

Miljøministeriet

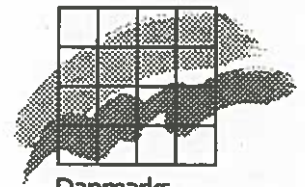


Danmarks
Miljøundersøgelser

Næringssaltudveksling mellem sediment og vand i Hjarbæk Fjord efter etablering af saltvandstilstand i 1991

Faglig rapport fra DMU, nr. 107
1994





Nærings saltudveksling mellem sediment og vand i Hjarbæk Fjord efter etablering af saltvandstilstand i 1991

Faglig rapport fra DMU, nr. 107

Henning S. Jensen

*Danmarks Miljøundersøgelser,
Afd. for Ferskvandsøkologi*

Peter A. Sampou

*Horn Point Environmental Laboratories,
University of Maryland, USA*

Marianne Holmer

Biologisk Institut, Odense Universitet

Datablad

- Titel:** Næringssaltudveksling mellem sediment og vand i Hjarbæk Fjord efter etablering af saltvandstilstand i 1991
- Forfattere:** Henning S. Jensen¹, Peter A. Sampou², Marianne Holmer³
- Afdelingsnavne:** ¹ Danmarks Miljøundersøgelser, Afdeling for Ferskvandsøkologi
² University of Maryland, USA, Horn Point Environmental Laboratories
³ Odense Universitet, Biologisk Institut
- Serietitel og nummer:** Faglig rapport fra DMU, nr. 107
- Udgiver:** Miljøministeriet
Danmarks Miljøundersøgelser ©
- Udgivelsesår:** 1994
- Layout:** Pia Nygård Jensen og Kathe Møgelvang
Tegninger: Kathe Møgelvang og Henning S. Jensen
Teknisk assistance: Marlene Jessen, Kitte Gerlich, Mette Thomson, John Glargaard Rasmussen
ETB: Pia Nygård Jensen
- Bedes citeret:** Jensen, H.S., Sampou, P.A. & Holmer, M. (1994): Næringssaltudveksling mellem sediment og vand i Hjarbæk Fjord efter etablering af saltvandstilstand i 1991. 52 s. - Faglig rapport fra DMU, nr. 107.
- Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse.
- Emneord:** Fosfor, kvælstof, jern, sulfat, sediment, ferskvand, saltvand
- Redaktionen afsluttet:** Maj 1994
- ISBN:** 87-7772-153-5
ISSN: 0905-815X
Papirkvalitet: Cyclus
Tryk: Silkeborg Bogtryk
Oplag: 200
Sideantal: 52
- Pris:** kr. 100,00 (inkl. 25% moms, ekskl. forsendelse)
- Købes hos:** Danmarks Miljøundersøgelser
Afd. for Ferskvandsøkologi
Vejsøvej 25
Postboks 314
DK-8600 Silkeborg
Tlf. 89 20 14 00
Fax 89 20 14 14

Indhold

Forord	5
Sammendrag	7
1. Introduktion	11
1.1 Baggrund for undersøgelsen	11
1.2 Formålet med undersøgelsen	12
2. Undersøgelsens metoder og resultater	15
2.1 Sedimentkarakteristik og akkumuleringsrater	15
2.2 Næringssaltfluxe og mineraliseringsrater 1992	24
2.3 Massebalancer for N og P i perioden 1987 til 1993	28
2.4 Resumé af eksperimentelle studier	34
3. Diskussion	37
3.1 Effekten af sluseåbningen på P-omsætningen	37
3.2 Effekten af sluseåbningen på N-omsætningen	37
3.3 Fremtidsperspektiver	38
Appendix 1: Metode til bestemmelse af sedimentets fosfor- og jernpuljer	41
Appendix 2: Beregnede vandbalancer	45
4. Referencer	49
Danmarks Miljøundersøgelser	51



Forord

Viborg Amtsråd besluttede i 1989 at genskabe saltvandstilstanden i Hjarbæk Fjord ved en åbning af sluserne i Virksund-dæmningen. Ved denne løsning beholdt man højvandsbeskyttelsen af de lavtliggende landområder. Sluseregulativet trådte i kraft den 20. april 1991.

Som led i belysning af miljøændringerne som følge af den ændrede slusepraksis blev der i samarbejde med Skov- og Naturstyrelsen, Danmarks Miljøundersøgelser og Viborg amt iværksat tre forskningsprojekter.

Forskningsprojekterne er udført af Danmarks Miljøundersøgelser, og resultaterne heraf foreligger nu i følgende tre delrapporter:

1. Næringssaltudveksling mellem sediment og vand i Hjarbæk Fjord efter etablering af saltvandstilstand i 1991.
2. Genetablering af den marine makrofauna i Hjarbæk Fjord. Succession efter genetablering af saltvandstilstanden i 1991.
3. Hjarbæk Fjord. Udviklingen i fuglebestanden 1967-1993 set i relation til miljøforhold og ændring i slusedrift.

Projekterne er finansieret af Viborg amt, Skov- og Naturstyrelsen og Danmarks Miljøundersøgelser i fællesskab.

Miljøtilstanden i fjorden følges fortsat af Viborg amt. Amtets overvågning omfatter tilførsel og afgivelse af vand og næringsstoffer, fysiske og kemiske forhold i fjorden, biologiske forhold m.v.

Denne rapport omhandler næringssaltudvekslingen mellem sediment og vand. Rapporten baserer sig på data, som er indsamlet gennem feltarbejde i 1992 samt på data fra Viborg Amts undersøgelser af Hjarbæk Fjord gennem de sidste 10 år. Marlene Jessen, Kitte Gerlich, Mette Thomson, Pia Nygård Jensen, John Glargaard Rasmussen og Kathe Møgelvang takkes for teknisk bistand.



Sammendrag

Undersøgelsen blev igangsat for at få belyst effekterne af overgang fra fersk- til saltvand på næringssaltudvekslingen mellem vand og sediment i Hjarbæk Fjord. Undersøgelsen omfattede:

- 1) Sedimentanalyser med bl.a. en bestemmelse af den jernbundne fosforpulje, som var akkumuleret i ferskvandsperioden (afsnit 2.1).
- 2) Direkte måling af næringssaltfrigivelsen (fosfor (P) og kvælstof (N)) fra akkumuleringsbunden, som skønsmæssigt udgør 25% af fjordens areal (afsnit 2.2).
- 3) Beregning af P-, og N-massebalancer for årene før og efter sluseåbningen, samt måling af jerntilførslen til fjorden (afsnit 2.3).
- 4) En eksperimentel undersøgelse af salt/sulfat effekt på P-frigivelse fra sedimenter (afsnit 2.4).

Resumé af resultater

Overgangen til saltvandstilstand blev etableret ved at åbne afvandingslusen i Virksund. Dette indgreb påvirkede næringssaltomsætningen i fjorden på flere måder:

Vandtilførslen er fordoblet

Efter sluseåbningen tilføres fjorden (mindst) $3.75 \cdot 10^8$ m³ saltvand fra Lovns Bredning. Denne vandmængde var i 1992 og 93 større end den tilstrømmende mængde ferskvand. Med saltvandet følger 40 tons fosfor og 300-500 tons kvælstof. P-tilførslen finder især sted i sommermånederne p.g.a. forhøjede P-koncentrationer i Lovns Bredning. Den tilførte P-mængde er lige så stor som den mængde, der tilføres fra ferskvandssiden, mens den mængde N, som tilføres med havvandet, udgør 12-20% af den samlede eksterne N-tilførsel. Den store indstrømning af saltvand bevirker, at den gennemsnitlige opholdstid for vandet i Hjarbæk Fjord er blevet halveret fra 45-50 dage i ferskvandssituationen til 25-26 dage efter sluseåbningen.

Saltoandet har også næringssalte med

Lagdeling af vandmasserne

Slusedybden på 2 m bevirker, at Hjarbæk Fjord får en næsten permanent lagdeling af vandmasserne med en haloklin (saltspringlag) beliggende i denne dybde. Lagdelingen skyldes, at det indstrømmende saltvand er tungere end det tilstrømmende ferskvand. En haloklin skaber en langt stærkere lagdeling end en termoklin (temperaturspringlag), som ofte findes i søer. Da det indstrømmende saltvand er tungere end vandet i fjorden, vil det altid synke ned i bunden og "presse" andet bundvand op. Derfor er der formodentligt en hurtig udskiftning af bundvandet i den nuværende situation. En overslagsberegning viser, at i sommerperioden udskiftes bundvandet med frisk vand fra Lovns Bredning hver 6. dag. Det betyder på den anden side, at de næringssalte, som frigives fra bunden, hurtigt bliver transporteret op i overfladelaget, hvor de kan bruges af planteplanktonet. Bunden under haloklinen forbruger så meget ilt i sommermånederne (mindst 100 mmol O₂ m⁻² d⁻¹), at selvom det indstrømmende vand er fuldt mættet med ilt, vil iltten være forbrugt

i løbet af 3 dage. Det forklarer, hvorfor bundvandet var iltfrit i lange perioder i 1992 og 1993.

*Iltsvind i bundvandet for-
mindsker N-tilbageholdelsen*

Nitrifikation, dvs. omdannelse af den ammonium til nitrat er en forudsætning for, at der kan foregå denitrifikation (omdannelse af nitrat til frit kvælstof) i sommerhalvåret, hvor nitratkoncentrationen i vandet er meget lav. Nitrifikationen er en oxidationsproces, som kræver ilt. I og med at bundvandet er iltfrit i meget af sommerperioden, er denne proces blevet afkoblet på de ca. 40% af arealet i Hjarbæk Fjord, som ligger under haloklinen. I stedet ses en stor ammoniumfrigivelse til vandet, og massebalancerne for Hjarbæk Fjord viser, at N-fjernelsen, som var på mere end 40% af den tilførte N-mængde i ferskvandsperioden, er ophørt. Dette betyder ikke blot, at N-koncentrationen i fjordvandet er steget, til trods for den større vandudskiftning, men det betyder også, at resten af Limfjorden nu får tilført ekstra 900-1000 tons N årligt. Denne ekstra N-tilførsel svarer til 5,6% af den samlede N-tilførsel til Limfjorden i 1991.

*Iltsvind og høj sulfatkon-
centration fører til massiv
frigivelse af P fra sedimen-
tet*

Det nuværende saltvand i Hjarbæk Fjord indeholder ca. 30 gange så meget sulfat som ferskvandet, der før fandtes i fjorden. Dette forhold skaber grundlag for en intens sulfatreduktion (bakteriers omdannelse af sulfat til svovbrinte) i sedimentet; en proces, som yderligere bliver forstærket af det iltfri bundvand. I juli 1992 blev der målt sulfatreduktionsrater på mellem 30 og 50 mmol SO_4^{2-} m^{-2} d^{-1} på de fire stationer. Skønsmæssigt en trediedel af den dannede sulfid blev tilbageholdt i sedimentet, hvor den kan danne tungt-opløselige jernsulfider ud fra nogle af de jernforbindelser, som blev aflejret i ferskvandsperioden. Det drejer sig især om de oxiderede jernhydroxider, som har bundet fosfat i et molært forhold på omkring 7Fe:1P. Svovlbrintedannelsen fører dermed til massiv frigivelse af jernbundet fosfor. Det har betydet, at Hjarbæk Fjord fra at tilbageholde 5-10 tons P årligt i ferskvandssituationen i 1992 og 1993 afgav netto 35 tons P årligt til Limfjorden. Denne mængde svarer til en 10% stigning af P-tilførslen til Limfjorden i forhold til 1991.

*P-puljen kan udtømmes på
4 år*

I akkumuleringsområderne lå der ved starten af 1992 et sted mellem 70 og 125 tons jernbundet P, som kan frigøres ved sulfiddannelsen. Med en årlig nettoafgivelse af 35 tons rækker denne pulje kun til 2-4 år med høj P-frigørelse fra sedimentet. Hastigheden, hvormed puljen udtømmes, vil dog aftage eksponentielt, så varigheden af forhøjet P-frigivelse kan blive noget længere, mens størrelsen af frigivelsen vil aftage hurtigt.

*Årligt tilbagevendende fæ-
nomen*

Så længe der optræder iltfrit bundvand hver sommer, vil der dog altid være en sæsonmæssig frigørelse af P fra sedimentet, som vil betyde, at den interne P-belastning bliver stor netop i sommermånederne, hvor fytoplanktonproduktionen foregår.

