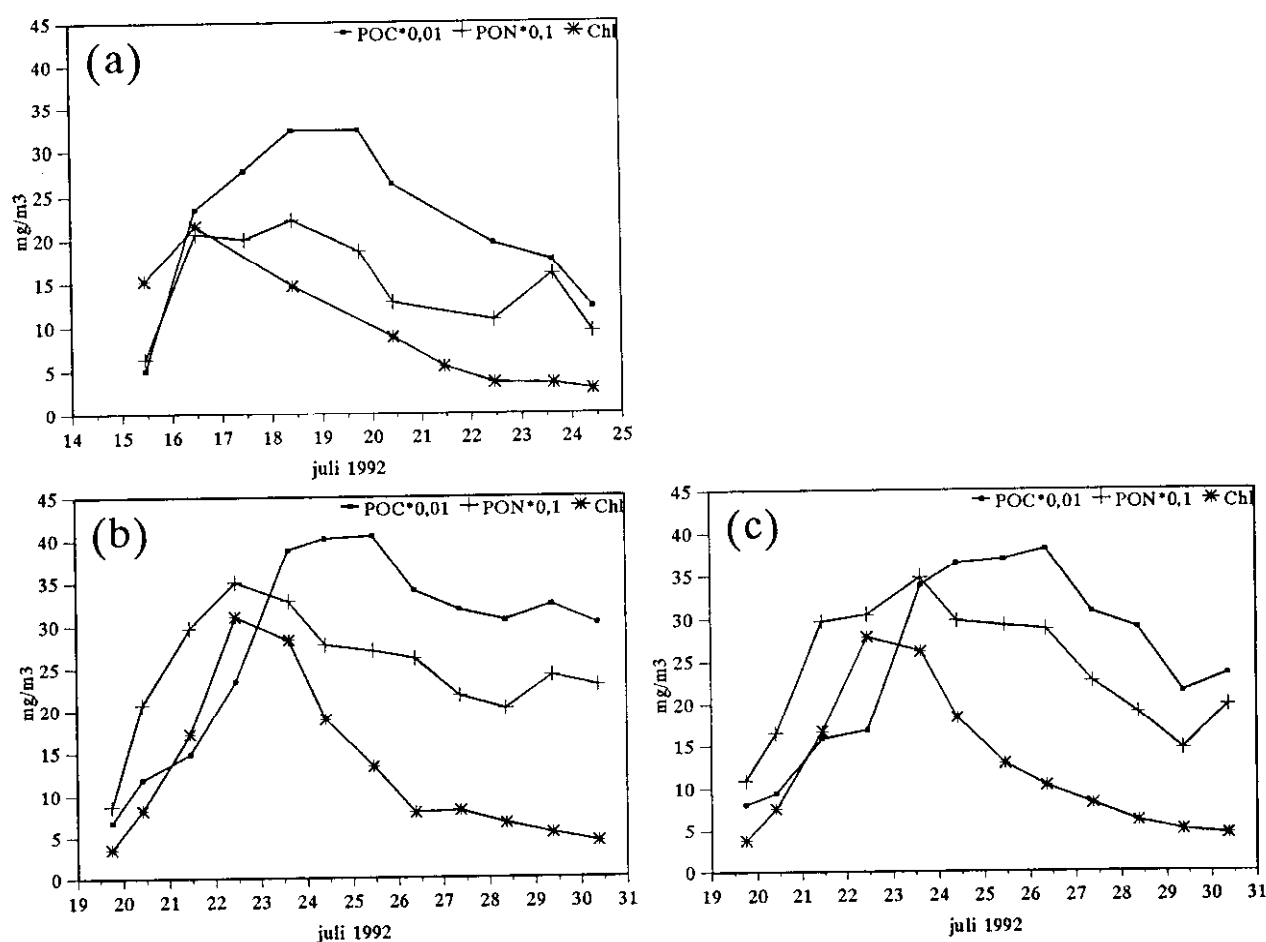
Til scanning elektron mikroskopi blev præparaterne fixeret i 3% glutaraldehyd, filtreret på 0,2 μm polyester membranfiltre, afsaltet, dehydreret i acetone og tørret ved kritisk punkt tørring eller dehydreret i ethanol, overført til isopentan og lufttørret.

3. Opblomstring i sække uden sedimentkontakt

3.1 Forløb af opblomstringer

Suspenderet klorofyl

Indelukning af en vandmasse fra vigen og tilsætning af næringsalte bevirkede i alle tilfælde en kraftig opblomstring af alger (figur 3.1). I NPSi 21 og NP22 hvor hele opblomstringen blev fulgt fordobledes koncentrationen af klorofyl *a* dagligt i de først tre døgn og nåede en maksimal koncentration på 28-32 mg m⁻³. Efterfølgende (23-30. juli) faldt klorofyl *a* koncentrationen tilnærmelsesvist eksponentielt og endte den 30. juli på ca. 4 mg m⁻³. I NP20 kendes kun udviklingen fra den 15. juli, hvilket er 3 dage efter opsætningen af sækken og næringsstoftilsætningen, og her toppede klorofyl *a* koncentrationen den 16. juli med 22 mg m⁻³ og henfaldt derefter til 2 mg m⁻³ i løbet af de næste 8 dage (figur 3.1).

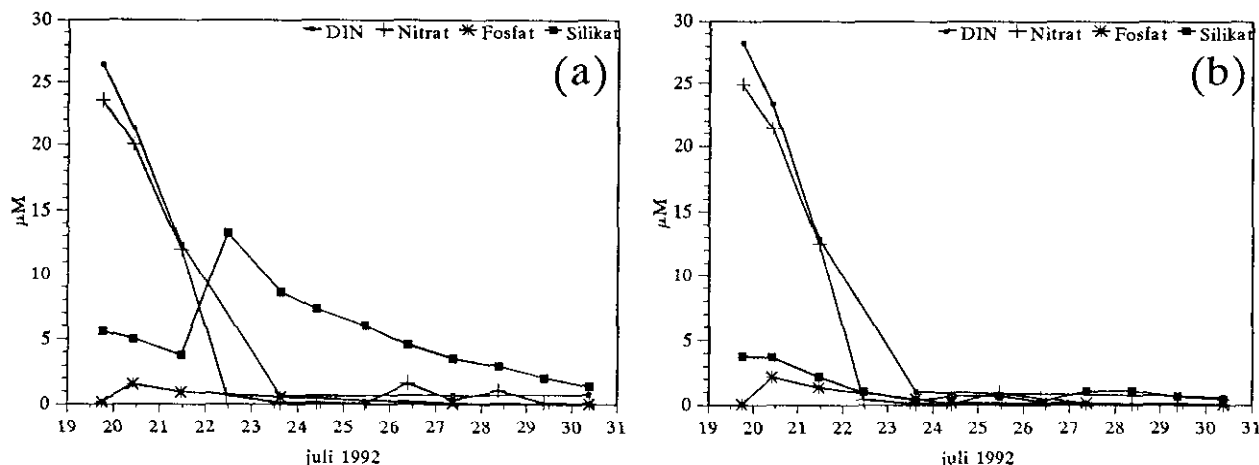


Figur 3.1. Koncentrationer af POC, PON og klorofyl *a* i det suspenderede partikulære materiale i sæk (a) NP20, (b) NPSi21 og (c) NP22.

Suspenderet PON og POC

I NPSi21 og NP22 fulgte PON udviklingen stigningen i klorofyl *a* i de første dage og de to parametre toppede samtidig. PON viste dog en noget bredere top, dvs. en langsommere vækst op mod maksimum og et langsommere henfald efterfølgende. I NP20 var det særligt udpræget, at PON holdt maksimumniveau i flere dage. Koncentrationen af suspen-

deret POC viste i alle tre sække en vækst, der toppede 1-3 dage senere end PON og klorofyl *a* maksimumet. Generelt holdt de maksimale PON niveauer sig indtil POC nåede maksimumniveau (figur 3.1).



Figur 3.2. Koncentrationer af næringssalte i (a) NPSi21 og (b) NP22.

Frie næringssalte

Udviklingen i koncentrationer af uorganiske næringssalte viste (NPSi21 og NP22), at klorofyl *a* og PON toppede samtidig med, at den tilsatte mængde af nitrat var blevet omsat (figur 3.2). Nitratkoncentrationen var da bragt ned på 0,1-0,7 μM , hvilket var niveauet resten af perioden, mens koncentrationen af total uorganisk nitrogen lå på 0,7-1,0 μM . Fosfatkoncentrationen faldt gennem hele forløbet og endte på 0,05 μM i NPSi21 og 0,1 μM i NP22. Silikat blev i NPSi21 den 21. juli målt til 3,8 μM og blev umiddelbart efter denne prøvetagning suppleret op til teoretisk 18 μM . Den følgende dag målt 13,3 μM og efterfølgende faldt koncentrationen eksponentielt til en koncentration på 1,4 μM den 30. juli. I den parallelle sæk uden silikattilsætning (NP22) var startkoncentrationen 3,8 μM og koncentrationen faldt i løbet 3 dage til et niveau på 0,3-1,0 μM .

Næringsstofbegrænsning

I NPSi21 og NP22 var der en tydelig sammenhæng mellem biomasseudvikling og koncentrationer af næringssalte. Sammenligning af PON udviklingen og DIN forbruget viser, at faldet i uorganiske N blev modsvaret af en stigning i PON, og at PON udviklingen først stoppede da næsten alt uorganisk N var optaget. Dette tyder på at uorganisk N blev begrænsende for væksten. På dette tidspunkt er de øvrige næringsstoffer (på nær silikat i NPSi21) imidlertid også bragt ned på et niveau, hvor de principielt kan være vækstbegrænsende.

Ekstra optag af kvælstof

Klorofyl *a* og PON toppede på samme tid, men inden dette tidspunkt var nået, var der tendens til, at væksthastigheden for PON begyndte at aftage tidligere end klorofylvæksten. Det tyder på at algerne kunne optage et overskud af kvælstof, der senere i vækstfasen kunne indbygges i f.eks. N-holdige klorofylmolekyler. Sådanne afkoblinger af kvælstofoptagelsen og væksten (målt i kulstof eller klorofyl) er også tidligere beskrevet for alger i kultur (Sciandra, 1991; Conway *et al.*, 1976; Paasche *et al.*, 1984).

POC stigning efter PON maksimum

Efter PON og klorofyl *a* maksimumet fortsatte stigningen i POC i 1-2 dage. Dette kunne skyldes, at den allerede optagne kvælstof, var tilstrækkelig til en yderligere kulstofindbygning (primærproduktion) i den

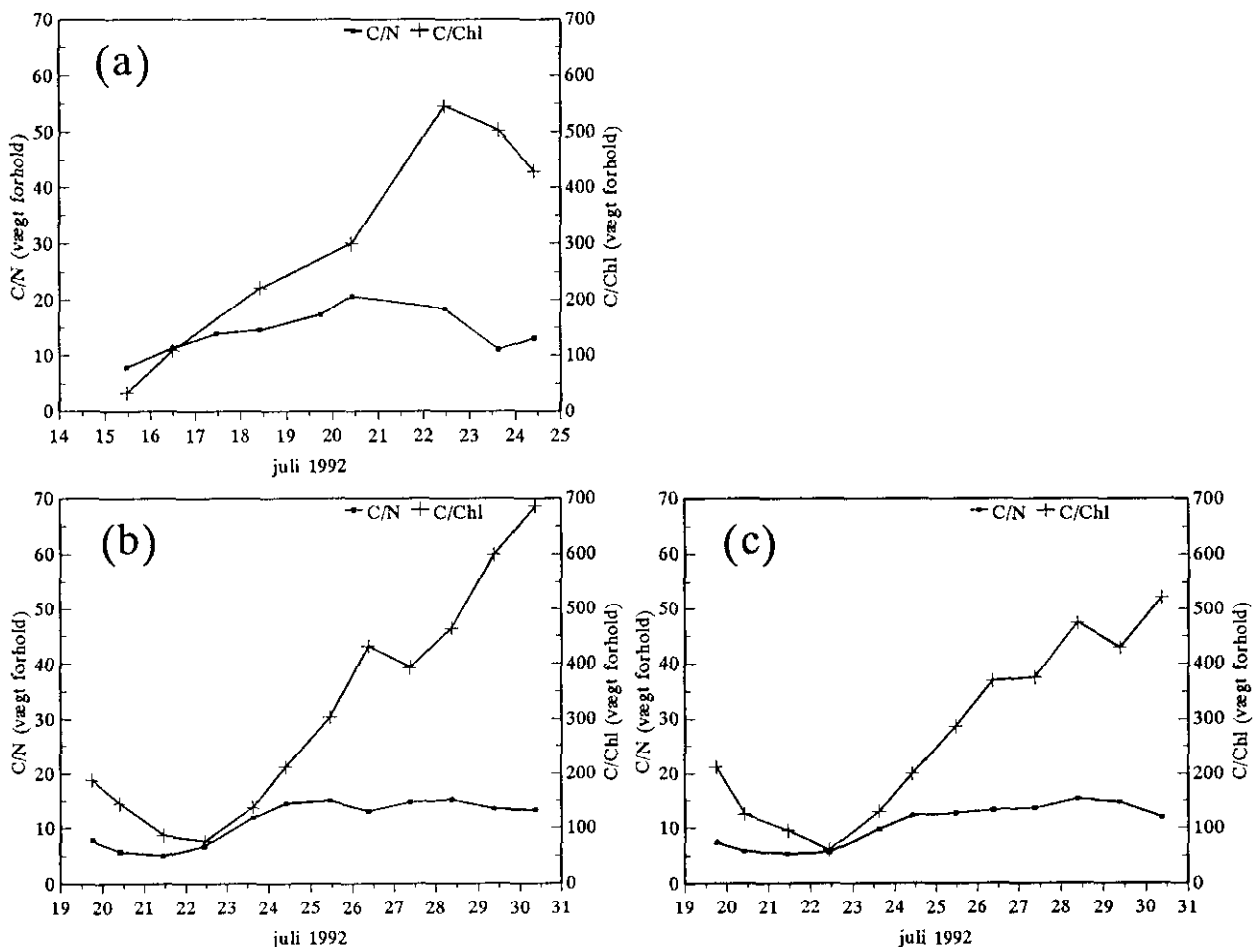
partikulære pulje (se senere omtale). I NPSi21 og NP22 øgedes POC koncentrationen henholdsvis 70 og 12% efter PON og klorofyl *a* havde toppet.

Hurtigt tab af klorofyl

Efter biomassen havde toppet forsvandt klorofyl *a* med en betydeligt større hastighed end gældende for POC/N, hvilket er tegn på, at algerne græsses og balancen mellem autotrof og heterotrof biomasse rykkes eller at algerens klorofylindhold sænkes.

Ubalanceret vækst

Disse eksempler på ubalanceret vækst i den suspenderede stofpulje er baggrunden for variationerne i det indbyrdes forhold mellem kulstof, kvælstof og klorofyl *a* i den partikulære suspenderede pulje (figur 3.3). Et par dage efter nitrattilsætningen nåede C/N vægt-forholdene de laveste værdier på ca. 5,0-5,3, hvilket er under Redfield ratioen (5,7), mens der i fasen fra begyndende næringsstoffbegrænsning til POC havde nået den maksimale koncentration (periode på ca. 3 dage) skete en forøgelse af C/N-forholdet med en faktor 2-3, og forholdet forblev højt den efterfølgende uge.



Figur 3.3. C/N og C/Chl forhold (vægt/vægt) i det suspenderede partikulære materiale i (a) NP20, (b) NPSi21 og (c) NP22.

Når forholdet mellem tilvæksten af POC og af PON beregnes for de første dage efter næringstilsætningen ses, at kvælstofindbygningen var meget stor de første 1-2 dage (tabel 3.1). Efter ca. 3 dage havde den

totale C og N indbygning nået et C/N-forhold svarende til Redfield ratioen. Efter endnu en dag var kvælstoffet blevet begrænsende, hvorved indbygningsforholdet var godt og vel fordoblet.

Tabel 3.1. Forhold mellem tilvækst af POC og PON i forskellige tidsintervaller efter den initiale næringsstoftilsætning.

