

Havforskning fra Miljøstyrelsen

Nr. 4 1991

Kystnær omfordeling af sediment og næringssalte



Miljøministeriet **Miljøstyrelsen**

Om Hav-90 forskningsprogrammet

Hav-90 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 de ca 45 rapporter, der udsendes som et resultat af Hav-90 forskningsprogrammet. Med Miljøstyrelsen som ansvarlig for programmets gennemførelse, er der sat ca 50 Hav-90 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. Herudover var der behov for en undersøgelse af, hvilken påvirkning der sker i havområderne ved tilførsel af forurenende stoffer fra atmosfæren og de tilstødende udenlandske farvande. På baggrund heraf fandt vi det hensigtsmæssigt at udvikle modeller til beskrivelse af vand- og stoftransporten samt selve stofomsætningen i de danske farvande.

Med henblik på at skabe en større viden indenfor dette område/de danske havområder besluttede Folketinget – i forbindelse med Vandmiljøplanens vedtagelse – at afsætte 85 mio.kr. til et forskningsprogram, der skulle løbe over en 5-årig periode fra 1988 til udgangen af 1992.

I 1987 nedsatte Miljøministeren derfor et rådgivende ekspertorgan, der skulle bistå Miljøstyrelsen, dels ved planlægning af den fremtidige havmiljøforskning, og dels ved at sikre en såvel faglige som økonomiske afvejning af denne forskning. Forskningen blev delt i 4 hovedområder, og der blev nedsat 4 koordinationsgrupper, som hermed har fået faglig ansvar for hvert sit område:

- 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 Vandkvalitetskontor har været sekretariat for Hav-90 forskningsprogrammet, og har sammen med koordinationsgrupperne stået for redaktionen af denne rapportserie.

Havforskning fra Miljøstyrelsen

Nr. 4 1991

Kystnær omfordeling af sediment og næringssalte

Christian Christiansen
Aarhus Universitet

Per Andersen
Bio/consult a/s

Steen Schwærter
Vejle Amt

Jens S. Laursen
Sønderjyllands Amt

Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

INDHOLD

<u>1.</u>	<u>Indledning</u>	5
<u>2.</u>	<u>Vejle Fjord</u>	5
<u>3.</u>	<u>Metoder</u>	7
3.1	Hydrografi	7
3.2	Sediment	10
3.3	Laboratorieanalyser	11
3.4	Fytoplankton	12
3.5	Næringssaltstilførsel	13
<u>4.</u>	<u>Hydrografi</u>	14
4.1	Vindskabt cirkulation	14
4.2	Vandstandsvariationer	22
4.3	Import af iltsvind	23
<u>5.</u>	<u>Suspenderet stof/Resuspension</u>	26
5.1	Suspenderet stof	26
5.2	Resuspension	29
5.3	Bølgesuspension	30
5.4	Effekter på lavt vand	32
5.5	Effekter ved åudløbet	32
5.6	Effekter på dybt vand	34
<u>6.</u>	<u>Sedimentfordeling</u>	36
6.1	Kornstørrelse	36
6.2	Næringssalt i bundsediment	36
6.3	Sedimentation og resuspension	37
<u>7.</u>	<u>Fytoplankton</u>	43
7.1	Artssammensætning	43
7.2	Generelle biomasseforløb	44
7.3	Vertikal fordeling af fytoplanktonbiomasse	45
7.4	Forårsopblomstringen	46
7.5	Kvælstofdynamik - forår	49
7.6	Kvælstofdynamik - sommer	50
7.7	Uorg-N, fytoplankton-N og total-N	51
7.8	Fytoplankton og total suspenderet stof	52
<u>8.</u>	<u>Næringssalte og primærproduktion</u>	54
8.1	Stoftransport	54
8.2	Årstidsvariation	57
8.3	Intensivperioder	58

<u>9.</u>	<u>Sammenfatning og diskussion</u>	61
9.1	Hydrografi	61
9.2	Sedimentation/resuspension	62
9.3	Hydrografi og fytoplankton	62
9.4	Næringssalte og primærproduktion	65
<u>10.</u>	<u>Litteratur</u>	66

1. Indledning

Andre publikationer
om projektet

Denne rapport behandler samlende resultater fra Havforskningsprogram-90/1-03. Projektet er udført i forbindelse med en samarbejdsaftale mellem Miljøministeriet og Geologisk Institut, Aarhus Universitet. Indenfor projektet sker der et samarbejde mellem Geologisk Institut, Bio/consult A/S, Vejle Amt og Sønderjyllands Amt. Projektet er gennemført i Vejle Fjord i perioden september 1988 til november 1989. Der har været knyttet 5 specialestuderende til projektet. Delresultater fra projektet er blevet publiceret i Christiansen (1989), Christiansen et al. (1989, 1990A og 1990B) Andersen et al. (1990) og Schwärter et al. (1990). Endvidere er andre dele af projektet indsendt til publikation (Christiansen et al., 1990C; Christiansen, Teortheos & Vang, 1990; Laursen et al., 1990) eller under udarbejdelse (Horstmann, Christiansen & Ærtebjerg, 1990).

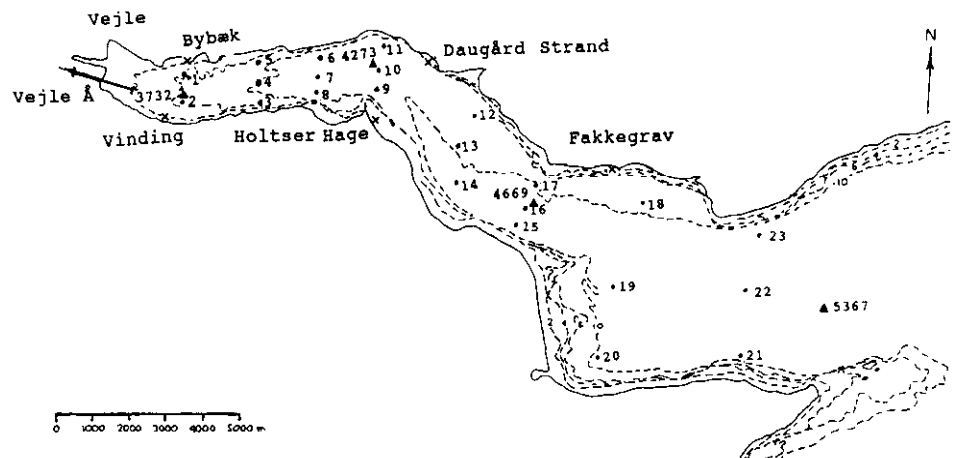
Vejle Fjord er udvalgt som eksempel på de syd- og sønderjyske fjorde med deres specielle cirkulation i overgangszonen mellem Kattegat- (Nordsø)- og Østersøvandmasser.

Formål

Det er projektets formål at få en bedre forståelse af, hvordan næringssaltene, som tilføres fra land, udbredes i sådant kystnært område. Specielt hvilke fysiske og biologiske mekanismer, der er af betydning for transporten.

2. Vejle Fjord

Undersøgelsesområdet i Vejle Fjord er ca 19 km langt målt fra Vejle by til Trelde Næs. Det er 5 km bredt ved Trelde Næs og 1,3 km bredt ved Vejle Fjord broen. Arealet er ca. 62 km² med et volumen på 0,5 km³ Vang (1990). Dybden varierer fra 20 m øst for Rosenvold til ca. 3 m under broen. Dybden aftager således ind gennem fjorden. Dybdeforholdene og stationernes placering fremgår af figur 2.1. Vejle Fjord har et opland på 816 km². 89% af oplandet er



Figur 2.1

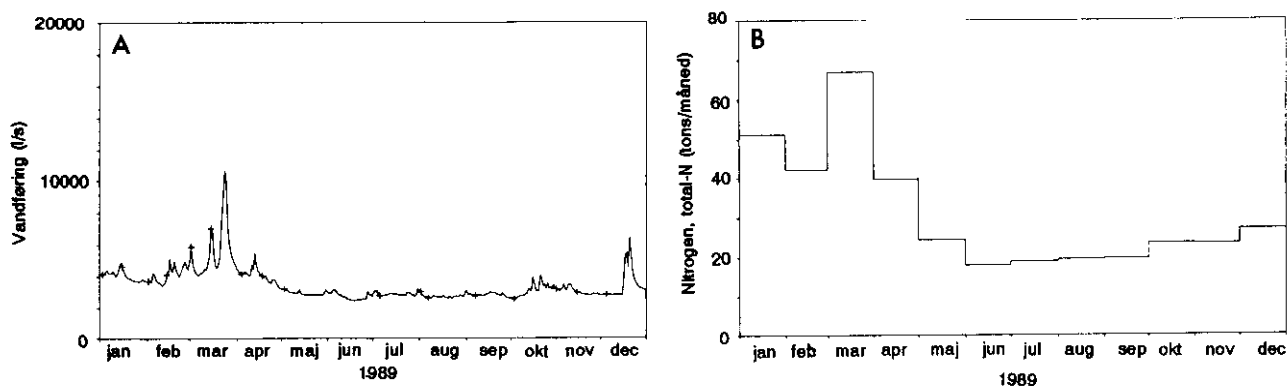
*Oversigtskort visende dybdeforhold og stationsplacering i Vejle Fjord.
 x = forsøgsselter på lavt vand. Δ = permanente hydrografiske og biologiske stationer. Tallene angiver lokalisering af bundprøver.*

beliggende i Vejle Amt resten i Ribe Amt.

Den samlede stoftransport til Vejle Fjord fra oplandet udgjorde i 1989 i alt 1490 tons kvælstof og 133 tons fosfor. Det er her valgt at lave opgørelsen på årsbasis, skønt måleperioden løber fra september 1988 til november 1989. Dette gør det muligt at sammenligne Vejle Amt med øvrige amter. Det skal anføres, at transporten af kvælstof i måleperioden var 2041 tons, medens transporten af fosfor var 159 tons. Kvælstoftransporten i 1989 har været lav i forhold til de to foregående år - ca. hlavt så stor som i 1988. Dette skyldes hovedsagelig, at året har været "tørt" med et nedbørsgennemsnit for området, der var ca. 20% lavere end for et normalt år.

Tabel 2.1

Tilførslen af næringssalte til Vejle Fjord 1989 opdelt for kilder.



Figur 2.2

A) Vandføringen i Vejle Å 1989. B) Månedsvis transport i Vejle Å af kvælstof 1989.

Figur 2.2 viser vandføringen og kvælstoftransporten gennem året i Vejle Å ved Haraldskær nær udløbet i fjorden, medens tabel 2.1 angiver tilførslen af næringssalte opdelt på kilder.

Udledningen af fosfor stammer for ca. 80%’s vedkommende fra renseanlæg i oplandet og belastningen herfra fordeler sig stort set jævnt over hele året. Udbygningen af de større renseanlæg i oplandet er i startfasen og den samlede fosforbelastning har derfor i de senere år ikke udvist noget markant fald.

3. Metoder

3.1. Hydrografi

Temperatur ($\pm 0.1^{\circ}\text{C}$), saltholdighed ($\pm 0.1\%$), dybde ($\pm 0.1\text{ cm}$), strømretning ($\pm 1^{\circ}$), strømhastighed ($\pm 1\text{ cm/s}$), pH (± 0.01), ilt ($\pm 0.01\text{ mg/l}$) og lysintensitet ($\pm 1\%$) er alle målt med GMI (Geological Marine Instruments) målesonde. Vandstand er målt på selvregistrerende skriver

foretaget med Shipmate udstyr (± 25 m). Vandprøver er indsamlet med vandhenter 1 m over bund og 1 m under overflade.

3.1.1. Opholdstider/udskiftningstider

Til bedømmelse af hvor længe næringssalte opholder sig i estuarier og andre kystnære vande bruges ofte forskellige beregningsmetoder til bestemmelse af opholdstiden.

Hvis der forudsættes steady-state kan *opholdstiden* (*Residence time*) beregnes efter

$$\frac{\text{total masse af et opløst substans i estuariet}}{\text{Tilførselsrate for substansen}}$$

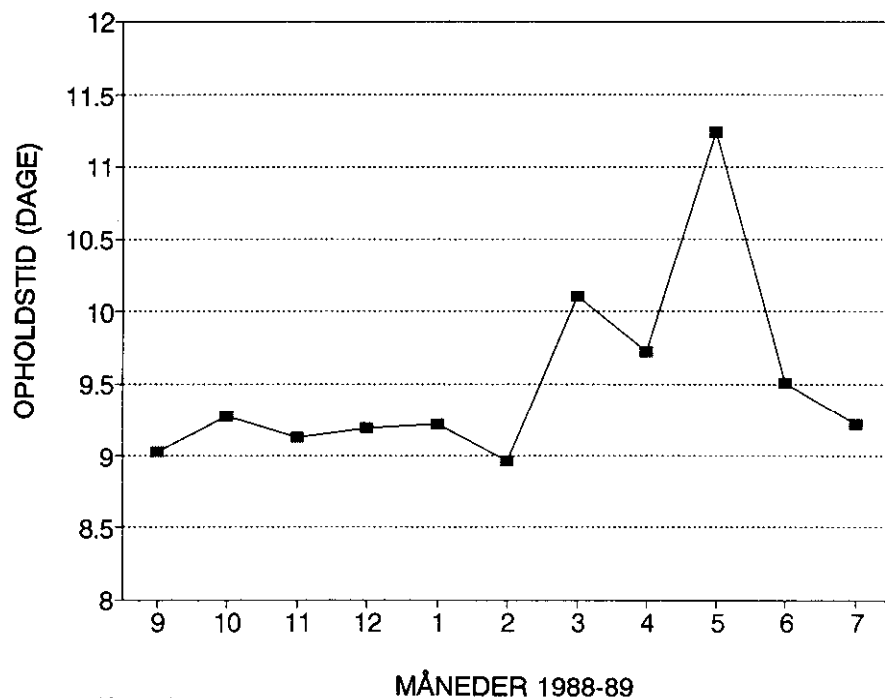
I Vejle Fjord er den gennemsnitlige koncentration for kvælstof 0,5 mg/l og volumenet er 0,5 km³. Dette svarer til en total masse af N på 250 ton. Da der årligt tilføres ca. 2000 ton bliver opholdstiden for N således 1/12 år = 1 måned. Gennemføres samme beregning for vand (tilførsel = 6 m³/s) fås en opholdstid på 964 dage. Problemet med beregningen af ovennævnte art er, at dels er kravet om steady-state ikke opfyldt og dels får man ikke oplysninger om sæsonmæssige variationer.

Ved en anden beregningsmetode kan *udskiftningstiden* (*Flushing time*) beregnes efter Ketschum (1951):

$$\text{opholdstid} = \frac{\text{Volumen}}{\text{Vol.ændr./tid}}$$

Resultatet af sådanne beregninger er vist i figur 3.1. Det ses, at opholdstiden er 11,2 dage som gennemsnit i maj 1989 og kun 9,2 dage i vintermånederne. Disse beregninger kræver, at følgende forudsætninger er opfyldt:

- det vand, der kommer ind i fjorden udefra, bliver totalt opblandet med vandet i fjorden.
- det vand, der under faldende vandstand forlader fjorden, vender ikke tilbage, når vandstanden igen begynder at stige.



Figur 3.1

Opholdstider beregnet udelukkende ud fra vandstandsvariationer i Vejle Fjord.

Dårlig vandskifte
uden vind

Hovedårsagen er de små strømhastigheder, der optræder ved gennemsnitlige vandstandsvariationer. Eksempelvis vil der i forbindelse med en vandstandsstigning på 40 cm i hele fjorden i løbet af 6 timer løbe en vandmasse ind i fjorden gennem et tværsnit yderst i fjorden med en gennemsnitlig hastighed på 2 cm/s. Dette medfører, at vandpartiklerne kun tilbagelægger en afstand på 433 m. Ved sådanne vandstandsændringer sker der altså stort set kun en intern omplacering af vandmasserne.

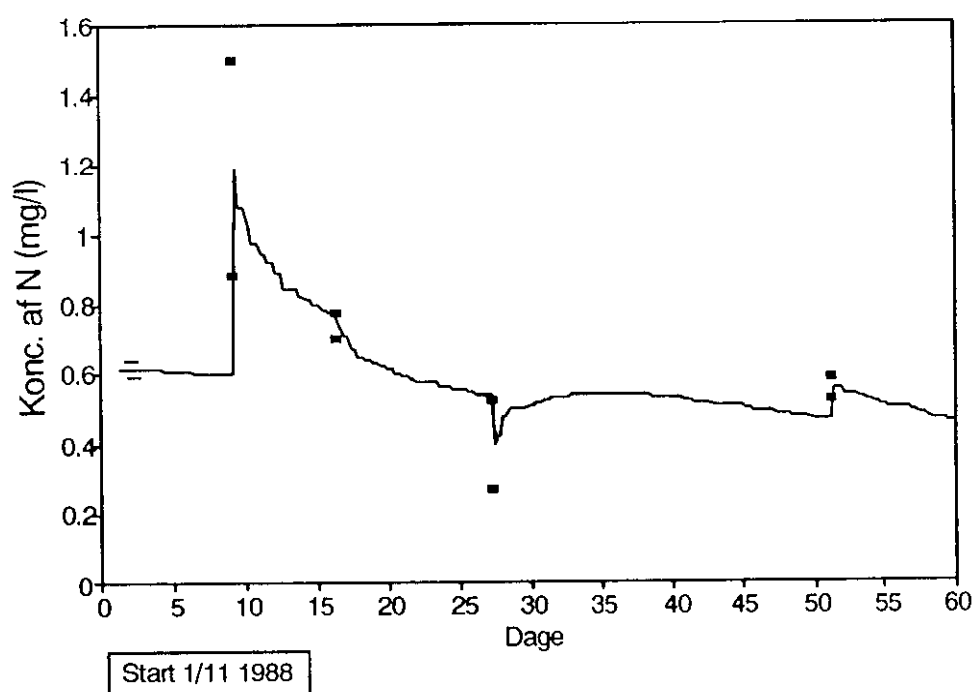
Hurtig vandskifte
med kraftig vind

Der er foretaget flere sæt af strømmålinger i profiler på tværs af fjorden ved station 4669 over tidevandsperioder. Vandtransporten gennem tværsnittet ligger på $1,6 \pm 0,3 \cdot 10^7 \text{ m}^3$ i løbet af ebbe eller flodperioden. Antages det, noget urealistisk, total opblanding og at den vandmasse, der forlader fjorden under ebbe ikke vender tilbage ved næste flod, svarer denne transport til en minimumsudskiftnings tid på 16 dage. Målinger fra juni 1989 viser, at der kun sker ringe udskiftning p.g.a. tidevandet. Til gengæld kan udskiftningen ske meget hurtigt (< 3 dage) med kraftig vestenvind (Christiansen et

al., 1990 a). I afsnit 4.4 vil det blive vist, at disse forudsætninger ikke er overholdt for Vejle Fjords vedkommende.

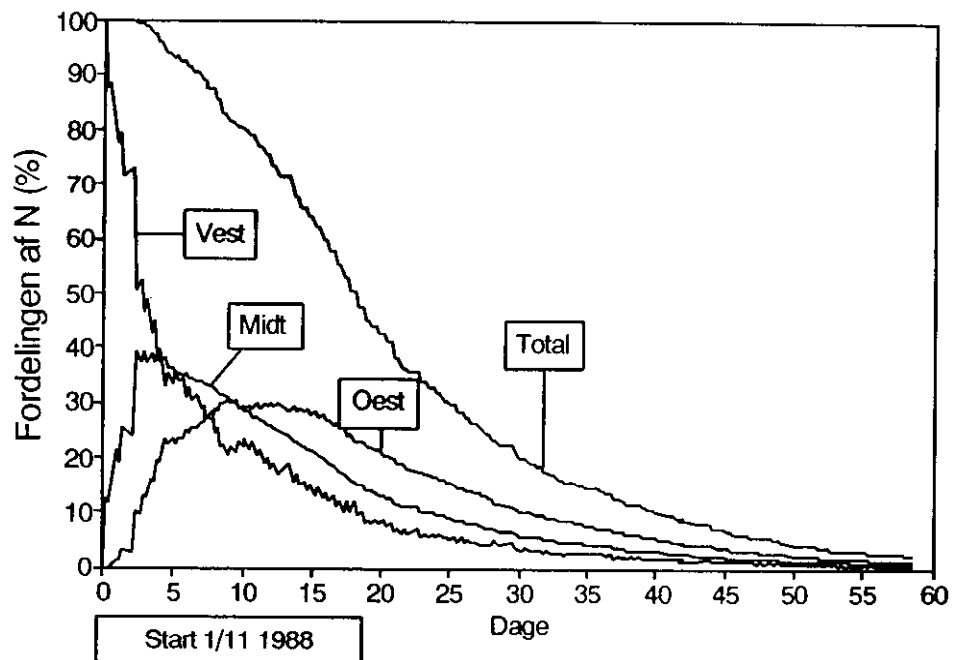
For dels i høj grad at undgå at arbejde med ovennævnte forudsætninger og dels at kunne tage hensyn til forskelle i udskiftningstider/opholdstider mellem fjordens delområder er beregningerne i denne undersøgelse udført med en boksmodel. En detaljeret beskrivelse af modellen kan findes i Vang (1991). Modellen beskriver nøje de målte sæsonmæssige variationer i saltholdighed. I perioder med ringe biologisk aktivitet som november-december kan modellen i rimelig grad også simulere de målte næringssaltskoncentrationer (figur 3.2). Bruges nu modellen til at beskrive, hvad der sker ved en momentan høj kvælstoftilførsel i Vejle Å, fremgår det af figur 3.3, at efter 1 måned er der stadig ca. 25% tilbage i fjorden. "Pulsen" med høj kvælstofindhold er i modellen toppet i den midterste del af fjorden efter 3-4 dage. I den østlige del nås det største indhold af kvælstof efter 10-15 dage.