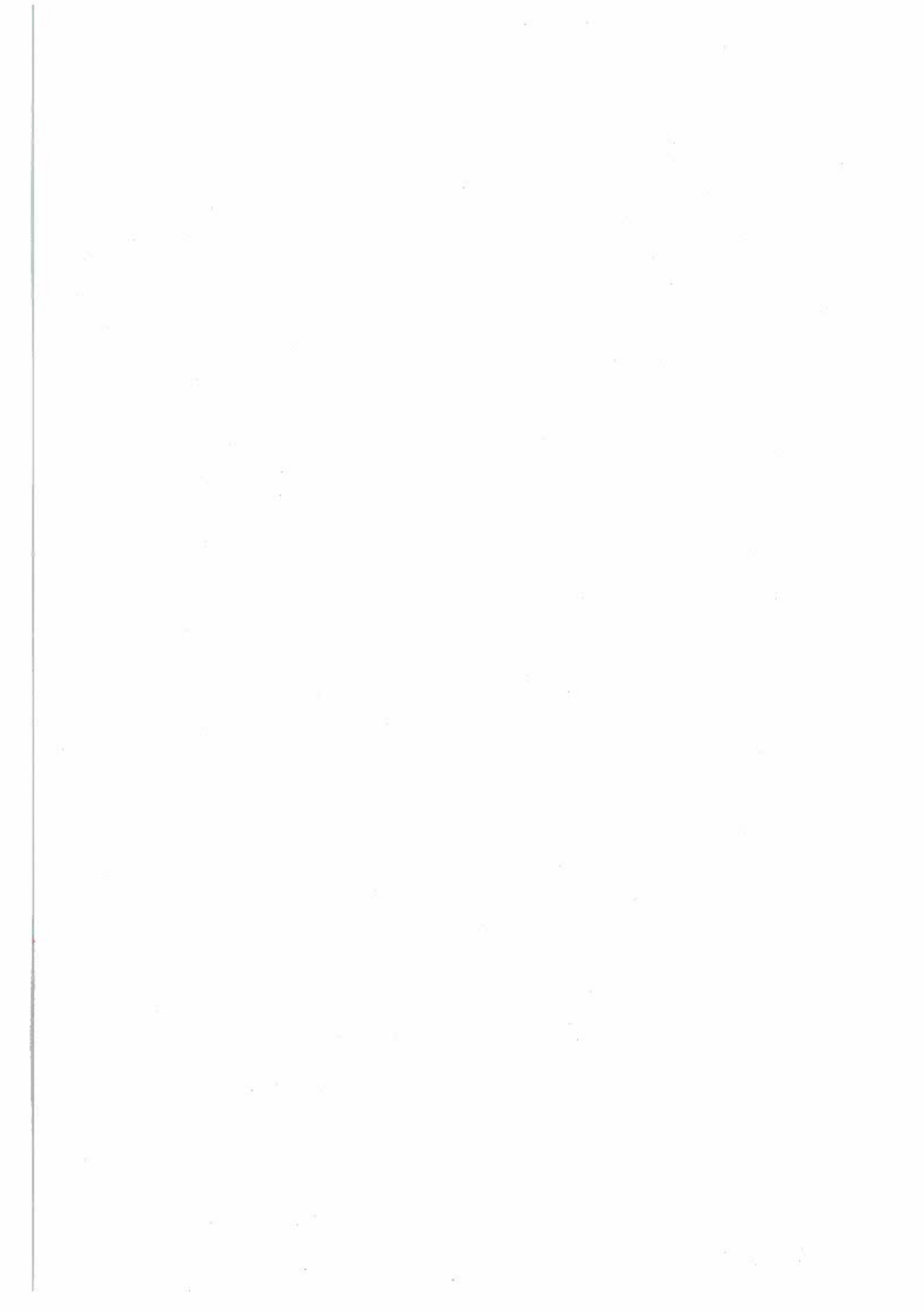
Konklusion

Den samlede effekt af sluseåbningen på næringssaltsomsætningen i Hjarbæk Fjord kan summeres til, at

- selvom vandudskiftningen er fordoblet ved tilførsel af næringsfattigt vand fra Lovns Bredning, så har interne processer, som er betinget af fjordens lagdeling og af den forhøjede sulfatkoncentration, ført til så stor næringssaltfri-

gørelse fra sedimentet, at næringssaltkoncentrationerne i overfladevandet er uændret høje efter sluseåbningen. I overensstemmelse hermed er der heller ikke sket nogen forbedring af vandkvaliteten

- den interne fosforbelastning vil aftage i løbet af få år i takt med udtømningen af den jernbundne fosforpulje i sedimentet. Der vil dog fortsat være en høj P-frigivelse fra sedimentet i sommermånederne
- den store næringssaltfrigørelse fra sedimentet hænger bl.a. sammen med de dårlige iltforhold i bundvandet. Overslagsberegninger af ilttilførslen til bundvandet viser, at der næppe er nogen chance for at undgå iltsvind med den nuværende sluseløsning
- Hjarbæk Fjord har stort set mistet evnen til varigt at tilbageholde kvælstof og fosfor. En 40% større N-mængde og en 15% større P-mængde, end i ferskvandssituationen, vil fremover fortsætte ud i Limfjorden.
- primærproduktionen af planteplankton efter sluseåbningen er P-begrænset om foråret og N-begrænset om sommeren. En forbedret sigtddybde i Hjarbæk Fjord kan sandsynligvis opnåes ved en nedsættelse af den eksterne P-tilførsel i perioden februar-maj og en nedsættelse af den eksterne N-tilførsel i perioden juni-oktober.



1. Introduktion

1.1 Baggrund for undersøgelsen

"Saltvandslomme" gav problemer i starten af ferskvandsperioden

Ved bygningen af Virksunddæmningen i 1966 blev Hjarbæk Fjord omdannet til en ferskvandssø. P.g.a. den meget store nærings-salttilførsel fra ferskvandssiden blev fjorden hurtigt meget eutrof med sommersigtedybder på omkring 1 m. Også indtrængning af saltvand gennem slusen skabte vandkvalitetsproblemer. Saltvandet lagde sig ofte som en "lomme" i bunden af fjorden og skabte iltfri forhold med svovlbrintefrigivelse fra sedimentet. I forbindelse med stagnationsperioderne har der formodentligt været en stor frigivelse af fosfat fra sedimentets jernbundne fosforpulje (Figur 1), samt af ammonium fordi nitrifikationen blev afkoblet p.g.a. de iltfri forhold¹. Disse formodninger baserer sig på undersøgelserne fra Viborg Amtskommune (1982; 1987).

Hjarbæk Fjord var P-begrænset

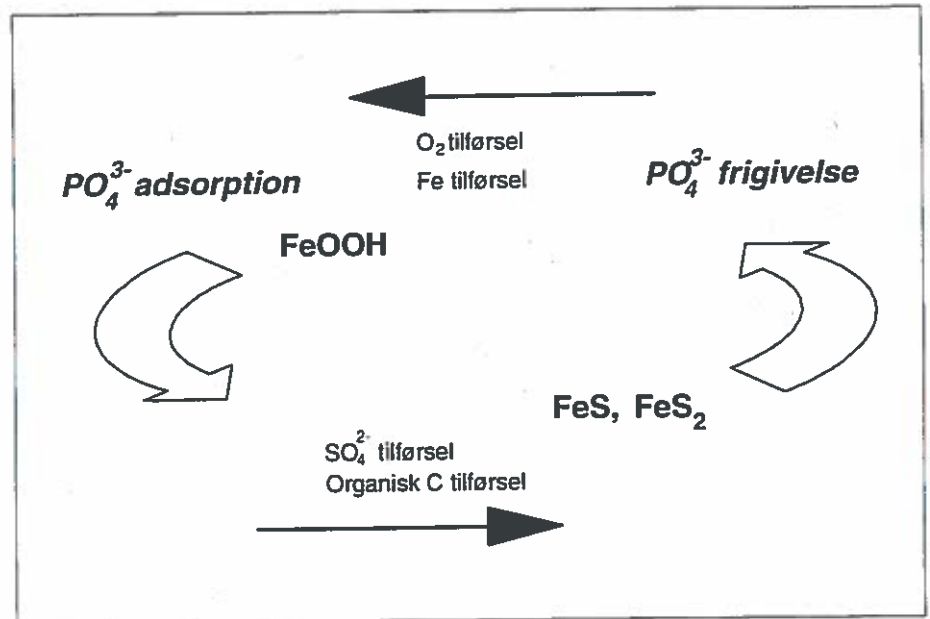
Målinger af næringssaltkoncentrationen i overfladevandet i 1980'erne indikerede, at primærproduktionen var fosforbegrænset - især i forårsperioden. P-begrænsning indikeres også af en (årgennemsnitlig) molær N:P ratio på mellem 55:1 (starten af 1980'erne) og 100:1 (1990) i den eksterne næringssalttilførsel (Viborg amt, 1993). Primærproduktion af planteplankton antages at være P-begrænset, når N:P ratioen i tilførslen overstiger 20-25 (e.g. Smith 1986). I denne situation skulle det være muligt at opnå forbedret vandkvalitet, hvis P-tilførslen bliver reduceret tilstrækkeligt. Indgreb mod fosforudledning til fjorden nedbragte i løbet af 80erne tilførslen fra mere end 100 tons pr. år til omkring 40 tons pr. år. Dermed skulle P-koncentrationen i vandet falde fra ca. 200 µg P/l (vandføringsvægtet årgennemsnit) til godt 100 µg P/l i 1990 (se Figur 16, afsnit 2.3).

I midten af firserne blev slusen tætnet. Målingerne af saltindholdet i bundvandet viste, at saltvandsindtrængningen stort set blev stoppet. Dette indgreb har formodentlig reduceret sedimentets nærings-saltafgivelse fordi iltforholdene ved bunden blev forbedrede (Viborg amt, 1993). Fjorden var dog stadig kendetegnet ved en kraftig opblomstring af planteplankton (lav sigtgybde) [ref].

Ønsket om yderligere at forbedre vandkvaliteten ved øget vandudskiftning var en af begrundelserne for den ændrede slusepraksis, som trådte i kraft i april 1991. Med denne slusepraksis blev Hjarbæk Fjord igen gjort salt. Da tærskeldybden i afvandingsslusen er 2 m, blev det dog samtidigt forudsat, at vandmasserne i Hjarbæk Fjord ville blive lagdelte med en haloklin (saltvandsspringlag) beliggende i ca. 2 m's dybde, og at der dermed igen blev skabt muligheder for stagnerende bundvand, som kunne dække op til 40% af fjordbundens areal.

Tilførslen af saltvand med et højt sulfatindhold og muligheden for langvarige perioder med iltsvind kan formodes at stimulere sedimentets næringsaltfrigivelse via flere mekanismer:

- 1) Øget sulfattilførsel i kombination med mindre ilttilførsel kan føre til frigivelse af sedimentets jernbundne fosforpulje (Figur 1).
- 2) En stor del af kvælstoffjernelsen i et iltet sediment sker ved koblet nitrifikation/denitrifikation^{* fodnote 1}. Ringere iltforhold reducerer denne proces, hvorved mere kvælstof frigives til vandfasen i form af ammonium.



Figur 1. Interaktioner mellem jern (Fe), svovl (S), kulstof (C) og fosfor (P) omsætning i sediment. I et oxideret (iltet) overladesediment dannes og tilføres amorf jernhydroxid (FeOOH), som adsorberer orto-fosfat fra porevandet i et molært Fe:P forhold på 7:1. Herved bliver fosfat bundet i sedimentet. Med alderen bliver jernhydroxidene modstanddygtige overfor reduktion (under iltfri forhold) med mindre de udsættes for en kraftig reduktant som f.eks. sulfid (HS⁻). Sulfid dannes ved bakteriel sulfatrespiration - en proces, som stimuleres ved tilførsel af sulfat og organisk stof. Hvis sulfid dannes i tilstrækkelig mængde udfældes den reducerede jern som ferrosulfid (FeS) eller pyrit (FeS₂) og den jernbundne fosfat frigives til vandet. I ferskvand er sulfatreduktionen begrænset af sulfattilgængeligheden. Derfor ses ofte store aflejringer af jernbundet fosfor, selv i eutrofe søer. I havvand er der meget mere sulfat end i ferskvand (sulfatkoncentrationen i Hjarbæk Fjord bundvandet er blevet ca. 30 gange større efter sluseåbningen) og sulfatreduktionen begrænses ofte kun af mængden af organisk stof der kan mineraliseres. Introduktionen af store sulfatmængder - i kombination med stagnerende, iltfrit bundvand - fører formodentligt til frigivelse af den jernbundne fosforpulje i Hjarbæk Fjord sedimentet.

1.2 Formålet med undersøgelsen

Baggrunden for nærværende undersøgelse er dels usikkerheden om effekten af saltvandstilførslen på den interne næringsaltcyklus i fjorden og dels, at der ikke foreligger nogen undersøgelser af den

interne næringssaltbelastning i fjorden eller af sedimentets pulje af jernbundet fosfor forud for sluseåbningen.

Undersøgelsen indeholder derfor følgende elementer:

- 1) En sedimentundersøgelse, der især skal opgøre puljen af jernbundet fosfor i fjordens akkumuleringsområder.
- 2) En kvantificering af sedimentets næringssaltafgivelse gennem en sommersæson.
- 3) En sammenligning af den interne og den eksterne næringssalttilførsel ud fra simple massebalancer.
- 4) Eksperimentelle undersøgelser af salt/sulfat effekt på næringssaltfrigivelsen fra sedimentet. (Denne indsats har været koncentreret om fosforfrigivelsen).

[FODNOTE 1]

Kvælstof (N) tilbageholdes i sedimenter dels ved akkumulering af langsomt nedbrydelige organiske N-forbindelse og dels ved denitrifikation - bakteriel nitrat (NO_3^-) respiration. Denitrifikationens slutprodukt er frit atmosfærisk kvælstof (N_2). Denitrifikation foregår i iltfrit sediment, hvor nitraten enten tilføres fra det ovenstående vand eller dannes i sedimentet ved nitrifikation - bakteriel oxidation af ammonium (NH_4^+) til nitrat. Denne proces kræver ilt (O_2). Koblet nitrifikation/denitrifikation er den vigtigste proces i kvælstoffjernelsen om sommeren, hvor vandets nitratkoncentration normalt er lav. Nitrifikationen foregår i grænselaget mellem iltet overfladesediment og dybereliggende iltfrit sediment. Hvis bundvandet bliver iltfrit, afkobles nitrifikation, og ammonium frigives til det ovenstående vand. Ammonium er den kvælstofforbindelse, som bedst stimulerer væksten af planteplankton. I Hjarbæk Fjord kan der derfor om sommeren forventes en stor ammoniumfrigivelse fra den bund, som ligger under springlaget, i det omfang bundvandet bliver iltfrit.