Periode	NPSi21	NP22
19-20. juli	4,2	2,5
19-21. juli	3,9	4,1
19-22. juli	6,4	4,5
19-23. juli	13,3	10,8

C/N og C/Chl

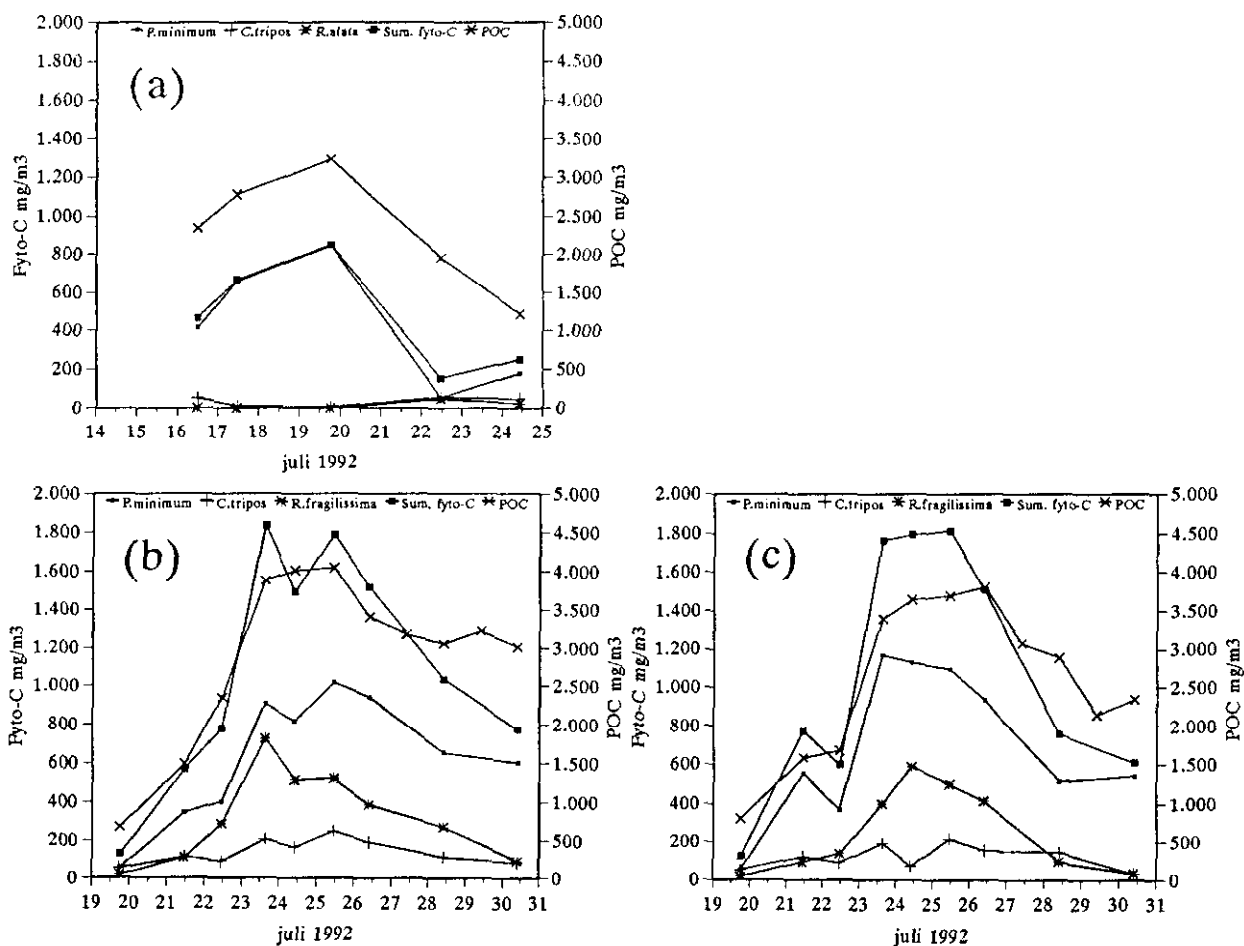
C/Chl forholdet havde de laveste værdier omkring det tidspunkt, hvor klorofyl *a* biomassen toppede, hvilket i NPSi21 og NP22 var C/Chl forhold på hhv. 76 og 60 (figur 3.3). C/Chl er målt på den totale partikulære pulje og algernes cellulære ratioer vil antageligt være lavere end disse målte værdier. Tidspunktet med maksimal klorofyl *a* mængde må dog forventes at være et af de tidspunkter, hvor algernes sande C/Chl forhold ligger nærmest de målte værdier. Med baggrund i de indikationer på ubalanceret vækst, der tidligere er omtalt, er der ikke belæg for at anvende en konstant faktor for hele perioden til omregning fra klorofyl *a* til algebiomasse, ej heller er der baggrund for at bestemme algekulstof ved korrelationsanalyse på POC og klorofyl *a* koncentrationerne over hele perioden. Man kan derimod antage, at den hurtige vækst i POC og klorofyl *a* der følger næringstilsætningen skyldes algevækst. Beregnes C/Chl forholdene på baggrund af tilvæksten af POC og klorofyl *a* ser man, at i de første 2 dages vækst efter næringstilsætningen er indbygningsforholdet 60 (NPSi21) og 73 (NP22).

Kisel- og furealger

Mikroskopisk analyse af det suspenderede materiale viste, at fytoplanktonet antalsmæssigt i alle sækkene og i den omliggende Knebel Vig var domineret af den thecate furealge *Prorocentrum minimum*, mens også furealgen *Ceratium tripos* og kiselalgerne *Rhizosolenia alata* (= *Proboscia alata*; NP20) og *Rhizosolenia fragilissima* (NPSi21 og NP22) betød noget biomasse-mæssigt (figur 3.4).

Fytoplanktonkulstof

Udviklingen i biomassen af de tre dominerende fytoplanktonarter afspejlede bedre POC koncentrationerne end klorofyl *a* koncentrationerne (tabel 3.2). De ringe korrelationer mellem klorofyl *a* og fytoplanktonkulstof støtter de tidligere nævnte indikationer på, at fytoplanktoncellernes klorofyl *a* indhold varierede gennem perioden og at klorofyl *a* koncentrationerne ikke kan omregnes til kulstof med en fast faktor. I NP20 var C/Chl forholdet usandsynligt lavt og korrelationen er også dårligst i denne sæk, mens C/Chl forholdet fundet ved regression i de to andre sække var mere realistiske, som gennemsnit for hele forsøget. Regressionsanalyse på POC versus fytoplanktonkulstof viser pæne korrelationer (r^2 -værdier på 0,8-0,9), men giver hældningskoefficienter højere end 1 for regressionslinien. Afvigelserne indikerer, at optællingerne og beregningerne af fytoplanktonkulstof kun giver ca. 25% (NP20) og ca. 50-60% (NPSi21, NP22) af den faktiske mængde fytoplanktonkulstof (se senere omtale).



Figur 3.4. Beregnet biomasse (fytoplankton-kulstof) af de dominerende fytoplankton arter baseret på mikroskopisk optælling og opmåling, samt total POC. (a) NP20, (b) NPSi21 og (c) NP22.

Tabel 3.2. Lineær regression for hhv. de tre dominerende arters fytoplanktonkulstof (Fyto-C) versus klorofyl a (Chl) og for POC versus fytoplanktonkulstof. Analysen er foretaget for hele måleperioden. De korrelerede koncentrationer af suspenderet stof har alle enheden mg m^{-3} .

Sæk nr.	Periode	Korrelation	r^2	n
NP20	16-24. juli	$\text{Fyto-C} = 12 \times \text{Chl} + 190$	0,34	6
NPSi21	19-30. juli	$\text{Fyto-C} = 20 \times \text{Chl} + 820$	0,11	9
NP22	19-30. juli	$\text{Fyto-C} = 29 \times \text{Chl} + 680$	0,16	9
NP20	16-24. juli	$\text{POC} = 3,9 \times \text{Fyto-C} + 1000$	0,81	5
NPS121	19-30. juli	$\text{POC} = 1,9 \times \text{Fyto-C} + 820$	0,88	9
NP22	19-30. juli	$\text{POC} = 1,6 \times \text{Fyto-C} + 960$	0,83	9

En bedre korrelation mellem parametrene POC, fytoplanktonkulstof og klorofyl a finder man ved at se isoleret på perioderne med henholdsvis stigning og fald i algebiomassen, og derved ses også karakteristiske forskelle mellem disse to faser af forsøget, hvilket gør en opdeling betydeligt mere værdifuld end en samlet analyse af hele forsøgsperioden (tabel 3.3).

Tabel 3.3. Lineær regression mellem suspenderet fytoplanktonkulstof (Fyto-C) for de 3 dominerende arter og klorofyl *a* samt mellem POC og fytoplanktonkulstof for særskilte måleperioder. De korrelerede koncentrationer af suspenderet stof har alle enheden mg m⁻³.

Sæk nr.	Periode	Korrelation	r ²	n
NPSi21	19-23. juli	Fyto-C = 43 × Chl - 30	0,54	4
NPSi21	25-30. juli	Fyto-C = 112 × Chl + 380	0,86	4
NP22	19-23. juli	Fyto-C = 42 × Chl + 30	0,46	4
NP22	25-30. juli	Fyto-C = 150 × Chl - 98	0,93	4
NPSi21	19-23. juli	POC = 1,9 × Fyto-C + 560	0,97	4
NPSi21	25-30. juli	POC = 1,0 × Fyto-C + 2200	0,86	4
NP22	19-23. juli	POC = 1,6 × Fyto-C + 590	0,98	4
NP22	25-30. juli	POC = 1,1 × Fyto-C + 1900	0,88	4

Det bemærkes, at algerne havde et betydeligt højere C/Chl forhold i sidste del af forsøget end i starten. Ligeledes afspejler den dårlige korrelation mellem fytoplanktonkulstof og klorofyl *a* under specielt opbygningsfasen, at klorofyl *a* indholdet i algecellerne faldt kraftigt ved overgangen til næringsstofbegrænsning. I de første dage af forsøgene tyder regressionen mellem POC og fytoplanktonkulstof på, at de mikroskopiske algeopgørelser af de tre dominerende arter har underestimeret fytoplanktonbiomassen med 40-50%, mens der i den sidste del af forsøget kun antydes en ubetydelig undersættelse. Endelig viser analyserne, at den koncentration af POC, der ikke kan tilskrives fytoplanktonbiomasse, er 3-4 gange højere under forsøgets sidste fase end under den første. For yderligere diskussion se også afsnit 3.3.

Betydning af silikat-tilsætning

Forekomsten af suspenderede kiselalger i sækkene med og uden silikat-tilsætning viste ingen tydelige forskelle, men der er dog en tendens til, at der gennemsnitlig var lidt højere kiselalge-biomasse i den berigede sæk, og at opblomstringen forgik hurtigere. Forekomsten af kiselalger i forhold til furealger var højest i denne sæk.

Tabel 3.4. Primærproduktionen integreret over 24 timer. Estimaterne baserer sig på inkubationer med ¹⁴C-bicarbonat over 1 eller 24 timer. De anførte P/B forhold er baseret på den målte POC mængde.

Dato (juli)	Inku.tid timer	NPSi21		NP22	
		Prim.prod. mg C m ⁻² d ⁻¹	P/B d ⁻¹	Prim.prod.	P/B d ⁻¹
21.	24	670	0,14	180	0,047
22.	1	2870	0,37	4960	0,75
23.	1	5530	0,56	2490	0,36
24.	1	2680	0,27	1650	0,45
25.	24	970	0,10	630	0,23
27.	24	370	0,048		

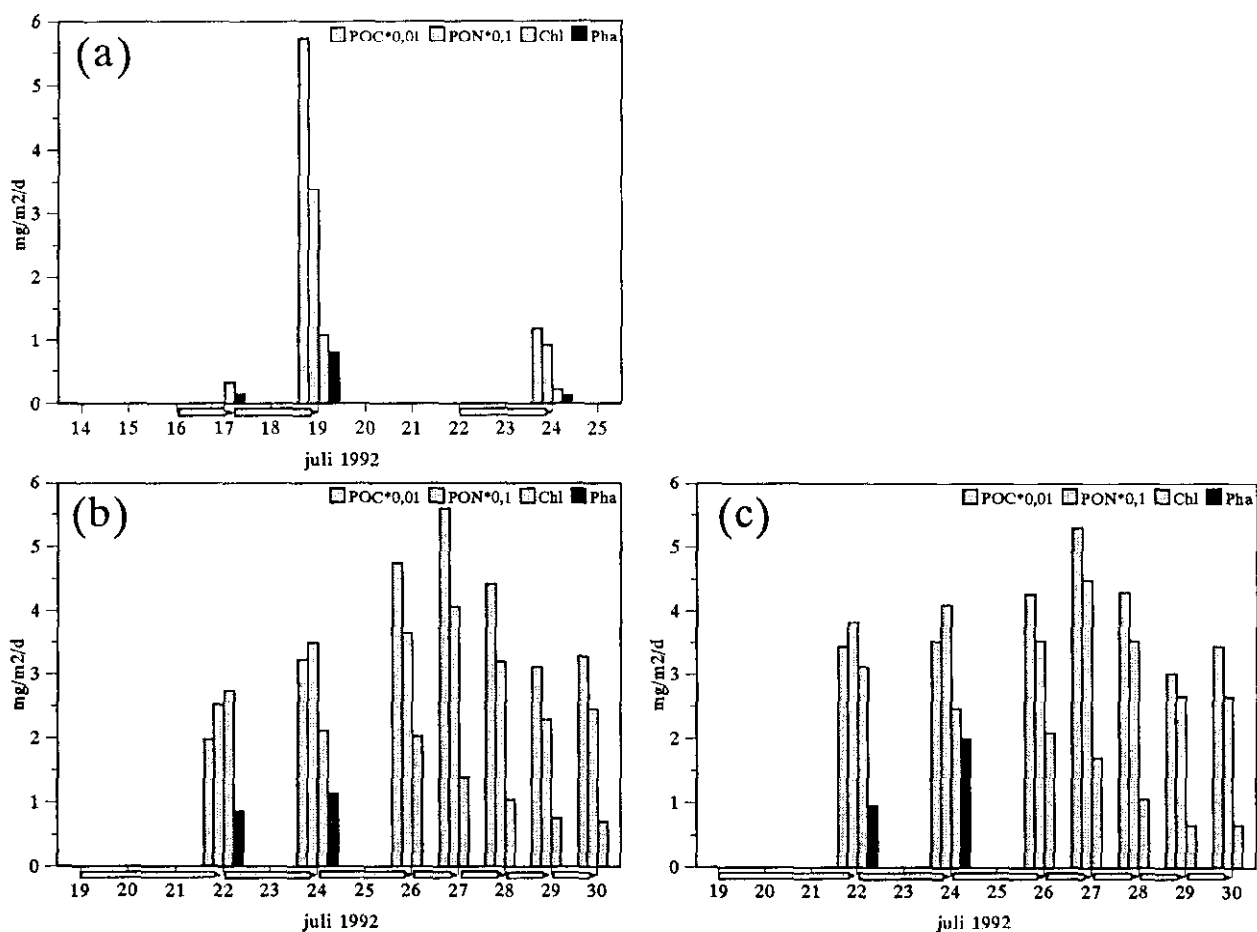
Primærproduktion

Primærproduktionen blev målt i NPSi21 og NP22 (tabel 3.4) ved 1 eller 24 t inkubationer og resultaterne må vurderes i lyset af de to metoder. Produktionsmålene baseret på én times inkubationer forventes at ligge på et niveau mellem algernes netto- og bruttoproduktion, men samtidig er de behæftet med en stor usikkerhed stammende fra omregningen fra time til døgnproduktion. Døgninkubationerne forventes at være påvirket af den heterotrofe omsætning i systemet, og det er således muligt at disse produktionsmål vil være lavere end algernes nettoproduktion. Generelt fulgte produktionen samme udvikling som algebiomassen med et maksimum omkring den 22-23. juli, og under opblomstringen var der sammenhæng mellem produktionens størrelse og biomassetilvæksten i sækkene. Den specifikke daglige primærproduktion på baggrund af total POC i vandet var i gennemsnit 19% i NPSi21 og 26% i NP22 (tabel 3.4).

3.2 Sedimentation

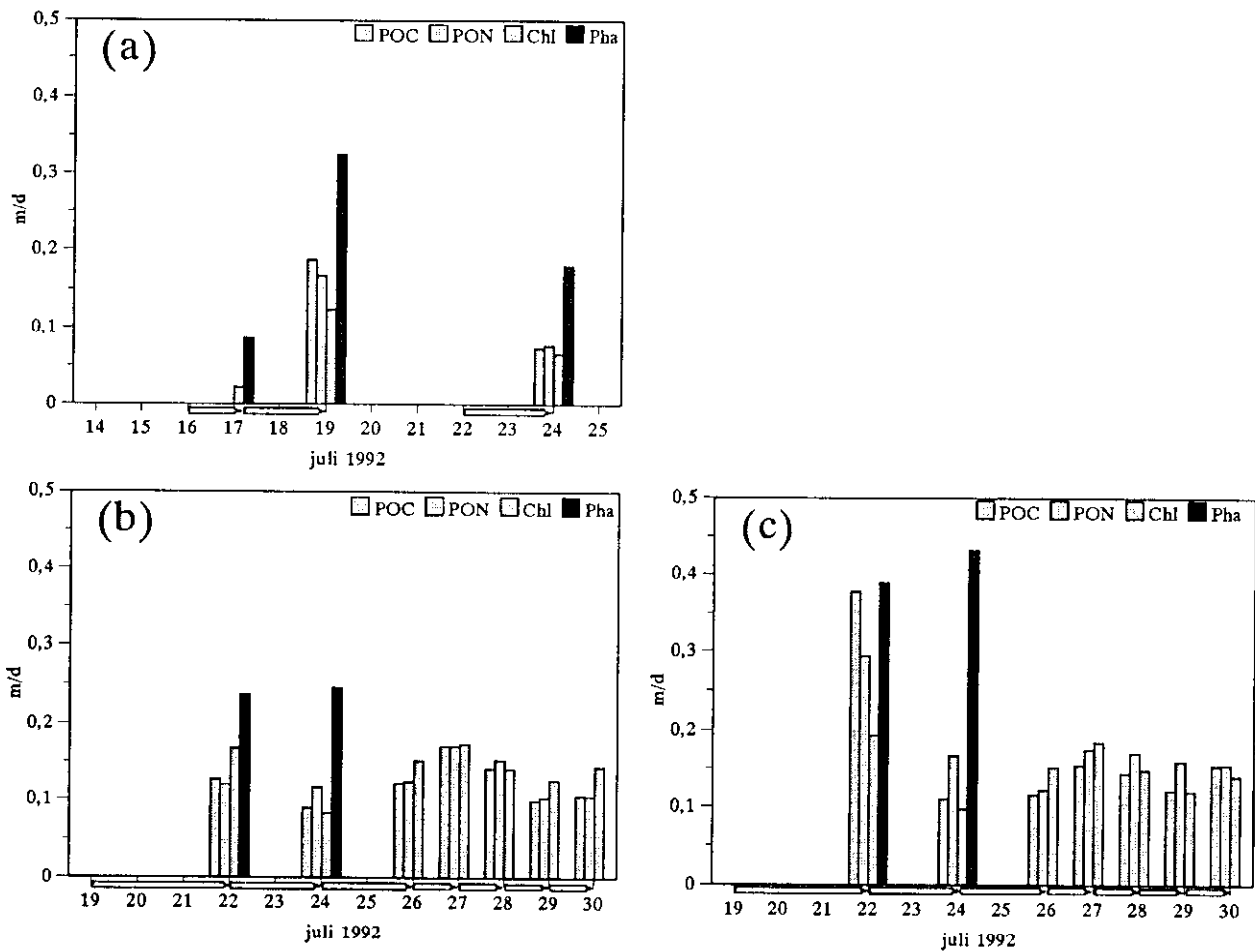
POC/N og klorofyl *a*

Sedimentationen i NPSi21 og NP22 var næsten ens mht. POC, PON og klorofyl *a* (figur 3.5) lige som udviklingen i suspenderet biomasse var det, og sækkene kan beskrives under ét. I NP20 er datamaterialet noget sparsomt, idet sedimentationsmålingen over en central 3-dages periode



Figur 3.5. Sedimentation af POC, PON, klorofyl *a* og fæopigment *a*. Sedimentation af fæopigment er kun estimeret i perioden 16-24. juli, og sedimentation af POC/N er ikke estimeret for perioden 16-17. juli. Eksponeringsperioden er angivet under søjlerne. (a) NP20, (b) NPSi21 og (c) NP22.

gik tabt, hvilket målingerne af suspenderet POC/N fra første eksponering også gjorde. I denne sæk ses dog, at klorofyl *a* sedimentationen var størst i den periode, hvor den suspenderede klorofyl *a* mængde faldt hurtigst, hvilket skete umiddelbart efter klorofyl *a* maksimumet. Situationen var lidt anderledes i NPSi21 og NP22, da sedimentationen af klorofyl *a* var størst under opbygningen af klorofyl *a* biomassen og tillige relativt høj i perioden med maksimum og begyndende biomassefald. Derefter aftog klorofyl *a* sedimentationen hurtigt. Sedimentationen af POC og PON viste også en vis sammenhæng med udviklingen i de suspenderede puljer af disse parametre. PON sedimentationen viste i en længere periode høje rater, sammenfaldende med den brede top i PON biomassen. Tilsvarende steg POC sedimentationen og biomassen parallelt og toppede senere end klorofyl *a* og PON på et tidspunkt svarende til det begyndende fald i suspenderet POC.