3.2 Sediment (Felten)



Figur 3.2

Beregnete (dybdegennemsnit) og målte (top og bund) koncentrationer af kvælstof i den inderste del af Vejle Fjord for perioden nov.-dec. 1988.



Figur 3.3

Beregnet tilbageholdelse af kvælstof i Vejle Fjords delområder efter simuleret stor tilførsel 1. nov. 1988.

3.2 Sediment (Felten)

Sedimentprøver fra dybtvand er indsamlet med van Veen grab (0.1 m^2). Sedimentationen på dybt vand er dels målt i sedimentfælder ophængt 1 m over bunden. Det skal nævnes, at disse fælder i udpræget grad er forsvundet. Der er totalt mistet 13 fælder, hvilket har gjort, at denne del af projektet er mangelfuld på sæsonbasis. Sedimentationen på lavt vand er dels målt som nettosedimentation udfra bundtopografiske ændringer i $25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$ forsøgsfelter. I praksis er dette sket ved at følge bundens ændringer relativt til toppene af en række pløkke, som blev hamret ned i felterne. Bruttosedimentationen blev målt i cylindriske fælder med en diameter på 17.5 cm . (Christiansen & Kristensen 1988). Fælderne er nedgravet således, at de flugter med bunden. På lavt vand blev bundprøver som kerner taget med cylinder med 7.8 cm 's diameter.

Vandanalyser

I laboratoriet er vandet analyseret for indhold af

- nitrat, nitrit, ammonium- og total-kvælstof
- total-fosfor og ortofosfat-fosfor
- partikulært organisk og uorganisk materiale
- planteplankton såvel kvalitativt som kvantitativt

De kemiske analyser er udført efter Dansk Standard.

Sedimentanalyser

Bundmaterialeprøverne er tørret, sigtet, nedknust og analyseret for indhold af

- total organisk kvælstof
- total fosfor
- organisk stof
- kornstørrelsesfordeling

Kvælstof er bestemt ved Kjeldahlmetoden, fosfor ved udtræk med saltsyre og spektrofotometri. Organisk stof er beregnet dels ud fra glødetab og bestemmes dels som C. Kornstørrelsesfordelingen er bestemt ved sigte- og pipetteanalyse.

3.4 Fytoplankton.

Vandprøverne blev straks efter prøvetagningen fikseret i Lugol's opløsning. De fikserede prøver blev opbevaret i brune flasker.

Den kvantitative oparbejdning af fytoplanktonprøverne blev foretaget ved hjælp af omvendt mikroskop ved anvendelse af Utermöhl's sedimentationsteknik (Utermöhl, 1958). Der blev anvendt 10 ml sedimentationskamre. Sedimentationstiden var >19 timer.

Optællingen og opmålingen blev foretaget ved henholdsvis 100X, 200X eller 320X forstørrelse, afhængigt af hvilke organismer der blev registreret.

De kvantitativt mest betydningsfulde arter blev opmålt, og deres biovolumen og kulstofindhold beregnet ud fra de gennemsnitlige lineære dimensioner, ifølge retningslinjerne udarbejdet

af "THE BALTIC MARINE BIOLOGISTS" (Edler, 1979) og "Vejledning i fytoplanktonbedømmelse, del I, metoder" (Miljøstyrelsen, under udarbejdelse). For arter, som ikke blev opmålt, blev der anvendt konstante voluminer og kulstofværdier. Rådata blev inddateret på EDB og beregnet ved hjælp af programmet ALGESYS-BIO/CONSULT 1990.

Kvælstofindholdet i fytoplanktonet blev beregnet ved at forudsætte et C:N (g/g) på 5.7 (Redfield et al., 1963).

Fytoplanktonets indhold af tørstof blev beregnet ved at forudsætte et forhold mellem tørvægt og vådvægt på 0.43 (se Reynolds, 1984).

Primærproduktionen blev estimeret på alle 4 stationer. Målingerne blev foretaget i perioden februar-oktober 1989. Der blev ialt udført 13 målinger pr. station.

Indsamling af prøver, inkubation og beregninger blev foretaget ifølge retningslinjerne fra Miljøstyrelsens Havforureningslaboratorium, 1988. (DS-293; VKI 1990).

3.5 Næringssaltstilførsel

Punktkilderne renseanlæg, industri og dambrug er opgjort ved enten målinger i afløbene eller ved erfaringstal. Diffus belastning fra land og by er målte oplande beregnet ved: $\text{Diffus} = \text{Total} - \text{Renseanlæg} - \text{industri} - \text{dambrug}$. Total er den målte stoftransport på målestationer i vandløbene. Den diffuse kvælstof- og fosforbelastning fra "umålte" oplande er beregnet ud fra et arealvægtet gennemsnit af det diffuse land- og bybidrag for samtlige målte oplande i Vejle Amt i 1989. Følgende fosfor- og kvælstofværdier er benyttet ved beregning af diffus afstrømning i umålte oplande:

kvælstof: 14 kg N/ha/år
fosfor : 0.21 kg P/ha/år

Hertil er punktkilder i det umålte opland adderet, hvorved totaltransporten fra det umålte opland er fundet. Beregningerne og opgørelsen af stoftransporten er udført af Henning Å. Jensen Vejle Amt.

4. Hydrografi

4.1 Vindskabt cirkulation

Forsinkelse ved
vestlig vind

Hurtig respons på
østlig vind

"Up-welling" ved
vestlig vind

Cirkulationen i Vejle Fjord er stærkt afhængig af vandudvekslingen i Kattegat og dermed styret af meteorologiske forhold. Vestlige vinde kan efter en forsinkelse på omkring 24 timer give indtrængning ved bunden af vand med højere saltholdighed og anden temperatur (højere temperatur i november). Omvendt så falder saltholdigheden ved bunden få timer efter et vindskifte til øst. Vestlige vinde giver med samme forsinkelse også høj vandstand i Vejle Fjord (figur 4.1.).

Fra Kattegat vil vandet trænge ind i Vejle Fjord som en bundstrøm på grund af dets høje saltindhold. Samtidig vil vestenvinden blæse overfladevand ud af fjorden. Herved skabes i de indre dele af fjorden en "upwelling" af bundvand til overfladen. Et eksempel herpå er vist i figur 4.2.

Figur 4.2 viser saltholdighedsfordelingen ved sydvestlig vind. På grund af "upwellings"-

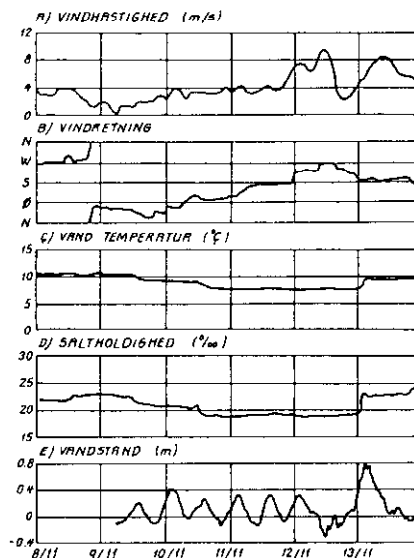
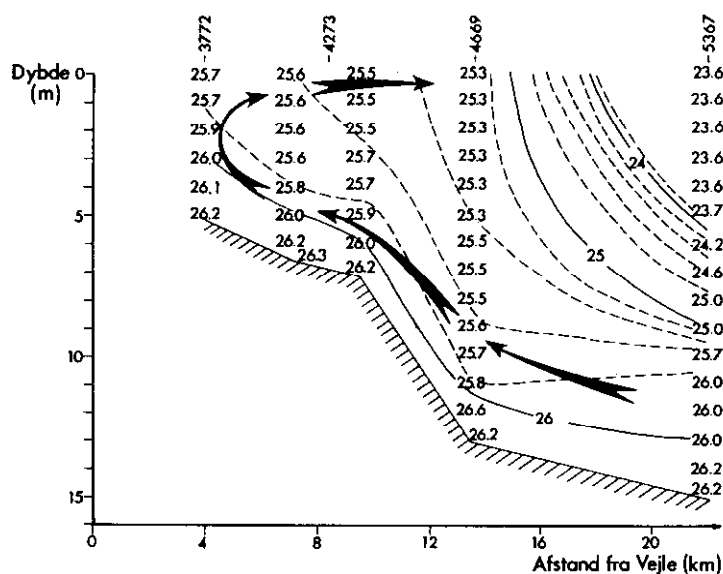


Fig. 4.1.

Eksempel på temperatur, saltholdighed og vandstands afhængighed af vindretning og -hastighed. Temp. og salth. er målt 1 m over bunden.

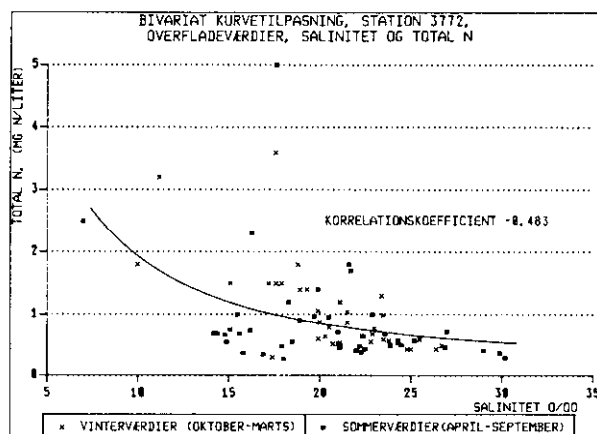
Placering af monite-
ringsstationer vig-
tigt

mønstret findes den højeste saltholdighed i overfladen inderst i Vejle Fjord, hvor saltholdigheden er den samme som i 10 m's dybde i den yderste del af fjorden. Der er altså en omvendt saltgradient i overfladen (Christiansen et al. 1981). Station 3772, som er den inderste af Vejle Amts faste referencestationer, får altså i denne situation sit "Vejle-Å-påvirkede"-overfladevand "fortyndet" med bundvand. Eller med andre ord en måling af næringsstofkoncentrationer i overfladen denne dag



Figur 4.2

Saltholdigheden i fjorden 21/9 1988. Bemærk, at saltholdigheden i overfladen er størst inderst i fjorden. Pilene antyder cirkulationsmønstret. Vinden kom fra vest med en hastighed på 4-5 m/s.



Figur 4.3

Sammenhæng mellem koncentrationen af total-N i overfladen og saltholdigheden i overfladen i Vejle Fjord.

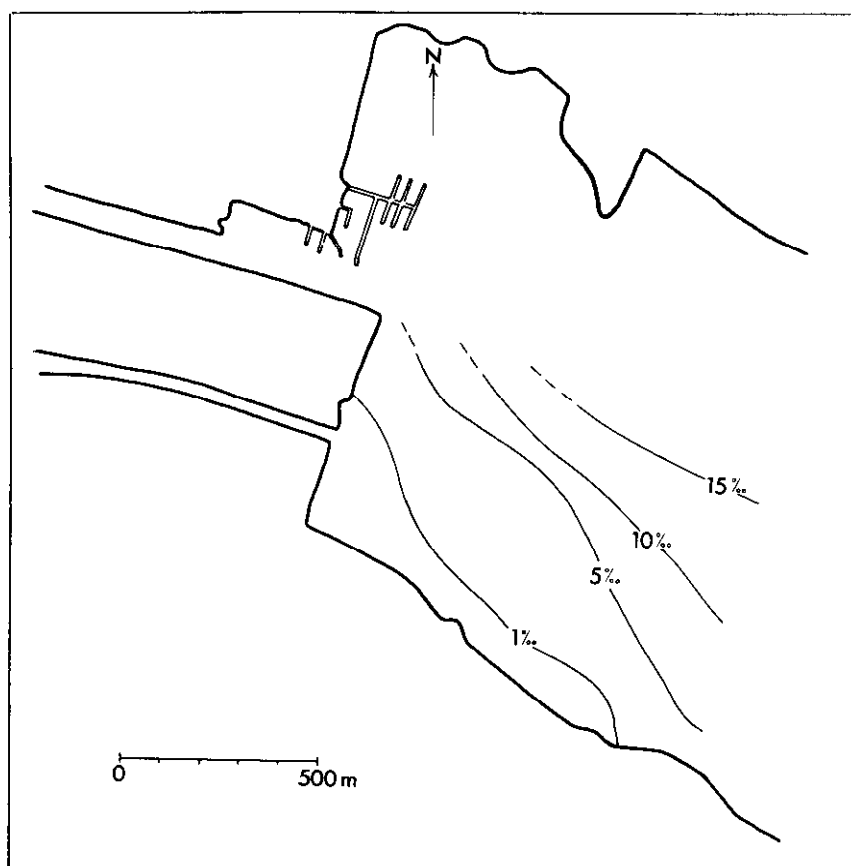
Vejle Fjord er afhængig af forholdene i Kattegat

ville give lavere værdier end dagen efter, hvor det ikke blæste. Et tegn på denne sammenhæng ses i figur 4.3. Figur 4.3 viser at det forhold at total-N ikke generelt er stigende med faldende salinitet skyldes, at de lave saliniteter kan være forårsaget af enten Vejle Å-vand (høj total-N) eller indtrængende Østersøvand (lav total-N). Situationen i den inderste del af fjorden kan således ikke beskrives ved hjælp af en 'simpel' estuarie-model, men kræver en mere kompleks model af et sammensat estuarie med Vejle Fjord estuariet som det primære estuarie og de indre danske farvande som det sekundære estuarie. En "fortynding" af overfladevandet inderst i fjorden kan også forklare, hvorfor der i løbet af 1988 i 20% af Vejle Amts tilsynsmålinger er højere total-N-koncentration ved station 4273 længere ude i fjorden end ved station 3772 tættere på åudløbet.

Ferskvand ud langs sydsiden

Der er imidlertid også andre forhold der kan "forstyrre" de vandkemiske resultater fra station 3772. Tilsyndeladende sker der en uventet ringe opblanding mellem fjordvandet og åvandet, idet påvirkningen i høj grad er koncentreret på fjordens sydside. Denne cirkulation er også antydnet af Dansk Geoteknik (1988). Figur 4.4 viser detaljerede målinger af saltholdighed og temperatur i overfladen i området indenfor Vejle Fjord Broen udført 21.10.1988. Det ses på figur 4.4, at åvandet ikke registreres længere mod nord end til højst fjordens midte på trods af, at dagen var præget af sydøstlig vind. Station 3772, som ligger midt i fjordens inderste del, vil altså ikke direkte berøres af "ferskvandsfanen". Var stationen imidlertid anbragt længere mod syd, er der ingen tvivl om, at man ville registrere en større belastning af fjordens inderste dele.

Tilsyneladende kan man registrere denne "ferskvandsfane" langt ud i fjorden på sydsiden. Dansk Geoteknik (1988) har således målinger i en afstand af 8 km fra Vejle, hvor saltholdigheden i overfladen på nordsiden er den samme som ved bunden på sydsiden. Den 21.9.1988 blev der foretaget oversigtsmæssige sondringer. Også denne dag er der forskel på nord- og sydsidens saltholdighed. Selv om forskellene er små, er det dog sådan, at saltholdigheden i overfladen på nordsiden svarer til den, man finder i 4 m's dybde på

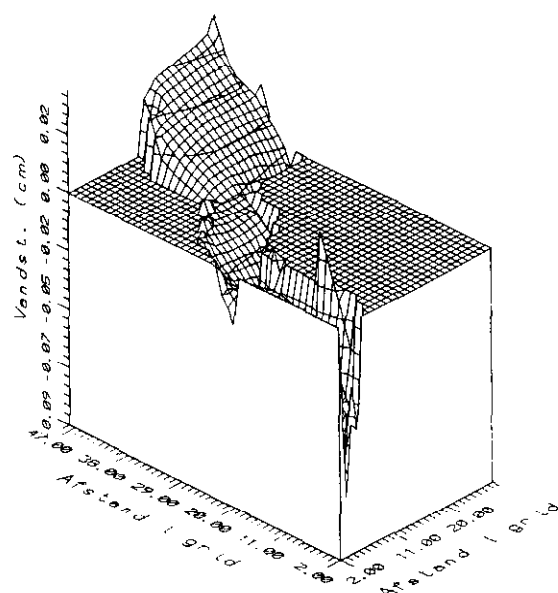


Figur 4.4

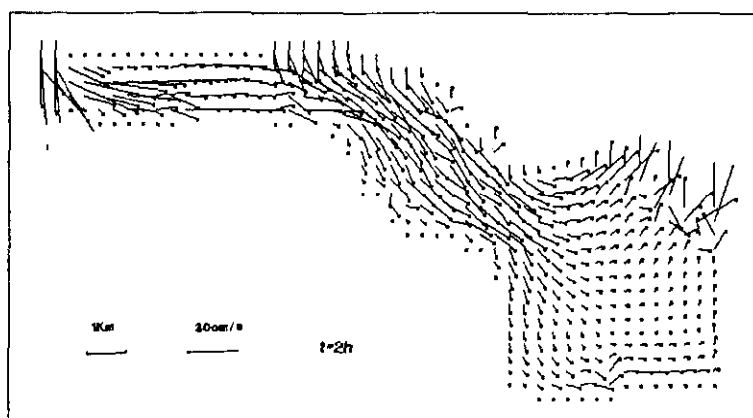
Overfladesaltholdighed nær Vejle Å 21/10 1988. Endnu i 1 km's afstand fra åen er der stor forskel i saltholdighed ‰ mellem sydside og midten af Vejle Fjord.

sydsiden helt ud til station 4273. Herfra er fanen efterhånden så opblandet, at der ikke længere er målelig forskel på nord og sydsiden. Det er altså heller ikke uvæsentligt for resultaterne fra denne referencestation, om åens vand holder sig til sydsiden.

A



B



Figur 4.5

a) Overfladehældning beregnet efter 2 timers vind fra vest, 10 m/s. b) Dybdeintegreret cirkulationsmønster efter samme vindpåvirkning i Vejle Fjord.

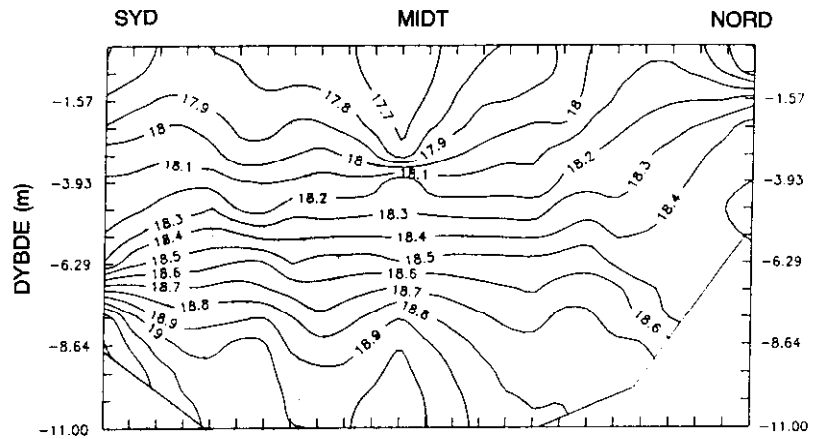
Saltvand ind langs
nordsiden

Det kan i samme forbindelse nævnes, at bundstrømmen er indadgående i 83% af tiden på nordsiden (Dansk Geoteknik, 1988). I brede tragtformede flodmundinger ses ofte en tilsvarende cirkulation (Pritchard, 1955). Her er forklaringen corioliskraftens afbøjning til højre set i strømretningen. Dette ville

Modelresultater

forklare, hvorfor den udadgående strøm i Vejle er koncentreret på sydsiden og den indadgående på nordsiden. Derfor er der foretaget modelberegninger over vinden og dybdens indflydelse på cirkulationen. Den anvendte model (Teorotheos, 1990) giver dybdeintegrerede strømhastigheder. På figur 4.5. A,B er vist modelresultater efter en vestenvind på 10 m/s, der har virket i 2 timer. Det ses, at vestenvinden medfører en overfladehældning ud gennem fjorden. Stigningen andrager 14 cm. Den resulterende cirkulation i den inderste del af fjorden har strømmene udad koncentreret på sydsiden. Når modellen har virket i 5 timer produceres en indadgående nettostrøm langs nordsiden. Ved Vejle by løber strømmene fra nord mod syd, hvilket sikkert er med til at holde ferskvandet på sydsiden. I den yderste del af fjorden iagttages en strømhvirvel, der løber rundt mod uret. Det modellerede strømsystem i den yderste del er noget afhængig af randbetingelser for modellen. Her er arbejdet med en delvis lukket model, der således skal simulere vestenvindens hævning af vandstanden i Kattegat. Strømhastighederne i den centrale del af yderfjorden er meget små. Modellen beskriver meget vel aktuelle observationer. Det kan således nævnes, at ved strømmålinger over tidevandsperiode (12,5 time) i tværsnit i overgangen til yderfjorden løber strømmen oftest på tværs af fjorden. En nøjere eksamination af modellen viser, at de styrende mekanismer for denne specielle cirkulation er 1) vinden, 2) dybdetopografien og 3) corioliskraften.