2. Undersøgelsens metoder og resultater

2.1 Sedimentkarakteristik og akkumuleringsrater

2.1.1 Stationsplacering

Kun "mudderbunden" blev undersøgt

Da hovedformålet med sedimentundersøgelsen var at kvantificere den pulje af jernbundet fosfor, som formodes at være akkumuleret gennem ferskvandsperioden, blev der udvalgt 4 stationer, som alle lå i akkumuleringsområder. Disse områder er ofte karakteriseret ved, at bunden er blød mudderbund. Valget af stationer (Figur 2A) skete dels på baggrund af sedimentundersøgelsen fra 1981 (Figur 3) og dels ud fra en visuel undersøgelse af sedimentet i forskellige dele af fjorden. Undersøgelsen i 1981 viste tydeligt, at stationerne 5-7 var placeret på hård, sandet bund, hvor akkumuleringen må formodes at være meget ringe (Tabel 1).

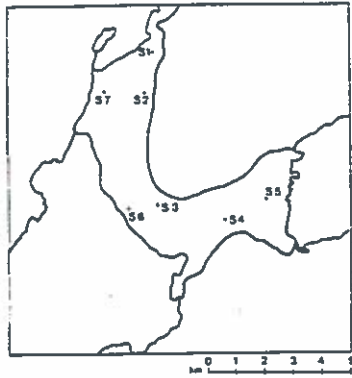
Tabel 1. Karakteristik af overfladesedimentet i Hjarbæk Fjord. Sammenligning af 7 stationer fra 1981 (Figur 3) og 4 stationer fra marts 1992 (Figur 2).

Sedimentdata fra Hjarbæk Fjord-undersøgelsen 1981-1992 (Rapport Nr. 3; Viborg amt 1982).

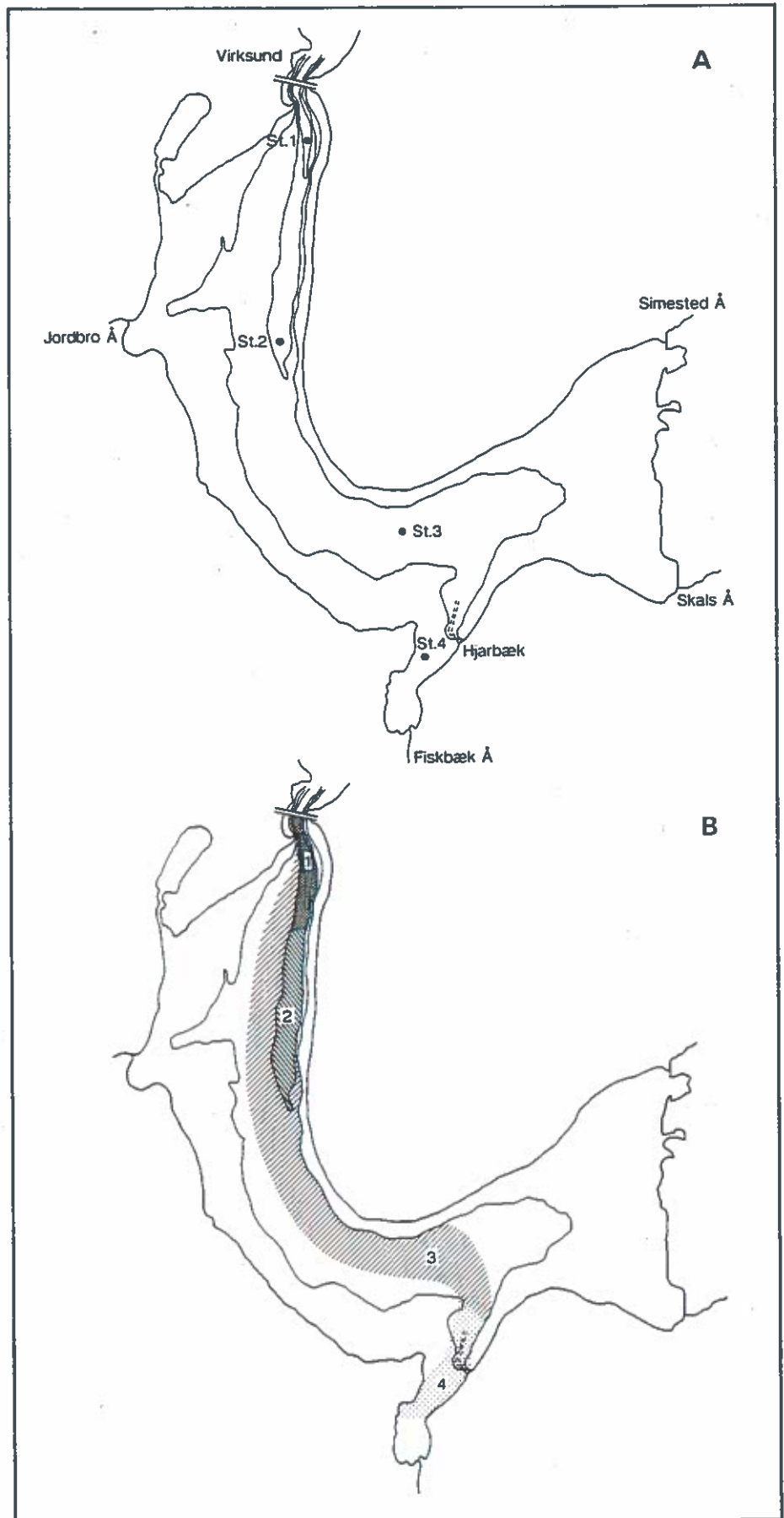
Station Nr.	S 1	S 2	S 3	S 4	S 5	S 6	S 7
Vanddybde, m	5	3.5	2	1.8	1	1	1
Data for 0 til 5-10 cm's dybde							
TS, % af tørvægt	7.6	9.3	53.1	9	71	76.4	70
GT, % af tørvægt	36.1	33.6	8.4	24.3	1.3	0.7	1.3
TN, $\mu\text{mol g TV}^{-1}$	1071	1000	286	857	50	36	57
TP, $\mu\text{mol g TV}^{-1}$	80.6	90.3	1.5	41.9	8.1	2.6	4.5
Uorg. P, $\mu\text{mol g TV}^{-1}$	48.4	61.3	8.4	25.8	8.1	2.3	2.9
TCa, $\mu\text{mol g TV}^{-1}$	1675	2225	2675	1975	155	247.5	65
TFe, $\mu\text{mol g TV}^{-1}$	501	483	197	483	38	14	34

Sedimentdata fra april 1992

Station nr.	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4
Vanddybde, m	5	3	2	1
Dybde 0 til:	10 cm	10 cm	10 cm	4 cm
TS, % af vådvægt	8.0	7.8	16.7	7.7
GT, % af TS	31.5	32.0	23.0	13.4
TN, $\mu\text{mol g TV}^{-1}$	848	856	655	379
TP, $\mu\text{mol g TV}^{-1}$	50.0	51.7	36.0	28.1
TFe, $\mu\text{mol g TV}^{-1}$	452	503	479	271



Figur 3. Stationsplacering ved Viborg Amts sedimentundersøgelse 1981 (fra Rapport nr. 3, Hjarbæk Fjord undersøgelsen 1981-82). Vanddybden på stationerne er angivet i tabel 1.



Figur 2. Stationsplacering for sedimentkarakteristik og fluxmålinger 1992 (A), samt den skønnede udbredelse af de fire bundtyper (B). Vanddybden på stationerne er angivet i tabel 1.

Estimeret jernakkumulering og målt jerntilførsel stemmer godt overens

Figur 2B viser den skønnede udbredelse af akkumuleringsbunden, fordelt på de 4 "bundtyper", som blev undersøgt. En indikation på, at dette skøn er rimeligt, er, at den jernpulje, som årligt er blevet aflejret i arealet (beregnet til 113,5 tons - afsnit 2.1.3) svarer ganske godt til den årlige jerntilførsel til fjorden på 125 tons (afsnit 2.3).

Uforstyrrede sedimentkerner

2.1.2 Metoder

Sedimentet blev udtaget i acrylrør (indre diameter 5,2 cm). Ved de lange sedimentkerner fra station 1 og 2 blev der anvendt et modtryksstempel for at undgå sammenpresning af sedimentkernen. Der blev kun anvendt sedimentkerner, hvor overfladen var intakt, således at sedimentets lagdeling var uforstyrret. Prøverne til sedimentkarakteristik blev udtaget i marts 1992.

Fosfor, jern og sulfider

Til bestemmelse af sedimentets fosfor-, jern- og sulfidpuljer blev der "puljet" sediment fra tre rør på hver station. Al håndtering af frisk sediment blev udført i handskeposer, fyldt med N₂-gas for at undgå en oxidation af reducerede jernforbindelser. Sedimentkernerne blev opdelt i dybdeintervaller på 0,5-2 cm i overfladen og 2-5 cm for dybere lag. Sedimentets fosfor- og jernpuljer blev bestemt på frosne sedimentprøver ved en trinvis ekstraktion, der tillader kvantitativ adskillelse af 6 fosforpuljer og tre jernpuljer (Appendix 1; Jensen & Thamdrup, 1993). Prøver til sulfidbestemmelse blev tilsat zinkacetat og frosset. Sulfidindholdet blev bestemt ved en to-trins destillation af henholdsvis syreopløselige sulfider og kromreducerbart svovl (Fossing & Jørgensen, 1989).

Akkumuleringsrater

Bestemmelse af akkumulering blev søgt foretaget ved Pb²¹⁰ datering af sedimentkerner fra station 1 og 2 (udført af VKI). Målingerne viste imidlertid, at sedimentet var opblandet ned til mere end 30 cm, hvorfor datering ikke kunne foretages. Årsagen hertil er formodentligt, at der indtil sluseåbningen blev trawlet med bundtrawl på de to stationer. Som alternativ blev akkumuleringen skønnet ud fra en visuel iagttagelse af lagdelingen på station 3. I alle sedimentkerner fra denne station skete der et skift fra mudret til mere sandet sediment i ca 10 cm's dybde. I samme lag optrådte der en skalthorisont, og det er dermed sandsynligt, at sedimentet under 10 cm, på station 3, repræsenterer den gamle fjordbund.

Ud fra sediments porøsitet og densitet kunne akkumuleringen på station 3 dermed estimeres til 2 g tørvægt cm⁻² for perioden 1966 til 1992. Dette svarer til 770 g TV m⁻² år⁻¹. Akkumuleringen af tørstof må formodes at være mindst lige så stor på station 1 og 2, der ligger på større dybde, mens den er antaget kun at være det halve på station 4 (Tabel 2). På station 1 og 2 svarer tørstofakkumuleringen til en lagtykkelse på henholdsvis 21 og 18 cm aflejret gennem ferskvandsperioden. At dømme efter det mindst 45 cm tykke, ensartede mudderlag på disse stationer må den skønnede akkumulering anses for at være et minimumsestimat.

2.1.3 Resultater

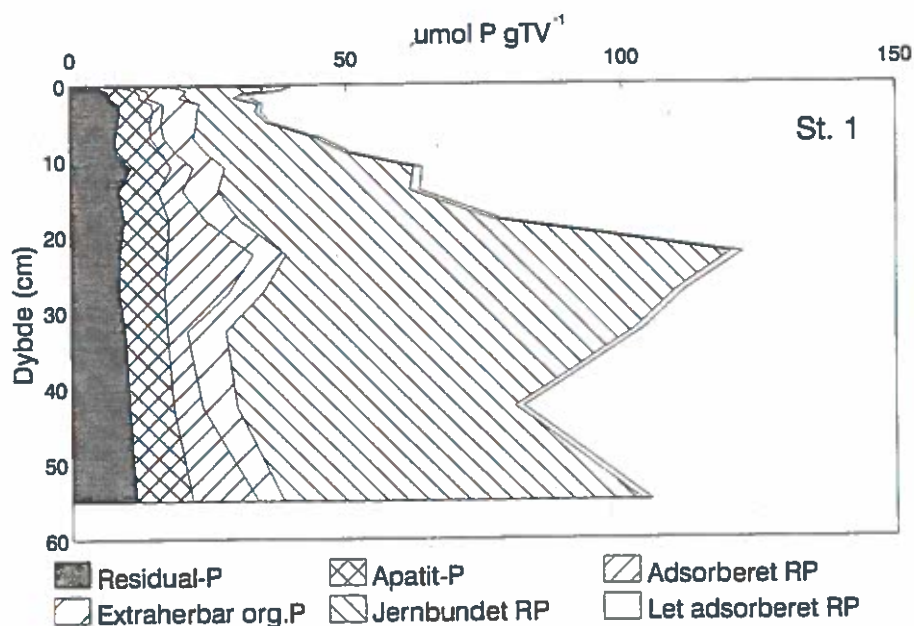
En sammenligning af sedimentundersøgelserne i 1981 og 1992 er foretaget i Tabel 1. I sedimentundersøgelsen i 1981 blev det angivet, at den undersøgte lagtykkelse var fra 5-10 cm overfladesediment. Den usikre dybdeangivelse i 1981 samt det lidt forskellige stations-

Overfladesedimentets P-indhold er faldet

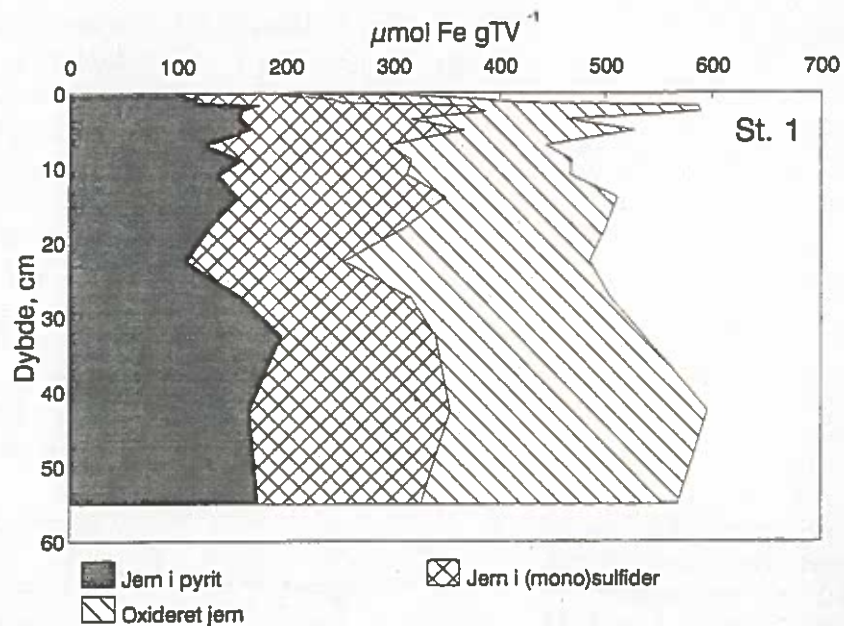
valg vanskeliggør en direkte sammenligning, men alligevel synes der for den dybe del af Hjarbæk Fjord (station 1 og 2 i begge undersøgelser) at være sket et fald i overfladesedimentets fosforindhold. På station 1, f.eks., er TP koncentrationen faldet fra 80 til 50 $\mu\text{mol P g TV}^{-1}$. Dette fald kan have flere årsager:

- 1) Det kan være udtryk for et fald i sedimentationen af organisk P som følge af formindsket ekstern P-tilførsel
- 2) Det kan skyldes, at der i løbet af sommeren 1991 (eller tidligere) er sket en frigivelse af jernbundet fosfor som følge af sulfiddannelse i overfladesedimentet.