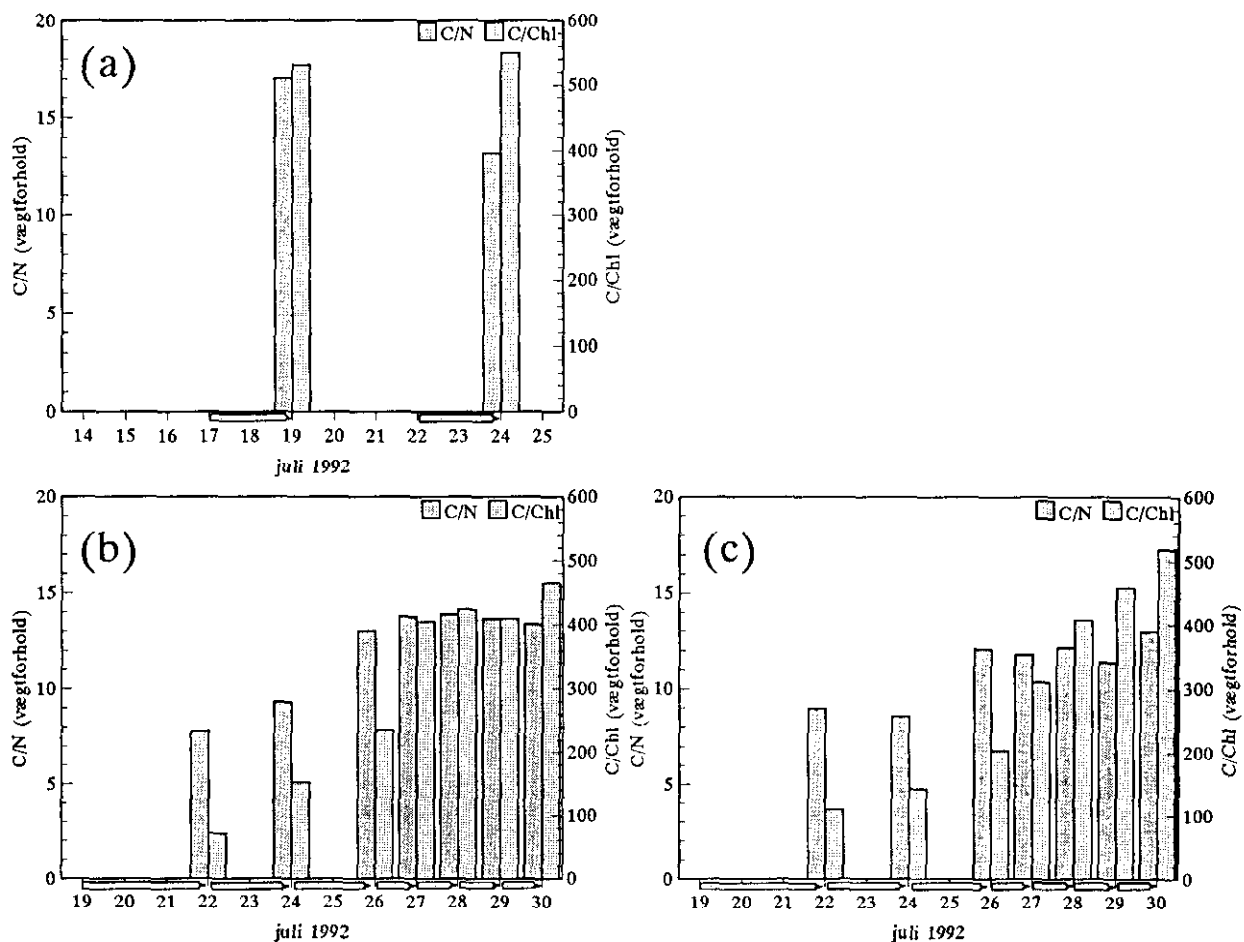
Figur 3.6. Gennemsnitlig sedimentationshastighed for suspenderet POC, PON, klorofyl *a* og fæopigment *a*. Sedimentationshastighed for fæopigment er kun estimeret i perioden 16-24. juli, og sedimentationshastighed af POC/N er ikke estimeret for perioden 16-17. juli. Eksponeringsperioden er angivet under søjlerne. (a) NP20, (b) NPSi21 og (c) NP22.

Sedimentationshastighed

Den koncentrationsspecifikke sedimentationsrate her udtrykt ved sedimentationshastigheden viser (figur 3.6), at i NP20 var sedimentationshastigheden for alle de målte parametre højest i perioden med begyndende klorofyl *a* henfald. Yderligere skal det bemærkes, at fæopigmentholdigt materiale sank over dobbelt så hurtigt som både klorofyl *a*,

PON og POC. Dette kan bl.a. skyldes følgende: 1) Da klorofyl *a* nedbrydes til fæopigment (specielt fæoforbid) i copepoder og andre græsseres tarmsystem, kan det målte fæopigment have været bundet til fækalier, der typisk har en høj sedimentationshastighed (f.eks. Welschmeyer & Lorenzen, 1985), 2) senescence alger har et højere indhold af fæopigment end alger i vækst (pers.obs. i batch kulturer). Hvis senescence alger samtidig sedimenterer hurtigere end sunde alger, kan forholdet skyldes, at en del af fytoplanktonsamfundet var senescent.

Den høje sedimentationshastighed for fæopigment blev også målt i NPSi21 og NP22, endda også under opblomstringsfasen (figur 3.6). I disse sække var sedimentationshastigheden for klorofyl *a* af samme størrelse gennem hele forsøget dog med tendens til lavere værdier ved bloomets maksimum. I henfaldsperioden (25-30. juli) var sedimentationshastighederne for klorofyl *a*, POC og PON bemærkelsesværdigt ens, konstante og relativt lave. Dette kunne skyldes, at de tre puljer i pågældende periode var knyttet til samme type partikler eller i det mindste til samme størrelse partikler. I NP22 var der høje sedimentationshastigheder for POC og PON under den første fældeeksponering, hvilket kunne skyldes sedimentation af aggregeret bentisk materiale stammende fra opsætningen af sækkene.



Figur 3.7. POC/PON forhold (C/N) og POC/klorofyl *a* forhold (C/Chl) i det sedimenterede materiale. Eksponeringsperioden er angivet under søjlerne. (a) NP20, (b) NPSi21 og (c) NP22.

Turnover rate

Sedimentationshastigheder på 0,10-0,17 m d⁻¹ kan omregnes til turnover rate for den suspendede biomasse ved at dividere med systemets dybde (i dette tilfælde regnes med 2,5 m = nederste fældedybde), hvilket her giver et turnover ved direkte sedimentation på 4-7% d⁻¹. I gennemsnit over perioden var der en sedimentation svarende til ca. 1/4 af primærproduktionen.

C/N og C/Chl i sedimenterende materiale

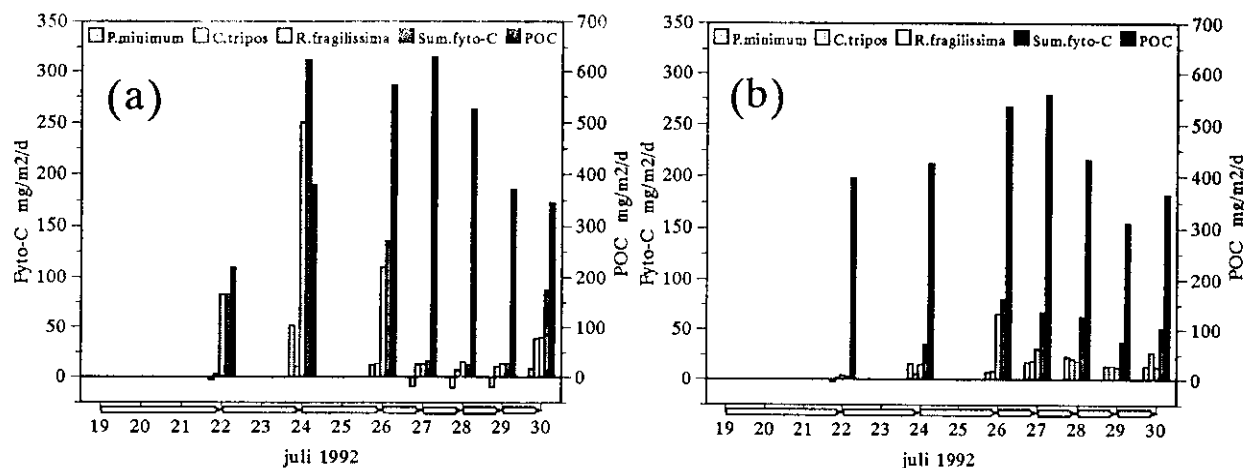
Karakteren af det sedimenterende materiale afspejles bl.a. i C/N og C/Chl forholdene (figur 3.7). I NPSi21 og NP22 var C/N forholdene i det sedimenterede materiale i fælderne 8-9 under opblomstringsfasen og steg til et niveau omkring 11-14 under henfaldsfasen. En meget mere drastisk udvikling var der i C/Chl forholdene, der dog også steg, men fra forhold på 18-39 gradvist op til forhold på 400-500.

Sammenlignes disse ratioer med de pågældende ratioer i vandet, ses det, at under de første tre dage med kraftig vækst var fældernes C/N forhold en anelse højere end vandets, mens det omvendte gjorde sig gældende for C/Chl forholdene, der var betydeligt højere i vandet end i fælderne. Senere under henfaldsfasen, hvor alle ratioerne var steget, havde de suspendede partikler samme C, N og klorofyl *a* forhold som de sedimenterede partikler, dog med en tendens til lidt højere forhold i vandprøverne.

Den sandsynligste baggrund for disse forhold er, at blandt de suspendede partikler var der forskellige puljer af partikler eller organismer med forskelligt forhold mellem klorofyl *a*, kvælstof og kulstof samt med forskellige sedimentationsmønstre.

Sedimentation af alger

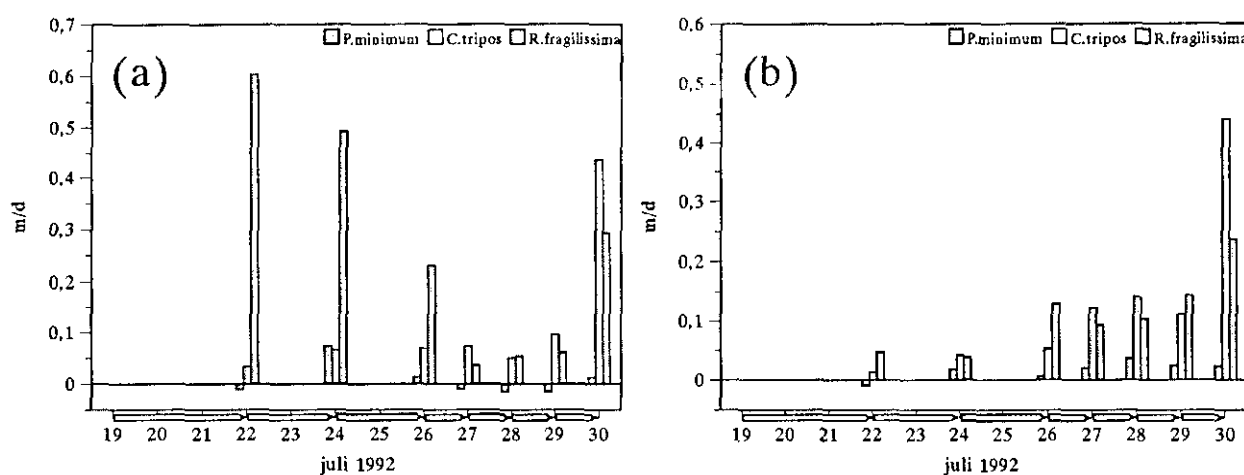
Algesammensætningen i det sedimenterede materiale var domineret af de samme arter som i vandprøverne. Resultaterne viste, at i NP20, hvor opblomstringen var furealgedomineret, var det *Ceratium tripos*, der betød mest biomasse. I NPSi21 og NP22, hvor både kiselalger og furealger voksede op, var begge disse algegrupper repræsenteret i det sedimenterende materiale (figur 3.8).



Figur 3.8. Sedimentation af de dominerende fytoplankton arter beregnet som kulstof-ækvivalenter ud fra mikroskopisk optælling og opmåling. Eksponeringsperioden er angivet under søjlerne. (a) NPSi21 og (b) NP22.

Effekt af silikattilsætning

I NP22 var sedimentationen af *Rhizosolenia fragilissima* af samme størrelsesorden som for de to arter furealger (figur 3.8 b). Der var dog en øget kiselalgesedimentation i perioden 24-27. juli, hvilket var udslagsgivende for, at netop denne periode havde den højeste samlede fytoplanktonsedimentation. I sækken med silikattilsætning (NPSi21) var sedimentationsforholdene helt anderledes (figur 3.8 a), idet *Rhizosolenia fragilissima* her sedimenterede kraftigt i perioden uden næringsstofbe-grænsning, mens sedimentationen af furealger var som i sæk NP22. Sedimentationen af fytoplanktonbiomasse i sæk NPSi21 var således helt domineret af *Rhizosolenia fragilissima* og var samlet betydeligt højere end i NP22. Dette afsløres ikke af tallene for sedimentation af POC, PON og klorofyl *a* (figur 3.5). Til trods for at den suspendede biomasse af *Rhizosolenia fragilissima* ikke var tydeligt påvirket af silikattilsætningen, var den samlede biomasseopbygning for denne alge godt 60% højere i NPSi21 end i NP22 i perioden 19-24. juli når sedimentationen indregnes.



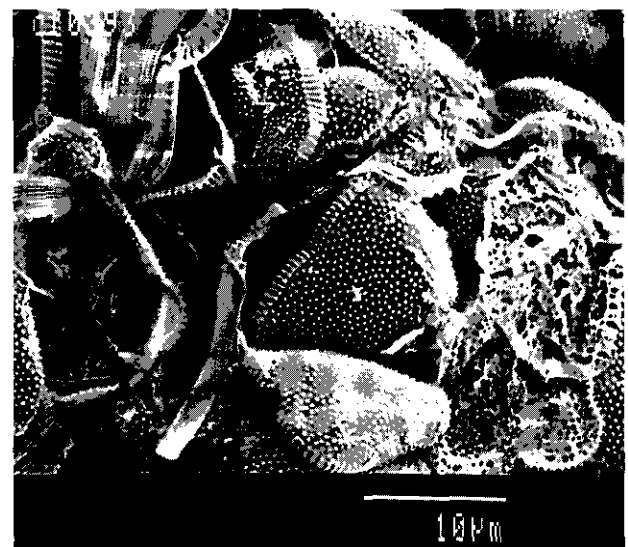
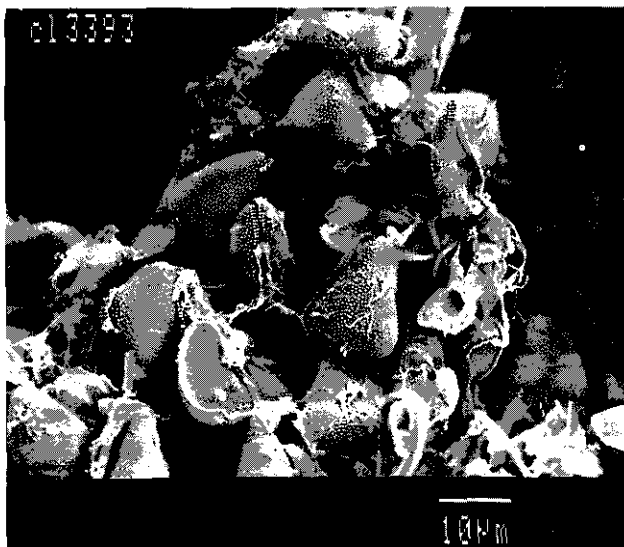
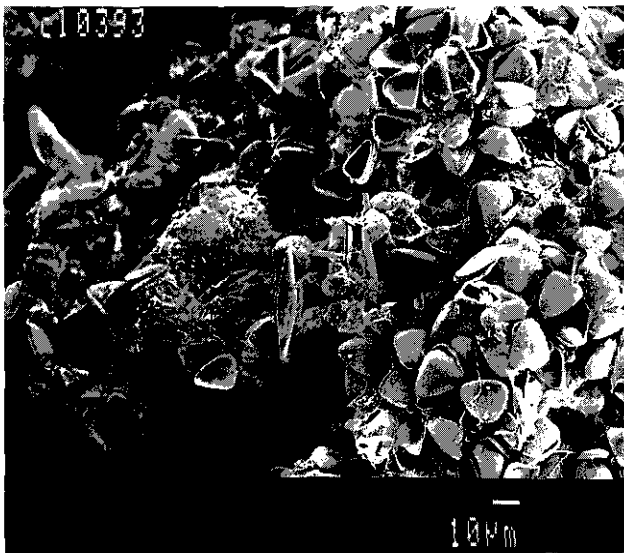
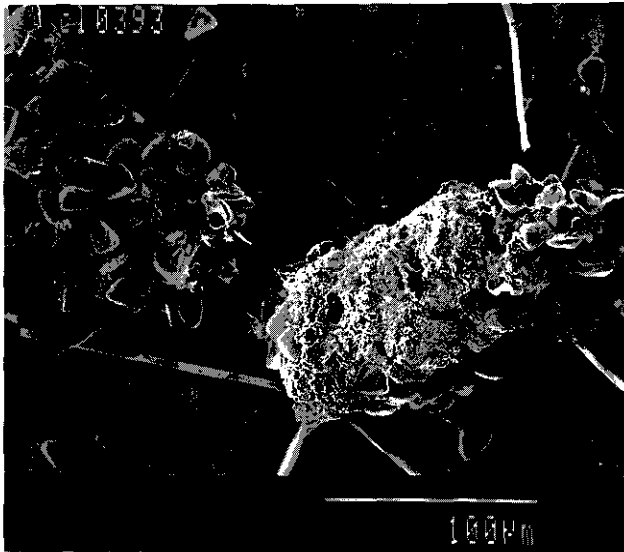
Figur 3.9. Gennemsnitlig sedimentationshastighed for de dominerende fytoplankton arter. Eksponeringsperioden er angivet under søjlerne. (a) NPSi21 og (b) NP22.