Det ser således ud til, at opblanding af ferskvandstilførslerne i fjorden først er total langt fra kilden. Desuden tyder resultaterne på, at det opblandede ferske vand i bunden af fjorden ikke opblandes jævnt i fjordvandet, men "sendes" ud i fjorden i form af "pulser". Dannelsen af disse pulser er ikke undersøgt, men en mulig mekanisme kan være Kelvin-Helmholtz afsnøringer af ferskvandsfanen, som observeret ved kølevandsfaner (Christensen & Christiansen, 1983). Øer af vandmasser med lavere saltholdighed end omgivelserne er ofte iagttaget i forbindelse med de hydrografiske målinger i fjorden. Figur 4.6. giver et eksempel herpå. Figur 4.6. viser saltholdighedsfordelingen i et tværsnit ved Rosenvold den 30/3 1989 kl. 09.10. Det ses, at der i



Figur 4.6

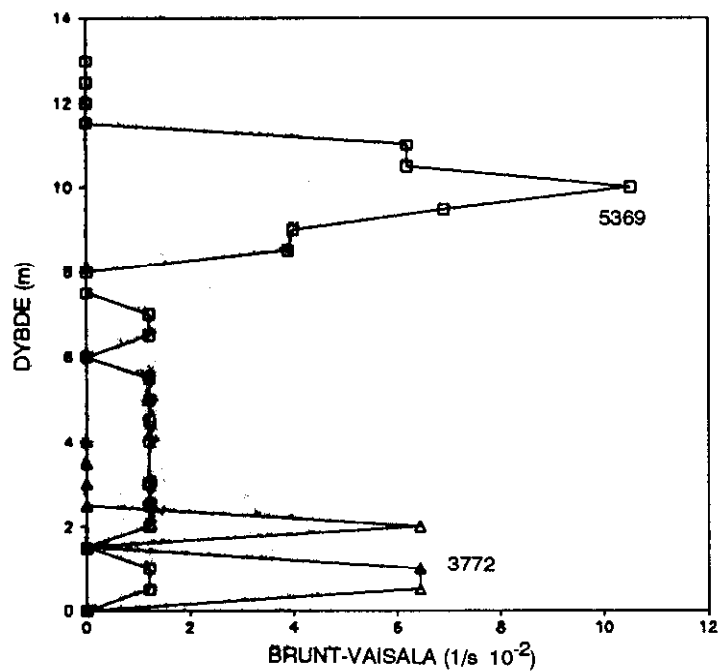
Saltholdighedsfordelingen i et tværsnit af Vejle Fjord den 30/3 1989 ved station 4669. Bemærk isohalinernes hældning og de lave saltholdigheder i overfladen i tværsnittets midte.

"Øer" af ferskere
vand driver rundt

overfladen midt i tværsnittet findes en ø med lavere saltholdighed. Denne ø var også på tværsnittet kl. 10.00 for derpå at forsvinde med strømmen ud af fjorden. Sidst på eftermiddagen kom øen tilbage med den indadgående strøm. Figur 4.6 viser samtidig, at isohalinerne på sydsiden ligger dybere end på nordsiden. Dette hænger sammen med, at det udgående ferskvand på sydsiden presser isohalinerne ned.

Disse "pulser" har således afgørende betydning for resultaterne af vandkemiske analyser på en række stationer ud gennem fjorden. Det kan nævnes, at nye målinger i Flensborg Fjord viser samme mønster med højere saltholdighed på nordsiden (Laursen, personlig meddelelse). Det tyder på, at cirkulations-mønstret, som er beskrevet her, også gælder i andre østjyske fjorde.

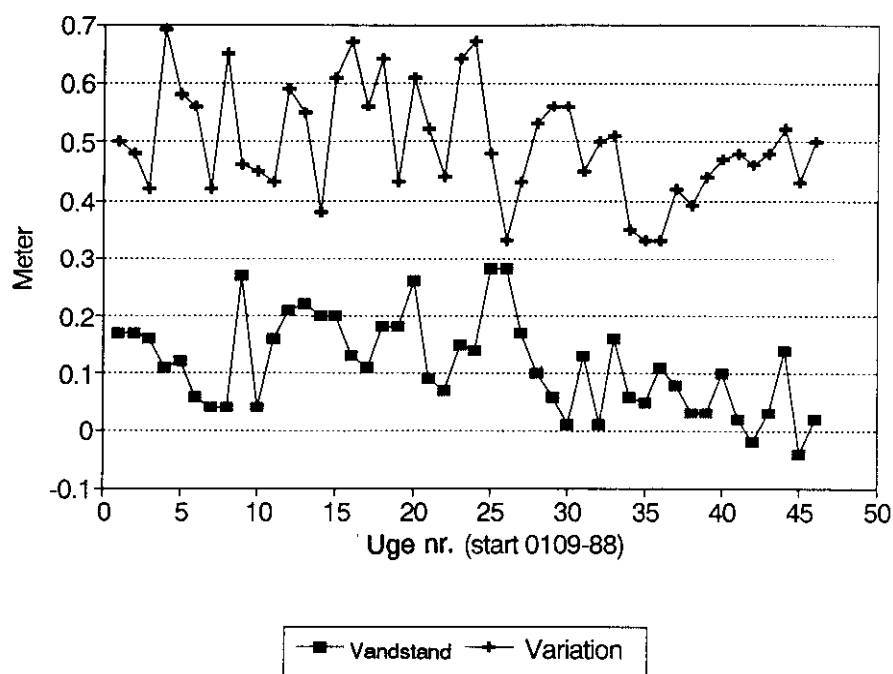
Springlagets styrke og beliggenhed i den inder-



Figur 4.7

Vertikal stabilitet (frekvens) på station 3772 inderst i Vejle fjord og station 5369 yderst i fjorden.

ste del af fjorden er hovedsagligt bestemt af ferskvandstilførslen. I modsætning hertil er springlagets styrke og beliggenhed i den yderste del af fjorden bestemt af forholdene i Kattegat (figur 4.7.). Dette yderste og dybere springlag trænger kun ind i resten af fjorden efter stærk vestenvind.



Figur 4.8
Ændringer i middelvandstand og i daglige vandstandsvariationer i måleperioden i Vejle Fjord.

4.2. Vandstandsvariationer

Den milde vinter gav
unormale vandstande

I måleperioden har der været en lidt usædvanlig sæsonmæssig variation i middelvandstanden. Normalt optræder de højeste middelvandstande i de danske farvande i september-oktober, medens de laveste optræder i marts (Christiansen, Møller & Nielsen, 1985). Den milde vinter 1988-89 samt de mange perioder med (syd)vestenvinde har dog medført, at højeste middelvandstand optrådte i februar 1989 (figur 4.8.) og laveste i juli 1989. Periodens middelvandstand var + 11 cm. Vandstandsmæssigt må december-februar karakteriseres som de mest urolige med gennemsnitlige daglige variationer på 55 cm. Maj md. 1989 havde kun gennemsnitlige variationer på 40 cm.

4.3. Import af iltsvind

I forbindelse med juni måneds intensivprogram blev der den 29. juni 1989 konstateret iltsvind i den yderste del af Vejle Fjord.

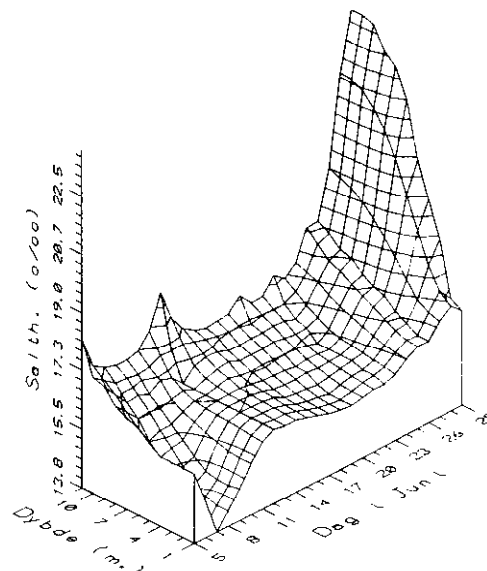
En nærmere analyse af de forhold, der medførte iltsvindssituationen, viser, at denne var importeret fra Kattegat.

I hydrografisk henseende må de første 25 dage af juni måned 1989 karakteriseres som meget stabile. Strømhastighederne i forbindelse med tidevandet overstiger på ingen lokaliteter 22 cm/s. Denne ekstrem hastighed svarer til en tidevandsekskursion (den længde en vandpartikel tilbagelægger før strømmen igen vender) på max. 4 km. De generelt små tidevandsekskursioner betyder, at vandudvekslingen med Kattegat er meget ringe. Dette afspejles specielt i måledata fra en station placeret i den yderste fjerdedel af fjorden. Frem til den 25. juni er der kun ringe forskel på saltholdigheden mellem top og bund (ingen haloklin). Saltholdigheden ligger med små udsving på 16‰ (figur 4.9). Den 26. juni begynder saltholdigheden at stige ved bunden. I løbet af få dage frem til den 29. juni stiger saltholdigheden fra 17‰ til 23‰. Den høje saltholdighed er et tegn på indtrængning af vand fra Kattegat. På grund af Kattegatvandets større vægtfylde registreres indtrængningen først ved bunden.

Temperatur og salt
som "tracere"

På grund af det fine vejr i juni måned stiger temperaturen i overfladevandet fra 12,1°C den 5. juni til 19,4°C den 22. juni. I samme periode stiger bundvandets temperatur fra 11,4°C til 13,9°C. I modsætning hertil falder bundvandets temperatur fra 12,2°C til 8,5°C mellem den 26. og 29. juni. Dette er også et tegn på indtrængning af vand udefra.

Iltindholdet i fjorden er højt frem til den 25. juni. Indholdet er 8-9 mg/l, og vandet er næsten iltmættet helt til bunden (Figur 4.10.). I denne periode kan iltforbruget fra især bundsedimentet altså opvejes af, at der vertikalt føres tilstrækkelig ilt til bundvandmassen. Den 26. juni begynder først bundvandets iltkoncentration at falde. Fra den



Figur 4.9
Saltholdighedsfordelingen på station 4669, juni 1989 i Vejle Fjord.

Iltsvindet skyldes ikke lokale forhold

26. til 29. juni falder iltindholdet fra 7,8 mg/l til 1,7 mg/l. Sættes havbundens iltoptagelse til 1-2 mmol O₂/time/m² (Vejle Amt, 1990) svarer dette til 0,1-0,2 mg O₂/l pr. døgn for en 4 m bundnær vandmasse. Iltsvindet i et 4 m tykt bundlag i forbindelse med importen var 2,2 mg O₂/l pr. døgn og altså langt højere end de lokale forhold kan gøre rede for. Iltsvindet, der optræder den 29. juni, skyldes således ikke forholdene i Vejle Fjord, men er importeret udefra og gør sig gældende i hele fjorden.

Også import af næringssalte

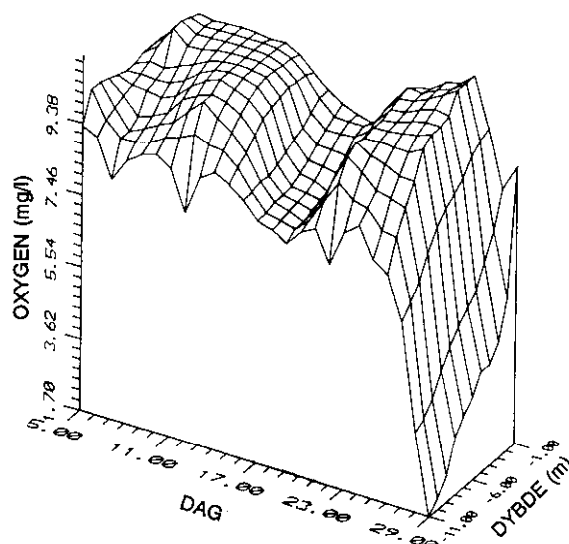
Indtrængningen af vand fra Kattegat kan også registreres i de vandkemiske data. Dette er særligt tydeligt for ortho-fosfat (Figur 4.11.). Frem til 25. juni ligger ortho-fosfatindholdet meget lavt på nogle få µg/l. Indholdet starter med at stige 26. juni for at kulminere 29. juni med 39 µg/l.

De lave ortho-P koncentrationer som blev målt i starten af perioden, hvor vandmasserne ikke var lagdelte, er karakteristiske for overfladevandet i Vejle Fjord i sommerperioden.

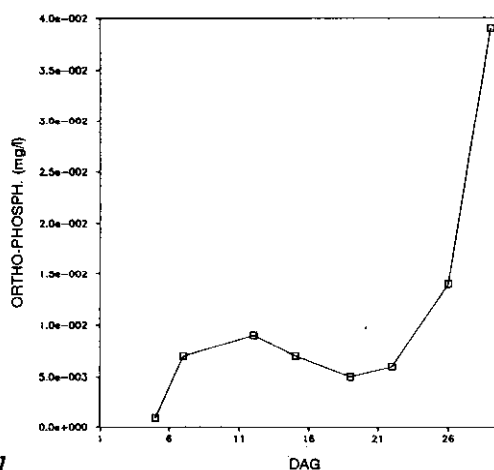
Efter indstrømningen af bundvand fra Kattegat stiger bundvandets fosfatkoncentration til et maksimum på 39 µg/l, hvilket er karakteristisk for bundvandet i Vejle Fjord i sommerperioden.

Vindforhold i forbindelse med import af iltsvind

Vindforholdene i juni op til den 27. er rolige. På figur 4.12 A er angivet dagenes maksimale målte middelhastighed over 10 min. Der er ikke taget hensyn til varigheden. Hastigheden på omkring 7 m/s den 8. juni varede således kun i 9 timer. Til gengæld blæser det op den 27. juni



Figur 4.10
Iltindholdet på station 4669 i Vejle Fjord, juni 1989.



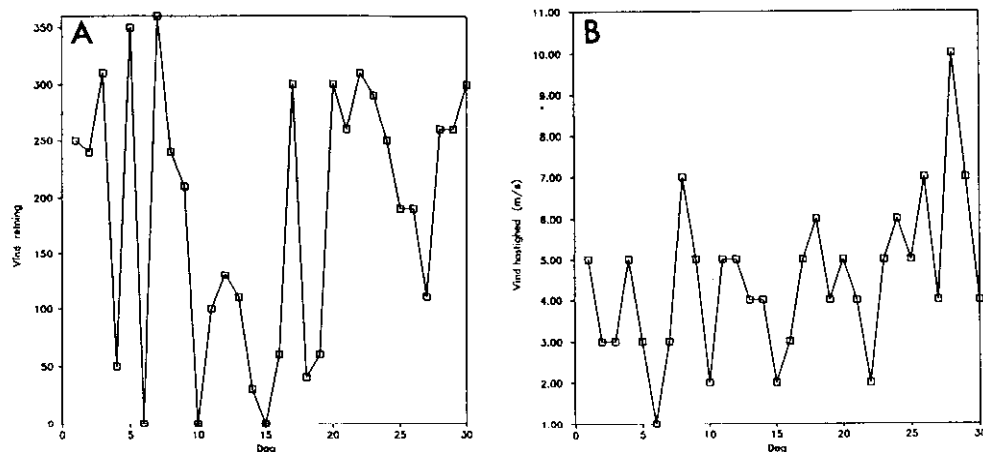
Figur 4.11
Variationen i ortho-fosfat ved bunden på station 4669 i Vejle Fjord, juni 1989.

for at give hastigheder på op til 10 m/s den 28. juni fra vest (figur 4.12 B).

De relativt høje hastigheder varede i 24 timer og var de højeste i juni måned. Vestenvinden presser Nordsø-vand ind i Kattegat og "skubber" der med Kattegat-vand ind i Vejle Fjord.

De hydrografiske målinger op til den 26. juni tyder på, at fjorden, når kun tidevandet medvirker, har et ringe vandskifte. Til gengæld kan vandskiftet ske hurtigt med vindskabt cirkulation.

Et hurtigt vandskifte er dog på dette tidspunkt af året ikke altid en fordel, hvis kvaliteten med hensyn til ilt i det indtrængende vand er dårlig. Pludselige iltsvindssituationer i havområder, som ellers er velilte både i



Figur 4.12
Vindforhold i Billund juni 1989. A) Retning. B) Max. hastighed.

vandsøjlen og ved sedimentet, kan således forklares ud fra de beskrevne hydrografiske forhold. Observationer af pludselige iltsvind med omfattende fiskedød som resultat er tidligere blevet registreret bl.a. nord for Djursland og nord for Fyn i 1981 og kan sandsynligvis forklares som importerede iltsvind. Dette giver et indtryk af at fænomenet er almindeligt forekommende i de indre danske farvande.

5. Suspenderet stof/Resuspension

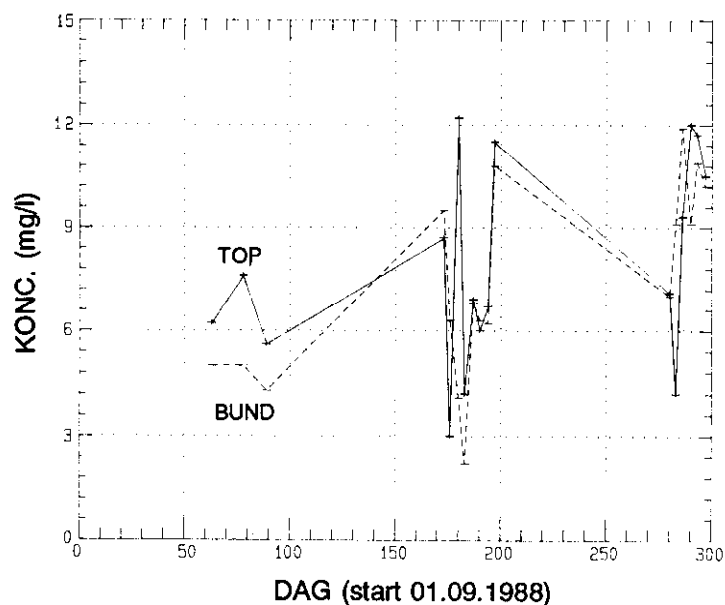
5.1. Suspenderet stof

Ingen sæsonmæssig variation

På stationerne 3772, 4273, 4669 og 5367 er der 21 gange i måleperioden ved overfladen og ved bunden indsamlet vandprøver til bestemmelse af koncentrationen af suspenderet materiale. I disse prøvers koncentration kan der ikke erkendes nogen sæsonmæssig variation (Figur 5.1.). Der findes heller ingen dybdemæssig systematik. På nogle måledage er overfladekoncentrationen større end bundkoncentrationen, medens det omvendte gør sig gældende på andre måledage.

Højeste koncentrationer inderst i fjorden

Tabel 5.1. viser, at de højeste gennemsnitskoncentrationer findes på relativt lavt vand (station 3772) i den inderste del af fjorden. De laveste gennemsnitskoncentrationer findes på



Figur 5.1
Variationen i indholdet af suspenderet stof top og bund på station 4669 i Vejle Fjord gennem måleperioden.

dybt vand (station 5367) i den yderste del af fjorden.

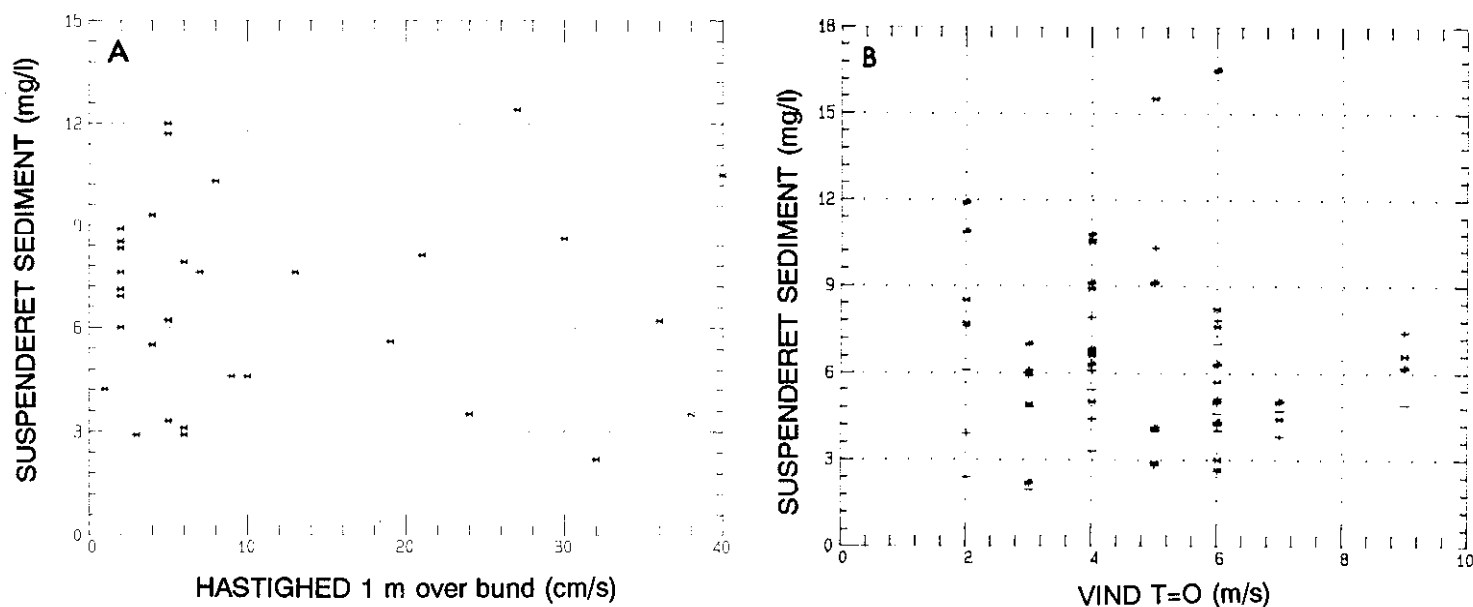
Der er foretaget en undersøgelse af, om koncentrationen af suspenderet stof kan korreleres med dynamiske parametre som strømhastighed målt 1 m over bunden og vindhastighed. Figur 5.2 A,B viser eksempler herpå. Det kan ses på figur

Tabel 5.1
Koncentrationen (mg/l) af suspenderet materiale på de 4 målestationer i Vejle Fjord (n = 21).