Det kan derimod ikke skyldes variation i jerntilførslen eller tilførsel af immobile fosforformer som f.eks. apatit (calciumbundet P), idet sedimentets indhold af disse forbindelser er nogenlunde konstant med dybden (Figur 4).



Figur 4. Dybdefordeling af sedimentets fosforpuljer på station 1. Residual-P (refraktær organisk P), apatit-P (calciumbundet P), ekstraherbar organisk P og let adsorberet P ændrer sig kun lidt med dybden. Adsorberet reaktiv P har et maximum i ca. 25 cm's dybde, som måske kan stamme fra udvaskning af lerminerale i forbindelse med bygningen af dæmningen. Jernbundet P stiger med dybden indtil maximum i 20-25 cm's dybde. Maximaet er sammenfaldende med maximaet i adsorberet RP. Det kan tænkes at repræsentere overfladen i den gamle fjordbund. For yderligere tolkning af P-puljerne, se appendix 1.



Figur 5. Dybdefordeling af sedimentets jernpuljer på station 1. BD-Fe udgøres af oxiderede jern(III)forbindelser (amorft ferri-oxy-hydroxid (FeOOH), goetit m.m.) og letopløselige Fe(II)forbindelser (vivianit $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$ og siderit FeCO_3). Ratioen mellem Fe og P i BD ekstraktionen varierer mellem 10-20 i overfladesedimentet til 4-5 i de dybe lag. Dette indikerer, at BD-Fe i overfladen består af oxiderede jernforbindelser, som binder fosfat i ratioer fra 8:1 til 20:1 (Jensen & Thamdrup 1993); mens vivianit, hvor ratioen er 3:2 kan udgøre en væsentlig del af den jernbundne P i de dybere lag. Dybdevariationen i BD-Fe følger i stor udstrækning dybdevariationen i BD-RP (Fig. 4 og Fig. 6). HCl-Fe består formodentligt af syreopløselige jernsulfider (f.eks. FeS), mens Residual-Fe formodes at bestå af pyrit (FeS_2). Et indicium for denne tolkning er, at de to jernpuljer co-varierer med puljen af total sulfid (Fig. 6) med en ratio mellem Fe og S på ca. 1:2.

Forklaring 1

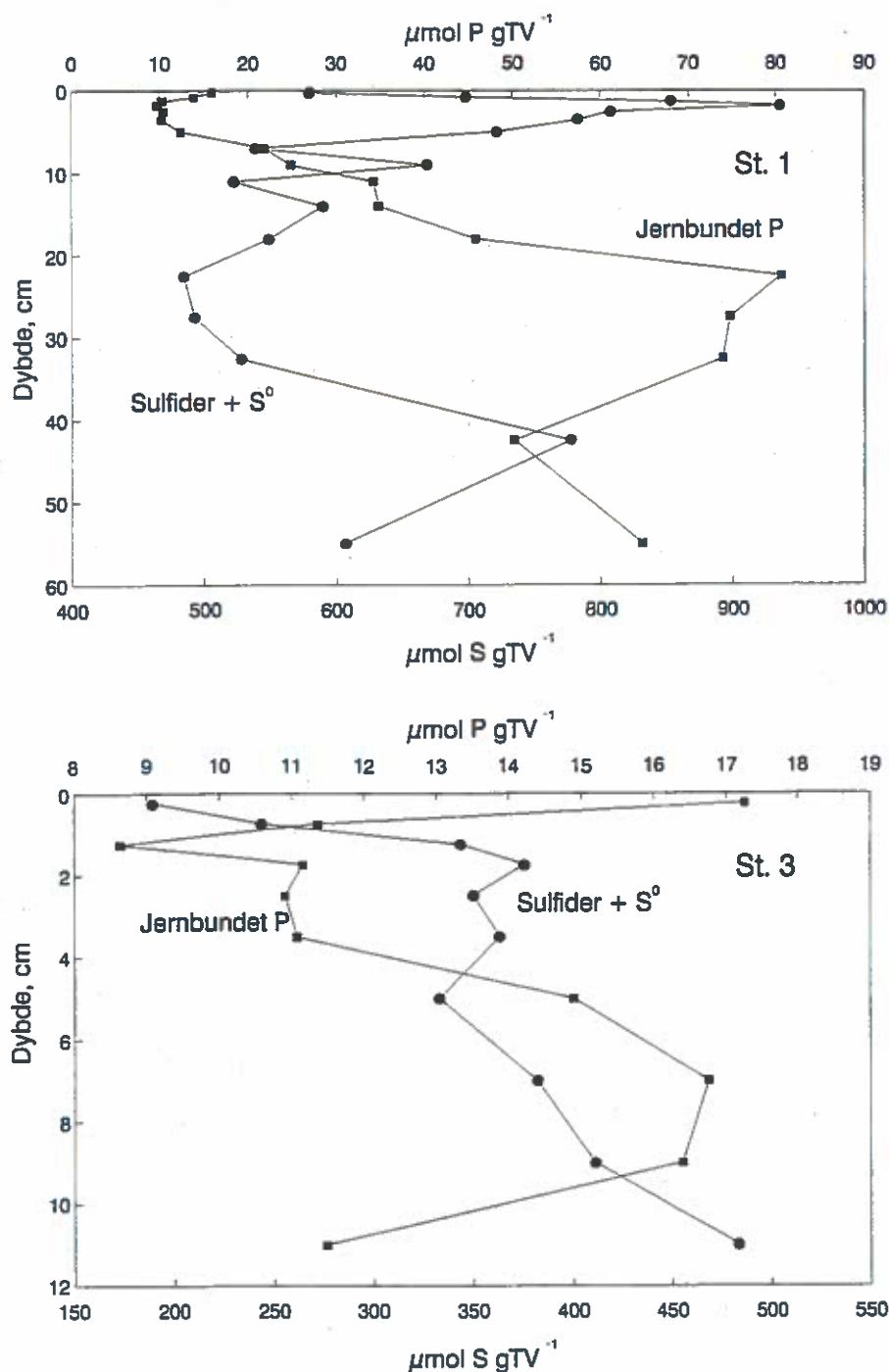
Gammel fjordbund i 25 cm's dybde?

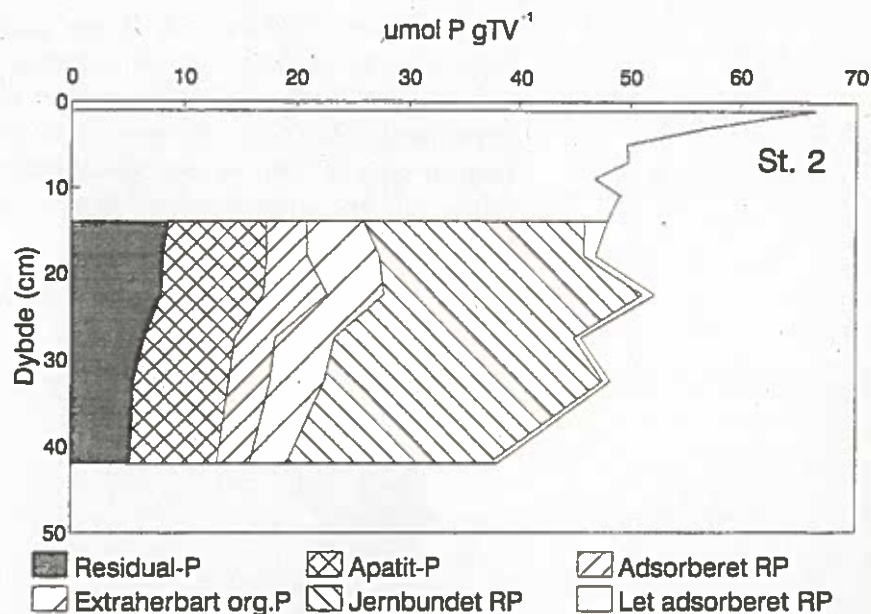
Den første forklaring, at P-pulje profilen afspejlede sedimentationshistorien, er i modstrid med Pb^{210} -analysen, som viste ensartede (høje) værdier ned til 30 cm's dybde, men den bestyrkes af, at man i det overfladesediment, som blev undersøgt i 1981 (ca. 13-23 cm's dybde i det nuværende sediment) finder en TP koncentration af samme størrelsesorden, som den daværende undersøgelse viste. En anden ting, som taler imod en helt opblandet sedimentprofil, er det markante maksimum i adsorberet fosfat i ca. 25 cm's dybde. I det anvendte ekstraktionsskema (Appendix 1) er adsorberet fosfat enten bundet til ler eller aluminiumoxider og et maksimum i 25 cm's dybde kunne være udtryk for, at der ved bygning af Virksunddæmningen er sket en stor udvaskning af ler. Det korresponderende maksimum i jernbundet P kan dermed repræsentere det overflademaksimum i jernbundet P, som altid iagttages i oxiderede marine sedimenter (f.eks. Jensen & Thamdrup, 1993) - altså overfladesedimentet i den gamle fjordbund. Denne teori stemmer yderligere overens med den gættede akkumuleringsrate på Station 1 for ferskvandsperioden. Sedimentets indhold af jernbundet P er i øvrigt overraskende stort, men tilsvarende høje koncentrationer er dog iagttaget i sedimentet fra andre eutrofe og jernrige søer som f.eks. Søbygård Sø (Jensen & Andersen, 1992).

Forklaring 2

Den anden forklaring, at den jernbundne P i overladesedimentet bliver frigivet p.g.a. sulfiddannelse, bestyrkes af profilerne for sulfidbundet jern (Figur 5) og af total sulfid (Figur 6), der begge er spejlbilleder af profilen for jernbundet fosfor. Sådanne profiler kan forklares ud fra hypotesen om sulfateffekten på fosforbinding i sedimentet (Figur 1). Det er en kendsgerning, at der er blevet frigivet store mængder fosfor fra sedimentet efter sluseåbningen (afsnit 2.3), og det er overvejende sandsynligt, at den frigivne fosfor stammer fra den jernbundne fosforpulje. Tilsvarende sedimentprofiler kan iagttages på station 3 (Figur 6 og Figur 8) blot med en anden dybdeskala, men ikke på station 2 (Figur 7). En mulig årsag til denne forskel kan være, at en bundtrawling i fjorden i efteråret 1991 eller foråret 1992 har berørt station 2, men friholdt station 1 og 3.

Figur 6. Jernbundet P og reduceret svovl (syreopløseligt sulfid + kromreducerbart svovl) på station 1 og 3. På station 1 er dybdeprofilen af jernbundet P næsten et spejlbillede af dybdeprofilen for total sulfid. Total sulfid består næsten udelukkende af jernbundet sulfid. Dybdeprofilerne kan derfor forklares ved, at i år, hvor meget jern er blevet bundet af sulfider har der været ringere kapacitet til at binde fosfor i sedimentet. Profilerne illustrerer den tætte kobling mellem svovl-, jern- og fosfor biogeokemien i sedimentet. På Station 3 er dette "spejlbillede" kun udtalt i de øverste 4 cm af sedimentet. I det lag foregår der stadig en aktiv sulfiddannelse (se Fig. 13).





Figur 7. Dybdefordeling af sedimentets fosforpuljer på station 2. Der mangler målinger fra de øverste 12 cm, men total-P profilen udviser ikke samme forløb som profilen på station 1. Dette kan skyldes opblanding af sedimentet p.g.a. trawlfiskeri. Også på denne station er der et (svagere) maximum af adsorberet RP og et lokalt maximum af jernbundet RP i 20-25 cm's dybde. Denne dybde kunne, som ved station 1, repræsentere sedimentaflejring fra perioden lige før dæmningen.

Det er ikke muligt at forklare de fundne profiler mere sikkert end dette, men hvis der sker en frigivelse af jernbundet P p.g.a. sulfid-dannelse i sedimentet (forklaring 2) ville en fornyet sedimentundersøgelse i f.eks. 1995 vise formindskede koncentrationer af jernbundet P på alle stationer. En del jernbundet fosfor er formentligt frigivet fra sedimentet allerede i slutningen af ferskvandsperioden, idet fjorden på det tidspunkt var inde i en periode med reduceret ekstern P-belastning. At en sådan frigivelse fandt sted antydes af en sammenligning af observerede og beregnede årsgennemsnit for TP i vandfasen (Figur 16). I mange søer, hvor den eksterne belastning reduceres, ses forhøjede TP-koncentrationer i årene efter reduktion p.g.a. P-frigivelse fra sedimentet (f.eks. Sas, 1989; Jensen & Andersen, 1989).