Sedimentationshastighed

Beregning af sedimentationshastigheden viste (figur 3.9), at *Prorocentrum minimum* næsten ikke sedimenterede (max. 0,07 m d⁻¹; gennemsnit for alle estimer 0,017 m d⁻¹). Dette er naturligt, da *Prorocentrum minimum* er lille (ca. 10 µm ESD) og aktivt svømmende. *Ceratium tripos* sedimenterede med 0,01-0,07 m d⁻¹ under oplomstringsfasen og biomasse maksimumet, men med 0,07-0,44 m⁻¹ under henfaldsperioderne. *Rhizosolenia fragilissima* havde under den initiale kraftige sedimentation i NPSi21 en sedimentationshastighed på 0,5-0,6 m d⁻¹ mod 0,04-0,05 m d⁻¹ i samme periode i NP22. Resten af forsøget lå sedimentationshastigheden i begge sække mellem 0,04 og 0,29 m d⁻¹.

Aggregater af tomme alger

Ud over de intakte algeceller fandtes i fælderne mange tomme skaller (theca) fra *Prorocentrum minimum* og mange af disse fandtes i mere eller mindre velafgrænsede klumper. Estimer af mængden af tomme theca i disse klumper er forbundet med meget stor usikkerhed, da optælling af disse kun kunne lade sig gøre lysmikroskopisk i de mindste af klumperne. Der er lavet et estimat af antal theca pr. volumenenhed af disse små klumper, og denne faktor er anvendt til at estimere indholdet i de større klumper på baggrund af volumenopmålinger. Estimerne viste, at sedimentationen af tomme theca i gennemsnit over hele perioden var ca. 3 gange højere end af hele celler. Dette er formentligt en underestimering,



*Figur 3.10. Scanning elektronmikrografier af materiale fra sedimentfælderne: Fækalier/aggregater indeholdende mange tomme skaller fra *Prorocentrum minimum* celler. Målestok er anført under hvert billede.*

da de større klumper virkede mere tæt pakkede. Yderligere var de meget store klumper ikke repræsenteret i den optalte mængde af sedimenteret materiale. Kun frie tomme theca blev talt i vandprøverne, da klumperne fandtes i så lav koncentration, at de ikke var repræsenteret i de optalte prøvemængder. Der kan på den baggrund beregnes en teoretisk minimumsværdi for de tomme thecas sedimentationshastighed på 5 m d^{-1} .

Græsningsprodukter

Baseret på lys- og scanning elektronmikroskopisk undersøgelse af materiale fra fælderne må det antages, at de omtalte aggregater/klumper var fækalier eller dele af sådanne, og yderligere at disse fækalier indeholdt cellevægge fra andre algearter end *Prorocentrum minimum* (figur 3.10).

Detritusaggregater

Også en del store detritusaggregater samt enkelte bentiske blågrønalger (*Lyngbya* sp.) og kiselalger var blandt fældematerialet (især i NP22). Disse komponenter forekom næsten udelukkende i fældematerialet opsamlet over de 3 første dage efter starten på forsøget. Det er således sandsynligt, at dette materiale stammede fra opsætningen af sækkene, hvor den megen aktivitet i vandet kunne have forårsaget resuspension af bentisk materiale. Biomasse mæssigt var blågrønalgerne uden betydning for sedimentationen, hvilket ikke var tilfældet med detritusaggregaterne. Da et volumen/kulstofforhold for aggregatene ikke kendes kan kulstoffmassen af disse ikke bestemmes, men da sedimentationen af alger i NP22 i perioden 19-22. juli var meget lav, og mængden af detritus samt blågrønalger var høj, må en stor del af den målte sedimentation af POC, PON og klorofyl *a* stamme fra dette detritus.

3.3 Stofbalance

Tab af kvælstof

For NPSi21 og NP22 kendes vandkoncentrationerne af PON og DIN (nitrat+nitrit og ammonium) gennem forsøget, samt sedimentationen af PON. På denne baggrund kan der opstilles en delvis massebalance for kvælstof i sækkens øverste 2,5 m vand (figur 3.11). Når DIN og PON summeres ses, at kvælstofmængden i disse to puljer faldt gennem forsøget. Den akkumulerede sedimentation kunne ikke svare for denne nedgang.

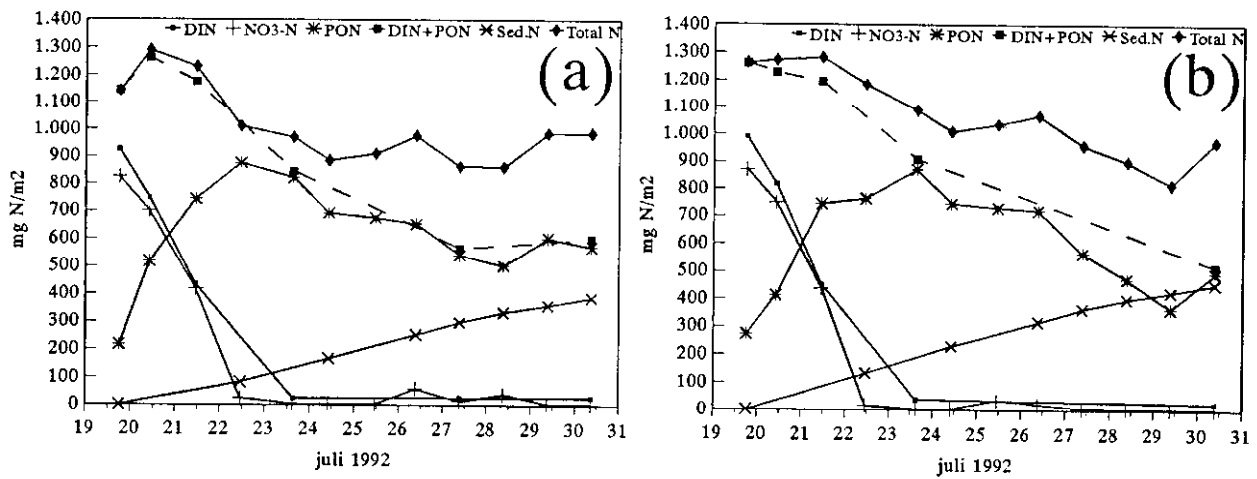
Ammonium er målt med mindre tidsmæssig opløsning end de øvrige puljer. Da koncentrationen af dette stof efter få dage var af minimal betydning sammenlignet med de øvrige puljer er fejlen ikke stor, når der ved beregning af den samlede mængde kvælstof i de kendte puljer er antaget en lineær udvikling mellem de enkelte målepunkter for ammonium. Yderligere er det antaget, at sedimentationen er jævnt fordelt under hver fældeeksponering. Det fremgår, at den totale mængde kvælstof i DIN samt suspenderet og sedimenteret PON faldt gennem forløbet. Ved PON maksimumet var tabt hhv. 11 og 14% og ved forsøgets slutning hhv. 14 og 23% af den initiale kendte kvælstofmængde i NPSi21 og NP22.

Forklaring på tab

En ukvantificeret pulje, som den tabte mængde kunne være overført til, er opløst organisk kvælstof (DON) som et resultat af exudation, lysering af celler, græsning (sloppy feeding) eller ekskretion; en anden mulig pulje er frit kvælstof (N_2) som følge af denitrifikation. En akkumulering af PON i den nederste meter af vandsøjlen (ikke målt) som følge af

migrerende organismer er også en mulighed, f.eks. er vertikale døgnvandring set hos *Prorocentrum minimum* (Tyler & Seliger, 1981). Endelig kunne kvælstof være tabt fra sækken via en lækage eller det tilsyneladende tab kunne være et resultat af fortynding med vand fra Knebel Vig tilført med bølgerne.

Det er ikke muligt at bestemme omfanget af de enkelte muligheder, men der har med al sandsynlighed været en opbygning af DON puljen. Vedrørende denitrifikation kan det anføres, at dette kræver anaerobe forhold, hvilket muligvis kan dannes i det sedimenterede materiale på sækkens bund. Sedimentation af materiale til bunden er dog medregnet i tabsopgørelse; om det akkumuleres eller denitrificeres på bunden er ligegyldigt i denne sammenhæng.



Figur 3.11. Tidsmæssig udviklingen for de kendte organiske og uorganiske kvælstofpuljer samt for summen af disse. (a) NPSi21 og (b) NP22.

Tabel 3.5. Regnskab over de dominerende algearters biomassetilbagegang og sedimentation i perioden 25-30. juli. Faldet der ikke skyldes sedimentation betegnes den potentielle minimumsgræsning. Turn-over ved hhv. sedimentation og græsning er angivet.

Sæk nr.	NPSi21			NP22		
	Pro.	Cer.	Rhiz.	Pro.	Cer.	Rhiz.
Start biomasse, mg C m ⁻²	2547	623	1304	2738	543	1255
Fald biomasse, mg C m ⁻²	1044	415	1075	1383	457	1171
Sedimentation, mg C m ⁻²	0	93	193	73	89	139
Græsning (minimum), mg C m ⁻²	1044	322	882	1310	368	1032
Turn-over ved sedimentation, d ⁻¹	0,000	0,045	0,050	0,007	0,057	0,042
Turn-over ved græsning, d ⁻¹	0,103	0,155	0,230	0,128	0,230	0,310

Sedimentation - græsning

Det er muligt i et vist omfang at lave beregninger over de enkelte algearters skæbne. Under fasen med faldende biomasse, kan det antages, at tabet skete via sedimentation og via omsætning ved heterotrofe organismer (græsning). Da sedimentationen er målt, kan græsningen beregnes (tabel 3.5). Dette er kun et minimums-estimat af græsningen, da en samtidig primærproduktion må forventes.

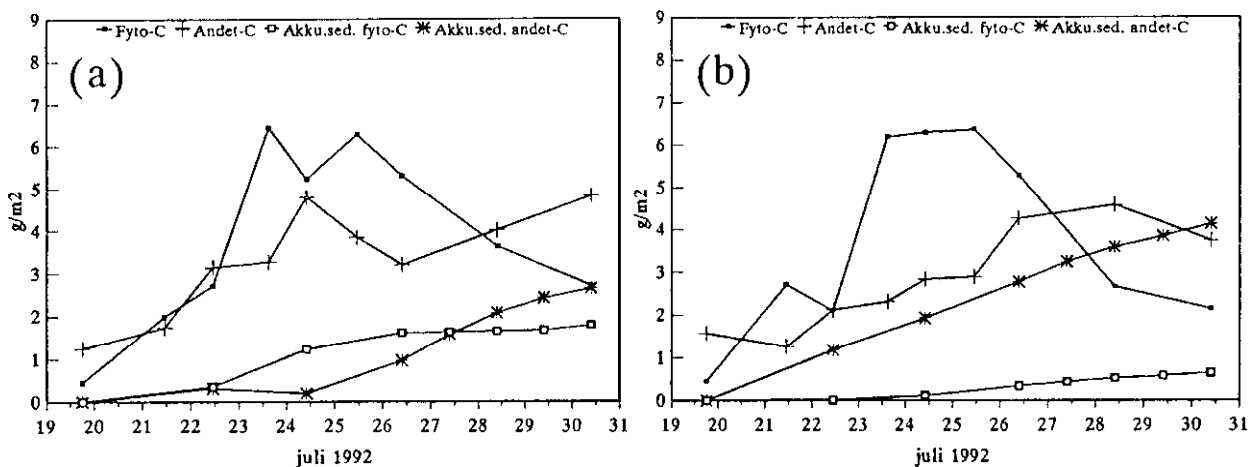
Prorocentrum græsses

Af tabel 3.5 fremgår, at for *Prorocentrum minimum* må græsning have været den primære grund til faldet i biomasse. For begge sække bekræftes dette af, at en stor mængde tomme skaller fra *Prorocentrum minimum* fandtes i fælderne i fækalielignende klumper (figur 3.10). Et konservativt skøn over mængden af genkendelige tomme skaller i de fækalielignede klumper er lavet på baggrund af mikroskopiske optællinger på fældematerialet. Det viser, at tomme skaller forekom i mængder, der langt oversteg antallet af fulde celler. Dette viser således også, at det sedimenterende materiale for en stor del stammede fra den heterotrofe omsætning.

For alle tre algearter var den heterotrofe omsætning i vandmassen en vigtigere tabsproces end direkte sedimentation. Den estimerede daglige omsætning ved græsning (minimumsestimat) var mindst for *Prorocentrum minimum* og størst for *Rhizosolenia fragilissima*. Sedimentationen var kun af betydning for tabet af *Ceratium tripos* og *Rhizosolenia fragilissima* og svarede i den sene fase til 4-6% af biomassen pr. dag. Til sammenligning var sedimentationstabt under 2% d⁻¹ under opblomstringsfasen, undtagen i sækken med silikattilsætning, hvor tabet af *Rhizosolenia fragilissima* var 18% d⁻¹. Det fremgår således, at de store alger har det største tab både i form af heterotrof omsætning og af direkte udsynkning. En fejlkilde i denne analyse kan være, at *Prorocentrum minimum* har en højere vækstrate end de større alger, således at tabet i form af heterotrof omsætning i højere grad vil være underestimeret for denne art.

Skøn over algekulstof

Som tidligere omtalt er der problemer ved at estimere algerne totale biomasse da 1) en omregning fra klorofyl *a* til fytoplanktonkulstof er vanskeliggjort af algerne stærkt varierende C/Chl forhold og 2) opgørelserne over algebiomassen af de dominerende arter ikke repræsenterer den samlede fytoplanktonbiomasse. For dog at få et skøn over den samlede algebiomasse er der her taget udgangspunkt i opgørelsen over biomassen af de dominerende arter, og det er søgt at korrigere for mængden af ikke optalte alger. De i tabel 3.3 anførte regressioner viser, at POC stiger 1,9 (NPSi21) og 1,6 (NP22) gange hurtigere end de målte algebiomasser (fyto-C) i forsøgets første dage. I perioden med faldende algebiomasse (25-30. juli) var regressionskoefficienterne hhv. 1,0 og 1,1 mellem det estimerede fytoplanktonkulstof og POC.



Figur 3.12. Overslag over total fytoplanktonkulstof (fyto-C) og andet kulstof (andet-C) i det suspenderede stof og i den akkumulerede sedimentation. Overslaget baserer sig på mikroskopiske opmålinger og POC data; se teksten for detaljer. (a) NPSi21 og (b) NP22.

Korrektion af alge- kulstof

Hvis koncentrationsudviklingen for POC udelukkende var styret af fytoplanktonudviklingen kunne man konkludere, at for at få den samlede algebiomasse måtte det opmålte algekulstof i starten skulle korrigeres med en faktor 1,6-1,9, men kun med en faktor 1,0-1,1 i den sene fase. Mikroskopiske vurderinger af de ikke optalte og -målte alger underbygger dog ikke denne forskel mellem de to perioder. Forklaringen er, at ud over den POC variation, der kan tilskrives algebiomassen, er der en generel stigning i POC mængden i løbet af forsøget, hvilket vil overestimere de omtalte regressionskoefficienter i perioder med stigende algebiomasse og underestimere i perioder med faldende algebiomasse. Det er derfor her valgt at antage, at opmålt algebiomasse er underestimerer den samlede algebiomasse med samme faktor i begge sække og på alle tidspunkter. Denne faktor er antaget at være gennemsnittet af de omtalte regressionskoefficienter, hvilket vil sige 1,4. Forudsat at omregningen fra cellevolumen til kulstof er rigtig, er således 71% af algebiomassen fordelt på de 3 dominerende arter.

Fyto-C og andet-C

Ved skelnen mellem fyto-C og andet-C, vil der selvsagt være forbundet en stor usikkerhed med estimatet af koncentrationerne af de to puljer. Til illustration af den tidsmæssige og indbyrdes variation mellem puljerne kan metoden dog forsvares. I både NPSi21 og NP22 var der forholdsvis ens udviklinger (figur 3.12): I løbet af de første dage voksede algebiomassen op og nåede maksimum dag 4. Dette niveau blev holdt i to dage hvorefter biomassen faldt og reduceredes med over 50% i løbet af de sidste 5 dage. Estimatet af andet-C er behæftet med en større usikkerhed, men helt generelt vokser denne pulje med en lavere hastighed end algebiomassen og når til gengæld et niveau der holdes i de 4-6 sidste dage af forsøget. Der er en tendens til at opbygningen af heterotrof biomasse og detritus i vandet forgår hurtigere i NPSi21 end i NP22.

Forskelle i sedimenta- tionsmønstre

Den største forskel i de to sække ses på sedimentationsmønsteret. I NPSi21 er der under opblomstringsfasen en kraftig sedimentation af fytoplanktonkulstof (*Rhizosolenia fragilissima*), men næsten ingen sedimentation af andet-C, mens der i den heterotrofe fase omvendt er en stor sedimentation af andet-C (her fækalier og andet detritus), men kun lille sedimentation af fytoplanktonkulstof. Omvendt var sedimentationen af fækalier og detritus (andet-C) stor under hele forsøget i NP22, mens en mindre sedimentation af fytoplanktonkulstof kun forekom under bloommaksimum og den efterfølgende fase. Så til trods for at sedimentationen af POC næsten er den samme i de to sække, og udviklingen i suspenderet fytoplankton og andet kulstof næsten er den samme, er der signifikant forskel på typen af sedimenteret materiale under opblomstringen.