	3772		4273		4669		5367	
Station	Top	Bund	Top	Bund	Top	Bund	Top	Bund
Max	16.6	12.1	15.5	8.9	10.6	17.2	7.0	10.8
Min	2.2	3.0	2.9	2.9	2.6	2.7	2.0	2.2
Gennemsn.	7.7	7.8	7.1	6.3	6.1	7.0	4.7	6.2
Stand.afv.	3.6	2.9	3.0	2.0	2.4	3.9	1.6	2.4

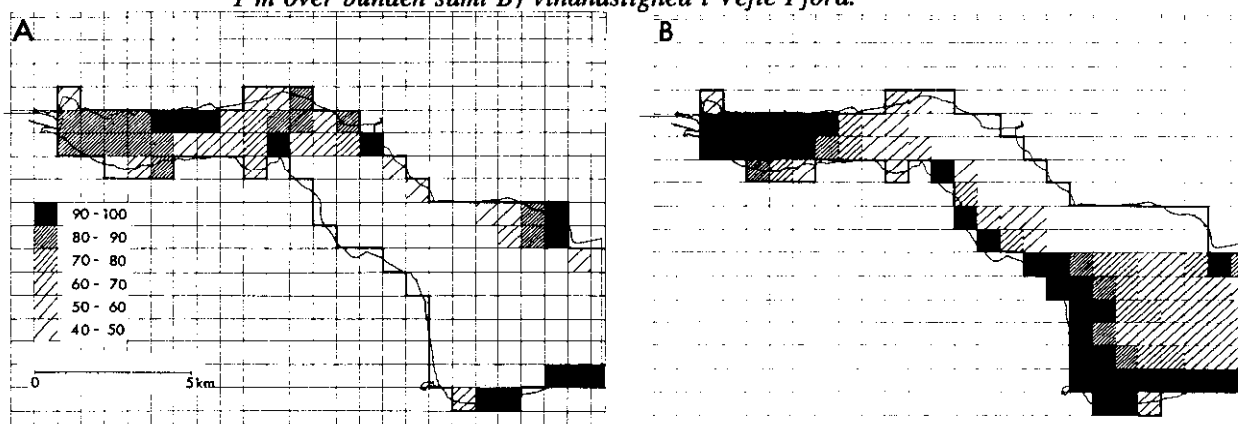
5.2. A,B, at der ingen sammenhænge er mellem disse dynamiske parametre og koncentrationen af suspenderet stof. Det samme gælder, hvis vindhastigheden 6 timer før måletidspunktet bruges i stedet for vindhastigheden på måletidspunktet. Figur 5.2. A,B antyder således, at der på måledagene ikke sker nogen resuspension på dybt vand. Det skal i denne forbindelse bemærkes, at på måledagene har vindhastigheden ikke oversteget 9 m/s og at strømhastigheden ikke har oversteget 32 cm/s. På 3 måledage er der foretaget strømmålinger

Kun målinger dækkende
vindhastighed < 9 m/s



Figur 5.2

Sammenhængen mellem koncentrationen af suspenderet stof og A) strømhastighed målt 1 m over bunden samt B) vindhastighed i Vejle Fjord.



Figur 5.3

Procentdele af bundsedimentet i Vejle Fjord der kan resuspenderes ved en vindhastighed på 15 m/s. A) Vestenvind. B) Østenvind.

over en tidevandsperiode. Heller ikke på disse dage kan variationen i koncentrationen af suspenderet stof korreleres med variation i strømhastighed. Det er derfor undersøgt, hvilke betingelser, der skal være opfyldt for at få resuspension på dybt vand.

5.2. Resuspension: Tidevand eller vind

Store hvirvler i vandet kan resuspendere bundsedimentet, hvis deres vertikale målestok er tilstrækkelig stor til at nå bunden. Den største målestok opstår ved en kritisk længde (L_c), der er bestemt af forholdet mellem opdrift og inertie. Længdeskalaen kan efter Denman & Gargett (1983) udtrykkes som

$$2\pi L_c = \varepsilon^{1/2} N^{-3/2} \quad (1)$$

hvor ε er tabet i turbulent kinetisk energi og hvor N , Brunt-Vaisala frekvensen er et mål for den lokale lagdeling udregnet fra temperatur og saltholdighedsprofiler:

$$N^2 = [g/\rho] \delta\rho/\delta z \quad (2)$$

hvor g er tyngdeacc., ρ er vandets vægtfylde og z er dybden. Efter Kullenberg (1977) kan ε udtrykkes som

$$\varepsilon_v = (\rho_a/\rho_w) (C_p/h) K U_{10}^3 \quad (3)$$

hvor ε_v er tabet på grund af vind, K (0.04) er en vindfaktor, ρ_a er luftens vægtfylde (1.2 kg/m^3), ρ_w er vandets vægtfylde ($1.02 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$). C_p er en modstandskoefficient ($1.3 \cdot 10^{-3}$), U_{10} er vindens middelhastighed i 10 m's højde og h er vanddybden.

En kombination af ligning (1) og (3) giver et udtryk for den mindste vindhastighed, der er nødvendig for at skabe hvirvler, der har indflydelse på bunden (altså hvor $2\pi L_c = h$)

$$U_{10\min} = [\rho_w/(\rho_a C_p K)]^{1/3} h N \quad (4)$$

Med forholdene centralt i Vejle Fjord ($h=12\text{m}$) skal der ved stærk lagdeling ($N>0.05 \text{ s}^{-1}$) kraftig storm til for at hvirvlerne når bunden. Er lagdelingen svag ($N<0.005 \text{ s}^{-1}$) kræves der vindhastigheder på 10 m/s).

For tidevandsbevægelser kan ε udtrykkes som

$$\varepsilon_t = C_d \frac{4}{3} \pi U_t^3 / h \quad (5)$$

hvor C_d er friktionskoefficienten og U_t er tidevandets amplitude (Pingree et al., 1978). Herefter kan det ses, at i ulagdelte lavvandede kystområder må ligning (6) være opfyldt når vinden er mere effektiv til at generere turbulent kinetisk energi end tidevandet

$$(3 \rho_a C_p K/4 \pi \rho_v C_d) (U_{10}/U_t)^3 > 1 \quad (6)$$

Vind har stor betydning for resuspension

I Vejle Fjord er dette opfyldt når vindhastigheden er >4 m/s. Vinden har altså stor betydning for resuspension fra bunden.

5.3 Bølgeresuspension

Sammenhængen mellem vindretning- og hastighed og forholdene på havbunden er ikke altid ligefrem. Vinden behøver en vis varighed og frit stræk for at opnå den største bølgeeffekt på bunden. Hertil kommer, at bølgerne bliver refrakterede på lavt vand. Vi forudsætter imidlertid, at vinddata kan bruges direkte som udtryk for bølgeaktivitet, idet Brydsten (1988) i Laholm bugten fandt, at vinddata fra den centrale del af Kattegat kunne forklare 90% af variationen i bølgehøjde og 92% af variationen i bølgeperiode målt på en bølgemåler.

Beregning af susp. sker i 3 faser

Proceduren i beregning af bølgeresuspension kan opdeles i 3 faser. Først bestemmes, for hvert felt i et net der er lagt ud over fjorden, bølgehøjde, periode og længde. Disse parametre er afhængige af det frie stræk. Bestemmelsen kan enten ske efter bølgeforudsigelsesdiagrammer (Beach Erosion Board, 1975) eller som her mere generelt efter

Bølgeforudsigelser

$$\frac{gH}{U^2} = 0.283 \tanh \left[0.578 \left(\frac{gd}{U^2} \right)^{0.75} \right] \tanh \left\{ \frac{0.0125 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{0.42}}{\tanh \left[0.578 \left(\frac{gd}{U^2} \right)^{0.75} \right]} \right\}$$

$$\frac{gT}{2\pi U} = 1.20 \tanh \left[0.520 \left(\frac{gd}{U^2} \right)^{0.375} \right] \tanh \left\{ \frac{0.077 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{0.25}}{\tanh \left[0.520 \left(\frac{gd}{U^2} \right)^{0.375} \right]} \right\},$$

Hastighed ved bund

Disse to formler gælder for bølger på lavt vand, hvor bølgerne bliver mindre end på dybt vand på grund af energitab til friktion, sedimentbevægelse og perkolation. Tilsvarende formler for bølger på dybt vand kan findes i Beach Erosion Board (1975). Dernæst beregnes den frem- og tilbagegående hastighed ved bunden som en overfladebølge kan medføre. Efter Komar & Miller (1973) kan max-hastigheden udtrykkes som

$$U_m = \pi H / T \sinh(2\pi h/L)$$

hvor H er bølgehøjde, T er periode, L er længde og h er dybde. Med kendskab til bundsedimentets kornstørrelsesfordeling kan nu bedømmes i hvor høj grad U_m kan medføre resuspension. Tærskelværdien for en bestemt kornstørrelse findes efter

Tærskelværdi for
kornstørrelse

$$\rho_w U_m^2 / (\rho_s - \rho_w) gD = 0,30 [H / \sinh(2\pi h/L) D]^{1/2}$$

hvor D er den kornstørrelse, der netop kan sættes i bevægelse. Selvom ovenstående formelapparat kan forekomme kompliceret, er det dog let at sammensætte ligningerne i et regnearksprogram.

Ingen resusp. centralt i fjorden

Figur 5.3. A,B viser beregninger udført for henholdsvis en vestenvind på 15 m/s (som er den højest målte i undersøgelsesperioden) og en østenvind på 15 m/s. I figurerne er angivet den procentdel af sedimentet på havbunden, der kan resuspenderes. Det ses generelt, at de største procentdele findes i de kystnære områder. Dette til trods for, at sedimentet her på grund af resuspension i forvejen er meget grovere end sedimentet på dybt vand. Ved at sammenholde de to figurer kan det ses, at der er et område på dybt vand i den centrale del af fjorden, som ikke har resuspension ved disse vindforhold. Netop i dette område findes de højeste koncentrationer af næringssalte og organisk mate-

Lav koncentration i
åens og høj i fjor-
dens sedimenter

bundsedimentet er lavt inde i åen. Dette skyldes resuspensionen på grund af høje strømhastigheder i åen. Så snart åen begynder at brede sig ud i fjorden, falder strømhastigheden, og det suspenderede materiale får ro til at sedimentere. Hertil kommer, at det fine stof som føres i suspension med det ferske vand vil flokkulere, når det møder saltvandet. De resulterende store aggregater vil sedimentere ud. Dette resulterer i, at sedimentet i fjorden nær åudløbet har et ca. 45 gange større indhold af kvælstof. Koncentrationen af kvælstof fortsætter med at stige ud gennem fjorden med stigende vanddybde. Dette hænger sammen med den ringere mulighed for bølgeresuspension med stigende vanddybde. Materialet fra åen, der sedimenterer på lavt vand i fjorden nær åen, bliver altså på grund af resuspensionen og strømmene omfordelt til de dybere dele af fjorden.

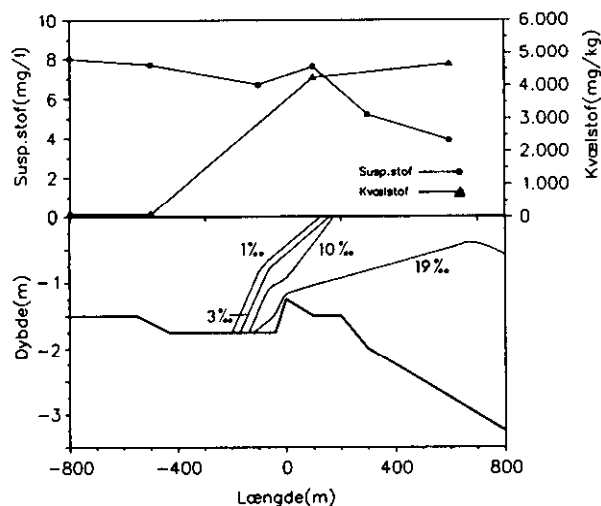
5.6. Effekter på dybt vand

I perioden oktober 1988 til juli 1989 er der på 4 målestationer på dybt vand ud gennem fjorden 21 gange indsamlet vandprøver 1 m over bunden og 1 m under overfladen. I disse prøver er der ingen forskel i koncentrationen af suspenderet stof mellem overflade og bund. Der kan ikke findes nogen sammenhæng mellem koncentration og vindhastighed ej heller med vindhastigheden målt 6 timer før måletidspunktet. Der er heller ingen sammenhæng mellem koncentration og strømhastighed målt 1 m over bunden. Disse målinger (der er ikke udført målinger på dage med vindhastighed over 9 m/s) tyder på, at der ikke sker resuspension på dybt vand ved små vindhastigheder i overensstemmelse med beregningerne. Den forskel, der kan observeres mellem de enkelte måledage tilskrives suspenderet stof, der er resuspenderet på lavt vand og ført med strømmene ud på dybt vand. Det skal dog nævnes, at et andet Hav-90 projekt i den yderste del af fjorden finder resuspension i specielt den nederste meter af vandsøjlen (Jensen, Pejrup og Valeur, 1990). I sidstnævnte projekt måles kontinuerligt, hvilket giver mulighed for at få effekten af høje vindhastigheder repræsenteret.

På grund af den ringe resuspension på dybt vand

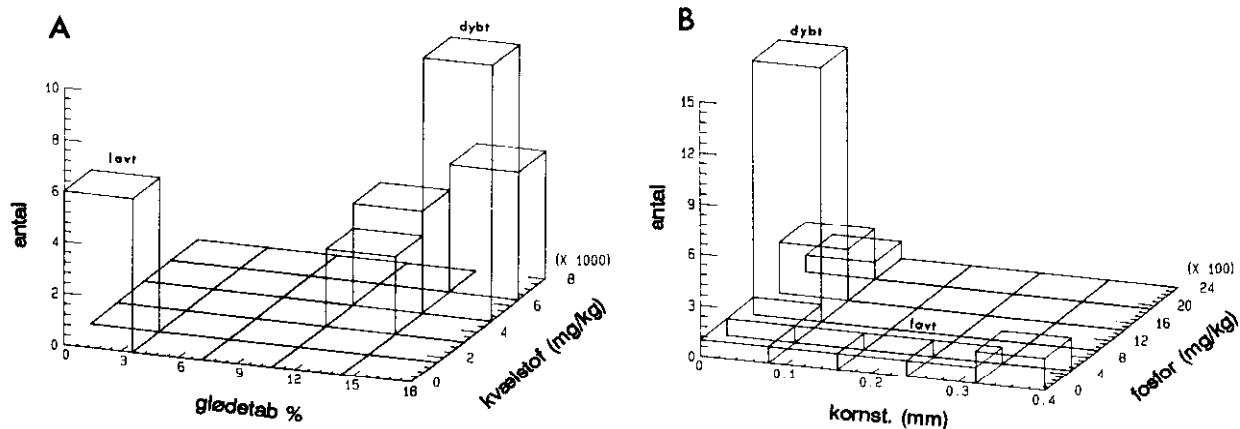
Højeste koncentration på dybt vand

får det fine materiale lov til at akkumulere med en rate på 2-4.5 g/m²/dag. I forhold til sedimentet på lavt vand har sedimentet på dybt vand en middeldkornstørrelse, der er 30 gange mindre og et kvælstof, fosfor og organisk indhold, der er 10 gange større (figur 5.7 A,B).



Figur 5.6

Nederst angives vandets saltholdighed nær Vejle Å. Øverst henholdsvis koncentration af suspenderet stof i vandet samt bundsedimentets koncentration af kvælstof. O på længdeaksen = åmunding.



Figur 5.7

Histogrammer visende sammenhængen mellem sedimentets indhold af A) Kvælstof og glødetab samt B) middeldkornstørrelse og fosfor.

6. Sedimentfordeling

6.1. Kornstørrelse

Erosionsområde ud
for Trelde Klint

Figur 6.1. viser middeldkornstørrelsen i det sediment, der er aflejret på fjordbunden. Det ses, at på dybder større end 4 m er middeldkornstørrelsen 7ϕ ($= 0,008$ mm.), medens man skal ind på dybden < 2 m. for at finde kornstørrelser i sandfraktionen 3ϕ ($= 0,125$ mm.). Der er en undtagelse til dette generelle mønster. Ud for Trelde Klint, som jvfr. afsnit 4.2.2. har resuspension ved stærke østlige vinde, skal man udenfor 10 m. dybdekurven for at finde sediment finere end 3ϕ . Dette område er det eneste i fjorden, der på dybt vand kan karakteriseres som erosionsområde.

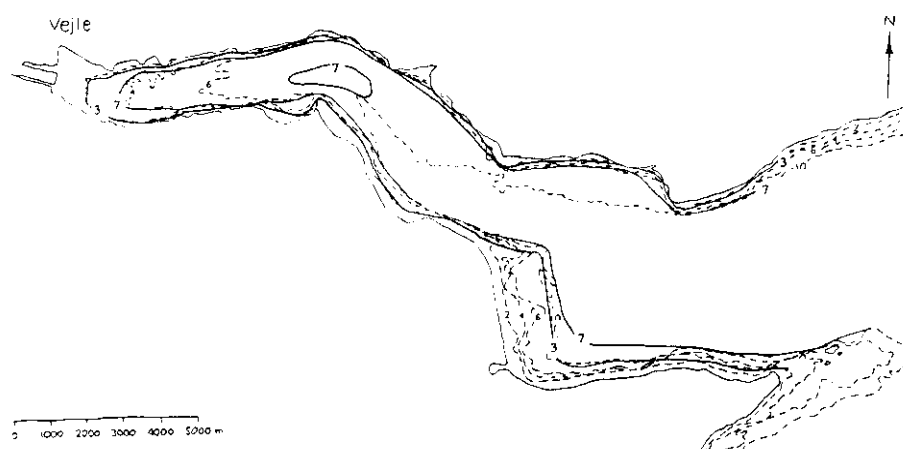
6.2. Næringssalt i bundsediment

Som med kornstørrelse er der stor forskel i næringssaltindholdet mellem lavt og dybt vand. Dette hænger sammen med, at der er en høj negativ regressionskoefficient mellem sedimentets sandindhold og både kvælstofindholdet ($r=-0,94$, $n = 28$) og fosforindholdet ($r=-0,89$, $n = 28$). Regressionskoefficienten mellem sedimentets organiske indhold og næringssaltindholdet er endnu højere 0,98 for kvælstof og 0,90 for fosfor.

På lavt vand er indholdet af kvælstof i sedimentet 200 - 600 mg/kg tørstof, medens indholdet af fosfor er 200 - 400 mg/kg tørstof. Indholdet af organisk stof udtrykt ved glødetab ligger på 0,6 - 2,3%. Baseret på kulstof er C/N forholdet 8,3.

På Fakkegrav lokaliteten gør specielle forhold sig gældende. Selvom lokaliteten i måleperioden har fået netto pålejret > 2 cm sediment, har sedimentomsætningen pr. måned oversteget 12 cm. Dette betyder, at lokaliteten ofte er udsat for kysterosion, hvilket også kan konstateres ved tilstedeværelse af kystskrænt uden vegetation. I skrænten og på havbunden, hvor den ofte er dækket af kun 2 - 3 cm marint sediment, er den

MIDDELKORNSTØRRELSE Ø-SKALA



Figur 6.1
Kornstørrelsesfordelingen i Vejle fjords bundsediment.

Tertiære ler har højt indhold af P

tertiære ler fremstående. Denne tertiære ler har et relativt højt indhold af næringssalte. For fosfor ligger indholdet helt oppe på 2000 mg/kg tørstof.

Erosionens betydning

På dybt vand, hvor resuspensionen er sjælden, ligger kvælstofkoncentrationen på 4200-7000 mg/kg tørstof. De højeste koncentrationer findes centralt i fjorden, hvor der ikke sker resuspension (fig. 5.3). Fosforindholdet på dybt vand ligger på 1000-1600 mg/kg tørstof. Det organiske indhold er på 11 - 17,5%. C/N forholdet er også her 8,3. Fjordbunden ud for Trelde Klint, hvor sedimentet er sand på grund af resuspension, har et lavt indhold af såvel næringssalte som organisk stof.