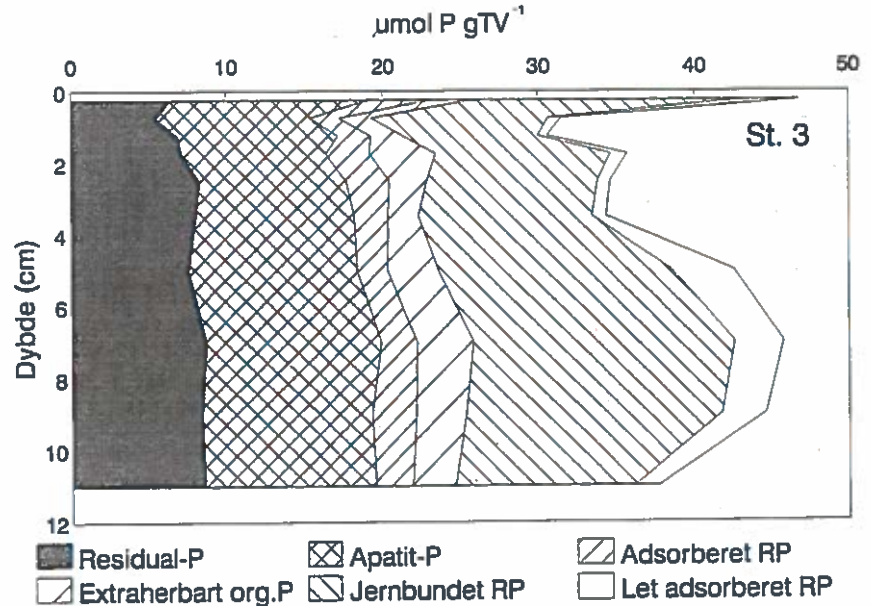
Stort indhold af jernbundet P på alle stationer

På station 2 mislykkedes bestemmelsen af P-puljerne i overfladesedimentet (Figur 7), men total-P profilen svarede som sagt ikke til profilerne på station 1 og 3. Også på station 2 ses der et meget stort indhold af jernbundet P i hele sedimentprofilen. På station 1, 2 og 3 udgør de potentielt frigivelige P-former (let adsorberet RP, jernbundet RP og ekstraherbar organisk P) ca. 50% af sedimentets totale fosforindhold, mens de på station 4 (Figur 9) kun udgør 25-30%.

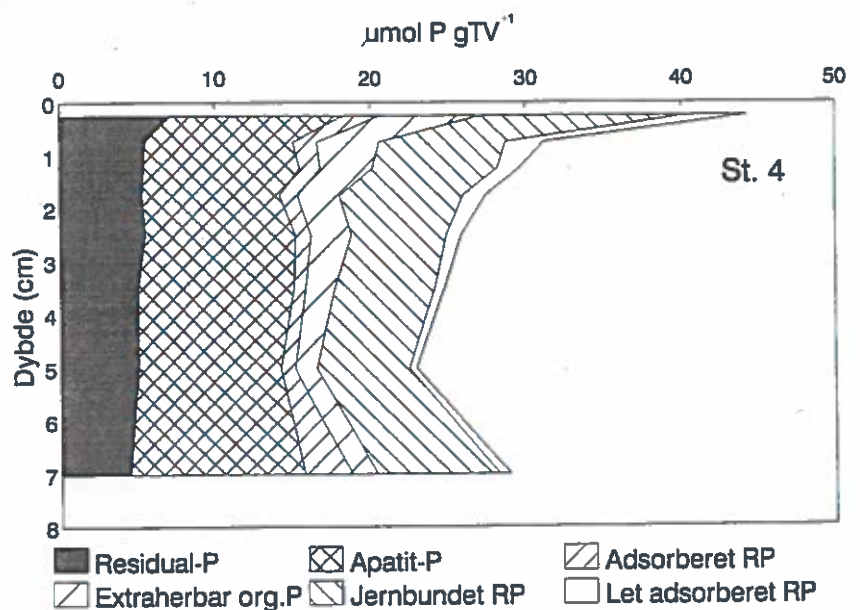
Estimatet for P-akkumulering "i underkanten"?

Ud fra de estimerede akkumuleringsrater og arealerne af de pågældende bundtyper kan fosfortilbageholdelsen i fjorden beregnes til 5,2 tons år⁻¹ som gennemsnit for ferskvandsperioden (Tabel 2). Denne værdi er lidt lav i forhold til de årlige nettotilbageholdelser på 5-20 tons, som kan beregnes ud fra massebalancerne for perioden 1987-90 (afsnit 2.3).

Profilerne for total jern på de fire stationer (kun vist for station 1, Figur 5) udviste ikke de store udsving med dybden, hvilket indikerer, at jerntilførslen ikke har ændret sig væsentligt med tiden, idet jern tilbageholdelsen i sedimenterne ofte er tæt ved 100% af den tilførte mængde. Den beregnede akkumuleringsrate for jern i de fire akkumuleringsarealer svarer som sagt ganske godt til den tilførte jernmængde (Tabel 2; afsnit 2.4).



Figur 8. Dybdefordeling af sedimentets fosforpuljer på station 3. De immobile P-puljer (Residual-P, apatit-P og adsorberet RP) udgør på denne station godt 50% af total P. Jernbundet P har et udtalt overflademaximum, som skyldes nydannet FeOOH i den oxiderede sedimentoverflade (prøvetagning i marts!); men i dybderne, hvor sulfatreduktionen foregår (Figur 6 og Figur 13) findes minimumsværdier af jernbundet P. Station 3 har højst sandsynligt været friholdt for trawlfiskeri, at dømme efter den synlige skalhorisont i 10-13 cm's dybde (overfladen i den gamle fjordbund). Maximaet af jernbundet P i 7 cm's dybde kan således repræsenterer perioden fra midten af 1970'erne, hvor den eksterne fosfortilførsel var maksimal.



Figur 9. Dybdefordeling af sedimentets fosforpuljer på station 4. De immobile P-puljer udgør her mere end 65% af total P. P-pulje profilen er typisk for en eutrof, jernrig sø.

Tabel 2. Areal af bundtyper for de fire stationer. Akkumuleringsrater, akkumulerede puljer og målte fluxe mellem sediment og vand 1992.

Hjarbæk Fjord 1992	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4	Sum
Total areal, km ²					24.6
Areal af bundtype, km ²	0.42	0.93	3.86	1	6.21
Areal i % af total	1.7	3.8	15.7	4.1	25.2
Akkumulering i perioden 1966-1992					
Akk. rate, g TV m ⁻² år ⁻¹	770	770	770	335	
Lagtykkelse, cm	21	18	10	4	
Akk. rate, cm år ⁻¹	0.81	0.69	0.38	0.15	
Fe, mmol m ⁻² år ⁻¹	353	393	368	104	
Fe, tons år ⁻¹	8.3	20.4	79.1	5.8	113.5
P, mmol m ⁻² år ⁻¹	42.7	35.6	27.7	10.8	
P, tons år ⁻¹	0.56	1.03	3.31	0.33	5.23
N, mmol m ⁻² år ⁻¹	663	695	504	145	
N, tons år ⁻¹	3.9	9.0	27.2	2.0	42.2
C, mmol m ⁻² år ⁻¹	8077	8815	5610	1622	
Akkumulerede puljer					
til dybde..., cm	20	20	12	8	
Jernbundet P, mmol m ⁻²	608	439	340	192	
Jernbundet P, tons P	7.9	12.7	40.7	6.0	67.2
Oxideret jern, mmol m ⁻²	3.44		3.04		
Akkumulerede puljer					
til dybde..., cm	45	45	12	8	
Jernbundet P, mmol m ⁻²	2540	1510	340	192	
Jernbundet P, tons P	33.1	43.5	40.7	6.0	123.2
Oxideret jern; mol m ⁻²	10.3		3.04		
Fluxe mellem sediment og vand; total for perioden 1/4-31/10 1992					
PO ₄ efflux, mol m ⁻²	0.264	0.474	0.177	0.154	
PO ₄ efflux, tons P	3.44	13.67	21.18	4.77	43.06
NH ₄ efflux, mol m ⁻²	2.77	5.15	1.99	2.05	
NH ₄ efflux, tons N	16.3	67.1	107.5	28.7	219.6
NO ₃ optagelse, mol m ⁻²	-0.215	-0.2	-0.223	-0.434	
NO ₃ optagelse, tons N	-1.26	-2.60	-12.05	-6.08	-22.00

N-akkumulering ubetydelig

Sedimenternes indhold af organisk N og C (Tabel 1), målt på "CHN-analyser", udviste ikke store ændringer med dybden i sedimentet, men varierede med glødetabet på stationerne. TN akkumuleringen kunne beregnes til 42 tons år⁻¹ som gennemsnit for ferskvandsperioden. Denne værdi er forsvindende lille i forhold til en tilbageholdelse på op mod 1000 tons år⁻¹ beregnet ud fra massebalancerne (afsnit 2.4).

2.2 Næringssaltfluxe og mineraliseringsrater 1992

2.2.1 Metoder

5 målinger på 4 stationer

Næringssaltfluxe mellem vand og sediment og sedimentets iltoptagelse blev målt 5 gange i perioden april-oktober på station 1-3 og 4 gange på station 4. De aktuelle måledatoer var 7/4, 13/5, 17/6, 7/7, 17/8 (kun iltoptagelse) og 28/9. Der blev hver gang målt udveksling mellem sediment og vand på 4-6 uforstyrrede sedimentkerner fra hver station. Målingerne blev udført ved at inkubere kernerne i mørke ved samme temperatur og iltforhold, som der blev målt på stationen. Sedimentets iltoptagelse blev målt, hvis der var ilt i bundvandet på den aktuelle prøvetagningsdag. Fluxe mellem sediment og vand blev beregnet ud fra koncentrationsændringer (over tiden) i det vand, som stod over sedimentkernen i hvert rør. Normalt var vandsøjleens højde 12-15 cm, og der var placeret en magnet (til omrøring) ca. 6 cm over sedimentet. Sedimentets iltoptagelse blev målt over en 3 timers periode, og næringssaltudvekslingen blev målt over en 15 timers inkubations periode.

Sulfatreduktionsrater

En måling af sulfatreduktionsraten (jvnf. Figur 1) på de 4 stationer blev foretaget i juli. Formålet var dels at få et mål for dannelseshastigheden af sulfid og dels at få et mål for mineraliseringen i perioden, hvor bundvandet var iltfrit. Sulfatreduktionsraten blev målt v.h.a. radioaktiv $^{35}\text{SO}_4^{2-}$ injektionsteknik efter metode af Fossing & Jørgensen (1989). Samtidig blev effluxen af sulfid fra sediment målt med samme teknik som ved måling af iltoptagelse.

Sedimentets næringssaltfrigivelse var størst under iltfrie forhold

2.2.2 Næringssaltfluxe; resultater

Fosfatfluxene mellem sediment og vand var forholdsvis små i april, maj og september, hvor vandtemperaturen var lav, og der var ilt i bundvandet (Figur 10). I maj måned var fluxen af fosfat rettet mod sedimentet på station 1-3, men ved alle andre målinger var der tale om fosfatfrigivelse fra sedimentet. Maximale værdier af fosfatfrigivelse blev på alle stationer målt i juni og juli, hvor temperaturen var 19-20 °C, og bundvandet var iltfrit på station 1-3. Bundvandets temperatur og iltindhold anses normalt for at være nogle af de vigtigste kontrollerende faktorer for sæsonmæssig fosfatfrigivelse fra sedimenter (f.eks. Jensen & Andersen, 1992; Mortensen *et al.*, 1992). Station 2 afgav de største fosfatmængder (op til 5 mmol m⁻² d⁻¹). Når fosfatfluxene kumuleres for de 4 arealtyper for perioden 1/4 - 31/10 svarer de målte fluxe til en frigivelse af 43 tons P fra sedimentet (Tabel 2).