Årsager til forskelle

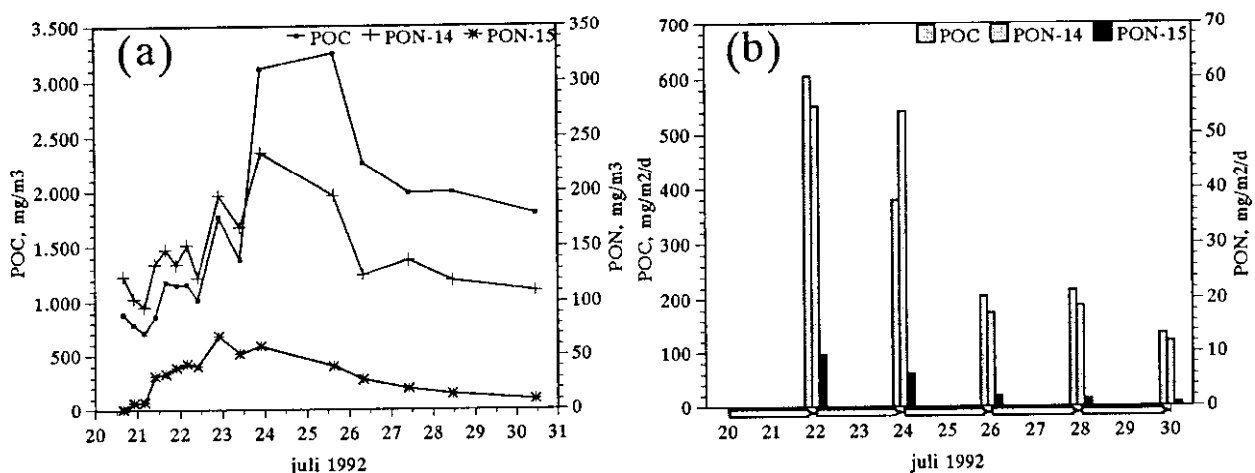
Forklaringen på den større sedimentation af primært *Rhizosolenia fragilissima* i NPSi21 skyldes silikatberigelsen, der tilsyneladende både forårsager en større produktion og en større synkehastighed af disse kiselalger. Hvorvidt synkehastigheden er påvirket via et øget aggregeringspotentiale og dermed større udsynkning (Kjørboe *et al.*, 1994) eller via en fysiologisk mekanisme for densitetsregulering er uvist. Baggrunden for forskellen i sedimentation af andet-C er ikke entydig. Mikroskopering har vist at materialet omfattede fækalier og andet detritus fra den heterotrofe omsætning og yderligere en del store detritusklatrer samt nogle bentiske blågrønalger og kiselalger. En del af forklaringen på forskellen i perioden 19-22. juli er givetvis, at NP22 har

modtaget en del resuspenderet bentisk materiale fra bunden under opsætning af sækken, og dette materiale sedimenterede ud i løbet af kort tid. Dette er kun en del af forklaringen, da der også i perioden 22-24. juli er en markant forskellig sedimentation af andet-C i de to sække, og materialet i denne periode ikke viste nogle tegn på at indeholde resuspenderede bentisk elementer, men var lig de græsningsprodukter der sås i resten af forsøget. Det er svært at se, hvorfor en mindre forskel i vandets fytoplanktonsammensætning skulle kunne have så stor indflydelse på de heterotrofe komponenter i fødenettet, at det kan forklare forskellen i produktion af ekskretionsprodukter i de to sække. En mulighed er, at kiselalgerne under opblomstringen i den silikatberigede sæk har udskilt mucus. En betragtelig udskillelse af transparent partikulært mucus er observeret i kulture af kiselalger og denne mucus er fundet af stor betydning for fytoplanktonaggregering (Alldredge *et al.*, 1993; Passow *et al.*, 1993; Kiørboe & Hansen, 1993). En sådan mucusudskillelse under opblomstringsfasen kan være med til at forklare den hurtigere kiselalgeudsynkning (pga. aggregering) i NPSi21 og samtidig er det muligt, at det partikulære mucus har hæmmet græsningen, og derfor har nedsat produktionen af sedimenterende fækaliemateriale i forhold til niveauet i sæk NP22.

3.4 Sedimentering af ny produktion målt ved ^{15}N -nitratindbygning

Kendt udviklingsmønster

I NPSi7 var udviklingen af suspenderet POC og PON (figur 3.13 a) meget lig udviklingen i sæk 20-22: I løbet af de første tre dage efter næringsstoftilsætningen voksede koncentrationerne af POC og PON. PON koncentrationerne nåede maksimumniveauet ca. 1 dag før POC toppede. Derefter faldt koncentrationerne hurtigt og nærmede sig et stabilt niveau sidst i perioden. Fra bloomets maksimum og perioden ud var koncentrationerne af uorganiske næringsstoffer på detektionsgrænsen (Giovanni Daneri, pers. komm.).



Figur 3.13. Suspenderet og sedimenteret biomasse i sæk NPSi7. (a) Suspenderet POC, PO^{14}N og PO^{15}N . (b) Sedimenteret POC, PO^{14}N og PO^{15}N . Eksponeringsperioden er anført under søjlerne.

Døgnvariation

Prøvetagningen under opbygningsfasen var hyppigere i denne sæk end i de øvrige, hvilket afslørede en udpræget døgnrytme i POC og PON koncentrationerne. Der var et udpræget fald i koncentrationerne i mørkeperioderne for både POC og PON, hvilket både kan skyldes tab til

puljen af opløst organisk stof, respiration (både fytoplankton og heterotrofe organismer) og sedimentation.

Sedimentationsmønster

Sedimentationen udviklede sig anderledes i denne søk (figur 3.13 b), idet sedimentation var højest i første del af perioden og ikke som i søk 20-22 højest umiddelbart efter biomasse maksimumet. POC sedimentationen aftog i løbet af opblomstringsfasen og stabiliserede sig under henfaldsfasen, mens den samlede PON sedimentation var mere ensartet høj under opbygningsfasen og lav under henfaldsfasen.

Stort tab af kvælstof

Den maksimale PON koncentration under bloomet plus den akkumulerede sedimentation indtil dette tidspunkt var 606 mg N m^{-2} , mens tilsætningen svarede til 725 mg N m^{-2} . Det vil sige, at 84% af det tilsatte kvælstof var indbygget på partikulær form. Regnet over hele perioden udgjorde sedimenteret og suspenderet PON kun 38% af den tilsatte kvælstof. Da der i lighed med de øvrige søkke var ubetydelige koncentrationer af uorganisk kvælstof fra tidspunktet hvor PON koncentrationen toppede, var der i denne søk et stort tab af kvælstof fra de kendte puljer (se afsnit 3.3 Stoffbalance for diskussion af mulige forklaringer).

C/N forhold

C/N forholdene i hhv. det suspenderede og det sedimenterede materiale viste tydelige forskelle i NPSi7. I vandprøverne var C/N forholdene mellem 5,2 og 7,2 indtil PON koncentrationen toppede og forholdet steg kraftigt til et niveau på 13-15. Dette var en udvikling tilsvarende den i søk 20-22. Det sedimenterede materiale viste et højere C/N forhold end vandets de første par dage, mens sammensætningen var ens under de sidste dage af opblomstringsfasen. Under henfaldsfasen steg også C/N forholdet i det sedimenterede materiale, men kun til et niveau på ca. 10,5, hvilket er lavere end i det suspenderede materiale. Denne forskel under henfaldsperioden er således betydeligt mere udpræget i denne søk end det der kun sås som tendenser i søk 20-22.

¹⁵N tilsætning

Ved næringsstofftilsætningen blev ¹⁴N og ¹⁵N tilsat i et forhold på 1:1, og fordelingen af ¹⁴N og ¹⁵N i den suspenderede PON pulje viste følgende karakteristika (figur 3.13 a):

Isotopratio i PON

1) De første dage foregik indbygningen af ¹⁴N og ¹⁵N stort set med lige stor rate dvs. i et forhold på 1:1. Dette tyder på, at puljen af uorganisk N tilstede før tilsætningerne var ubetydelig, og at der ikke var isotopdiskriminering af betydning.

Stor total flux

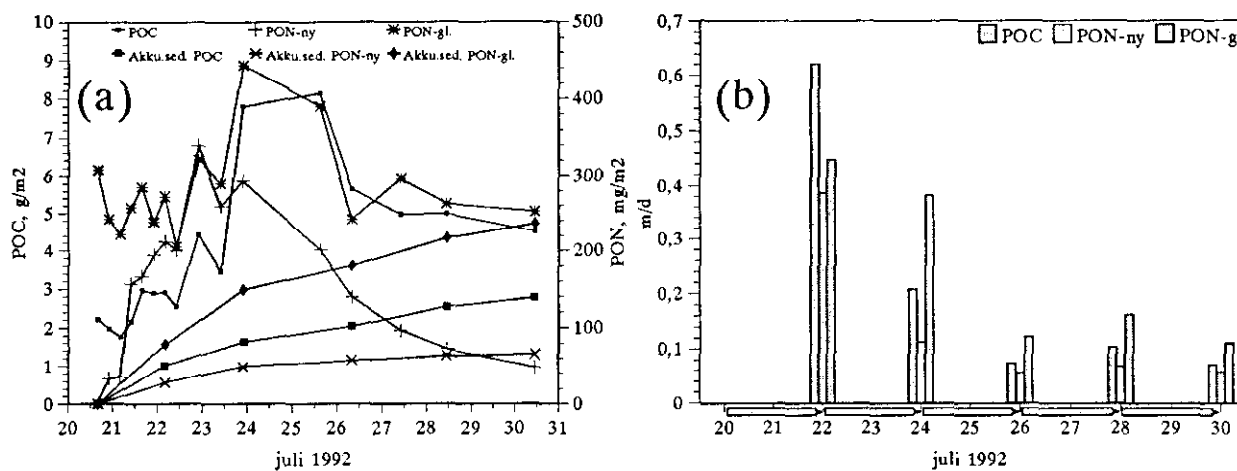
2) Mørkenedgangen af PON var for de første døgn størst for PO¹⁴N puljen, der fra starten havde en koncentration på ca. 90 mg m^{-3} , hvorimod PO¹⁵N koncentrationen steg eller var stationær om natten. Tabet af ¹⁴N må således have sket fra en forholdsvis stor og langsomt omsættelig pulje hvori det nyligt indbyggede N kun deltog i lille omfang. Den indbygning, der omvendt kunne spores umiddelbart efter tilsætningen af tracer viser, at der er en større flux af kvælstof mellem den uorganiske og den partikulære organiske pulje end netto ændringerne af total PON afslører.

3) Hvor der de første dage stort set var en indbygning i forholdet 1:1 af ¹⁴N og ¹⁵N, stoppede ¹⁵N indbygningen gradvist, mens PO¹⁴N puljen fortsat øgedes. En del af forklaringen kan være, at forholdet mellem ¹⁴N

og ^{15}N i det uorganiske opløste kvælstof var øget pga. remineralisering af gammelt PO^{14}N . Det er dog usandsynligt at DIN puljen skulle bestå udelukkende af ^{14}N , så kvælstofudveksling med ikke estimerede puljer er også muligt, f.eks. resuspension af gammelt sedimenteret PO^{14}N fra sækkens bund på tidspunktet, hvor al DIN var brugt op.

Stor fjernelse af PO^{15}N

4) Under henfaldet reduceredes PO^{15}N koncentrationen relativt mest (i alt med 85% over 6 dage; PO^{14}N reduceredes 50%). Angivet som procentvis henfald af den tilvækst der kom under opblomstringsfasen var der en reduktion på 85% for både PO^{14}N og PO^{15}N . Det forskellige relative tab af PO^{15}N og PO^{14}N viser, at isotoperne er indbygget i forskellige puljer med hver sin omsætningsvej.



Figur 3.14. Suspenderet biomasse og akkumuleret sedimentation (a) samt sedimentationshastighed (b) af POC, PON_{ry} og PON_{gl} i sæk NPSi7.

Nyt og gammelt PON

Antages det, at al indbygning baseret på den udefra tilførte mængde næringsstof (ny produktion) skete i forholdet 1:1 mht. ^{14}N og ^{15}N , kan PON tilvæksten forårsaget af ny produktion beregnes som $\text{PO}^{15}\text{N} \times 2$ (PON_{ny}), mens PON baseret på næringsstoffer tilstede i sækken før næringstilsætning (PON_{gl}) udgjorde resten af den totale PON mængde (figur 3.14 a). På denne måde illustreres tydeligt, at der de første dage kom en kraftig forøgelse af PON_{ny} , mens der den 22-23. juli også skete en forøgelse af PON_{gl} . Yderligere ses, at størstedelen af PON_{ny} biomassen blev tabt igen, mens PON_{gl} havde en netto-tilvækst under forsøget. Når sedimentationen omregnes på lignende måde, ses at sedimentationsraten var størst under opbygningsfasen, samt at sedimentationen af PON_{gl} var betydeligt højere end af PON_{ny} . Det fremgår yderligere, at sedimentationen af PON_{ny} var ubetydelig i forhold til det svind, der var i den suspenderede mængde PON_{ny} under henfaldsfasen. Sammenholdes biomasseopbygningen plus sedimentationen med den tilsatte mængde af ^{15}N , ses det, at i perioden indtil PON koncentrationens maksimum (4 dage) svarede PO^{15}N opbygningen kun til ca. 50% af tilsætningen, og over hele perioden svarede den kun til 15% af ^{15}N tilsætningen.

Større tab af ^{15}N end ^{14}N

"Tabet" af PO^{15}N var således betydeligt større end af PO^{14}N . Dette tyder på, at tabet ikke skyldes et hul i sækken, da dette ville have forårsaget samme procentvise tab af PO^{15}N og PO^{14}N (under forudsætning af en

homogen vandsøjle). "Tabsmekanismen" må derimod have virket kraftigst på de puljer, hvor ^{15}N var opkoncentreret. En del af tabet kan skyldes opbygningen af den ikke målte DON pulje, der netop får sit input fra forskellige PON puljer. Opbygningen af PO^{15}N koncentrationen på baggrund af tilsat DI^{15}N vil naturligt følges af en øget koncentration af DO^{15}N . Tabet fra DON puljen vil modsat skyldes indbygning i PON, men så længe DON puljen ikke er i isotopligevægt, må der forventes en relativt større netto indbygning af ^{15}N end af ^{14}N i denne pulje. Det kan dog ikke afgøres hvor vigtig DON puljen konkret er for forklaringen af det forskellige tab af PO^{15}N og PO^{14}N , men det virker ikke sandsynligt at hele kvælstoftabet i denne sæk skyldes en opbygning af DON puljen.

Relateres sedimentationen til den suspendede biomasse i form af de udregnede sedimentationshastigheder (figur 3.14 b), ses generelt at sedimentationshastigheden aftog i løbet af opblomstringen, og at den var stabil under henfaldsperioden. Yderligere ses, at PON_{gl} sedimenterede hurtigere end både POC og PON_{ny} under hele perioden undtagen under de første 2 døgn's fældeeksponering. Materialet dannet på baggrund af det tilsatte næringsstof (dvs. i første omgang algebiomasse), havde således en karakter der gjorde, at det sank langsommere end det gamle materiale (der i højere grad også talte heterotrof biomasse og detritus). Under de to første dage med kraftig vækst, var der dog en hurtig sedimentation af PON_{ny} , hvilket formentligt skyldtes *Rhizosolenia fragilissima*'s hurtige sedimentation under forhold med rigelige næringsstoffer lige som i sæk NPSi21 (se afsnit 3.3).

3.5 Samlet beskrivelse af opblomstringer og sedimentation

Vækstfasen; opsummering

Vandet fra Knebel Vig, der lukkedes inde i plastsækkene var præget af lave koncentrationer af næringsstoffer og formentligt et veludviklet heterotroft samfund. Ved tilsætning af næringsalte startede algerne et hurtigt optag af næringsioner inkl. nitrat, og væksthastigheden steg, hvilket bevirkede en biomassestigning. Algenes intracellulære overskud af nitrogen udlignedes i løbet af et par dages fortsat vækst. Yderligere karakteriseredes vækstperioden af en stor udveksling mellem den partikulære og de opløste puljer af kvælstof, samt af døgnsvingninger i den partikulære puljes størrelse. Både kiselalger og furealger voksede op, og de dominerende arter *Prorocentrum minimum*, *Ceratium tripos*, *Rhizosolenia alata* og *Rhizosolenia fragilissima* er alle arter, der ofte er dominerende i Kattegat og Øresund i sommer og efterår (Thomsen, 1992; Olesen & Lundsgaard, 1992), dog med lavere biomasser pga. den lavere næringsstofmængde. Hos den antalsmæssigt dominerende art *Prorocentrum minimum* har det tidligere i laboratorieforsøg været vist, at næringsoptagelsen og celleveksten afkobles i forbindelse pulstilsætning af næring (Sciandra, 1991). Yderligere er arten kendt for masseopblomstringer ("red tides"; Tyler & Seliger, 1981).

I de første dage med kraftig vækst baseret på ny produktion bestod sedimentationen overvejende af materiale, der var til stede ved forsøgets start (bl.a. resuspenderet bentisk materiale), og i visse sække af nyproducerede kiselalger (*Rhizosolenia fragilissima*). De første dage var der en bemærkelsesværdig høj sedimentation af pigmentholdigt materiale, hvilket i visse sække skyldtes udsynkningen af disse kiselalger og i andre skyldtes indholdet af resuspenderet bentisk materiale, der var

meget pigmentholdigt (jævnfør resuspensionsforsøget; kapitel 4).

Stor dynamik ved opblomstringens maksimum

Senere begyndte de uorganiske næringsstoffer at blive begrænsende i takt med at de tilsatte uorganiske næringsstoffer var blevet indbygget i den organiske pulje. Algerne var imidlertid fortsat i stand til at fixere kulstof, hvilket bevirkede, at C/N forholdet i den partikulære pulje øges. Den biologiske baggrund kan være følgende: 1) Algernes interne C/N forhold øgedes ved f.eks. opbygning af kvælstoffattige depotstoffer eller ved vækst baseret på interne puljer af kvælstof. 2) Det herbivore zooplankton havde på dette tidspunkt en græsningskapacitet, der muliggjorde en effektiv omdannelse af autotrof produktion til heterotrof biomasse, hvilket under forudsætning af et højere C/N forhold hos græsserne gav det beskrevne resultat. 3) I stedet for overførsel til heterotrof biomasse, kan fænomenet skyldes en ophobning af kvælstoffattigt detritus. Dette kan være et resultat af græsning (ved sloppy feeding eller ekskretion) eller af død og nedbrydning af alger f.eks. som følge af virusangreb (Bratbak *et al.*, 1993). Forklaring 1) underbygges af, at algebiomassen bestemt ved mikroskopering nåede maximum samtidig med POC dvs. senere end for PON. Både forklaring 2) og 3) kræver en hurtig remineralisering af kvælstof for at der ved kulstoffixering kan "pumpes" yderligere kulstof i POC puljen uden at PON puljen ændres. Der sker en betydelig græsning af algebiomassen, hvilket medførte at der i fælderne var fækalier med et stort indhold af tomme theca fra *Prorocentrum minimum* samt rester fra også andre algearter. Fækaliernes størrelse tydede på, at de kom fra copepoder, mens de løsere aggregater af detritus formentligt omfattede fækaliemateriale fra andre organismer.