6.3. Sedimentation og resuspension

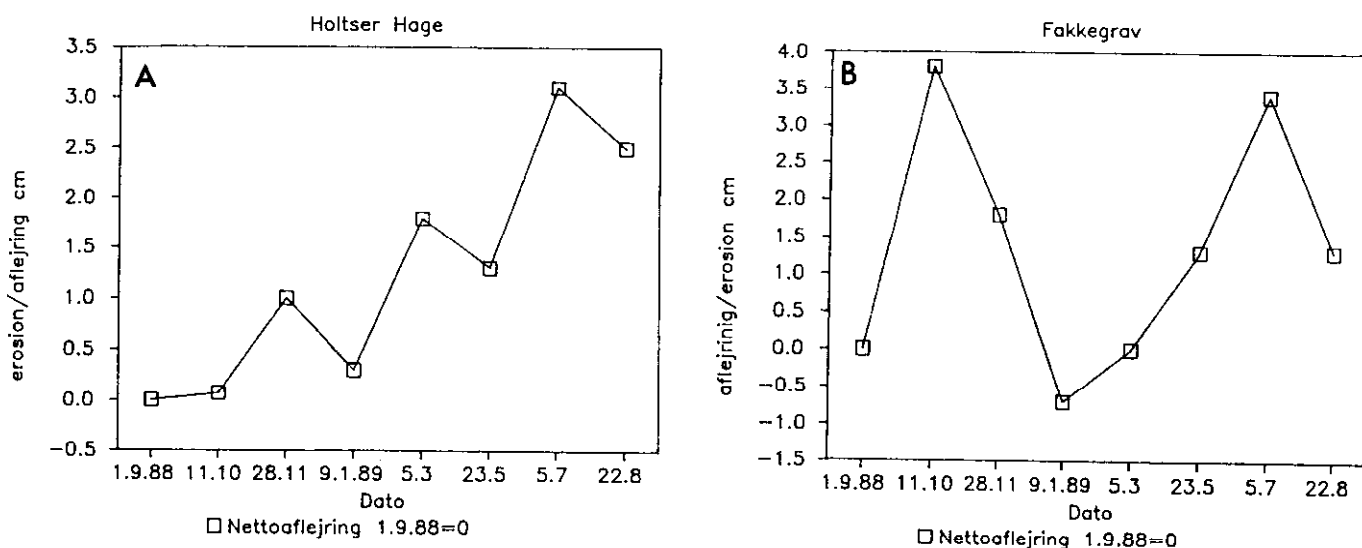
De fem forsøgsmålinger på lavt vand har på grund af forskellig eksponering haft hver deres sæsonmæssige variationer i sedimentation og resuspension. I det følgende gennemgås de to ekstremer: Den beskyttede, østvendte lokalitet

Bruttosedim. meget større end netto-sedim.

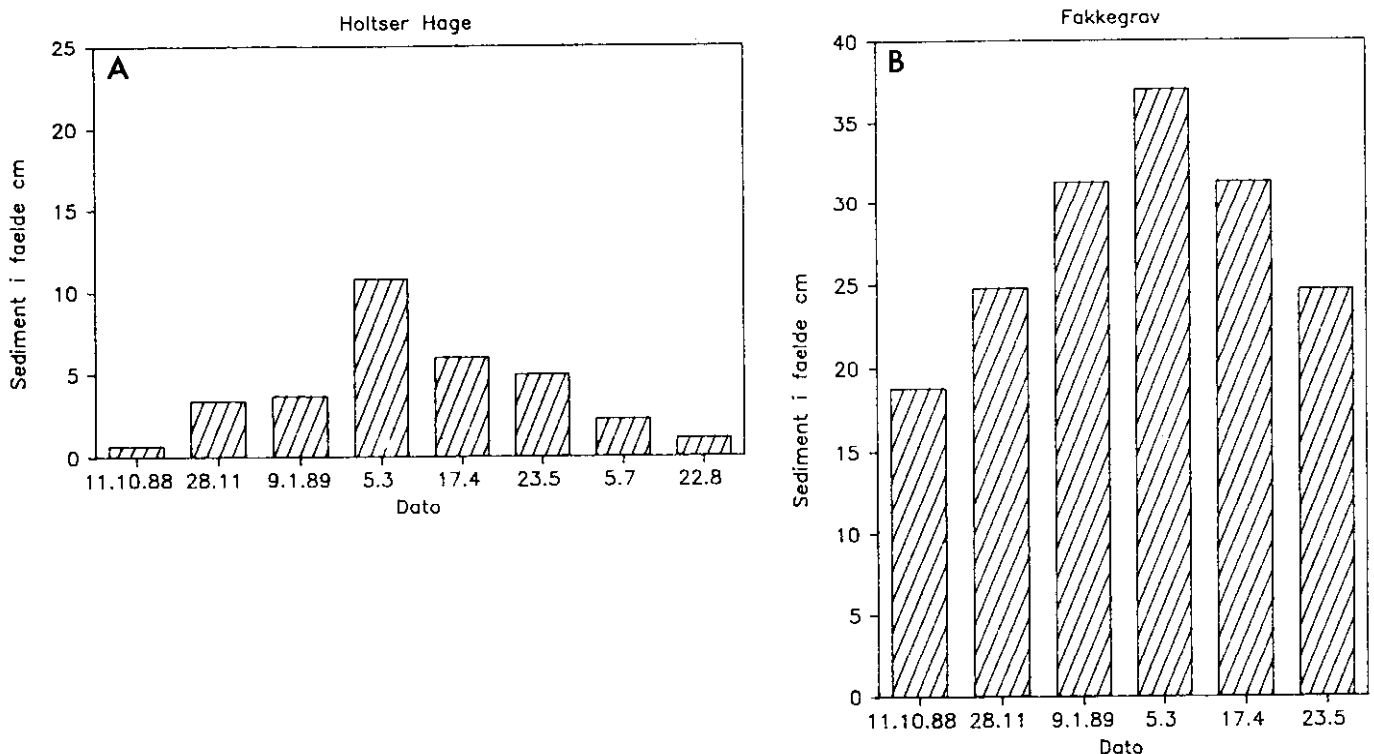
Holtser Hage på sydsiden og den eksponerede lokalitet Fakkegrav på nordsiden. Holster Hage er en lavenergi lokalitet, da stærke østenvinde er sjældne. Bruttoomsætningen er på begge lokaliteter meget stor i forhold til nettoomsætningen. Målt som topografiske ændringer er der ved Fakkegrav sket erosion (4,4 cm) om vinteren og pålejrning forår og sommer således, at der i måleperioden netto er pålejret 1,2 cm sediment (figur 6.2. A). Holtser Hage har haft mindre variationer, og netto er der her aflejret 2,5 cm. sediment (figur 6.2. B). Disse tal angiver dog kun, hvad der er blevet tilbage på havbunden efter sedimentation/resuspension. I fælderne registreres derimod den sedimentmængde, der har været på bunden, men som forsvinder ved resuspension. Denne mængde svarer til op til 5 cm/md ved Holtser Hage og op til 20 cm/md ved Fakkegrav (figur 6.3. A,B).

Høje koncentrationer langs sydsiden

Næringssaltindholdet i det sediment, der bliver tilbage på bunden, er lille i forhold til indholdet i det sediment som resuspenderes, både når det drejer sig om kvælstof og fosfor (figur 6.4 A,B). Ydermere er koncentrationerne meget høje på sydsiden i forhold til nordsiden.



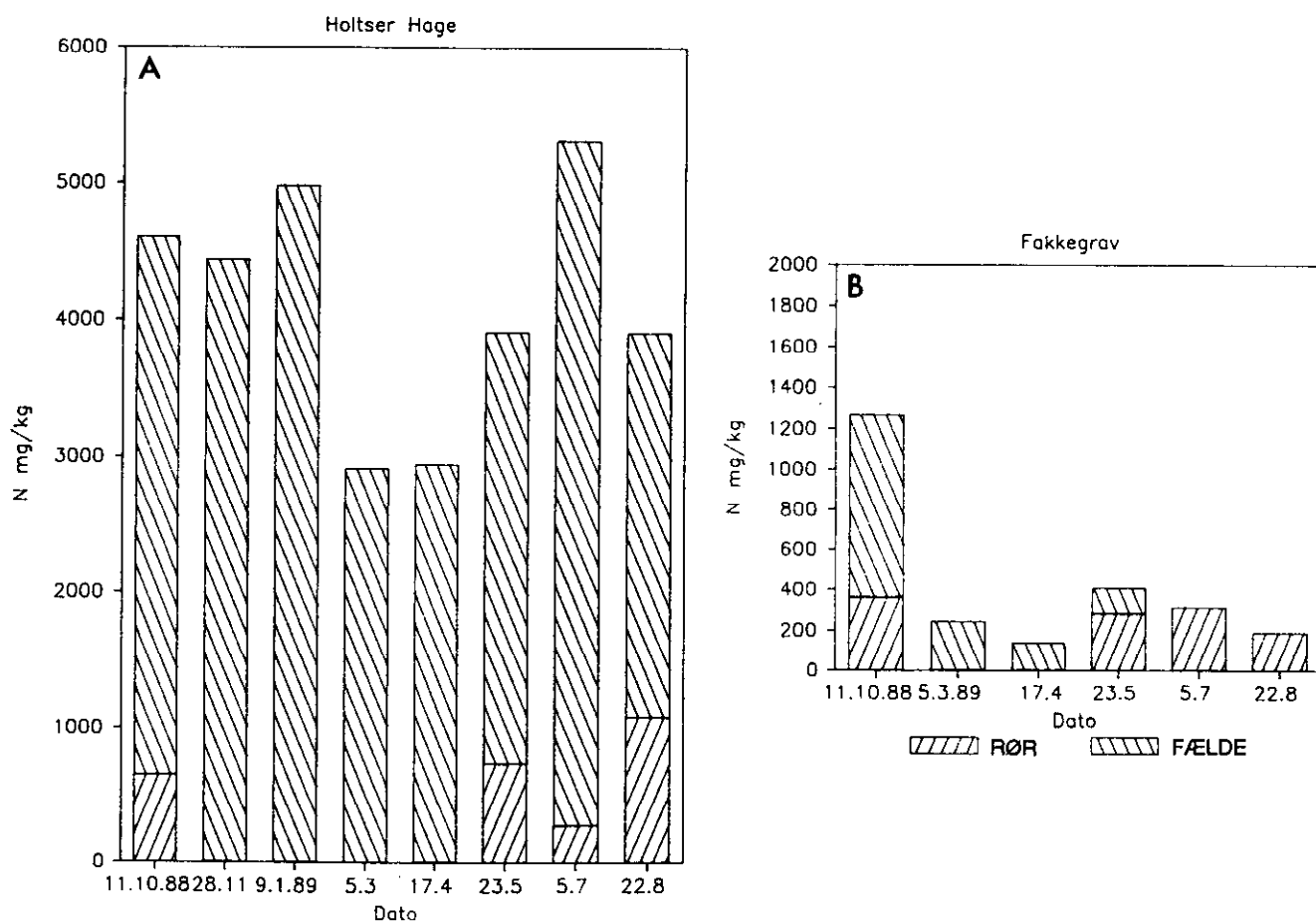
Figur 6.2
Erosions/aflejningsforløb målt som topografiske ændringer i Vejle Fjord. A) Holtser Hage. B) Fakkegrav.



Figur 6.3
Bruttoomsætning målt i fælde i Vejle Fjord. A) Holtser. B) Fakkegrav.

Ved gennemgang af flyfotos er det bedømt, hvor store arealer af fjordens lavvande områder, de enkelte forsøgsselter repræsenterer. Herved muliggøres en beregning af omsætningen af næringssalte på lavt vand i fjorden. De lavvandede arealer, der her er defineret som områder indenfor 2 m dybdekurven, udgør ialt 6,4 km². På lavt vand er der netto aflejret 18,6 tons kvælstof og 2,8 ton fosfor (tabel 6.1 A,B).

Som omtalt i afsnit 3.2 har der været problemer med måling af sedimentationsrate på dybt vand, idet ialt 13 sedimentfælde er forsvundet i løbet af måleperioden. For perioden 7/7-9/8 1989 foreligger for station 4273 og 4669 målinger af rater på henholdsvis 2.1 og 2.0 g/m²/dag. Til sammenligning er der tidligere (Dansk Geoteknik, 1988) på Tirsbæk lokaliteten målt 2.0 g/m²/dag i perioden november-december 1987. Dette er samme sedimentationsrate, som i sommerperioden findes i den yderste del af fjorden (Jensen, Pejrup og Valeur, 1990). Dette kunne tyde på, at sedimentationsraten i



Figur 6.4
Indholdet af kvælstof i henholdsvis bundmateriale og fældemateriale i Vejle Fjord. A) Holtser Hage. B) Fakkegrav.

perioden er meget konstant for hele fjorden. Det vistes da også i afsnit 5.1, at indholdet af suspenderet sediment var relativt ens ud gennem fjorden.

Bestemt udfra Pb-210 datering i sedimentet er

Tabel 6.1

Nettosedimentationen (ton) på lavt vand af næringssalte i Vejle Fjord. A) Kvælstof. B) Fosfor.

A	Fakkegrav	Daugård Strand	Bybæk	Vinding	Holtser Hage	Sum
1.9-11.10 88	4,3	2,0	-1,0	-1,2	0,7	4,8
11.10-28.11 88			3,2	-12,8	7,0	-2,6
28.11-9.1 89			-0,7	3,9	-3,9	-0,7
9.1-5.3 89	-1,2 *	-0,6 *	-2,8	3,9	9,3	8,6
5.3-23.5 89	1,2	0,6 *	-0,7	-0,9	-1,6	-1,4
23.5-5.7 89	2,1	1,0 *	4,3	-2,5	5,2	10,1
5.7-22.8 89	-1,3	-0,5 *	5,8	1,7	-5,9	-0,2
Sum	5,1	2,5	8,1	-7,9	10,8	18,6

B	Fakkegrav	Daugård Strand	Bybæk	Vinding	Holtser Hage	Sum
1.9-11.10 88	2,7	0,9	-0,7	-0,9	0,3	2,3
11.10-28.11 88			3,5	-10,2	2,5	-4,2
28.11-9.1 89			-0,8	3,1	-1,4	0,9
9.1-5.3 89	-1,3 *	-0,6 *	-3,0	3,1	3,3	1,5
5.3-23.5 89	1,0	0,5 *	-1,0	-1,1	-2,2	-2,8
23.5-5.7 89	1,7	0,8 *	2,2	-1,9	4,4	7,2
5.7-22.8 89	-1,7	-0,8	0,5	2,8	-2,9	-2,1
Sum	2,4	0,8	0,7	-5,1	4,0	2,8

sedimentationsraten af tørstof ved de 4 faste stationer ud gennem fjorden henholdsvis 2,7-7,4-1,3-4,7 g/m²/dag. Dette giver i gennemsnit 4,1 g/m²/dag eller 1643 g/m²/år. Den gennemsnitlige koncentration af N i det udsedimenterede sediment er 7 g/kg tørstof svarende til en sedimentation af N på 11,5 g/m²/år. Det skal bemærkes, at koncentrationen af N i bundsedimentet kun er omkring 50% af koncentrationen af N i tørstoffet i vandfasen, således at kun halvdelen af det sedimenterende N forbliver på bunden. Beregnet på samme måde bliver sedimentationsraten af P 2,5 g/m²/år. I den yderste del af fjorden er nettoakkumulationen til bunden på 70 g org.C/m²/år. (Valeur, pers. kom.). Anvendes et C/N forhold på 6, svarer dette til en sedimentation af N på 11,7 g/m²/år i overensstemmelse med nærværende resultater.

Vang (1991) har opstillet en boks-model for fjorden til beregning af vandskifte. Modellen drives af vandstandsvariationer og tager hensyn til bevarelse af saltholdighed, som er en konservativ parameter. De tre inderste målestationer ligger i hver sin boks, medens den yderste station repræsenterer forholdene uden for fjorden. Tilførslen fra land sker i modellen til inderste boks. Modellen beskriver

meget vel også de målte koncentrationer af N i vandet i biologisk "stille" måneder som november og december (Christiansen et al., 1990c).

Med start september 1988 beregnes for hver boks den totale mængde næringssalt, som sammenlignes med den næste målte mængde. Bliver de målte mængder mindre end de beregnede opfattes differencen som tab ved sedimentation. Bliver de beregnede mængder større end de målte, opfattes differencen som gevinst fra bunden. Resultatet for P er vist i figur 6.5, medens de samlede resultater er angivet i tabel 6.2.

Tabel 6.2

Beregnete sedimentationsrater af næringssalte for de 3 bokse og fjorden som helhed fra vandskiftemodel 1) Beregnet ud fra Pb-210 datering.

Sedimentationsrate (g/m ² /år)					
	Vest	Midt	Øst	Fjord	Fjord ¹⁾
Brutto N	53,8	32,0	17,8	22,2	
Netto	50,9	28,8	-2,1	12,2	11,5
Brutto P	4,6	3,5	3,2	2,8	
Netto	2,3	2,4	2,0	2,1	2,5

Det fremgår af tabel 6.2, at de største nettosedimentationsrater for N er inderst i fjorden, mens de største rater for P er i fjordens centrale del.

Tabel 6.3

Månedsvis tilførsel fra land (tons) af næringssalte.

	Sept.	Okt.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	
N	173	291	174	285	204	168	
P	8,8	12,2	13,6	26,7	13,6	14,3	
	Mar.	Apr.	Maj	Juni	Juli	Aug.	År
N	266	158	97	72	76	77	2041
P	21,3	14,2	10,7	8,7	7,7	7,4	159,2

Det fremgår af tabel 6.3, at fjorden fra land har modtaget 2041 ton N og 159,2 ton P. Da fjordens real er kendt, kan nu med de fundne tilførsler og sedimentationsrater beregnes hvilke mængder næringssalte, der netto eksporteres til Kattegat (tabel 6.4).

Tabel 6.4

Balance for næringssalte samt tilbageholdelsesprocent.

	Tilført (T)	Sedim. (T)	Eksport (T)	Tilbageh. (%)
N	2041	753	1288	37
P	159,2	131,6	27,6	83

Det skal bemærkes, at der i tabel 6.4 ikke er taget hensyn til atmosfærisk deposition over fjorden. Tilbageholdelsesprocenten for P er langt større end for N. En ukendt faktor her er, i hvor høj grad kysterosion af tertiært ler (med specielt høje koncentrationer af P) bidrager til sedimentationen og dermed indvirker på tilbageholdelsesprocenten.

7. Fytoplankton

7.1. Artssammensætning

Fytoplanktonet i Vejle Fjord var domineret af kiselalger, furealger og gruppen af ubestemte flagellater, som bl.a. består af arter fra klasserne Prymnesiophyceae, Prasinophyceae og Chrysophyceae.

Furealger om vintere

Furealgerne dominerede biomassen i vinterperioden, mens forårsperioden var domineret af kiselalger. I starten af juni måned bestod biomassen af en blanding af kisel- og furealger, mens der var en tendens til furealgedominans i slutningen af måneden. Denne tendens fortsatte igennem sommer- og efterårsperioden med stigende dominans af furealger som resultat (Vejle Amt, upublicerede resultater).

Kiselalger om foråret

I forårsperioden var kiselalgebiomassen domine-

ret af den lille *Skeletonema costatum*. Den udgjorde således alene >70% af fytoplanktonbiomassen på de 3 inderste stationer. De kvantitativt mest betydningsfulde furealger var de små arter *Heterocapsa triquetra* og *Prorocentrum minimum* samt store arter fra slægten *Ceratium*.

De små arter optrådte i de højeste koncentrationer på de inderste stationer, hvor de blev registreret i regulære masseforekomster. De store *Ceratier* opnåede de højeste koncentrationer på de yderste stationer.

Små arter inderst,
store arter yderst
i fjorden

Den registrerede fordeling af de dominerende arter ind gennem fjorden afspejlede således de enkelte delområder med hensyn til hydrografi og tilgængelighed af uorganiske næringstoffer. De små hurtigtvoksende arter dominerede i den indre, hydrografisk ustabile og næringsrige del af fjorden, hvor de på grund af deres potentielt hurtige vækstrater kunne udnytte favorable situationer i tid og rum, mens de store langsomtvoksende furealger dominerede i den yderste, mere stabile del af fjorden.

7.2. Generelle biomasseforløb

Generelt blev der registreret en faldende gradient ud gennem fjorden med hensyn til fytoplanktonbiomasse og primærproduktion. Fytoplanktonbiomasserne varierede efter samme overordnede mønster gennem året på de 4 stationer. I løbet af perioden fra slutningen af februar til midten af marts måned blev der registreret en massiv øgning i fytoplanktonbiomassen. Tilsyneladende kulminerede udviklingen midt i marts med et markant forårs maksimum domineret af kiselalger som resultat. I den efterfølgende sommerperiode blev der registreret fluktuerende fytoplanktonbiomasser på alle 4 stationer. I vinterperioden blev der registreret aftagende fytoplanktonbiomasser på alle 4 stationer.

Hvis man laver en mere detaljeret sammenligning af forløbene i antal eller biomasse på de enkelte stationer på klasse- eller artsniveau, er det dog klart, at der kan registreres store forskelle i fytoplanktonets populationsdynamik ud gennem fjorden. I sommerperioden blev der

således flere gange registreret modsatrettede ændringer i antal og biomasse af fytoplankton på stationerne ind gennem fjorden. Figur 7.1 viser som eksempel den yderste og den inderste station.

Det overordnede successionsmønster, som karakteriserede fytoplanktonudviklingen på alle 4 stationer, må være resultatet af variationen i de overordnede fysiske-kemiske parametre som f.eks. temperatur, indstråling, turbulens og tilgængeligheden af uorganiske næringsstoffer. Årsagen/årsagerne til forskellene i fytoplanktonets populationsdynamik imellem stationerne skal søges i lokale forskelle i næringsstofftilgængelighed, turbulens og hydrografisk heterogenitet og stabilitet som et resultat af de enkelte fjordområders topografi og belastning med næringsstoffer fra land.