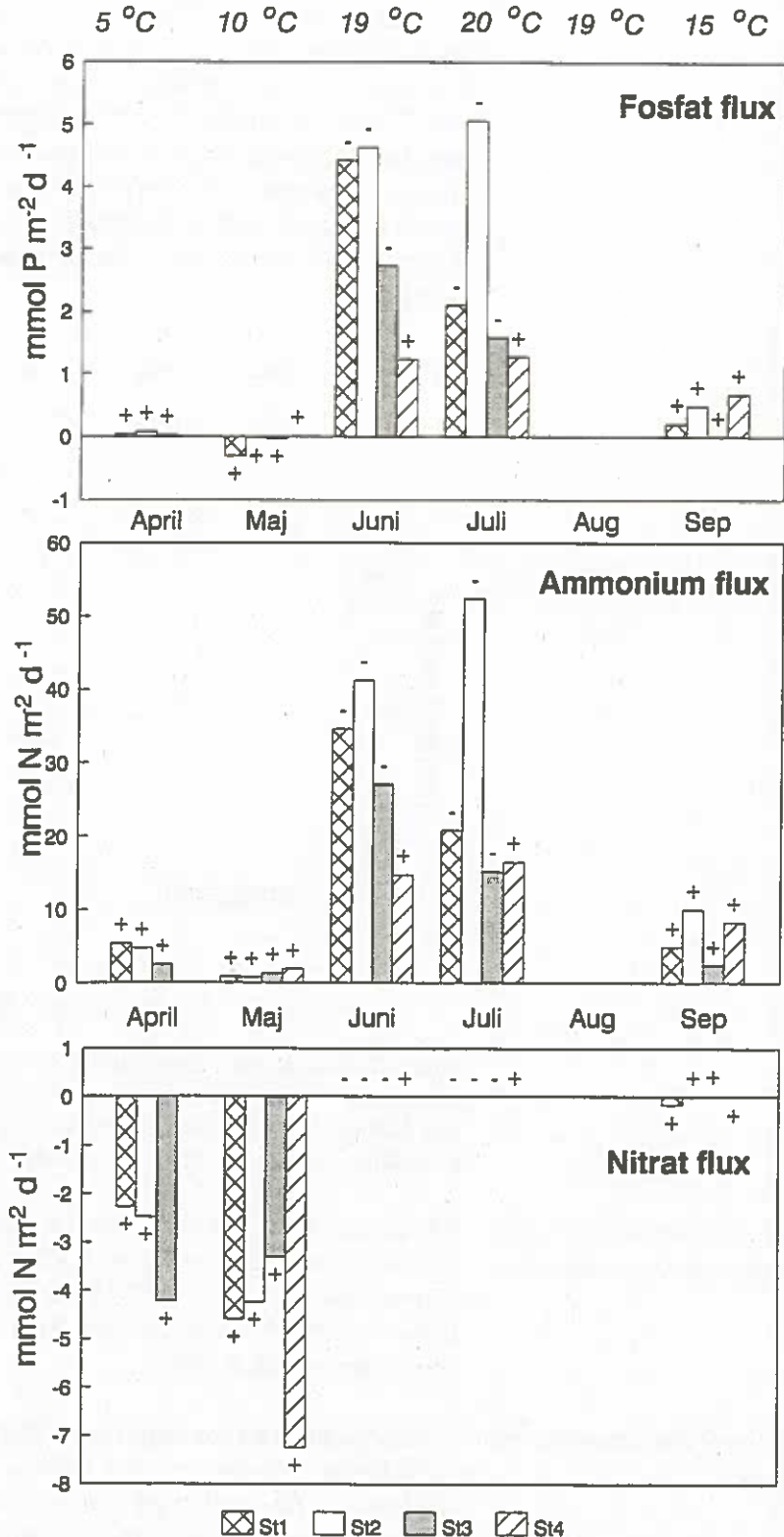
43 tons P og 220 tons N afgivet fra sedimentet

Ammoniumfluxene viste stort set samme mønster som fosfatfluxene (Figur 10), hvor de højeste frigivelsesrater blev målt på station 1 og 2 i juni og juli. Sammenlagt for perioden blev der frigivet 220 tons ammonium-N. Det molære forhold mellem N og P i effluxen var 10-11 for hele perioden. Da ammonium hidhører næsten udelukkende fra mineralisering af organisk stof, som har et N:P forhold på mindst 16-20 indikerer den fundne ratio i effluxen, at der afgives P i overskud.

Denitrifikationen var minimal

Nitratfluxen var altid rettet mod sedimentet (Figur 10). Denne flux er udtryk for denitrifikation (jvnf. fodnote 1) af vandfasens nitrat. Hvis der i perioder registreres nitrat efflux fra sedimentet er dette

udtryk for, at nitrifikationsraten overstiger denitrifikationsraten i sedimentet. Signifikant nitratoptagelse blev kun iagttaget i april og maj, hvor der var tilstrækkelige mængder af nitrat i bundvandet. Det samlede nitratoptag udgjorde 22 tons N for den 7 måneders periode. Dette er en forsvindende mængde sammenholdt med den årlige kvælstoftilførsel på over 2000 tons N (afsnit 2.3). De 22 tons er dog et minimumsestimat for denitrifikationen, dels fordi den koblede nitrifikation/denitrifikation ikke blev målt med denne teknik, og dels fordi denitrifikationen kan være anseelig i vintermånederne, hvor vandets nitratindhold er højt.

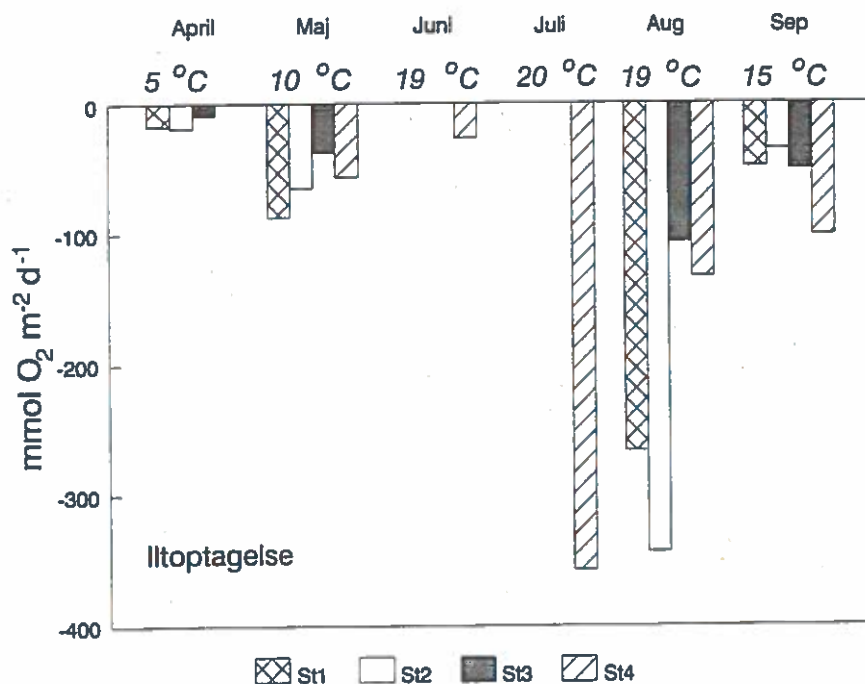


Figur 10. Næringssaltfluxe mellem sediment og vand i 1992 på de 4 stationer. Positive værdier betyder, at fluxen var rettet fra sediment til vand. + og - over søjlerne angiver tilstedeværelse (+) eller fravær (-) af ilt i bundvandet ved den pågældende måling. Temperaturen i bundvandet er angivet øverst i figuren.

Stort iltforbrug i sedimentet; mindst 100 mmol O₂ m⁻² d⁻¹ i sommermånederne

2.2.3 Mineraliseringsrater

Sedimentets iltoptagelse varierede mellem ca 20 mmol m⁻² d⁻¹ ved 5 °C i april til over 300 mmol m⁻² d⁻¹ i juli og august. I juni og juli var der iltfrit bundvand på stationerne 1-3, og i juni var der lav iltkoncentration på station 4. De meget høje rater (station 4 i juli og station 1 og 2 i august) er derfor udtryk for sedimentets iltforbrug både til respiration og til kemisk/biologisk oxidation af sulfider, som er akkumuleret i den iltfrie periode. Sulfatreduktionsraterne på 40-50 mmol S m⁻² d⁻¹ målt i juli (Figur 12) var meget høje sammenlignet med f.eks. andet Limfjordssediment. Jørgensen (1977) og Howarth & Jørgensen (1984) fandt således maximumsrater på 15-20 mmol S m⁻² d⁻¹ for Lovns Bredding. De høje sulfatreduktionsrater i Hjarbæk Fjord skyldes den meget høje produktionsrate (og tilsvarende store sedimentation) af planteplankton i fjorden. Da 1 mol SO₄²⁻ kan oxidere 2 mol organisk C ved sulfatrespiration svarer de målte sulfatreduktionsrater til en C-mineralisering på ca. 100 mmol C m⁻² d⁻¹. Mineraliseringen ville have forbrugt 100 mmol O₂ m⁻² d⁻¹, hvis den havde foregået ved iltrespiration. Denne rate må anses for at være et minimumsestimat for C-mineraliseringsraten i de tre sommermåneder.



Figur 11. Sedimentets iltoptagelse i 1992 på de 4 stationer. Positive værdier betyder, at fluxen var rettet fra sediment til vand. + og - over søjlerne angiver tilstedeværelse (+) eller fravær (-) af ilt i bundvandet ved den pågældende måling. Temperaturen i bundvandet er angivet øverst i figuren.

1/3 af den producerede sulfid blev forbrugt i sedimentet

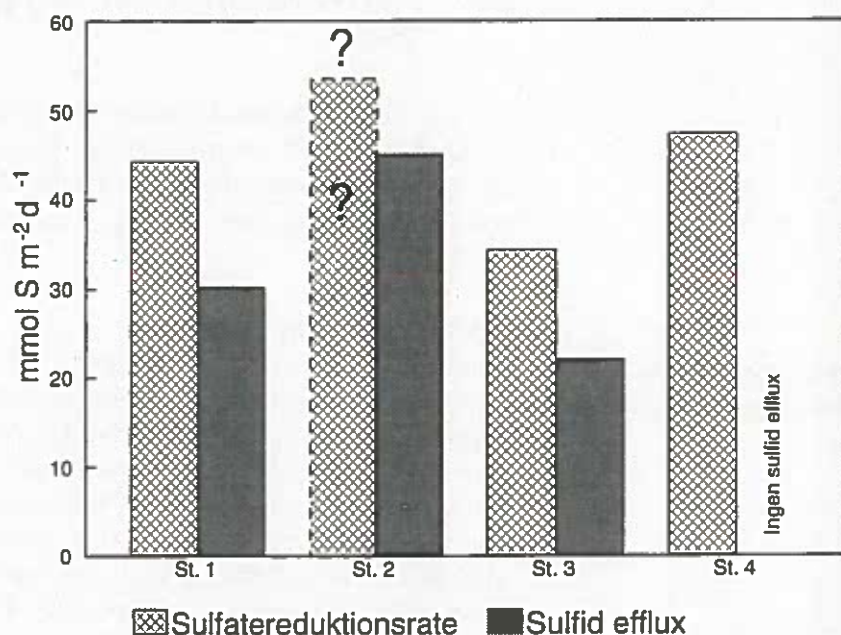
På station 1 og 3, hvor bundvandet var iltfrit, var den målte efflux af sulfid fra sedimentet ca. 2/3 af den målte sulfatreduktionsrate (Figur 12). Dvs. at ca. 1/3 af den producerede sulfid, svarende til 15 mmol S m⁻² d⁻¹, var til rådighed for reduktion og fældning af jernforbindelser i sedimentet.

Størst sulfidproduktion på Station 2

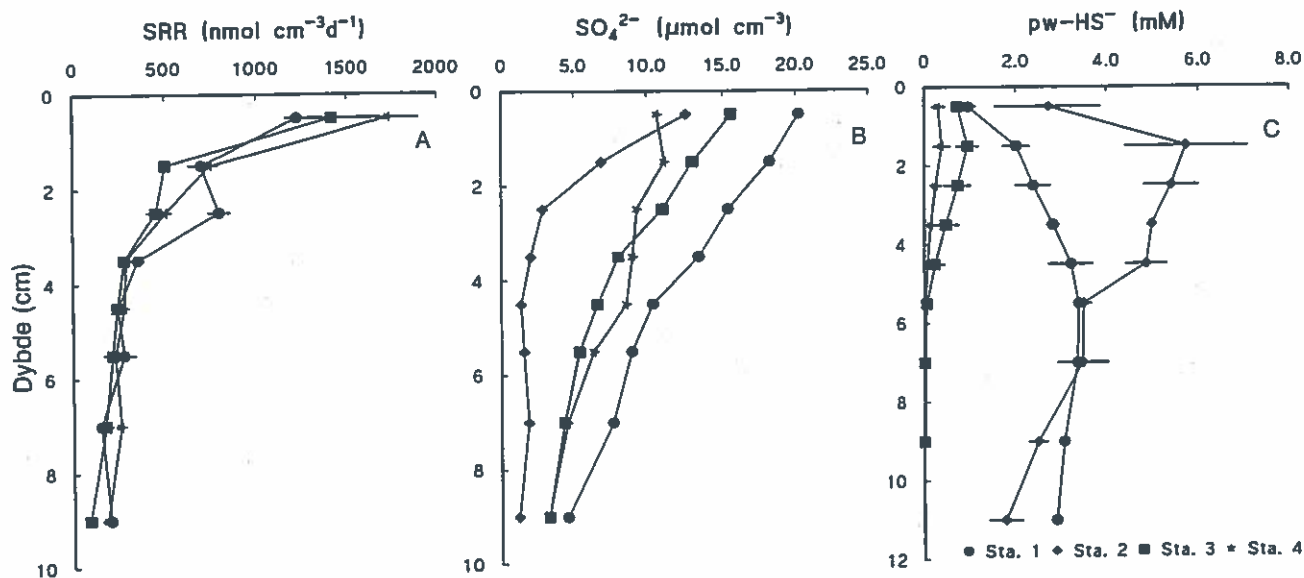
Dybdeprofilerne for sulfatreduktionsraten og porevandets sulfat- og sulfidkoncentration er vist i Figur 13. Det var ikke muligt at måle sulfatreduktionsraten på station 2, fordi sulfaten i sedimentporevandet blev opbrugt for hurtigt i forhold til inkubationstiden. At døm-

Støkiometrien passer: "Den producerede sulfid kan frigøre 43 tons P"

me efter sulfat- og sulfidprofilen samt efter sulfideffluxen (Figur 12) var sulfatreduktionsraten højest på denne station. På alle 4 stationer var sulfatreduktionsraten højest i sedimentoverfladen og faldt til under en trediedel i 4 cm's dybde. Den producerede sulfid kunne måles i større dybder på station 1 og 2, mens den forsvandt under 6 cm's dybde på station 3 og 4. Den faldende sulfidkoncentration dybere i sedimentet skyldes til dels et forbrug af sulfid til reduktion og fældning af de jernforbindelser, som ekstraheres med BD-reagenset (Figur 5 og Figur 6). Det er den nedadrettede diffusion af sulfid, som vil føre til frigivelse af den jernbundne fosfor, som er akkumuleret i de dybere sedimentlag. Denne sulfidflux kan antages at være i størrelsesordenen $15 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ i de tre sommermåneder (jvnf. Figur 12). Hvis sulfiden forbruges til reduktion af FeOOH og fældning af den frigivne Fe^{2+} som pyrit (FeS_2) (Figur 1), skal der forbruges 3 mol sulfid pr mol FeOOH . Der kan dermed omdannes $900 \text{ mmol FeOOH m}^{-2}$ i de tre sommermåneder ved den nedadrettede sulfidflux, hvilket vil føre til frigivelse af $150\text{-}200 \text{ mmol jernbundet P m}^{-2}$. Denne frigivelse af jernbundet P svarer godt til de P-frigivelser, som er målt for hele sommerhalvåret på station 1, 3 og 4, mens frigivelse på station 2 var $474 \text{ mmol fosfat m}^{-2}$ for sommerhalvåret. Det var som sagt ikke muligt at måle sulfatreduktionsraten på station 2, men det er tænkeligt, at den har været i størrelsesordenen $75\text{-}100 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, hvilket ville tillade en nedadrettet sulfidflux på ca. $30 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ - tilstrækkeligt til at forklare den målte fosfatfrigivelse.