Samme sammensætning i fælder og vand

I de sidste dage af algeopblomstringen havde det sedimenterende materiale en lignende sammensætning af klorofyl *a*, POC og PON som det suspendede materiale, dvs. samme C/Chl og C/N forhold. Denne afspejling af vandmassens sammensætning i det sedimenterende materiale fortsatte under den heterotroft dominerede fase. Der var dog i visse sække en tendens til, at C/N forholdet var lavere i fælderne end i vandet under den heterotrofe fase, og i en enkelt sæk var det et signifikant lavere forhold. Dette er i umiddelbar modstrid med undersøgelser fra Kattegat, der viser, at det sedimenterende materiale på alle tidspunkter af året har et højere C/N forhold end det suspendede materiale (Olesen & Lundsgaard, 1992). Den præcise baggrund for forskellene kendes ikke, men af betydning kan have været systemernes forskellige dybde, og dermed partiklernes forskellige opholdstid. Yderligere vil der i det naturlige system under en sommersituation ikke forekomme pludselige næringssalt stigninger af en størrelse som i dette forsøg.

Artsforskelle mht. tabsprocesser

Der var forskel på hvor meget sedimentationen betød tabsmæssigt for de forskellige algearter; af de dominerende arter sedimenterede således kun de store furealger og kiselalger, mens den lille svømmende flagellat *Prorocentrum minimum* stort set ikke sedimenterede. Til gengæld var der en stor sedimentation af fækalielignende aggregater indeholdende mange rester af algevægge, specielt fra *Prorocentrum minimum*, og faldet i biomasse efter algebiomassens maximum tydede også på en betydelig græsning af de store alger. Generelt udgjorde produkterne fra den heterotrofe omsætning størstedelen af sedimentationen, dvs. ca 60% i NPSi21 og ca. 90% i NP22 set over hele forsøgsperioden. Kun under opblomstringen i de silikatbereggede sække var der en betydelig direkte udsynkning af algemateriale, nemlig kiselalgerne

Rhizosolenia fragilissima der havde et dagligt tab på 18% af den suspendede biomasse.

Gammelt materiale sedimenterer hurtigt

Der var en generelt lavere sedimentationshastighed for materialet dannet på basis af de tilsatte næringssalte (PON_{ny}) end for materialet indeholdende næringsstoffer fra før tilsætningen (PON_{gl}). Når det ofte anføres, at ny produktion svarer til den del af produktionen, der sedimenterer ud af systemet igen, gælder sammenhængen primært for et systems overordnede massebalance set over en længere periode.

Hurtig sedimentation af ny produktion

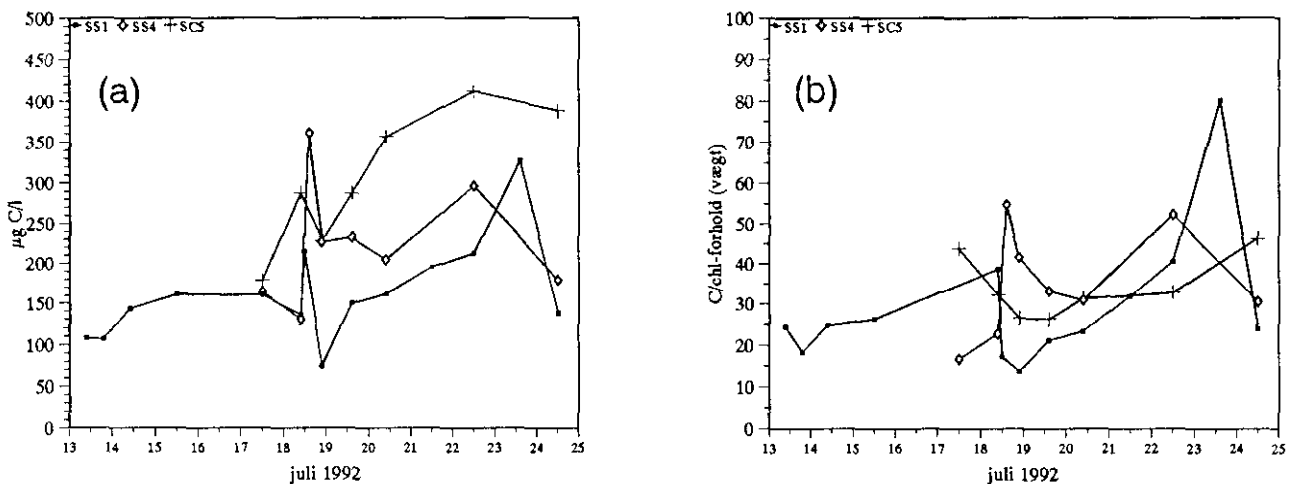
Resultaterne fra ^{15}N -forsøget tyder imidlertid på, at de partikler/alger, der voksede op ved ny produktion (PON_{ny} under opblomstringen) sedimenterede hurtigere end partiklerne fra perioden med højere grad af recykling. Dette er et fænomen, der skyldes kiselalgerne hurtige udsynkning under opblomstringen i de silikatberigede sække, mens sække, der kun blev beriget med nitrat og fosfat ikke viste samme indikationer på hurtigere sedimentation af ny produktion. Fænomenet er således både knyttet til en bestemt algeart og til bestemte vækstforhold, der i naturen vil være mest sandsynlige under forårsopblomstringen. Omvendt er forholdene, hvor sedimentationen domineres af produkter fra den heterotrofe omsætning mere knyttet til de naturlige forhold i den fysiske zone i sommerperioden.

4. Sækkeforsøg med sedimentkontakt og kunstig ophvirvling

4.1 Fytoplankton-sammensætning, biomasse og sedimentation

Prorocentrum dominerer
fytoplankton-biomassen

I de fire søkke med sedimentkontakt (SS1, SC2, SS4 og SC5) dominerede den lille hjerteformede furealge *Prorocentrum minimum* algebiomassen i hele undersøgelses-perioden (13-25. juli). Størrelsen af *P. minimum* varierede kun ubetydeligt i løbet af undersøgelsen med en gennemsnitlig længde på 16 μm (SD \pm 3 μm) og bredde på 10 μm (SD \pm 2 μm). Med undtagelse af perioden umiddelbart efter den kunstige ophvirvling i søk SS1 og SS4 tegnede *Prorocentrum minimum* sig for over 80% af algebiomassen i SS1, SS4 og SC5 (ingen algetælling i SC2). Den øvrige fytoplankton-biomasse udgjordes især af furealgerne *Ceratium tripos* og *Prorocentrum micans*, kiselalgerne *Rhizosolenia alata* og *Rhizosolenia fragilissima* samt mere sporadisk af blågrønalgerne *Lyngbya* spp. og *Oscillatoria* spp. I umiddelbar forlængelse af den kunstige ophvirvling den 18. juli i søkkene SS1 og SS4 var der en øget forekomst af millimeterlange trådformede blågrønager i SS1, især af *Oscillatoria* spp. samt en del pennate bentiske kiselager. Ophvirvlingen den 13. juli medførte ingen synlig ændring i algesammensætningen.



Figur 4.1. (a) Biomasseudviklingen af *Prorocentrum minimum* opgjort på basis af celletællinger og volumenopmålinger i søkkene med kunstig ophvirvling (SS1 og SS4) samt kontrolsøkken (SC5). (b) Forholdet mellem den beregnede kulstofbiomasse af *Prorocentrum minimum* og målte koncentrationer af klorofyl a i de samme tre søkke.

Ophvirvling og ned-
synkning af algeceller

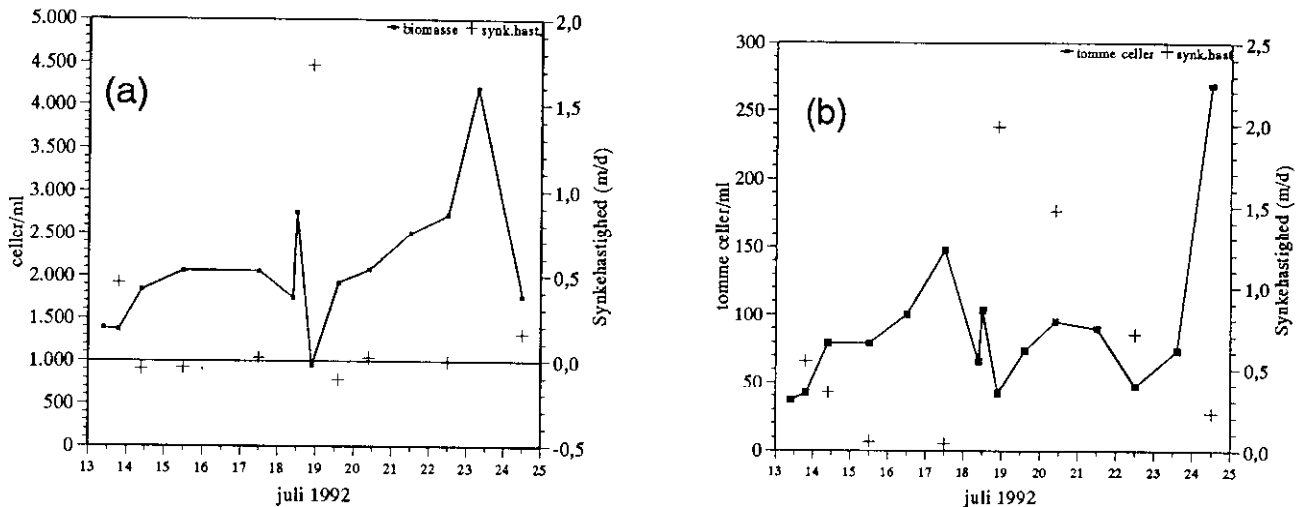
Biomassen af *Prorocentrum minimum* i søkkene SS1, SS4 og SC5 (figur 4.1 a) lå før ophvirvlingen den 18. juli på samme niveau (ca. 2000 celler ml^{-1} svarende til 180 mg C m^{-3} ; Edler, 1987). Efter ophvirvlingen var biomassen i de tre søkke (også i den uden kunstig ophvirvling, SC5) øget kraftigt (1,6 og 2,7 gange i henholdsvis SS1 og SS4). Tællingerne viste, at stigningen helt overvejende kunne tilskrives ophvirvling af formodentlig tidligere sedimenterede alger. Stigningen i kontrolsøkken (SC5) må derimod primært have været et resultat af en netto-vækst. Allerede 10 og 6 timer efter ophvirvlingen i henholdsvis SS1 og SS4, var der sket en kraftig reduktion af den samlede algebiomasse i SS1 på 65% og i SS4 på

37%. Faldet i algekoncentrationen i SS1 overgik stigningen som følge af de genophvirvlede alger med 183%.

Sedimentation af *Prorocentrum*

Sedimentationsundersøgelser af fytoplanktonet viste, at *Prorocentrum minimum* normalt ikke sank (figur 4.2 a). Kun i forbindelse med ophvirvlingerne den 13. og 18. juli sås en betydende sedimentation. I en sedimentationsperiode på 7½ time og startende 2 timer efter at ophvirvlingen den 13. juli i sæk SS1 var sluttet målte en gennemsnitlig synkehastighed på 0,5. Tre timer efter ophvirvlingen i den samme sæk den 18. juli og i en 6½ times periode var den gennemsnitlige synkehastighed for *Prorocentrum minimum* som helhed 1,7 m d⁻¹. I SS4 sank *P. minimum* i de 7 timer umiddelbart efter ophvirvlingen den 18. juli med en gennemsnitlig hastighed på 2,8 m d⁻¹. For en 1,5 m vandsøjle, svarende til fældedybden, giver det et specifikt sedimentationstab den 18. juli på 1,2 og 1,9 d⁻¹ for henholdsvis SS1 og SC4, hvilket forklarer mellem 50 og 100% af det registrerede biomassetab af *P. minimum* i perioden efter ophvirvlingen den 18. juli. Den store mængde resuspendert stof i sedimentfælderne især i sæk SS1 efter ophvirvlingen kan muligvis have medført en underestimering af den reelle sedimentation af *P. minimum*.

Forklaringen på den forhøjede sedimentations-rate i forbindelse med ophvirvlingerne gives nedenfor i afnittet, hvor algebiomassen sammenlignes med partikulært suspenderet stof.



Figur 4.2. Koncentration og synkehastighed af (a) intakte celler og (b) tomme skaller af *Prorocentrum minimum* i sæk SS1.

Sedimentation af andre alger

Det var især blågrønalger (*Oscillatoria spp.* og *Lyngbya spp.*) der tegnede sig for algesedimentationen. Synkehastigheden af *Lyngbya spp.* lå i undersøgelsesperioden på over 3 m d⁻¹. De to dominerende kiselalger samt i mindre omfang *Ceratium tripos* bidrog dog også til sedimentationen. *Rhizosolenia alata* sank den 24. juli i SS1 med en hastighed på 0,6 m d⁻¹ mens *R. fragilissima* og *Ceratium tripos* sank med hastigheder på under 0,1 m d⁻¹. *Prorocentrum micans* sank tilsyneladende slet ikke i perioder uden ophvirvling.

Fytoplankton upåvirket af ophvirvling?

Cellekoncentrationen af *P. minimum* fulgte i perioden efter den kunstige "storm" den 18. juli et forholdsvis ensartet mønster i alle 3 sækker (figur 4.1 a). Biomasse-tilvæksten i kontrol-sækken (SC5) er dog noget større end for de to "stormsækkes" vedkommende (SS1 og SS4).

Tomme skaller af *Prorocentrum*

Under hele perioden fandtes en del tomme skaller af *P. minimum* i suspension (figur 4.2 b). Det var svært præcist at afgøre, om en celle var tom eller ej især i fældematerialet, og det er sandsynligt, at der er en flydende overgang mellem døde og levende celler med hensyn til plasmaholdet. Opgørelsen af tomme skaller i suspension vil antageligt derfor kun repræsentere en procentdel af de døde celler. Stigningerne af tomme skaller i SS1 mellem den 16. og 17. juli samt mellem den 23. og 24. juli var knyttet til samtidige fald i koncentrationen af intakte celler. Da *Prorocentrum minimum* som tidligere beskrevet normalt ikke sank, skyldes biomasse-faldet sandsynligvis græsning, og at de tomme skaller kan tolkes som et produkt af denne græsning. Mikroskopiske undersøgelser af fældematerialet viste, at tomme skaller normalt sedimenterede med en hastighed på $0,5 \text{ m d}^{-1}$ (figur 4.2 b, minimumsværdier, da antallet af tomme celler i fældematerialet sandsynligvis er underestimeret, $SD \pm 0,4 \text{ m d}^{-1}$). Efter "stormen" var synkehastigheden 2 m d^{-1} . Da intakte celler som tidligere beskrevet ikke synker, vil en øget cellekoncentration i umiddelbart forlængelse af en kraftig resuspension sandsynligvis især være et resultat af akkumulerede døde celler af *Prorocentrum minimum* fra sedimentet. Denne akkumulering kan som nævnt være et resultat af en sedimentation af algeceller, der har været udsat for en græsning, men hvor de strukturelle komponenter er bevaret. En anden årsag til en ophobning af fytoplankton i sedimentet kan imidlertid skyldes en tilbageholdelse af partikler ved vandets passage tæt over sedimentoverfladen. Denne tilbageholdelse kan være aktiv som følge af bentiske organisms filtration (Sand-Jensen, 1993) eller passiv ved partiklernes cohesion til den biofilm der normalt dækker sedimentet med stort indhold af organisk stof (Stolzenbach *et al.*, 1992).