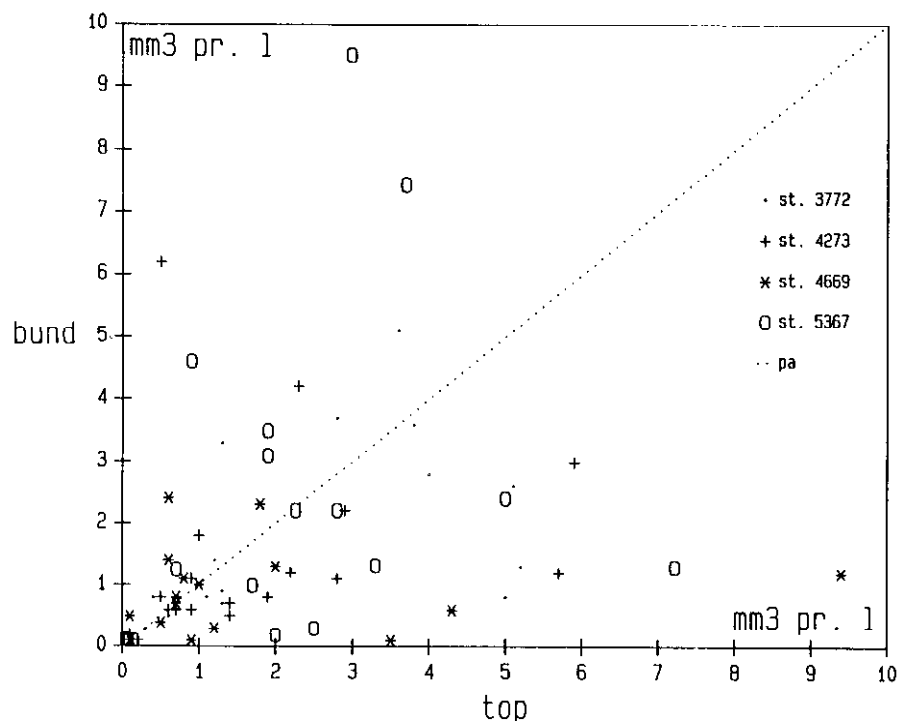
7.3. Vertikal fordeling af fytoplanktonbiomassen

En sammenligning mellem fytoplanktonbiomasserne i overfladen og ved bunden giver kun et groft billede af fytoplanktonbiomassernes vertikale fordeling på de 4 stationer i Vejle Fjord (figur 7.2).

De største forskelle mellem overflade og bund (> faktor 7) blev registreret på station 5367 og 4669, som også var de dybeste stationer. På station 5367 var fytoplanktonbiomassen større end eller lig med fytoplanktonbiomassen ved bunden i 63% af tiden. På de 3 øvrige stationer var fytoplanktonbiomasserne i overfladen større end eller lig biomasserne ved bunden i ca. 70 % af tiden (tabel 7.1). Af tabel 7.1 ses det endvidere, at der var en tendens til, at fytoplanktonbiomasserne på de 2 inderste stationer hyppigere var størst i overfladen end på de to yderste stationer.

Denne tendens underbygges af den hydrografiske beskrivelse, hvorefter det fremgår, at de største forskelle med hensyn til f.eks. salinitet mellem top- og bundvand generelt blev registreret i den inderste del af fjorden som et resultat af tilstrømningen af ferskvand fra Vejle Å.

Det noget kaotiske billede af fytoplankton-



Figur 7.2

Fytoplanktonbiomasser i overfladevandet plottet imod de samhørende biomasser i bundvandet.

biomassernes vertikale fordeling på stationerne i Vejle Fjord som skitseret herover er et resultat af fjordens hydrografiske dynamik koblet til fytoplanktonets adfærd og populationsdynamik. Vertikale klorofylprofileringer viste således, at der i perioder med lav turbulens (lave vindstyrker) kunne registreres markante klorofyltoppe henholdsvis i overfladen, over/i eller under springlaget, mens der i andre perioder blev registreret ensartede klorofylkoncentrationer hele vejen ned gennem vandsøjlen.

7.4. Forårsopblomstringen

Tidlig forårsopblomstring

Forårsopblomstringen startede tidligst inderst i Vejle Fjord, på station 3772, hvor der allerede ved starten af prøvetagningen efter den 20.02. kunne registreres en stabil eksponentiel netto vækst i fytoplanktonbiomassen ($\mu = 0,3$ pr. dag), som fortsatte frem til og med d. 13.03, (figur 7.3.). Forløbet på

Tabel 7.1

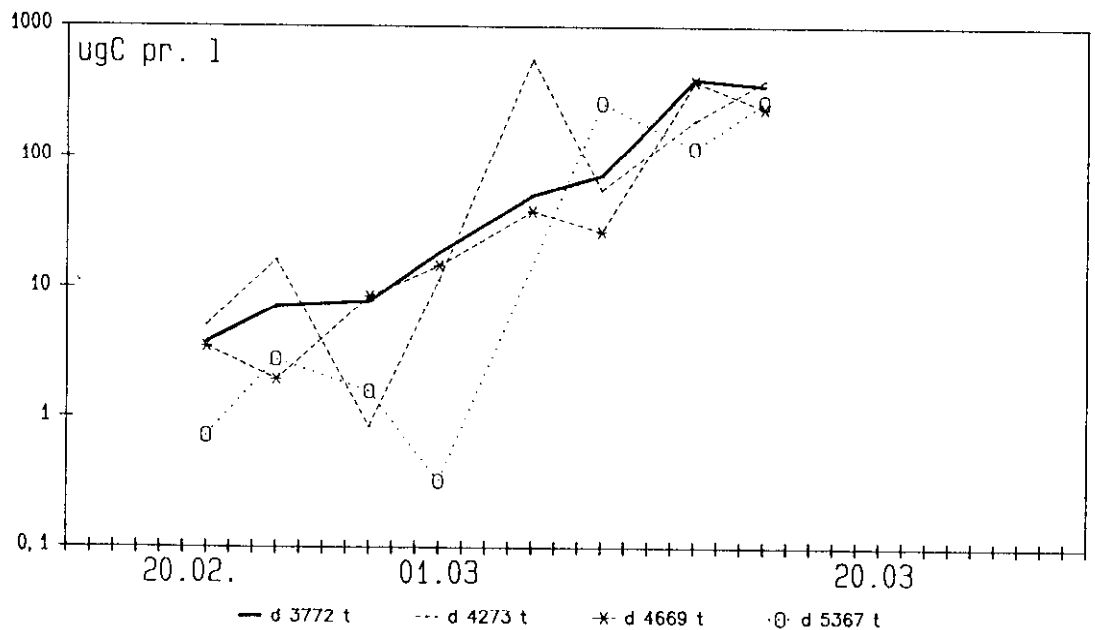
Den procentvise fordeling af prøvetagninger, hvor fytoplanktonbiomassen (mm^3/l) i Vejle Fjord var henholdsvis større eller mindre i overfladen (T) end ved bunden (B).

<u>Station</u>	<u>T>B</u>	<u>T~B</u>	<u>T≥B</u>	<u>T<B</u>	<u>n</u>
3772	47	20	67	33	15
4273	50	22	72	28	18
4669	38	31	69	31	16
5367	38	25	63	38	16

station 4273 havde samme tendens, men var karakteriseret ved, i modsætning til forløbet på station 3772, at være betydeligt mere ujævnt. Årsagen til det ujævne forløb var at stationen var påvirket lejlighedsvist fra vandmassen inderst på station 3772. Således var der et klart sammenfald mellem faldet i kiselalgebiomassen på station 4273 ned på niveau med, hvad der blev registreret på station 3772, og tilstedeværelsen af en stærkt ferskvandspåvirket "ø", med oprindelse længere inde i fjorden, på stationen. Det kan bemærkes her, at "ø"-ens nitrat+nitrit-koncentration ligeledes var som på station 3772. Forløbet i overfladen på station 4669 var helt parallelt med forløbet på station 3772, dog oftest med mindre fytoplanktonbiomasser end registreret på station 3772. Forløbet passer med den hydrografiske beskrivelse af forløbet på stationen, hvor vandmassen i det meste af forårsperioden var kraftigt påvirket af vandmasserne i den indre fjord.

Biomasseforløbenes ensartethed samt dominansen af kiselalgen *Skeletonema costatum* på de tre stationer resulterede også i, at de registrerede maksimale fytoplanktonbiomasser i overfladen var af samme størrelse ($397\text{--}449 \mu\text{g C pr. l}$) (tabel 7.2). Biomasseforløbet på station 5367 adskilte sig fra hvad der blev registreret i den indre del af fjorden ved at biomassen først

Opblomstringen starter senere yderst i fjorden



Figur 7.3

Udviklingen i kiselalgebiomasserne i forårsperioden i overfladen på station 3772, 4273, 4669, 5367 i Vejle Fjord.

begyndte at stige fra 2. marts. I modsætning til de 3 inderste stationer var fytoplanktonbiomassen ikke domineret af *Skeletonema costatum* på denne station. I den efterfølgende periode frem til og med den 16. marts øgedes fytoplanktonbiomassen til en maksimal koncentration på 286 $\mu\text{g C pr. l}$ (tabel 7.2). Den voldsomme vækst i biomassen i den sidste del af forårsperioden faldt sammen med, at vandmassen på stationen blev blandet sammen med vandmasserne i den indre del af fjorden i perioden.

Forårsopblomstringernes størrelse på de enkelte stationer afspejlede de maksimale nitrat+nitrit koncentrationer registreret før opblomstringerne (tabel 7.2). Nitrat+nitrit-koncentrationerne var ikke på noget tidspunkt i forårsperioden $<190 \mu\text{g N pr. l}$. Det er således sandsynligt, at fytoplanktonvæksten i perioden ikke på noget tidspunkt har været væsentligt begrænset af tilgængeligheden af uorganisk kvælstof. Med dette skal forstås, at mængderne af tilgængeligt uorganisk kvælstof har været tilstrækkelig til fortsat fytoplanktonvækst igennem hele den undersøgte del af forårsperioden.

Tabel 7.2

Maksimum fytoplanktonbiomasser (C og N) samt maksimum koncentrationer af uorganisk N og P (DIN og DIP) før; og minimum koncentrationer af uorganisk kvælstof og fosfor "efter" forårs-opblomstringen i Vejle Fjord 1989.

Station	Maksimale fytoplanktonbiomasser		DIN		DIP	
	($\mu\text{g C pr. l}$)	($\mu\text{g N pr. l}$)	($\mu\text{g N pr. l}$) "før"	($\mu\text{g N pr. l}$) "efter"	($\mu\text{g P pr. l}$) "før"	($\mu\text{g P pr. l}$) "efter"
3772 T	401	72	740	620	61	24
3772 B	414	74	540	340	-	-
4273 T	449	81	730	440	58	20
4273 B	219	39	510	180	-	-
4669 T	397	71	580	240	41	15
4669 B	50	9	310	180	-	-
5367 T	286	51	190	180	41	19
5367 B	222	40	230	210	-	-

Tabel 3.

7.5. Kvælstofdynamik - forår

Ved at sammenholde de observerede biomasseændringer (nettoprimærproduktionen) på stationerne med primærproduktionsmålingerne ("brutto-primærproduktionen") kan fraktionen af primærproduktionen, som tabes ud af fytoplankton, enten som resultat af græsning, vertikal transport (sedimentation) eller horisontal transport beregnes. I forårsperioden var mængderne af zooplankton som var i stand til at græsse *Skeletonema costatum*, d.v.s. mesozooplankton, lave i fjorden (Vejle Amt, 1990 upublicerede resultater; Seebach, 1990 upublicerede resultater).

Fraktionen af primærproduktionen, som blev kanaliseret igennem mesozooplanktonet i forårsperioden, forudsættes derfor at være uden kvantitativ betydning for det pelagiske kvælstofbudget. Endvidere var de horisontale vandbevægelser små i største delen af forårsperioden. Horisontal eksport af fytoplankton forudsættes derfor også at være uden kvantitativ betydning i forårsperioden. Tilbage er den vertikale transport af fytoplanktonbiomasse-sedimentation.

Op mod 100% af primærproduktionen sedimenteres

Beregnes nettosedimentationen af fytoplankton i perioden 9.-16. marts som skitseret herover, ses det, at den udgjorde fra 77 til 99,8% af

Tabel 7.3

Beregnete nettosedimentationsrater på stationerne 3772, 4273, 4669 og 5367 i Vejle Fjord under forårsopblomstringen 1989.

<u>Station</u>	<u>µg N pr. l pr. dag</u>	<u>% PP</u>	<u>% Biomasse pr. dag</u>
3772	212	99,8	20
4273	130	91,8	30
4669	19	77,0	20
5367	9	95,1	10

primærproduktionen på de 3 inderste stationer med den højeste sedimentation på station 3772. På station 5367 udgjorde sedimentationen ca. 93% af primærproduktionen (tabel 7.3). De beregnede sedimentationsrater svarede til fra 11 til 30% af fytoplanktonets biomasse pr. dag (tabel 7.3).

Det er således klart, at en meget stor del af det uorganiske kvælstof som indbygges i fytoplanktonet i forårsperioden 1989 eksporteres til sedimentet. Et resultat som tidligere er fundet af bl.a. Smetacek, 1985; Skjoldahl & Wassmann, 1985.

7.6. Kvælstofdynamik - sommer

Tabet af produceret organisk stof i relation til primærproduktionen kan, som for forårsperioden, groft beregnes som skitseret for forårsperioden. Mesozooplanktonet optrådte med betydelige biomasser i flere perioder i løbet af sommeren. Det kan således ikke udelukkes, at fraktionen af fytoplanktonbiomassen, som blev kanaliseret igennem mesozooplanktonet, kunne være af kvantitativ betydning, men en for os ukendt størrelse. Det beregnede nettotab af fytoplanktonets primærproduktion omfatter således i sommerperioden både sedimentation og græsning.

Beregnes nettotabet af fytoplankton for ud-

Højt tab af fyto-
plankton om sommeren

valgte perioder ses det, at det udgjorde fra 100-115% af den daglige primærproduktion på de 3 inderste stationer med det største tab på den inderste station.

Tabet på station 5367 var derimod ca. 18% af den daglige primærproduktion (tabel 7.4). Det relativt lave nettotab på station 5367 i forhold til de indre stationer i fjorden kan skyldes, at fytoplanktonet på station 5367 i højere grad end på de indre stationer, var domineret af store furealger (bl.a. *Ceratier*) i vækst. Disse store furealger vil have en mindre tendens til at udsedimentere og græsses med lille effektivitet af det meste mesozooplankton.

7.7. Uorganisk-N, fytoplankton-N og total-N

Tabel 7.4.

Beregnete nettosedimentationsrater på stationerne 3772, 4273, 4669 og 5367 i Vejle i Fjord i juni 1989.

<u>Station</u>	<u>µg N pr. l pr. dag</u>	<u>% PP</u>	<u>% Biomasse pr. dag</u>
3772	104	105	70
4273	39	115	46
4669	22	100	103
5367	1	18	3

Fordelingen af kvælstof imellem puljerne, uorganisk-N (DIN), fytoplankton-N (fyto-N) og total-N (tot-N) var forskellig i de 3 undersøgte perioder. I vinterperioden og starten af forårsperioden var DIN den dominerende fraktion som nitrat+nitrit. I slutningen af forårsperioden, og især i sommerperioden, var koncentrationerne af DIN relativt lave, mens hovedparten af kvælstoffet blev registreret i puljen tot-N, hvoraf fyto-N kun udgjorde en lille fraktion (figur 7.4).

I vinterperioden udgjorde fyto-N i gennemsnit fra 2-6% af tot-N. Der var en svag tendens til stigende betydning af fytoplankton ud gennem fjorden, (figur 7.5) I forårsperioden udgjorde

fyto-N i gennemsnit fra 4-6% af tot-N. Igen blev de højeste fraktioner registreret yderst i fjorden. I sommerperioden udgjorde fyto-N fra 12 til 17% af tot-N.

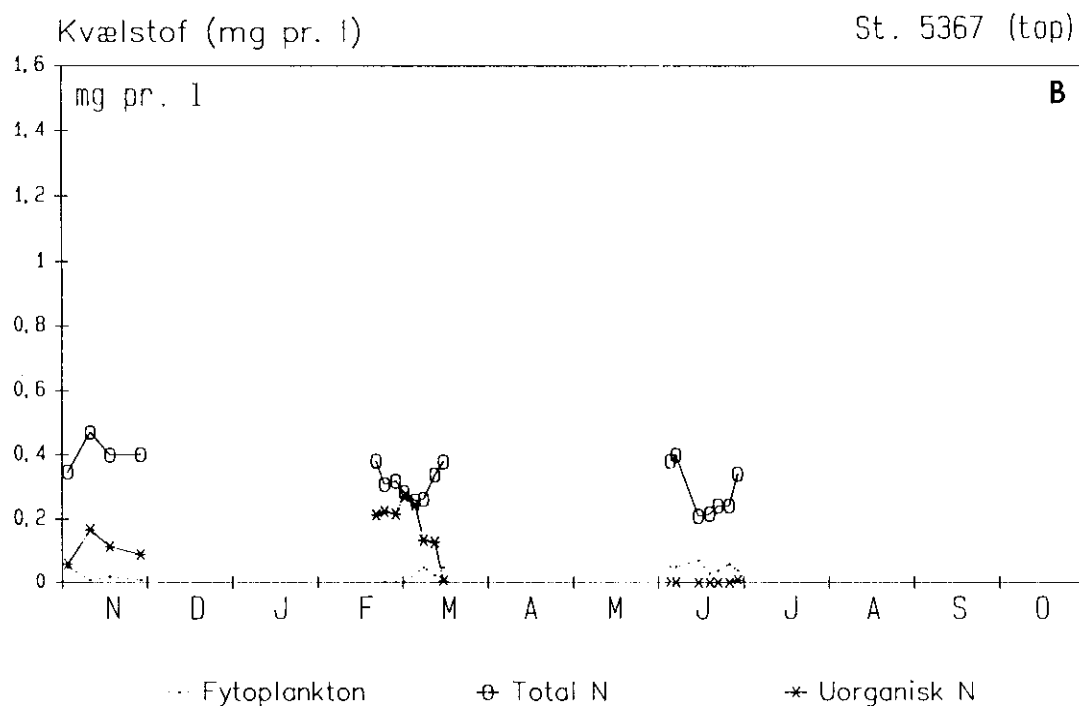
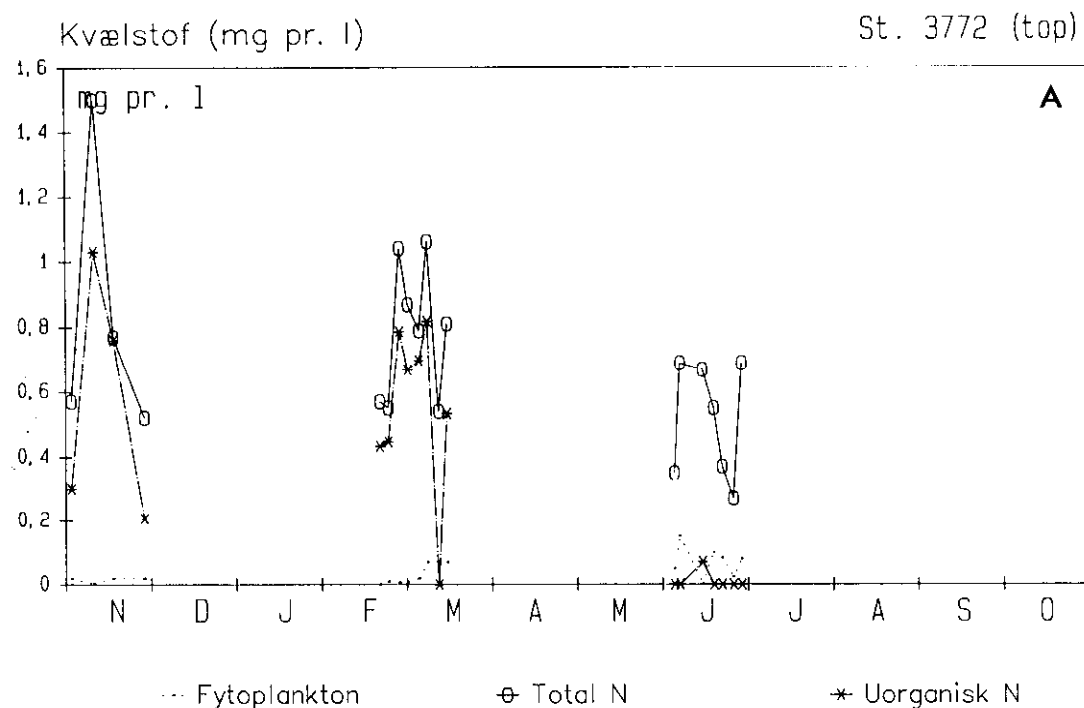
Der tegner sig altså et billede af en kvælstoffordeling gennem året hvor fyto-N kun udgør en markant del af tot-N i sommerperioden; DIN dominerer i vinterperioden og starten af foråret, mens kvælstof i partikulær form (men ikke i fytoplankton), f.eks. i detritus, udgør en væsentlig del af tot-N i hele perioden efter forårsopblomstringen frem til vinterperioden.