Figur 12. Sulfatreduktionsrater bestemt ved $^{35}\text{SO}_4^{2-}$ -injektionsteknik og målte rater af sulfid frigivelse fra sedimentet i juli 1992 på de 4 stationer. På station 4, hvor der var ilt i bundvandet, var der ingen målelig sulfidfrigivelse. Meget af den dannede sulfid er formodentligt blevet oxideret i sedimentoverfladen på denne station, hvilket kan forklare det meget høje iltforbrug på station 4 i juli (Figur 11).



Figur 13. Vertikalprofiler af sulfatreduktionsrater (A), porevandets sulfatkoncentration (B) og porevandets indhold af opløst sulfid (C) på de 4 stationer i juli 1992. Det var ikke muligt at beregne sulfatreduktionsraten på station 2 p.g.a. det meget høje forbrug af tracer ("isotopkoncentrering"). Udfra porevandsprofilerne af sulfat kan sulfatreduktionsraten på station 2 imidlertid antages at have været betydeligt større end på de andre stationer, hvilket bekræftes af den målte sulfid efflux (Figur 12).

2.3 Massebalancer for N og P i perioden 1987 til 1993

Ud fra Viborg Amts data for tilstrømning til Hjarbæk Fjord fra de 4 større vandløb, samt data for vandkemi på station 1 (indenfor slusen) og på stationen i Lovns Bredning (udenfor slusen) er der foretaget en beregning af årlige vand- og stofbalancer for årene 1987-1993.

2.3.1 Beregningsmetode

Simple massebalancer beregnet med månedsintervaller

Massebalancen er beregnet ud fra 1-2 månedlige målinger af vandføring og stofkoncentration, og der er regnet med tidsskridt på en måned. Da vandets gennemsnitlige opholdstid i fjorden kan beregnes til ca. 50 dage i ferskvandssituationen og ca. 25 dage efter sluseåbning, er det anvendte tidsskridt tilstrækkeligt lille til at give en nogenlunde sikker beregning på årsbasis. For månedlige beregninger af massebalance kan der være større usikkerhed. For alle stofkoncentrationer er der anvendt TN og TP værdier.

Vand- og stoftransporter er skitseret i Figur 14. I ferskvands-situationen før sluseåbning (Figur 14A) antages mængden af udstrømmende vand at være lig med mængden af tilført ferskvand (umålte oplande er medtaget i beregningen) $Q_U = Q_T$. Næringssalttilførslen beregnes som $Q_T \cdot C_T$, mens næringssaltfraførslen beregnes som $Q_U \cdot C_O$, idet det er overfladevand, som strømmer ud af slusen. Når datagrundlaget i øvrigt er i orden, er usikkerheden ved denne beregningsmetode begrænset til de ændringer i vandbalancen, som har at gøre med nedbør, fordampning og vandstand-sændringer. Set i forhold til de vandmængder, som passerer gennem fjorden, er de processer ubetydelige.

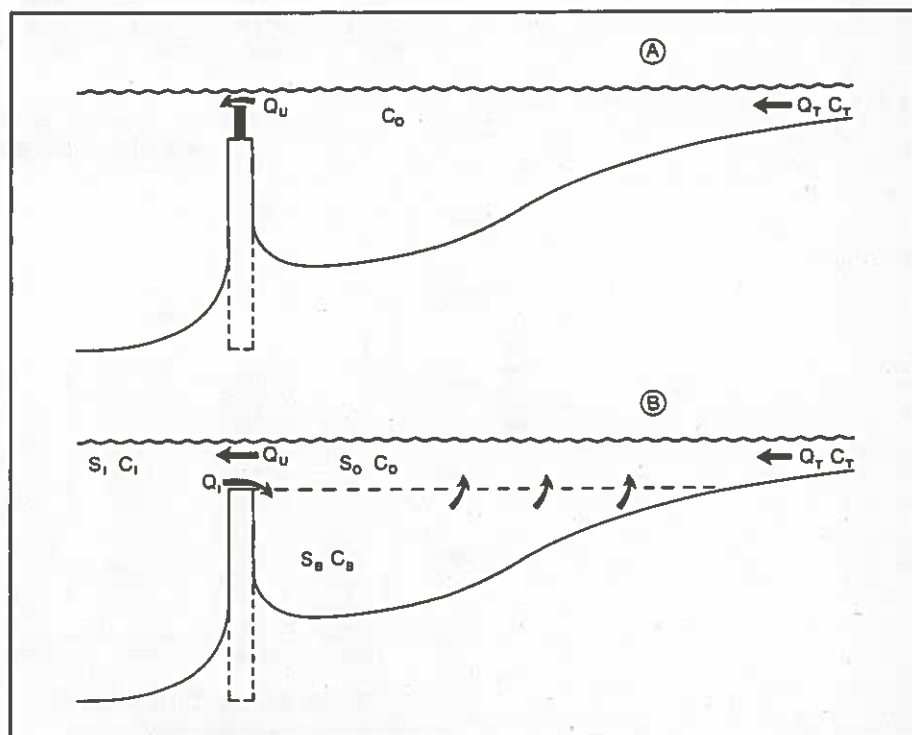
*Saltvandsindstrømning be-
regnes ud fra saltbalancen*

I saltvandsituationen beregnes den udstrømmende stofmængde stadig som $Q_U \cdot C_O$; men Q_U er nu summen af tilført ferskvand og indstrømmende havvand $Q_U = Q_T + Q_I$. Q_I beregnes ud fra netto-transporten af salt ud af fjorden ($Q_T \cdot S_O$), idet denne saltmængde skal erstattes af overskuddet af salt i det indstrømmende havvand: $Q_T \cdot S_O = Q_I \cdot (S_I - S_O)$. Ligningen løses til udtrykket $Q_I = Q_T \cdot S_O / (S_I - S_O)$. Den mængde næringsstof, som tilføres Hjarbæk Fjord med havvandet fra Lovns Bredning beregnes som $Q_I \cdot C_I$, hvor C_I er stofkoncentrationen i tærskedybden (2 m) uden for slusen. Ovenstående beregningsmetode blev også anvendt af Dansk Hydraulisk Institut i Hjarbæk Fjord-undersøgelsen 1986-87 (Viborg Amt 1986, side 9-7) til beregning af forventet saltkoncentration i Hjarbæk Fjord ved en sluseåbning. Den største usikkerhed på beregning af vand- og stoftransport i saltvandsituationen er nok, at der ikke tages hensyn til tidevandsstrømme. Nettoresultatet af tidevandsstrømmene vil dog være, at der tilføres endnu mere stof fra Lovns Bredning.

Beregning for 1991

Ovenstående beregningsmetode tager ikke hensyn til magasinændringer af vand og salt. For 1991, hvor slusen blev åbnet i slutningen af april, blev det derfor antaget, at i tillæg til den saltvandsindstrømning, som kunne beregnes ud fra ovenstående, blev der i de første 3 måneder tilført en mængde saltvand, som var så stor, at den gennemsnitlige saltholdighed i Hjarbæk Fjord kom op på 10 promille.

Figur 14. Skematisk fremstilling af vand-, salt- og stoftransporter i Hjarbæk Fjord i ferskvandssituationen (A) og saltvandsituationen (B).

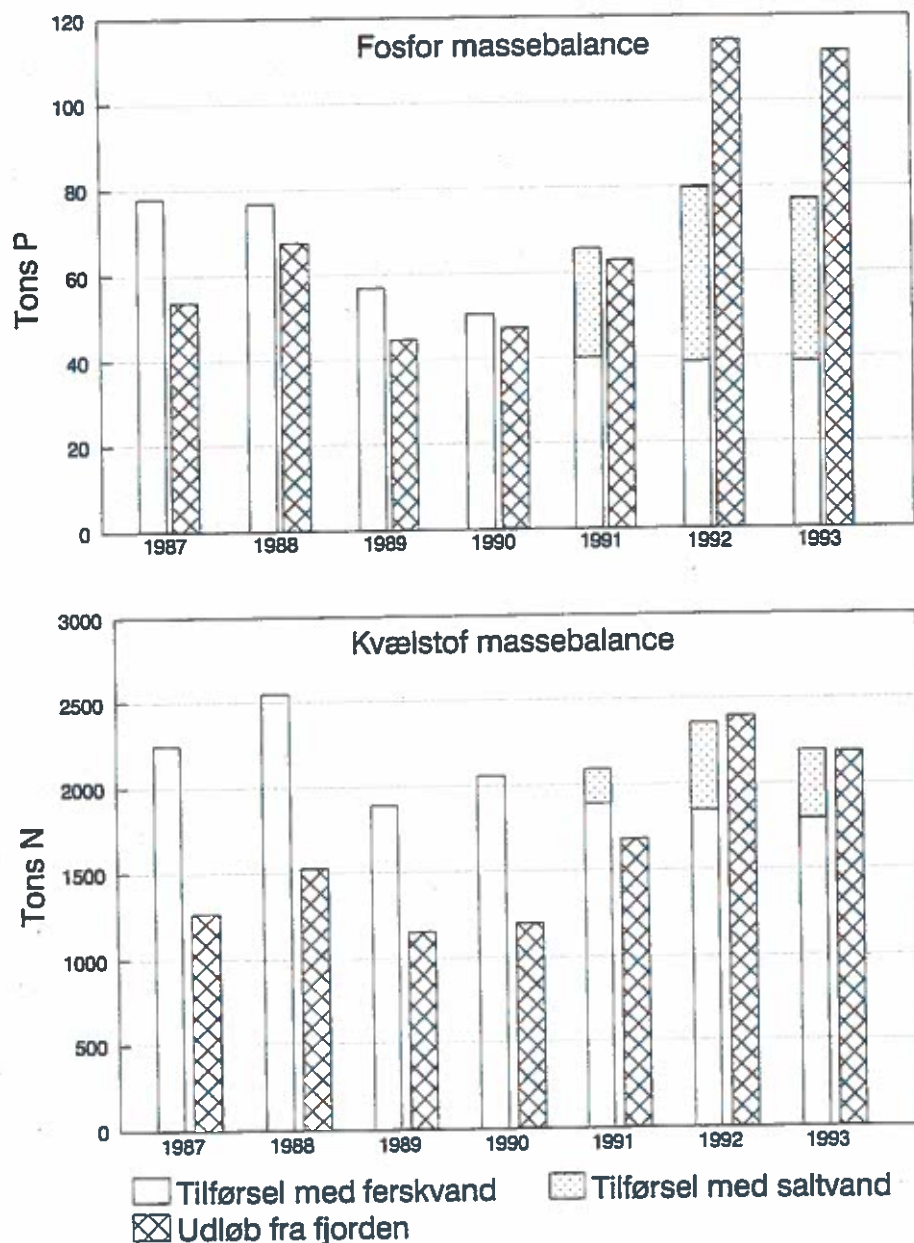


- Q_T ; Tilført vandmængde fra ferskvandstilløbene (incl. umålt opland)
- Q_U ; Afstrømning gennem slusen
- Q_I ; Indstrømning af saltvand fra Lovns Bredning
- C_T ; Stofkoncentrationen (N og P) i ferskvandstilførslen
- C_O ; Stofkoncentrationen i overfladevandet på station 1
- C_B ; Stofkoncentrationen i bundvandet
- C_I ; Stofkoncentrationen i det indstrømmende saltvand
- S_O ; Saltkoncentrationen (klorid) i overfladevandet
- S_B ; Saltkoncentrationen i bundvandet
- S_I ; Saltkoncentrationen i det indstrømmende havvand

Lige så meget saltvand som ferskvand

2.3.2 Resultater

En tabel med de årlige vandbalancer for 1987 til 1993 findes i appendix 2. Vandets årsgennemsnitlige opholdstid i Hjarbæk Fjord var 41-51 dage i ferskvandsituationen 1987-1990 og faldt til 25 dage i 1992 og 27 dage i 1993. Den indstrømmende mængde havvand blev beregnet til $3.9 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ i 1992 og $3.6 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ i 1993, hvilket mere end fordobler vandtilførslen til Hjarbæk Fjord. Indstrømningen af saltvand er lidt større i sommermånederne end i vintermånederne (appendix 2).



Figur 15. Årlige stoftransporter af P og N 1987-93, beregnet ud fra Viborg Amts data.