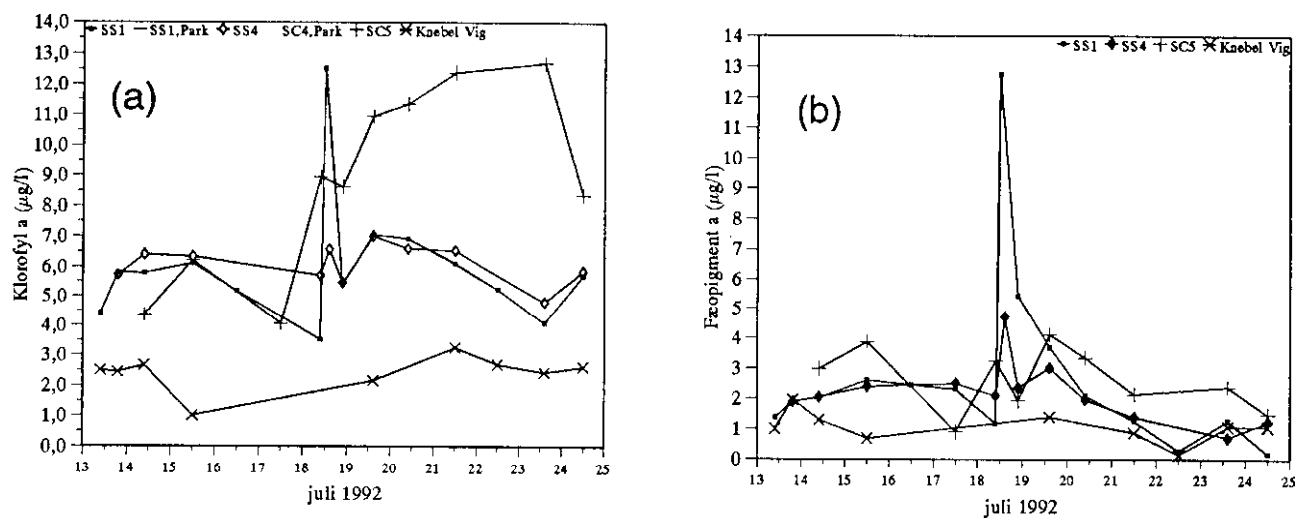
4.2 Koncentration og sedimentation af klorofyl og fæopigment i sammenligning med *Prorocentrum minimum*

Fytoplanktonbiomasse og klorofylkoncentration

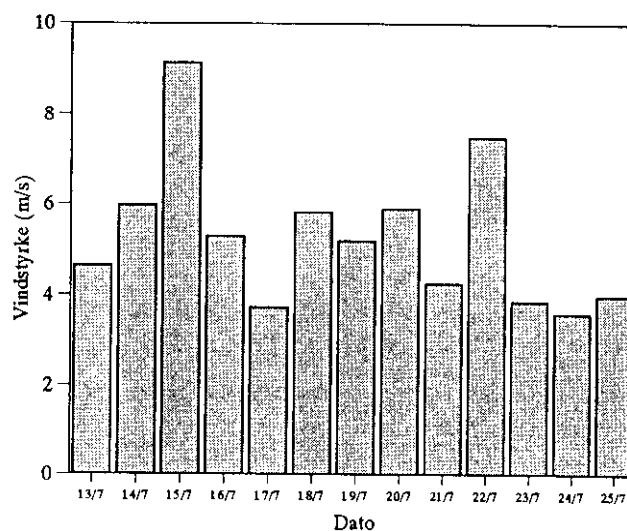
Klorofyl *a* koncentrationen i de tre sække svingede mellem 3 og 13 mg m^{-3} (figur 4.3 a) og fulgte i store træk det samme mønster som biomassen af *Prorocentrum minimum*. Forholdet mellem algebiomasse udtrykt som kulstofækvivalenter og klorofyl *a* i undersøgelsesperioden (figur 4.1 b) var i gennemsnit 29,9 ($n = 15$, $SD \pm 15,3$), 35,4 ($n = 8$, $SD \pm 18,9$) og 34,2 ($n = 7$, $SD \pm 5,9$) for henholdsvis SS1, SS4 og SC5. Forholdet i perioden før og efter ophvirvlingen steg med stigende algebiomasse, dvs. at det relative klorofyl *a* indhold faldt i perioder med nettovækst. I forbindelse med ophvirvlingen den 18. juli ændredes forholdet mellem biomassen af *Prorocentrum minimum* og klorofyl *a* drastisk og modsatrettet i de to sække. Den faldt nemlig til 15,4 ($n = 2$, $SD \pm 2,4$) i SS1 og steg til 48,2 ($n = 2$, $SD \pm 9,4$) i SS4. For SS4's vedkommende hang dette antageligt sammen med, at de mange ophvirvlede *Prorocentrum minimum*-celler havde et ubetydeligt klorofyl *a* indhold, mens den store stigning i klorofyl *a* koncentrationen i sæk SS1 skyldtes resuspension af bentiske alger (især blågrønaler, jfr. tidligere afsnit).

Fæopigment: pigmentandel og oprindelse

Fæopigment *a* udgjorde i undersøgelsesperioden bortset fra tidsrummet under og efter ophvirvlingen en rimeligt konstant andel på omkring 20% (gennemsnit: $22,5 \pm 2,3$ for alle tre sække, $n = 37$) af total-pigmentkoncentrationen (målt som summen af klorofyl *a* og fæopigment *a* koncentrationerne; figur 4.3 b).



Figur 4.3. Klorofyl *a* koncentration (a) og fæopigment *a* koncentration (b) i de to søkke med den kunstige sedimentophvirvlinger den 13. og 18. juli (sæk SS1 og SS4) samt i kontrolsækken (sæk SC5) og i selve Knebel Vig.

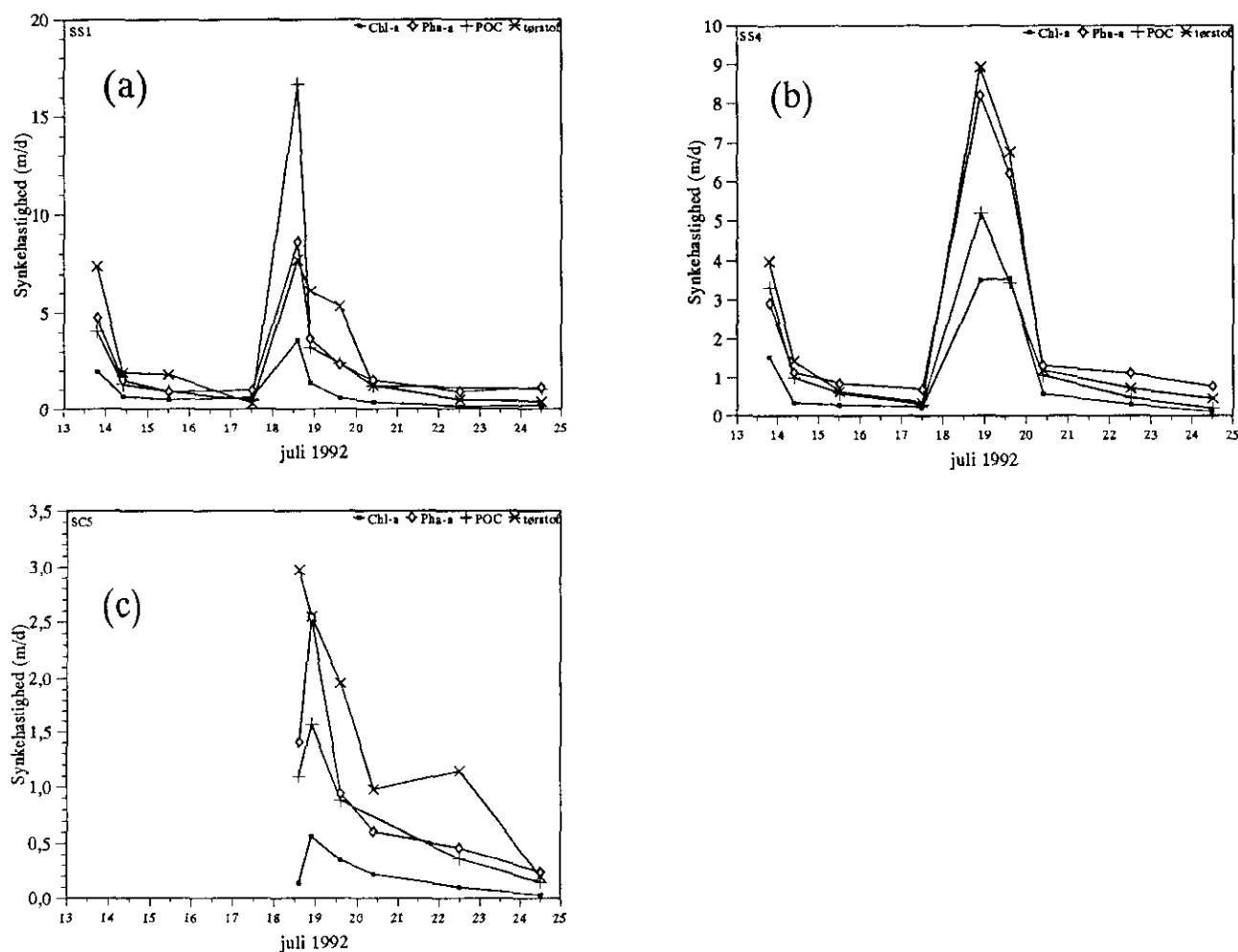


Figur 4.4. Vindhastigheden som daglig gennemsnit målt ved Tirstrup flyvestation i undersøgelsesperioden.

Variationsmønstret i kontrolsækken (SC5) korrelerede ubetydeligt med klorofyl *a* koncentrationen ($r^2 = 0,04$, $n = 10$), men i rimelig grad med vindforholdene ($r^2 = 0,55$, $n = 9$) (figur 4.4). Dette tages som udtryk for at fæopigment især havde sin oprindelse fra sedimentet. Dette understøttes af den kraftige koncentrationsstigning af fæopigment *a* i vandet, der sås i forbindelse med ophvirvlingen i sæk SS1 og SS4. En del af vandtes indhold af fæopigment skyldes dog muligvis fækaliemateriale stammende fra græsning af fytoplankton.

Klorofylsedimentation

Klorofyl *a* sedimentationen i sækkene var forholdsvis beskednen i perioderne uden genophvirvling, nemlig under 20% af den suspenderede klorofyl *a* biomasse pr. dag (svarende til synkehastigheder på mindre end $0,6 \text{ m d}^{-1}$; figur 4.5). Der ville dog være tale om en noget større relativ klorofyl *a* sedimentation, hvis *Prorocentrum minimum*'s andel af klorofyl *a* biomassen i vandet blev fratrukket. Ved lineær regression kan kulstof-klorofyl *a* forholdet i intakte celler af *P. minimum* i kontrolsækken estimeres til 38,5 ($r^2 = 0,81$). Den andel af vandets klorofyl *a*, der ikke omfatter *P. minimum*, kan på den baggrund beregnes til at have udgjort op mod 50% af den samlede klorofyl *a* (gennemsnitlig $32\% \pm 14\%$).



Figur 4.5. Gennemsnitlige synkehastigheder for klorofyl *a*, fæopigment *a*, partikulært kulstof (POC) og tørstof (DM) i stormsækkene SS1 (a) og SS4 (b) samt kontrolsæk SC5 (c).

Pigmentholdigt detritus

Som det fremgår af et tidligere afsnit, var der ingen af de hyppigt forekommende planktoniske alger, der kunne svare for så stor en biomasse. Da endvidere sedimenterende alger (især blågrønner) næppe på noget tidspunkt oversteg 25% ($C/Chl = 25$) af sedimenteret klorofyl *a*, kan det konkluderes at en stor del af klorofyl *a* antageligt var associeret detritus, samt at dette materiale sank betydeligt hurtigere end algerne.

Konstant ophvirvling i sækkene

Fæopigment *a* sank i perioder uden kunstig ophvirvling med gennemsnitlige hastigheder på $1,8 \text{ m d}^{-1}$ ($\pm 1,2$), $1,3 \text{ m d}^{-1}$ ($\pm 0,7$) og $1,5 \text{ m d}^{-1}$ ($\pm 1,0$) i henholdsvis sæk SS1, SS4 og SC5 (figur 4.5). Den stadige

ophvirvling af bentisk materiale, herunder også klorofyl *a* og fæopigment *a* fremgår også af den gennemgående 10 til flere hundrede procent større sedimentation i 2,5 m dybde sammenlignet med fælderne i 1,5 m dybde.

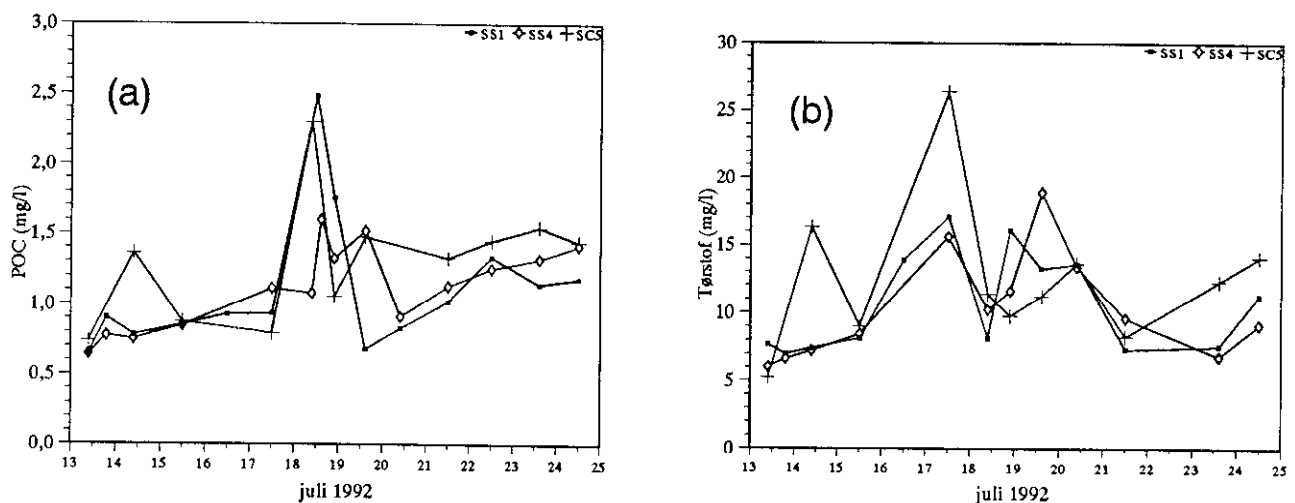
4.3 Suspension og sedimentation af partikulært kulstof og kvælstof samt tørstof og glødetab vurderet i forhold til *Prorocentrum minimum*

POC og PON

Partikulært kulstof (POC) og kvælstof (PON) fulgte ligesom klorofyl *a* biomassen af *Prorocentrum minimum* (figur 4.6 a). Der var dog ikke en tilsvarende stigning i forholdet mellem algebiomasse og POC som observeret mellem algebiomasse og klorofyl *a*. Under hele forløbet var forholdet mellem biomassen af *P. minimum* og POC 0,18 (\pm 0,06) i sæk SS1 og SS4, mens det var 0,22 (\pm 0,05) i sæk SC5.

C/Chl forhold

POC/klorofyl *a* ratioen efter ophvirvlingen i SS1 og SS4 steg fra værdier på omkring 150 op til 250. I kontrolsækken holdt niveauet sig på 154 (\pm 78). C/N forholdet lå rimeligt konstant under hele undersøgelsen i de to sække med ophvirvling på 9,4 (\pm 0,8) og i kontrolsækken på 8,0 (\pm 0,4). Den større POC koncentration i forhold til alger, klorofyl *a* og PON i sæk SS1 og SS4 vidnede om, at de kunstige ophvirvlinger antageligt har bevirket en ødelæggelse af sedimentets "forsegling", og dermed gjort det mere følsomt for gentagen ophvirvling i forbindelse med vind og strøm.



Figur 4.6. Koncentrationen af (a) partikulært kulstof (POC) og (b) tørstof i sækkene med kunstige ophvirvlinger den 13. og 18. juli (SS1 og SS4) samt i kontrolsækken (SC5) og i selve bugten (Knebel Vig).

Stor POC sedimentation

Den specifikke sedimentation af POC var som forventet højere end af klorofyl *a*, og var mere i overensstemmelse med fæopigment såvel hvad angår sedimentationsmønster som -hastigheder (figur. 4.5). Forskellen i POC sedimentation mellem de to fældedybder fulgte samme mønster som for klorofyl *a* og fæopigment *a* (omend mere udtalt).

Tørstofkoncentrationer indikerer resuspension

Tørstofindholdet i alle 3 sække i perioder uden kunstig ophvirvling lå rimeligt ens på omkring 10 g m⁻³ (figur 4.6 b). Heroverfor var niveauet i selve Knebel Vig i undersøgelsesperioden 4,9 g m⁻³ (\pm 0,7). Da fytoplankton biomassen målt som kulstof i sækkene udgjorde under 0,5 g m⁻³ (\approx max 1 g tørstof m⁻³), ses det at resuspensionen af bundmate-

riale var betydelig større i sækkene end udenfor. Da tørstof koncentrationen konsekvent var lavest i starten, må det forhøjede niveau skyldes en større vertikal advektion i sækkene end udenfor, hvilket sandsynligvis hænger sammen med en ren mekanisk effekt af plastvæggene på vandets bevægelser. Forhøjede tørstofkoncentrationer ses da også med ca. 1 dags forsinkelse i forhold til høje vindhastigheder. Tørstoffets bentiske oprindelse afspejler sig også i de gennemgående højere synkehastigheder (figur 4.5) samt i den kraftigt voksende sedimentation med dybden.

Glødetab

Den organiske fraktion (= glødetabet) af vandets tørstofindhold var den samme såvel ude som inde i sækkene: henholdsvis 44% ($\pm 7\%$) og 45% ($\pm 11\%$). Dette vidner om et relativt ringe mineralsk indhold i det ophvirvlede materiale. I forbindelse med de kunstige ophvirvlinger af bentisk materiale faldt den organiske fraktion i SS1 og SS4 dog til omkring 20%.

Heterotrof omsætning og sedimentation

Da *Prorocentrum minimum* som tidligere beskrevet ikke sank, kan de betydelige dag til dag fluktuationer af biomassen i løbet af undersøgelsen tages som udtryk for høje vækst- og græsningsrater. På trods af en rimelige korrelation mellem kulstofindholdet af den dominerende fytoplankton art *Prorocentrum minimum* og POC for alle sække i perioderne uden kunstig ophvirvling ($r^2 = 0,36$, $\alpha = 2,6$, $y_0 = 576$), udgjorde algekulstoffet kun ca 20% af POC. Dette vidner om en forholdsvis tæt kobling mellem fytoplankton og sandsynligvis hurtigvoksende heterotrofe organismer. Hvis skæringspunktet på omkring 600 mg m⁻³ tages som udtryk for det overvejende resuspenderede stof, vil den heterotrofe biomasse kunne estimeres til et niveau i størrelsesordenen med fytoplankton biomassen. Da det ikke kan afgøres om oprindelsen til vandets indhold af fæopigment *a* og detritusassocieret klorofyl *a* var bentisk eller planktonisk, kan den pelagiske græsningsbetingede sedimentation ikke bestemmes. Hvis det antages at den store fraktion af det løse (ikke-fytoplankton associeret) og relativt hurtigt synkende klorofyl *a* overvejende er et planktonisk fænomen, kan det konkluderes at en stor del af den pelagiske algeproduktion indirekte er kanaliseret til sedimentet via et eller flere heterotrofe led.