Regenerering af N
af stor betydning

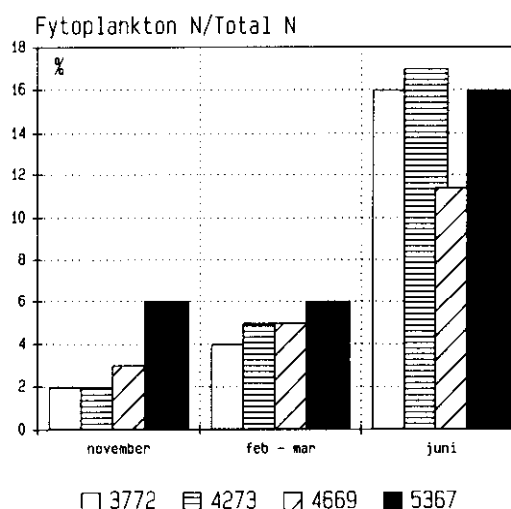
Beregningerne af sedimentation i forårsperioden og "tab" i sommerperioden indikerer, at der må være en stor transport af fytoplankton, enten direkte til bunden (forår) eller direkte til bunden/ind i pelagisk detritus/ind i mesozooplankton (sommer). Det store tab fra fytoplanktonet indikerer, at regenereringen af f.eks. kvælstof, enten ved omsætning af fytoplankton, pelagisk detritus eller fra sedimentet må være af væsentlig betydning for størrelsen af den pelagiske kvælstofomsætning i sommerperioden, hvor afstrømningen fra land er relativt lav, mens regenereringen må være af lille betydning i vinterperiode og starten af forårsperioden, hvor afstrømningen fra land er høj.

7.8. Fytoplankton og total suspenderet stof

Koncentrationerne af total suspenderet stof varierede meget igennem året. De laveste niveauer blev registreret i vinterperioden. Lige før forårsopblomstringen blev der registreret høje koncentrationer, mens der, efterhånden som forårsopblomstringen tog til, først blev registreret markante fald i koncentrationerne af total suspenderet stof. I løbet af opbygningen af forårsopblomstringen steg koncentrationerne af total suspenderet stof parallelt med udviklingen i fytoplanktonets biomasse (se figur 7.6). Dette indikerer, at en væsentlig del af det producerede suspenderede stof i den sidste del af forårsperioden havde sin oprindelse som fytoplankton. Denne mulige sammenhæng mellem forekomsten af fytoplankton og suspenderet stof



Figur 7.4
 Udviklingen i fytoplankton-N, uorganisk-N og total-N i Vejle Fjord. A) station 3772 top. B) station 5367 top.



Figur 7.5

Fytoplanktonets gennemsnitlige andel af total-N i de undersøgte perioder i Vejle Fjord. 1988-89.

En stor del af susp. stof har sin oprindelse som fytoplankton

understøttes af, at beregningerne af sedimentationen af fytoplankton i forårsperioden viste, at hovedparten af fytoplanktonets primærproduktion ikke forblev i pelagiet som fytoplankton, men sedimenterede ud til sedimentet, hvorfra det så igen kunne resuspenderes som detritus.

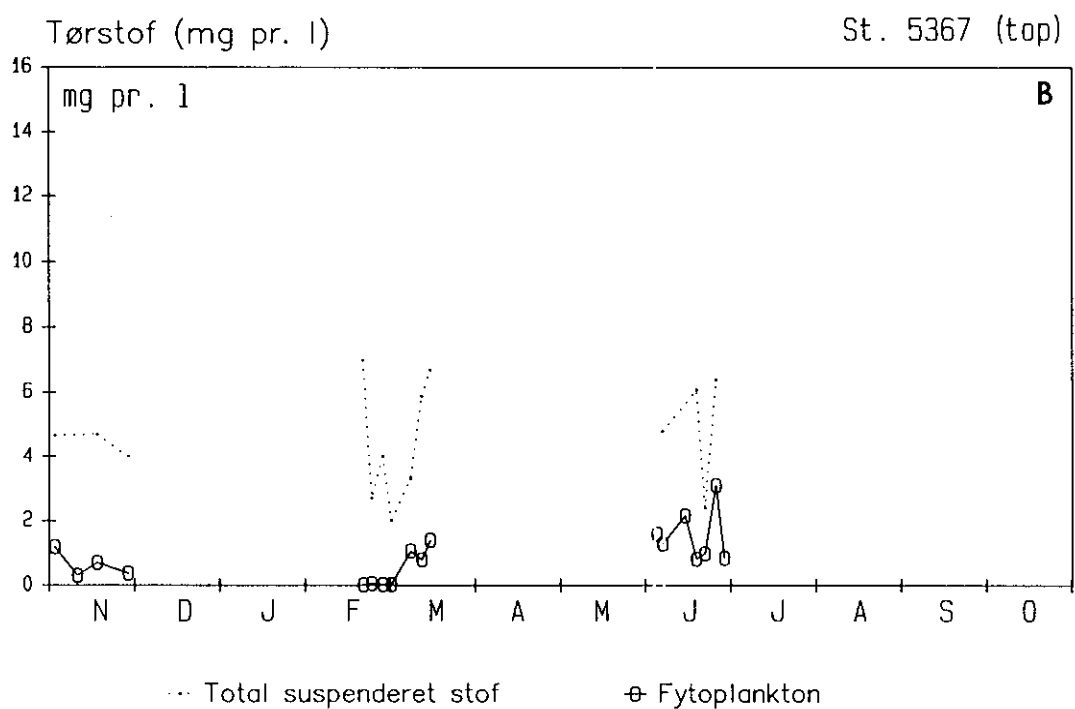
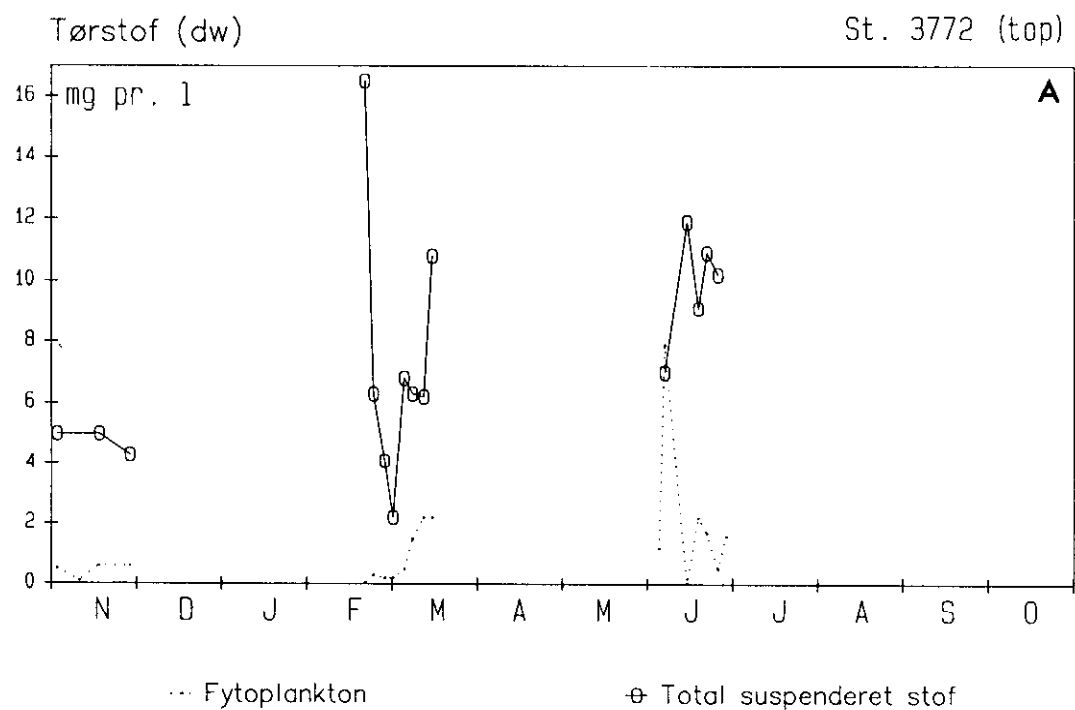
Fytoplanktonet udgjorde de største fraktioner af total suspenderet stof i sommerperioden, fra 19-30%, med den største fraktion på station 5367. I vinter- og forårsperioderne var fytoplanktonets andel af det totale suspenderede stof fra 6-14% (figur 7.7).

Det forhold, at fytoplanktonet udgjorde relativt ens fraktioner af det totale suspenderede stof på stationerne i de forskellige perioder, indikerer, at omsætningen af fytoplankton og total suspenderet stof var tæt koblet og relativt uafhængige af de forskellige hydrografiske forhold på de 4 stationer.

8. Næringssalte og primærproduktion

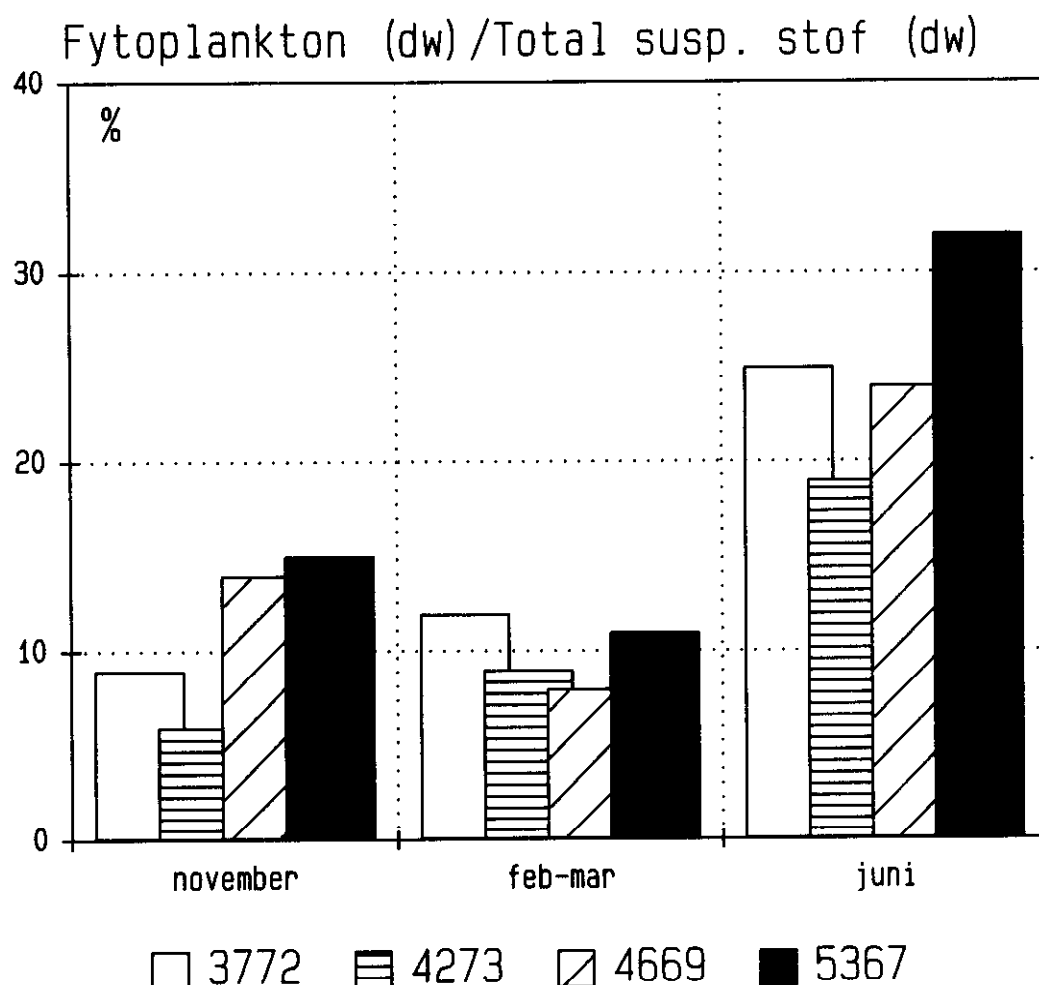
8.1. Stoftransport

Tilførslen af næringssalte til Vejle Fjord fra fjordens afstrømningsområde var mindre i 1989 end i de foregående år. Således var tilførslen af total-N fra størstedelen af Vejle Å's opland f. eks. i årene 1983, 85, 87 og 89 henholdsvis



Figur 7.6

Udviklingen i fytoplanktonbiomassen (tørvægt) i Vejle Fjord i 1988-89. A) station 3772 top. B) station 5367 top.



Figur 7.7

Fytoplanktonets gennemsnitlige andel af det totale suspenderede stof i de undersøgte perioder i Vejle Fjord, 1988-89.

623, 591, 444, og 375 ton pr år. Desuden fandt den største kvælstoftilførsel sted senere på året, nemlig i marts, end det var tilfældet i de tidligere år, hvor tilførslerne ofte toppede omkring januar/februar. Afstrømningstidspunktet har betydning for, hvor store mængder af de tilførte næringssalte der kan fikseres i planktonbiomasse og dermed igennem sedimentation i første omgang immobiliseres. Havde den maksimale tilførsel ligget i eksempelvis januar, ville kiselalgerne, som i 1989 først var tilstede i større mængder i marts, ikke have kunnet optage samme

Tidspunkt for maks. afstrømning betyder meget for nærings-saltsbudget

næringssaltsmængder. Dette ville sandsynligvis have resulteret i større transport til Kattegat.

8.2. Årstidsvariation

Næringsaltkoncentrationernes generelle Årstidsvariation i Vejle Fjord er karakteristisk for forholdene, som findes i de øvrige indre danske kystnære vandområder og fjorde. Se f.eks. figur 8.1. A,B, som viser Årstidsvariationen af $\text{PO}_4\text{-P}$ og $\text{NO}_3\text{+NO}_2\text{-N}$ på station 4273 i Vejle Fjord. I forårsperioden falder koncentrationerne af næringssalte samtidig med en eksponentiel vækst af planteplanktonet domineret af Skeletonema costatum. Koncentrationsniveauerne af uorganisk fosfor er sandsynligvis begrænsende for produktionen i maj - juni, mens kvælstof i en længere periode fra april - september ligger på niveauer, der kan være begrænsende for produktionen. I samme periode falder frem til juni også siliciumkoncentrationen, hvor SiO_2 koncentrationen i vandfasen er nær detektionsgrænsen ($50 \mu\text{g/liter}$), hvilket skyldes kiselalgernes opvækst i denne periode. Variationen i fosfor og kvælstofkoncentrationer mellem de enkelte prøvetagningsdage i intensivperioderne er i visse tilfælde af samme størrelsesorden som variationen mellem to målinger med en måneds interval. Dette viser, at eventuelle trends i næringssaltniveauer, der er målt med store tidsintervaller vil kræve lange tidsserier for at kunne erkendes. De største korttidsvariationer i intensivperioderne findes ved koncentrationen af uorganisk kvælstof specielt i vinter/forårsperioden inderst i fjorden, hvor selv små "pulse" af ferskvand kan ændre niveauet markant. Salinitetsændringer i februar/marts perioden fra 0.5 - 2 ‰ kan, hvis disse skyldes opblanding med åvand fra oplandet resultere i stigninger fra omkring 100 - 450 $\mu\text{g N/liter}$, hvilket alt efter, hvor i fjorden opblandingen sker i denne periode vil kunne resultere i koncentrationsstigninger på fra omkring 20 til over 200 ‰. I starten af forårsperioden, hvor produktionen er meget lav, er kvælstofkoncentrationen i vandet en forholdsvis konservativ parameter, der med kendskab til

Korttidsvariationer
lige så store som
variationer fra måned
til måned

koncentrationen i det tilstrømmende åvand kan anvendes som 'tracer' for ferskvandsafstrømningen. Det kunne på den måde vises, at de faldende saliniteter som registreredes fra starten af perioden februar/marts skyldtes oplandsafstrømningen og ikke indstrømmende lavsalint baltisk vand.

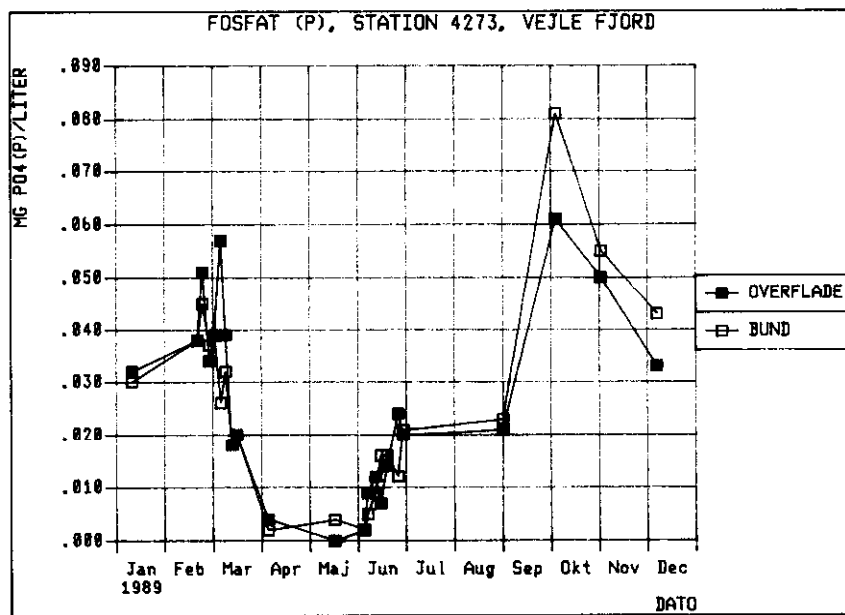
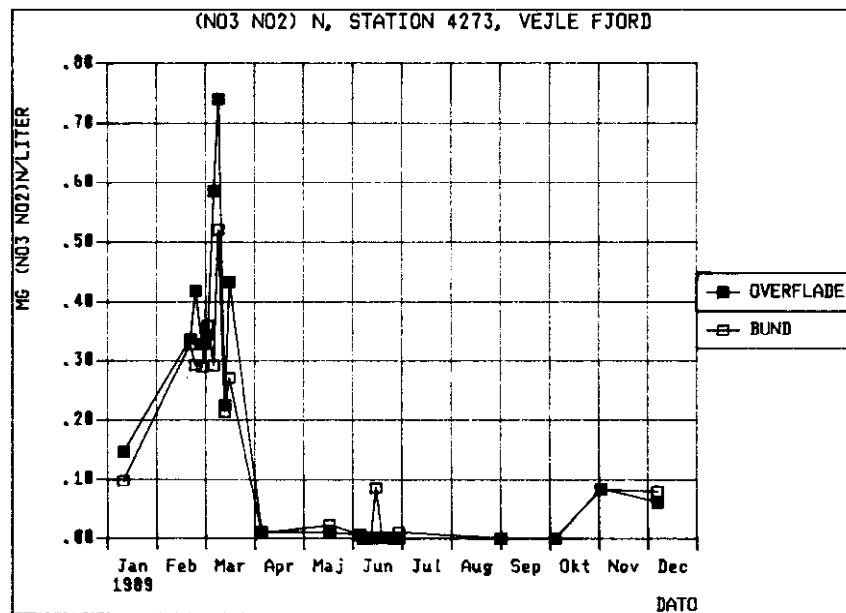
Også fosforkoncentrationerne specielt total fosfor udviser korttidsfluktuationer. I intensivperioden i juni, hvor de hydrografiske forhold i størstedelen af perioden er stabile og næringssalttilførslerne fra land konstante må fluktuationerne for en stor del skyldes "patchiness" kombineret med, at de enkelte vandmasser ikke befinder sig på samme position på de forskellige måletidspunkter i perioden.

8.3. Intensivperioder

Den samlede primærproduktion i måleperioden februar/marts (figur 8.2) som altovervejende udgjordes af kiselalger giver ud fra et vægtbaseret C/N forhold på 5.6 en plankton-optagelse på ca. 80 tons kvælstof for hele fjorden i perioden. Den største del af denne produktion er sandsynligvis sedimenteret i fjorden, og dermed for en periode immobiliseret. I samme periode var den samlede kvælstoftilførsel ca 210 tons, hvilket levner knap 2/3 af den totale tilførte kvælstofmængde til eksport, da der i perioden ikke sker nogen generel akkumulering af kvælstof i vandfasen.

I samme periode falder koncentrationen af fosfat med ca. 20 µg P/liter, hvilket svarer til, hvad primærproduktionen kan gøre rede for nemlig ca. 11 tons P. Total fosfor mængderne i vandfasen er derimod generelt uændret fra start til slut i perioden. Der tilføres i perioden ca 15 tons P fra oplandet hvilket således også for fosfors vedkommende levner et overskud til eksport, også selvom der ikke indregnes en frigivelse af næringssalte fra sedimentet gennem mineralisering.

I intensivperioden i juni måned ligger de uorganiske kvælstoffraktioner generelt på detektionsgrænsen (5 µg N/liter) og kvælstof er



Figur 8.1

A,B. Årstidsvariationen i næringssaltene i Vejle Fjord. A). Nitrat og nitrit. B) Fosfat.

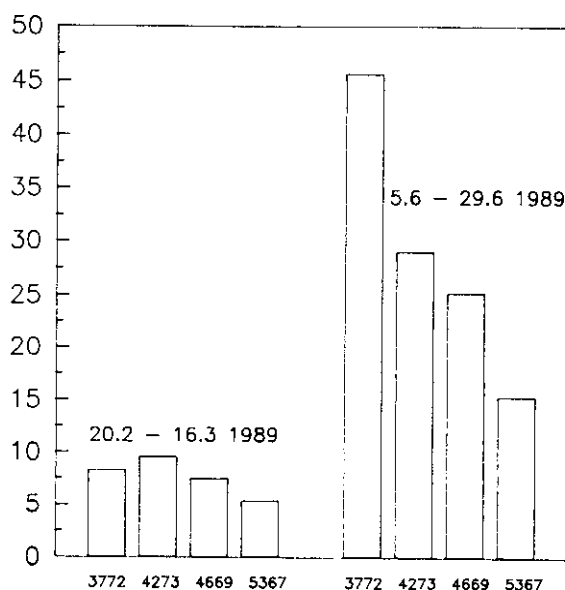
således sandsynligvis begrænsende for planteplanktonets vækst. På en måledag i maj inden intensivperioden i juni tyder koncentrationerne af uorganisk kvælstof og fosfor på, at begge næringssalte var begrænsende for planktonvæksten. I juni derimod stiger fosfat koncentrationen jævnt fra et niveau, der tyder på fosforbegrænsning i starten af juni til koncentrationer, der herefter ikke begrænser væksten af planktonet.

Størst akkumulering
inderst i fjorden

Planteplanktonet er i resten af året helt frem til september sandsynligvis kvælstofbegrænset. Som følge heraf akkumuleres fosfat i vandfasen i juni måned. Fra inderst til yderst i fjorden på de fire målestationer er det stigninger på hhv. 2-63, 2-20, 2-13 og 2-10 $\mu\text{g PO}_4\text{-P/liter}$ (detektionsgrænsen er 2 $\mu\text{g P/liter}$). Akkumuleringen er således størst i det inderste af fjorden, hvor de største næringssaltkilder findes.

Overvejelser om kvælstofoptagelsen i algerne og dermed i første omgang kvælstoftilbageholdelse i fjorden i form af sedimenterede alger, ud fra primærproduktionsdata, lader sig ikke gøre for sommerperioden. De producerede biomasser, som her overvejende udgøres af små furealger, omsættes sandsynligvis for en stor del i de frie vandmasser og giver således ikke anledning

g Kulstof/ m^2 /periode



Figur 8.2
Primærproduktionen i Vejle Fjord i intensivperioderne 1989.

til sedimentation i samme grad som forårets kiselalgebloom.

9. Sammenfatning og diskussion

9.1. Hydrografi

Vandskiftet i Vejle Fjord på grund af tidevand er særdeles lille. Der sker i praksis kun en intern omplacering af vandvolumenet. Vandskiftet kan være mindre end 3 dage p.g.a. vindskabt cirkulation. Stor vandskifte er ikke altid en gevinst for fjorden, idet der i forbindelse med importen af iltsvind også i høj grad blev importeret næringssalte fra Kattegat.

Ved vestenvind sker der inderst i fjorden "upwelling" af bundvand med lavere kvælstofindhold til overfladen.

Cirkulationen er generelt opdelt i en udadgående overfladestrøm på sydsiden og en indadgående bundstrøm på nordsiden. Derfor er fjorden mere forureningsbelastet på sydsiden end på nordsiden.

Af ovennævnte grunde anses Vejle Amts målestation 3772 ikke altid at være repræsentativ for belastningen i fjordens inderste del.

Opblandingen mellem ferskvand og saltvand er ringe. Ferskvandet kan spores op til 10 km fra Åudløbet. Der er i flere tilfælde konstateret "øer" af ferskere vand drivende rundt i fjorden. Den ringe opblanding giver store muligheder for lokale planktonopblomstringer.

Eksporten til Kattegat i måleperioden har været ca 1288 ton N og 28 ton P. På grund af det ringe vandskifte er tilbageholdelsen i fjorden op til 84% for P.

Et iltsvind i fjorden juni 1989 skyldtes ikke direkte fjordens næringssaltsbelastning, men var importeret fra Kattegat.

9.2. Sedimentation/resuspension

Det er vinden, der er afgørende for resuspension. Ved små vindhastigheder (<10 m/s) sker der kun resuspension fra lavt vand.

Indholdet af suspenderet stof i vandmassen er svagt højere inde i fjorden end i fjordmundingen.

Fluxen af såvel sediment som næringssalte er stor på lavt vand. I løbet af måleperioden er der her netto aflejret op til 2 cm sediment, medens bruttoomsætningen kan være >20 cm/måned.

Netto er der på lavt vand sedimenteret 18,6 ton kvælstof. Brutto har der her været 825 ton kvælstof i forbindelse med bunden på et eller andet tidspunkt.

Ved kysterosion kommer der et bidrag af fosfor til fjordens belastning fra den tertiære ler, som er blottet i den yderste del af fjorden. Fosforindholdet i den tertiære ler er så høj som 2000 mg/kg tørstof. Det er dog ubekendt i hvor høj grad denne fosforkoncentration er bio-tilgængeligt.

Næringssaltene i sedimentet er i udpræget grad knyttet til kornstørrelsesfraktionen mindre end sand og til sedimentets organiske indhold.

På lavt vand er der 1-2% organisk stof, 200-600 mg/kg kvælstof og 200-400 mg/kg fosfor knyttet til sedimentet. På dybt vand drejer det sig om 11-17% organisk stof, 4000-7000 mg/kg kvælstof samt 1000-2000 mg/kg fosfor.

Sedimentationsraten er 11,5-12,2 g/m²/år for kvælstof og 2,1-2,5 g/m²/år for fosfor.

9.3. Hydrografi og fytoplankton

M.h.t. hydrografi og fytoplanktonforekomst kan Vejle Fjord opdeles i 1. den indre fjord som generelt er meget ferskvandspåvirket (st.3772), 2. midterfjorden som skiftevis er påvirket af ferskvandsafstrømningen fra land og ind-

trængningen af Kattegatvand (st. 4273 og 4669) og 3. yderfjorden som generelt er meget kraftigt påvirket af Kattegatvand.

Der blev registreret regionale forskelle i fytoplanktonets artssammensætning ud gennem fjorden med dominans af små hurtigt voksende arter inderst i fjorden og større langsomtvoksende arter i den ydre del af fjorden. Dominansen af små hurtigt voksende arter inderst i fjorden kan tilskrives den store næringsstofbelastning som resultat af fjordens topografi (lav vanddybde = stor overflade:volumen = høj volumen specifik flux af uorganiske næringsstoffer fra sediment til de frie vandmasser), høj næringsstofbelastning fra land igennem Vejle Å.

Den høje næringsstofbelastning af den indre del af fjorden sammenholdt med at vandmasserne her ofte var relativt isolerede fra resten af fjorden resulterede i gentagne masseforekomster af bl.a. de små hurtigt voksende furealger *Heterocapsa triquetra* og *Prorocentrum minimum* samt kiselalgen *Skeletonema costatum* som er kendt fra andre eutrofierede lavvandede kystnære farvande bl.a. Limfjorden (Limfjordskomiteen 1990).

Vandmassen på station 5367 var oftest markant anderledes end på de øvrige stationer både m.h.t. hydrografi og plankton. Som nævnt ovenfor kan den i hydrografisk henseende bedst karakteriseres som en del af Kattegat. Også m.h.t. fyto- og zooplankton var artssammensætning og biomasser oftest markant anderledes end på de øvrige stationer i Vejle Fjord, men mere som forventet i det mere åbne Kattegat.

Retentionen af P i Vejle Fjord på helt op til 84% af de tillædte mængder på årsbasis, er af samme størrelse som rapporteret for en lang række andre estuarier og fjorde (Biggs & Howell, 1984). Det kan beregnes, at fytoplanktonet i løbet af forårsopblomstringen i 1989 kun var i stand til at forbruge, og dermed potentielt sedimentere, ca. 40% af de i perioden tillædte mængder af uorganisk kvælstof fra land. Dette indikerer, at den resterende andel på ca. 60% svarende til 140 t blev exporteret ud af fjorden i perioden.

Ferskvandstilstrømningen inderst i fjorden

sammenholdt med den stigende dybde ud gennem fjorden medførte, at der blev registreret faldende gradienter ud gennem fjorden m.h.t. bl.a. primærproduktion, klorofylkoncentration, total-N, total-P. Afsnøringen af "ferskvands øer" fra den indre del af fjorden og "upwelling" i midten af fjorden bevirkede dog, at det generelle billede af fordelingen af f.eks. næringsstoffer ofte blev forstyrret.

Grove overslagsberegninger viste, at 77-99.8% af primærproduktionen sedimenterede eller blev omdannet til pelagisk detritus under forårsperioden. I sommerperioden var de tilsvarende fraktioner 100-115% på de 3 inderste stationer mod kun 18% på station 5367. Den meget markant "forsvinden" af fytoplanktonbiomasse indikerer at regenerering og tilførsel af uorganiske næringsstoffer må være af afgørende betydning for fytoplanktonets primærproduktion i Vejle Fjord. I forårsperioden var tilførslen fra land af størst betydning, mens regenerering i pelagiet og sedimentet må have været af størst betydning i sommerperioden.

Den store sedimentering af organisk stof i Vejle Fjord underbygger estimatet af fjordens høje retentionseffektivitet m.h.t. uorganiske næringsstoffer. Tidligere undersøgelser i danske farvande har vist at sedimentationen udgør en meget variabel andel af den pelagiske primærproduktion på årsbasis. I de østlige bredninger i Limfjorden er det blevet beregnet at en mængde af organisk stof svarende til op mod 100% af den pelagiske primærproduktion blev mineraliseret i sedimentet (Limfjordskomiteen, 1975). I Thisted Bredning blev det tilsvarende beregnet at en stofmængde svarende til 30% af den pelagiske primærproduktion blev mineraliseret i sedimentet (Limfjordskommiteen, 1982). For Bælthavet og Kattegat er det blevet beregnet, at transporten af organisk stof til sedimentet i gennemsnit udgjorde 44% af primærproduktionen (Jørgensen & Revsbech, 1989). I lyset af disse observationer forekommer de beregnede sedimentationsrater i Vejle Fjord at være af den rigtige størrelse.

Fytoplankton-N i forhold til total-N var størst yderst i fjorden. I sommerperioden udgjorde fytoplankton-N en andel på 12-17% af total-N, mens andelen kun var 4-6% i vinter- og forårsperioden, hvor hovedparten af kvælstoffet

var på uorganisk form i form af nitrat. Fytoplanktonets relativt beskedne andel af total-N, rejser spørgsmålet i hvor høj grad de tilsyneladende store mængder kvælstof som var bundet til detritus i pelagiet var tilgængeligt for fytoplanktonet, samt i hvilket omfang det pelagisk detritus produceres ud fra fytoplankton i pelagiet eller ud fra sedimenteret fytoplankton og andet organisk stof som resuspenderes fra sedimentet.

I sommerperioden udgjorde fytoplanktonet 19-30% af det totale suspenderede stof, med den største fraktion yderst i fjorden på station 5367. I vinter- og forårsperioden var fytoplanktonandelen 6-14%. Det forhold at det totale suspenderede stof fulgte udviklingen i fytoplanktonbiomassen under opbygningen af forårsopblomstringen indikerer at en stor del af det suspenderede stof havde sin oprindelse som fytoplankton.

9.4. Næringssalte og primærproduktion

Tidspunktet på året for de største afstrømninger af næringssalte til fjorden har betydning for, hvor meget af denne tilførsel der ved planktonproduktion gennem sedimentation i første omgang kan immobiliseres fra vandfasen. 1989 var et atypisk år med en forholdsvis lille tilførsel af kvælstof fra oplandet og med maksimale afstrømningsrater forholdsvis sent omkring marts, hvor planktonalgerne allerede var i eksponentiel vækst. Et år med større afstrømning og med den maksimale afstrømning i f.eks. jan/feb ville således have givet anledning til større næringssalt transport ud af fjorden. Næringssaltniveauerne i fjorden udviser en markant faldende gradient ud af fjorden og årstidsvariationen er typisk for de indre danske kystnære farvande. Fosfor er således tilsyneladende begrænsende for produktionen i det sene forår og kvælstof fra forsommer og frem til omkring september. Varierende afstrømning fra land kan i løbet af få dage specielt ændre kvælstofkoncentrationsniveauerne markant fordi det tilstrømmende ferskvand har

koncentrations niveauer, der ligger op til en faktor 30 over fjordvandets. Ud fra primærproduktionsberegninger i forårsperioden blev det vist, at ca. 1/3 af den i perioden tilførte kvælstofmængde blev immobiliseret ved sedimentation. Hvilket levner ca. 2/3 til eksport ud fjorden. Der er her ikke taget højde for en evt. mineralisering og dermed næringssaltfrigivelse fra det sedimenterede materiale i perioden.

10. Litteratur

Andersen, P., Christiansen, C., Schwärter, S. og Laursen, J. S. (1990): Plankton dynamik koblet til hydrografi i Vejle Fjord 1989 (Hav-90 projekt). Danmarks Miljø Undersøgelser. Faglig Rapport Nr. 4, 195-199.

Beach Erosion Board (1975): Shore Protection Manual, Vol. 1., U. S. Army Coastal Eng. Research Center, Virginia.

Biggs, R. B. & Howell, B. A., (1984): The estuary as a sediment trap: Alternate approach to estimating its filtering efficiency. I: Kennedy, V. S. (ed.): The estuary as a filter. Academic Press. New York, pp. 107-129.

Brydsten, L., (1988): A model for determining resuspension of sediments due to wave action. Hydrobiologia (in press).

Christensen, L. K. & Christiansen, C., (1983): Infra-red line-scanning and field measurements of temperature fronts in thermal discharge. Vatten, 39, 388-399.

Christiansen, C., Andersen, P., Schwärter, S. og Laursen, J. S. (1989): Sammenhænge mellem hydrografi og målt forureningsbelastning i kystnære farvande. Vand og Miljø. 6, 181-183.

Christiansen, C., Andersen, P., Schwärter, S. og Laursen, J.S. (1990b): Hydrografi samt sediment og næringssaltdynamik i Vejle Fjord. Danmarks Miljøundersøgelser. Faglig Rapport Nr. 4, 185-188.

Christiansen, C., Andersen, P., Schwärter, S.

og Laursen, J. S. (1990a): Portræt af et importeret iltsvind i Vejle Fjord. Vand og Miljø. (i trykken).

Christiansen, C., Christoffersen, H. & Lomholdt, S., 1981: Characteristics of three-layer circulation and inverse salinity gradients in two small semi-enclosed Danish embayments. *Nordic Hydrology*, 12, 119-128.

Christiansen, C. & Kristensen, S. D., (1988): Two time scales of micro-tidal flat erosion and accumulation. 1: Sediment changes. *Geografiska Annaler*, 70A, 47-58.

Christiansen, C., Møller, J. T. & Nielsen, J., (1985): Fluctuations in sea level and associated morphological response: Examples from Denmark. *Eiszeitalter und Gegenwart.*, 35, 89-108.

Christiansen, C., Petersen, P., Asmussen, L. og Zacharias, I. (1990d): Resuspensionens betydning i Vejle Fjord. *Vand og Miljø*, 8, 295-298.

Christiansen, C., Teorotheos, Z. & Vang, T. (1990C): Hydrography and fluxes of sediments and nutrients, Vejle Fjord, Denmark. 5'th International Symposium on the Interactions between Sediments and Water. Uppsala.

Dansk Geoteknik, 1988: Deponering af havneslam. Vurdering af alternative metoder. Rapport til Vejle Kommune.

Denman, K. L. & Gargett, A. E., (1983): Time and space scales of vertical mixing and advection of phytoplankton in the upper ocean. *Limnology and Oceanography*, 28, 801-815.

Horstmann, U., Christiansen, C. & Ørtebjerg, G., (1990): Inflow from the North Sea to the southern Kattegat inferred from satellite images and ground truth data. (in prep.)

Teorotheos, Z., (1990): Numerical modelling of circulation in shallow lakes and estuaries. Comparison with observations. An application to Lake Trichonis, Greece. (in prep.)

Jensen, A., Pejrup, M. og Valeur, J., (1990):

Akkummulation og resuspension af sediment og næringssalte i Vejle Fjord. Danmarks Miljøundersøgelser. (i trykken).

Jørgensen, B. B. & Revsbech, N. P., (1989): Oxygen uptake, bacterial distribution and carbon-nitrogen-sulfur cycling in sediments from the Baltic Sea - North Sea transition. (Submitted).

Jørgensen, B. B., Bang, M. & Blackburn, T. H., (1990): Anaerobic mineralization in marine sediments from the Baltic Sea - North Sea transition. Mar. Ecol. Prog. Ser. (in press).

Ketchum, H., (1951): Stream pollution: The flushing of tidal estuaries. Sewage and Industrial Wastes., 23, 198-209.

Komar, P. D. & Miller, M. C., (1973): The threshold of sediment movement under oscillatory water waves. Journal of Sedimentary Petrology, 43, 1101-1110.

Kullenberg, G., (1977): Entrainment velocity in natural stratified vertical shear flow. Estuarine and Coastal Marine Science, 5, 329-338.

Laursen, J. S., Christiansen, C., Andersen, P. & Schwerter, S., (1990): Flux of sediments and nutrients from shallow to deep water in a Danish fjord. International Conference on Marine Coastal Eutrophication. Bologna.

Limfjordskomiteen, (1982): Recipientundersøgelser i Thisted Bredning. Iltsvind. (Udarbejdet af VKI).

Limfjordskomiteen, (1990): Fyto- og protozooplankton i Limfjorden 1986 og 1987. (Udarbejdet af Bio/consult).

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

Pritchard, D.W., 1955: Estuarine circulation patterns. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 81, 717/1-717/11.

Redfield, A. C., Ketchum, B. H. & Richards, F. A., (1963): The influence of organisms on the composition of sea-water. I: Hill, M. N. (ed): The Sea., vol 2. Wiley Interscience, New York, pp. 26-79.

Reynolds, C. S., (1984): The ecology of freshwater phytoplankton. Cambridge University Press. Cambridge.

Schwærter, S., Christiansen, C., Andersen, P. og Laursen, J. S. (1990): Importeret iltsvind i Vejle Fjord, juni 1989. Danmarks Miljø Undersøgelser. Faglig Rapport Nr. 4, 279-282 .

Simmons, H. B., (1955): Some effects of upland discharge on estuarine hydraulics. Proceedings of the American Society of Civil Engineers., 81, 1-20.

Skjoldal, H. R. & Wassmann, P. (1986): Sedimentation of particulate organic matter and silicium during spring and summer in Lindåspolene, Western Norway. Marine Ecology Progress Series. 30, 49-63.

Smetacek, V., (1985): The role of sinking in diatom life-history cycles: ecological, evolutionary and geological significance. Marine Biology, 84, 239-251.

Smidth, F.L. & Co., (1972): Mariager Fjord. Vandkvalitet 1971. København. 195 pp.

Sørensen, N.E. (1989): "Dårlige vinde" har ført store mængder tysk kvælstof hertil. MiljøDanmark 3, (4), 4-5.

Vang, T., (1990): Hydrografi og vandskifte i Vejle Fjord (under udarbejdelse).

Vejle Amtskommune, 1988: Badevandsrapporter. Teknik og Miljøforvaltningen.

REGISTRERINGSBLAD

Udgiver: Miljøstyrelsen, Strandgade 29, 1401 København K

Serietitel, nr.: Havforskning fra Miljøstyrelsen, 4

Udgivelsesår: 1991

Titel:

Kystnær omfordeling af sediment og næringssalte

Undertitel:

Forfatter(e):

Christiansen, Christian; Andersen, Per; Schwærter, Steen; Laursen, Jens S.

Udførende institution(er):

Århus Universitet. Geologisk Institut; Bio/consult as; Vejle Amtskommune; Sønderjyllands Amtskommune

Resumé:

I Vejle Fjord er de fysiske og biologiske mekanismer, der har betydning for spredning, sedimentation og den senere omfordeling af sediment og næringssalte i kystnære områder analyseret. En stor del af de næringssalte, der eksporteres til Kattegat, har forinden passeret gennem planktonbiomassen, været aflejret og er blevet resuspenderet. Dette gælder specielt for de lavvandede områder. De dybere, centrale dele af fjorden virker som en naturlig fælde for såvel sediment som for næringssalte.

Emneord:

næringssalte; hydrografi; kystvande; plankton; sedimentation; stoftransport; vandtransport; Vejle Fjord; fosfor CAS 7723-14-0; nitrogen CAS 7727-37-9

ISBN: 87-503-9206-9

ISSN:

Pris (inkl. moms): Kr. 70,-

Format: A4

Sideantal: 72

Md./år for redaktionens afslutning: maj 1991

Oplag: 600

Andre oplysninger:

Rapport fra koordinationsgruppen for stofomsætningen og transporten i kystvandene, herunder belastningernes effekt på samme

Tryk: P. J. Schmidt A/S, Vojens

Havforskning fra Miljøstyrelsen

Rapporter fra Hav-90 forskningsprogrammet:

- Nr. 1: Analyse af iltsænkning i Kattegat, Bælthavet og V. Østersø
- Nr. 2: Danmarks vindklima fra 1870 til nutiden
- Nr. 3: Hydrografiske forhold i det sydlige Kattegat
- Nr. 4: Kystnær omfordeling af sediment og næringssalte

Kystnær omfordeling af sediment og næringssalte

I Vejle Fjord er de fysiske og biologiske mekanismer, der har betydning for spredning, sedimentation og den senere omfordeling af sediment og næringssalte i kystnære områder analyseret. En stor del af de næringssalte, der eksporteres til Kattegat, har forinden passeret gennem planktonbiomassen, været aflejret og er blevet resuspenderet. Dette gælder specielt for de lavvandede områder. De dybere, centrale dele af fjorden virker som en naturlig fælde for såvel sediment som for næringssalte.



Miljøministeriet **Miljøstyrelsen**

Strandgade 29, 1401 København K, tlf. 31 57 83 10

Pris kr. 70,- inkl. 22% moms

ISBN 87-503-9206-9