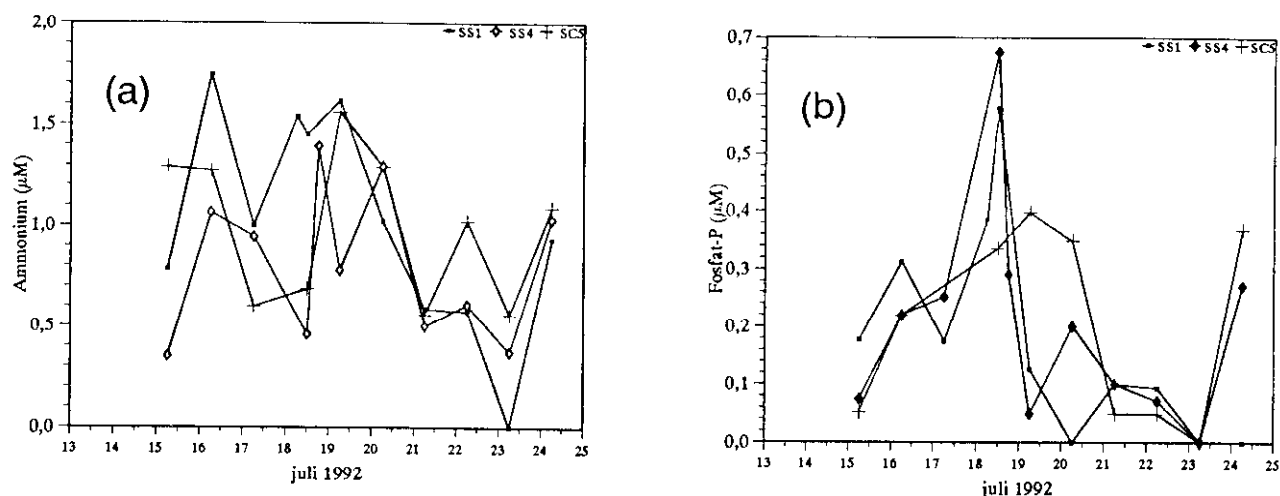
Prorocentrum's sedimentation efter resuspension

Den kortvarige sedimentation af *Prorocentrum minimum* i forbindelse med den kunstige ophvirvling kan hænge sammen med den kortvarige massive tilstedeværelse af hurtigt synkende resuspenderede partikler i vandsøjlen. Selv om *Prorocentrum minimum* ikke i sig selv synker kan det derfor tænkes at en stor del af algerne simpelthen er blevet "fejlet med" under den hurtige bundfældning af de kunstigt ophvirvlede partikler.

Ingen primær effekt af resuspension på plankton

Umiddelbart efter ophvirvlingen i sæk SS1 den 18. juli var tørstofkoncentrationen oppe på 116 g m⁻³ og secchidybden under en halv meter. På baggrund af forholdet mellem sække- og secchi-dybden kan partikelarealfractionen for sækken beregnes til 800%. 6 timer efter var koncentrationen faldet til 16 g m⁻³, hvilket svarer til at vandmassen i dette tidsrum var blevet "kæmmet" 7,5 gange af de hurtigt synkende partikler (halvdelen af partiklerne havde allerede nået bunden 1 time efter den kunstige "storms" ophør, svarende til gennemsnitlige synkehastigheder på 100 m d⁻¹). I forhold til den oprindelig koncentration før starten af ophvirvlingen var der dog kun tale om en halvering af algekoncentrationen i SS1 og faktisk en 50% stigning i SS4. Så på trods af den tætte "regn" af partikler blev algerne kun svagt eller slet ikke påvirket. Den øgede

observerede synkehastighed kan derfor især tilskrives synkende skaller af genophvirvlede tomme eller halvtomme *Prorocentrum minimum* celler (jfr. tidligere afsnit). Den ringe fysiske effekt af resuspensionen på algerne kan forklares med at chancerne for at en stor synkende partikel fanger en mindre på dens vej er lille, simpelthen fordi den lille bliver fortrængt sammen med "bovandet" og dermed undgår kollision (den såkaldte "Queen Mary"-effekt). F.eks. kan sandsynligheden for en kollision mellem en 10 μm og 100 μm partikel beregnes til 30 gange mindre end mellem partikler af samme størrelse (Stolzenbach, 1993). Endelig kan algernes selvbevægelighed samt manglende klæbrighed medvirke til at de undgår at blive fanget ved en eventuel kollision.



Figur 4.7. Koncentrationen af (a) ammonium (NH_4^+) og (b) fosfat (PO_4) i stormsækkene SS1 og SS4 samt i kontrolsæk SC5. Den kunstige "storm" i sæk SS1 og SS4 fandt sted den 18. juli.

Sekundære effekter af resuspension

Der kan dog være nogle sekundære effekter af resuspensionen på de planktoniske organismer. Mens algebiomassen efter den kunstige resuspension den 18. juli i SS1 og SS4 forblev på omtrent det samme niveau, var der en udpræget stigning i kontrolsækken. Den kraftige ophvirvling af hurtigsynkende partikler inklusiv bentiske mikroalger, kan have drænet vandsøjlen for en del af dens næringsalte. Mens ammoniumkoncentrationen steg en kort overgang i sæk SS1 (figur 4.7 a), faldt fosfatkoncentrationen markant til under detektionsgrænsen efter ophvirvlingen (figur 4.7 b, målinger ved VKI). I kontrolsækken SC5 forblev fosfatkoncentration på et højt niveau (10 mg m^{-3}) til og med den 20. juli.

4.4 Sammenfatning og konklusion

Sedimentets partikeltilbageholdelse

Eftersom sedimentationen af intakt fytoplankton var minimal, blev størstedelen af algeproduktionen omsat i vandet. Omend det ikke blev undersøgt, vil en del af den pelagiske planteproduktion i et lavvandet system dog blive omsat af bentiske organismer som følge af sedimentets partikeltilbageholdelse ved vandets passage. Omfanget heraf afhænger ud over af sedimentets cohesive struktur og benthossammensætning også af omrøringen i vandet (Sand-Jensen, 1993). Det er blevet påvist, at sækkene med bundkontakt i sig selv fremmer denne omrøring, hvilket muliggør en relativt større tilbageholdelse af vandsøjlets fytoplankton-produktion.

*Omrøring fremmer
fytoplankton-væksten*

Alligevel var algebiomassen (udtrykt som klorofyl *a*) 2-5 gange højere i sækkene end udenfor, hvor klorofyl *a* koncentrationen som gennemsnit for vandsøjlen lå rimeligt stabilt på ca. 2 mg m⁻³ i hele perioden. Den største biomasse blev opnået i kontrolsækken med sedimentkontakt og uden den kunstige ophvirvling. I kontrolsække uden sedimentkontakt svingede klorofyl *a* koncentrationen omkring samme niveau som i Knebel Vig (Sloth *et al.*, 1993). Dette tolkes som at en øget sedimentkontakt og opblanding i dette lavvandede system med mudret bund snarere fremmer fytoplanktonproduktionen end begrænser den. Dette skyldes antageligt en øget næringssaltfrigivelse som følge af den større kontakt mellem vand og sediment, og hvis positive virkning på algeproduktionen er større end den negative virkning af sedimentets øgede partikeltilbageholdelse.

*Resuspension hæmmer
fytoplankton væksten*

Resuspension hæmmer derimod fytoplankton-udviklingen. Som påvist skyldes dette ikke en forøget sedimentation. Virkningen på det planktoniske system er mere indirekte og må tilskrives næringssaldynamikken i forbindelse med ophvirvling. Selv om resuspension af partikler kan være ledsaget af en næringssaltfrigivelse, især ammonium, synes en massiv ophvirvling af partikler i dette forsøg snarere at begrænse biomasseudviklingen. Årsagen er at der tilsyneladende sker en binding af især fosfat til de resuspenderede partikler (der bl.a. indbefatter bentiske mikroalger). Resuspension af partikler og opblanding af vandmassen der begge er produkter af vandbevægelser synes derfor at have modsatrettede virkninger på det planktoniske system. Hvilket af de to fænomener der vil have størst virkning afhænger af sedimentets cohesive egenskaber og bentossammensætning.

*Sedimentation pga.
græsning*

Kanaliseringen af pelagisk algeproduktion til bunden sker tilsyneladende også i betydeligt omfang som følge af en heterotrof aktivitet. Selv om detritus-associeret klorofyl *a* i nogen udstrækning kan tilskrives en bentisk oprindelse stammer en stor del af det sedimenterende klorofyl *a* og fæopigment *a* fra pelagisk omsat fytoplankton. Så selv om fytoplankton ikke selv synker, vil græsningen bevirke en betydelig indirekte sedimentation af pelagisk produktion. På baggrund af klorofyl *a*'s synkehastighed kan den daglige sedimentation af algeproduktion via heterotrofe produkter skønnes til 1/5 af algebiomassen.

*Bentisk/pelagisk om-
sætning*

På trods af en ubetydelig sedimentation af intakt fytoplankton, vil den bentiske omsætning af planktonisk produktion i det undersøgte system antageligt være af samme størrelsesorden som den pelagiske. Omvendt vil op til halvdelen af de regenererede næringssalte til den pelagiske produktion stamme fra en bentisk remineralisering.

5. Referencer

- Allredge, A.L. & Silver, M.W. (1988): Characteristics, dynamics and significance of marine snow. *Prog. Oceanogr.*, 20: 41-82.
- Blackburn, T.H. (1986): Microbial processes of N- and C-cycles in marine sediments. *Proc. IV, ISME*: 218-224.
- Bratbak, G., Egge, J.K. & Heldal, M. (1993): Viral mortality of the marine alga *Emiliana huxleyi* (Haptophyceae) and termination of algal blooms. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 93: 39-48.
- Christiansen, C., Christoffersen, H. & Schultz, K.E. (1981): Hydrography, sediments and sedimentation in a low-energy embayment, Knebel Vig, Denmark. *Geogr. Ann.*, 63 A (1-2): 95-103.
- Conway, H.L., Harrison, P.J. & Davis, O. (1976): Marine diatoms grown in chemostats under silicate or ammonium limitation. II. Transient response of *Skeletonema costatum* to a single addition of the limiting nutrient. *Mar. Biol.*, 35: 187-199.
- Decho, A.W. (1990): Microbial exopolymer secretions in ocean environments: their role(s) in food webs and marine processes. *Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev.*, 28: 73-153.
- Dugdale, R.C. & Goering, J.J. (1967): Uptake of new and regenerated forms of nitrogen in primary productivity. *Limnol. Oceanogr.*, 12: 196-206.
- Edler, L. (1977): Phytoplankton and primary production in the Sound. University of Gothenburg, Gothenburg, Sweden, 82 pp.
- Hansen, I.S., Ærtebjerg, G., Jørgensen, L.A. & Pedersen, F.B. (1990): Analyse af ilt-sænkning i Kattegat, Bælthavet og V. Østersø, - Havforskning fra Miljøstyrelsen, nr. 1, 1990, Miljøstyrelsen, 136 pp.
- Hansen, P.J. & Nielsen, T.G. (1992): Mikrozooplankton. *In*: T. Fenchel (red.): Plankton-dynamik og stofomsætning i Kattegat, - Havforskning fra Miljøstyrelsen, nr. 10, 1992, Miljøstyrelsen, p. 61-76.
- Hellström, T. (1991): The effect of resuspension on algal production in a shallow lake. *Hydrobiologia*, 213: 183-190.
- Kjørboe, T., Andersen K.P., Dam, H.G. (1990): Coagulation efficiency and aggregate formation in marine phytoplankton. *Mar. Biol.*, 107: 235-245.
- Kjørboe, T. & Nielsen, T.G. (1992): Mesozooplankton, produktion og græsning. *In*: T. Fenchel (red.): Plankton-dynamik og stofomsætning i Kattegat, - Havforskning fra Miljøstyrelsen, nr. 10, 1992, Miljøstyrelsen, p. 77-101.
- Kjørboe, T. & Hansen, J. (1993): Phytoplankton aggregate formation: observations of patterns and mechanisms of cell sticking and the significance of exopolymeric material. *J. Plankton Res.*, 15: 993-1018.

Kjørboe, T, Hansen, J, Timm, U., Lundsgaard, C. & Olesen, M. (1994): Aggregering og sedimentering af marint fytoplankton, - Havforskning fra Miljøstyrelsen, 1994, Miljøstyrelsen, in prep.

Olesen, M. & Lundsgaard, C. (1992): Sedimentation af organisk materiale fra den fotiske zone i det sydlige Kattegat. *In*: T. Fenchel (red.): Planktondynamik og stofomsætning i Kattegat, - Havforskning fra Miljøstyrelsen, nr. 10, 1992, Miljøstyrelsen, p. 167-183.

Olesen, M. (1993): The fate of an early diatom spring bloom in the Kattegat. *Ophelia*, 37: 51-66.

O'Melia, C.R. (1980): Aquasols: the behavior of small particles in aquatic systems. *Environ. Sci. Technol.*, 14: 1052-1060.

Pedersen, F.B. (1991): Kompendium. Hydrografiske grundelementer i de indre danske farvande. Institut for Strømningsmekanik og Vandbygning, DtH, Lyngby.

Paasche, E., Bryceson, I. & Tangen, K. (1984): Interspecific variation of dark nitrogen uptake by dinoflagellates. *J. Phycol.*, 20: 394-401.

Passow, U., Alldredge, A.L. & Logan, B.E. (1993): The role of particulate exudates in the flocculation of diatom blooms. *Deep-Sea Res.*, in press.

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

Riebesell, U. (1989): Particle aggregation during a diatom bloom. II. Biological aspects. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 69: 281-291.

Riemann, B. & Møller, L. (1991): Bestemmelse af fytoplanktonets totale stofproduktion, - Havforskning fra Miljøstyrelsen, nr. 5, 1991, Miljøstyrelsen, 20 pp.

Sand-Jensen, K. (red.)(1993): Resuspension og stofomsætning i Roskilde Fjord, - Havforskning fra Miljøstyrelsen, 1994, Miljøstyrelsen, in prep.

Sciandra, A. (1991): Coupling and uncoupling between nitrate uptake and growth rate in *Prorocentrum minimum* (Dinophyceae) under different frequencies of pulsed nitrate supply. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 72: 261-269.

Sloth, N.P., Riemann, B., Nielsen, L.P. & Blackburn, T.H. (1993): Resuspension effects on N and C-dynamics in a benthic/pelagic shallow water coastal system, Knebel Vig, Denmark. Submitted to *Limnol. Oceanogr.*

Stolzenbach, K.D., Newman, K.A. & Wong, C.S. (1992): Aggregation of fine particles at the sediment-water interface. *J. Geophys. Res.*, 97: 17,889-17,898.

Stolzenbach, K.D. (1993): Scavenging of small particles by fast-sinking porous aggregates. *Deep-Sea Res.*, 40: 359-369

Thomsen, H.A., Hansen, G., Larsen, J., Moestrup, Ø. & Vørs, N. (1992): Fytoplankton og heterotroft nanoplankton. *In*: T. Fenchel (red.): Planktondynamik og stofomsætning i Kattegat, - Havforskning fra Miljøstyrelsen, nr. 10, 1992, Miljøstyrelsen, p. 31-59.

Thomsen, H.A. (red.)(1992): Plankton i de indre danske farvande, - Havforskning fra Miljøstyrelsen, nr. 11, 1992, Miljøstyrelsen, 336 pp.

Tyler, M.A. & Seliger, H.H. (1981): Selection for red tide organism: Physiological responses to the physical environment. *Limnol. Oceanogr.*, 26: 310-324.

Wassmann, P. (1990): Relationship between primary and export production in the boreal coastal zone of the North Atlantic. *Limnol. Oceanogr.*, 35: 464-471.

Welschmeyer, N.A. og Lorenzen, C.J. (1985): Chlorophyll budgets: Zooplankton grazing and phytoplankton growth in a temperate fjord and in the Central Pacific Gyres. *Limnol. Oceanogr.*, 30: 1-21.

Registreringsblad

Udgiver: Miljøstyrelsen, Strandgade 29, 1401 København K

Serietitel, nr.: Havforskning fra Miljøstyrelsen, nr. 38

Udgivelsesår: 1994

Titel:

Sedimentationsprocesser i et kystvandssystem

Undertitel:

Forfatter(e):

Lundsgaard, Claus; Olesen, Michael

Udførende institution(er):

Københavns Universitet. Marinbiologisk Laboratorium

Resumé:

I mesocosmosforsøg i Knebel Vig blev sedimentationsdynamikken undersøgt i sammenhæng med den planktoniske udvikling samt under påvirkning af resuspension af bentisk materiale. Resultaterne viste, at sedimentationen i høj grad afhang af algesammensætningen og vækstforholdene, samt at den betydeligste sedimentation blev udgjort af produkter fra den heterotrofe omsætning. Resuspensionen påvirkede primært næringsforholdene i vandet frem for sedimentationen af planktoniske organismer.

Emneord:

plankton; stoftransport; sedimentation; resuspension; alger; primærproduktion; kystvande

ISBN: 87-7810-167-0

ISSN:

Pris (inkl. 25 % moms): 75,- kr.

Format: A4

Sideantal: 53 s.

Md./år for redaktionens afslutning: februar 1994

Oplag: 400

Andre oplysninger:

Rapport fra koordinationsgruppen for stofomsætningen i de frie vandmasser

Tryk: Luna-Tryk ApS, København

Havforskning fra Miljøstyrelsen

Rapporter fra Hav90 forskningsprogrammet:

- Nr. 1 : Analyse af ilt-sænkning 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 næringsalte
- 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 : Planktonodynamik og stofomsætning i Kattegat
- Nr. 11 : Plankton i de indre danske farvande
- Nr. 12 : Effekter af iltvind og tungmetaller på marine bunddyr
- Nr. 13 : Nedbørforhold over Kattegat
- Nr. 14 : Partikulære næringsstoffluxer 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 : Fosfor omsætning i sedimentet i Århus Bugt
- Nr. 18 : Sedimentation og resuspension i Århus Bugt
- Nr. 19 : Emission af NH_3 , NO_x , SO_2 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 havforsker møde
- Nr. 26 : Processer for våddeposition
- Nr. 27 : Bundfaunens 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 : Planktonodynamik omkring springlaget i Kattegat
- Nr. 34 : Effekter af springlagsopblomstring på benthos
- Nr. 35 : Processer for tørdeposition
- Nr. 36 : Redoxbalancen og mineraliseringens temperaturafhængighed i Århus Bugt
- Nr. 37 : Atmosfærisk tilførsel af kvælstofforbindelser til Kattegat
- Nr. 38 : Sedimentationsprocesser i et kystvandssystem

Sedimentations- processer i et kystvandssystem

I mesocosmosforsøg i Knebel Vig blev sedimentationsdynamikken undersøgt i sammenhæng med den planktoniske udvikling samt under påvirkning af resuspension af bentisk materiale. Resultaterne viste, at sedimentationen i høj grad afhang af algesammensætningen og vækstforholdene, samt at den betydeligste sedimentation blev udgjort af produkter fra den heterotrofe omsætning. Resuspensionen påvirkede primært næringsforholdene i vandet frem for sedimentationen af planktoniske organismer.



Pris kr. 75.- inkl. 25% moms

ISBN nr. 87-7810-167-0

Miljøministeriet **Miljøstyrelsen**

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