Før sluseåbningen blev 5-20 tons P tilbageholdt årligt. Efter sluseåbningen afgives ekstra 35 tons årligt

Fosfortilførslen med ferskvand faldt i perioden fra omkring 80 tons i 1987 til 40 tons i 1991-93 (Figur 15). Den årlige P tilbageholdelse varierede i perioden 1987-90 mellem 3.5 og 24 tons P (den gennemsnitlige akkumulering for hele ferskvandsperioden blev beregnet til 5.2 tons år⁻¹; tabel 2). Efter åbning af slusen blev fosfortilførslen til fjorden fordoblet p.g.a. fosforindholdet i det indstrømmende hav-

vand. Fosfortransporten ud af fjorden var dog både i 1992 og 1993 35 tons større end de samlede tilførsler. Denne nettofrigivelse af fosfor kan kun komme fra sedimentet. Den målte P-frigivelse for sommerhalvåret var 43.1 tons (tabel 2), hvilket er i rimelig overensstemmelse med massebalancerne, idet den målte efflux fra sedimentet både indholder bidrag fra frisk sedimenteret organisk stof, som mineraliseres i sedimentet og bidrag fra den sulfidbetingede frigivelse fra den jernbundne P-pulje. Massebalancen for fosfor viser klart, at der foregår en udtømmning af sedimentets fosforpuljer, som skyldes overgangen fra fersk- til saltvand.

Årligt blev 900 tons N tilbageholdt i ferskvandstilstanden. Denne N-fjernelse er ophørt

Kvælstoftilførslen fra ferskvandssiden på 1800-2500 tons N år⁻¹ er ikke faldet væsentligt i perioden 1987-93 (Figur 15). I årene 1987-90 tilbageholdt Hjarbæk Fjord ca. 900 tons N år⁻¹, hvilket er mere end 40% af N-tilførslen. Kun ca. 5% af denne mængde (42 tons år⁻¹) blev akkumuleret i fjordbunden. Det resterende tab må formodes at skyldes denitrifikation (se fodnote 1). Efter sluseåbningen tilføres fjorden yderligere 300-500 tons N år⁻¹ fra Lovns Bredning, og tilbageholdelse af N er ophørt. Der synes ikke at ske nogen kvælstoffjernelse i saltvandssituationen, hvilket til dels bekræftes af den målte nitratflux (22 tons år⁻¹), som er forsvindende lille i forhold til årstransporten. Den væsentligste årsag til ændringen i N-tilbageholdelsen er formodentligt, at den koblede nitrifikation/denitrifikation (fodnote 1) er ophørt p.g.a. de dårlige iltforhold i bundvandet i sommerperioden, hvor netop denne proces har stor betydning.

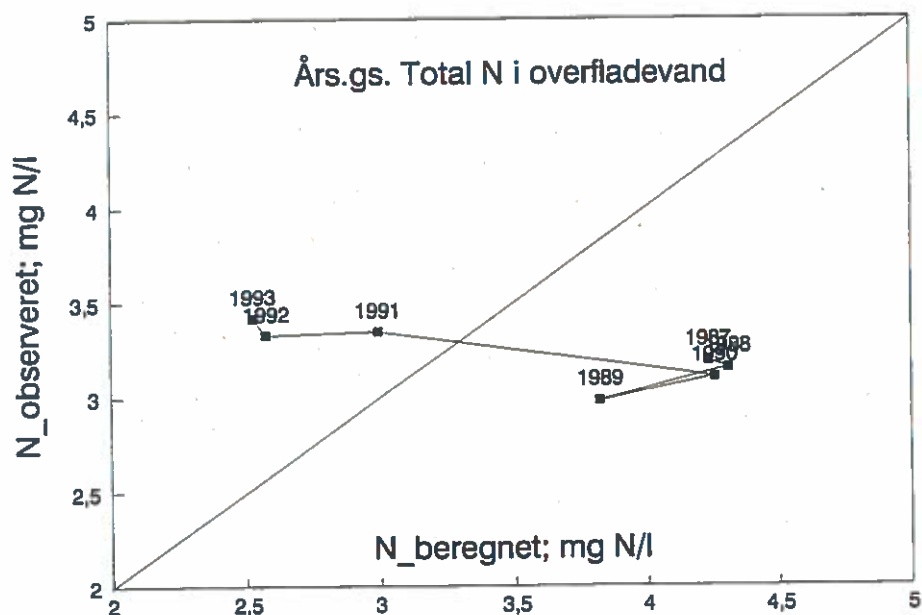
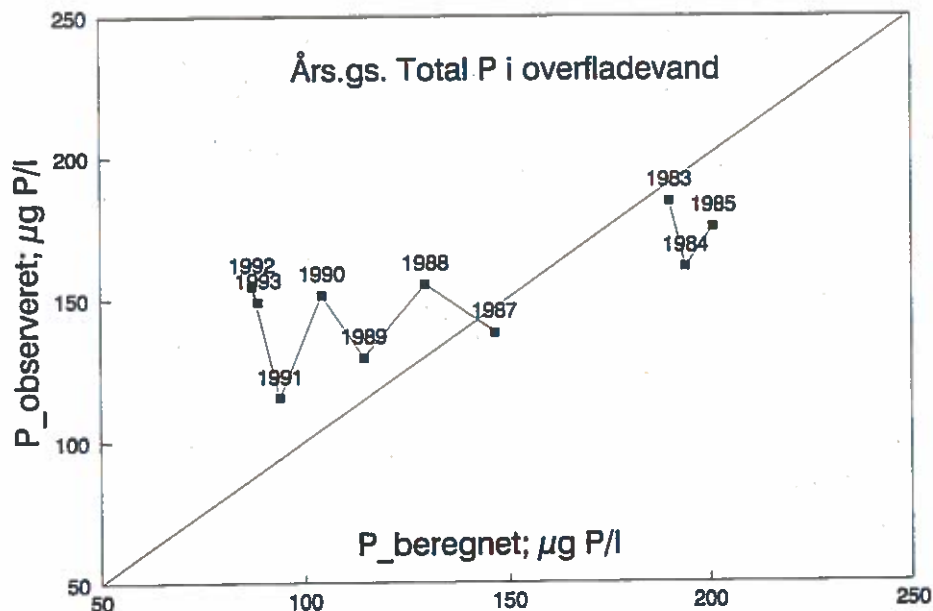
P-koncentrationen i vandet er forhøjet p.g.a. intern P-belastning

Den tidlige udvikling i forventet kontra observeret årgennemsnitlig TP koncentration (Figur 16) udviser i perioden 1983 til 1991 et forløb, som har været iagttaget i andre søer, hvor, den eksterne P-tilførsel er blevet reduceret (f.eks. Sas, 1989). I årene med høj ekstern belastning på omkring 100 tons P år⁻¹ (1983-85) er den observerede TP koncentration i vandet lavere end forventet p.g.a. en stor tilbageholdelse i sedimentet. Fra 1985 falder den eksterne P tilførsel år for år, hvilket resulterer i en mindre "beregnet" TP koncentration, mens den "observerede" TP koncentration ikke helt kan følge med p.g.a. det en frigivelse af fosfor fra den pulje, som blev akkumuleret i sedimentet i årene med høj belastning.

Som et resultat af den accelererede P-frigivelse fra sedimentet og af P-tilførslen fra Lovns Bredning, er TP-koncentrationen i vandet uforandret høj efter sluseåbningen (150 µg P l⁻¹ i 1992-93 mod forventet 80-90 µg P l⁻¹) (Figur 16). Dette til trods for at vandudskiftningen er fordoblet.

Samme tendens for N

Beregningen af vandføringsvægtede gennemsnitskoncentrationer, som er brugt i Figur 16, er udviklet empirisk ud fra data for P-tilførsler og P-tilbageholdelser i søer (Vollenweider, 1975). Beregningsmåden kan ikke forventes at virke også for total kvælstof. Derfor kan de høje observerede TN koncentrationer i 1991-93 ikke uden videre tolkes som frigivelse af N fra en akkumuleret pulje i sedimentet. En del af de 220 tons ammonium-N, som blev frigivet i sommerhalvåret (afsnit 2.2) kan dog stamme fra den pulje på 1100 tons organisk N, som er akkumuleret i ferskvandsperioden, men effekten af sluseåbningen på N-balancen må primært tilskrives en formindsket denitrifikation.



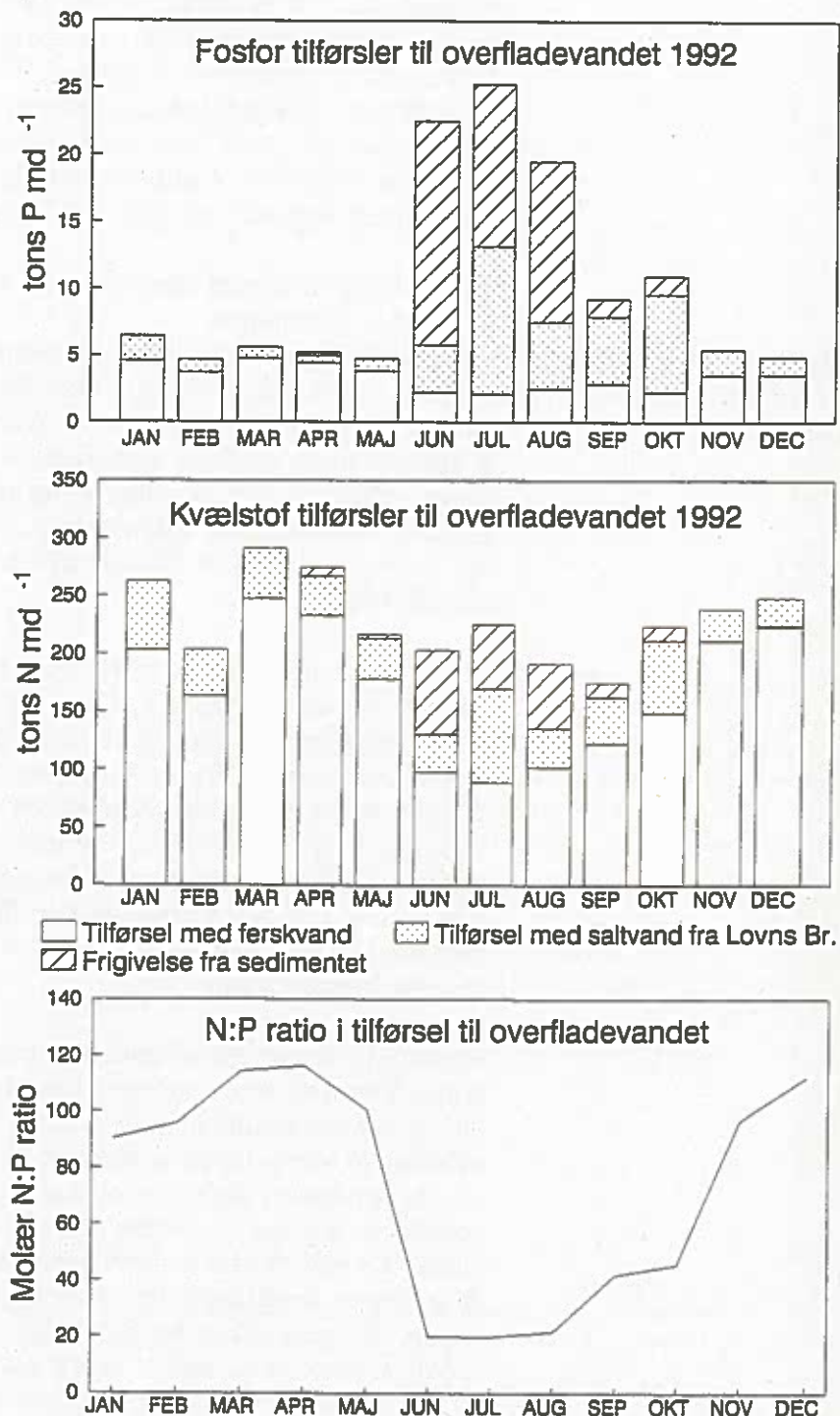
Figur 16. Sammenligning af beregnede- og observerede årgennemsnitlige koncentrationer af TP og TN i vandfasen i Hjarbæk Fjord for årene 1983-1993 (P) og 1987-1993 (N). Med beregnede gennemsnitkoncentrationer menes vandføringsvægtede, forventede stofkoncentrationer (Vollenweider, 1976). Eks. $P_{\text{beregnet}} = P_{\text{indløb}} / (1 + \sqrt{T_w})$; hvor $P_{\text{indløb}}$ er den årgennemsnitlige P koncentration i tilløbet og T_w er vandets opholdstid (i enheden "år"). Modellen er empirisk og har stor gyldighed for fosfor i søer. For kvælstof er det muligvis ikke den mest velegnede model. Brugt på datamaterialet for Hjarbæk Fjord viser sammenligningen af beregnet og observeret stofkoncentration imidlertid udviklingen i fjorden m.h.t. responsen på nedsat P-tilførsel og responsen på sluseåbningen.

Frigivelsen af N og P fra sedimentet er et væsentligt bidrag i sommermånederne

For 1992, hvor den interne belastning blev målt, er det muligt at opstille en sæsonvariation i næringssalttilførslerne til fjordvandet (Figur 17). For P-tilførsels vedkommende er det iøjnefaldende, at frigivelsen fra sedimentet og tilførslen med indstrømmende saltvand især er stor i sommermånederne, hvor den kan udnyttes til fytoplankton primær produktion. P-frigivelsen fra sedimentet udgør

mere end 50% af den samlede tilførsel i de tre sommermåneder. Kvælstoftilførslen er især afhængig af ferskvandsafstrømningen, som er mindst i sommermånederne, men den mindskede N-tilførsel kompenseres dog i nogen grad af ammoniumfrigivelsen fra sedimentet under haloklinen. Den molære ratio mellem N og P i tilførslen er omkring 100 i det meste af året, men falder til ca. 20 i sommermånederne. N:P ratioen i tilførslen er ofte bestemmende for hvilket næringssalt, der er begrænsende for primærproduktionen, og det antages generelt, at N-begrænsning indtræder ved værdier lavere end 20 (f.eks. Smith 1986; Howarth, 1988). Kombinationen af en høj P-koncentration i overfladevandet og en lav N:P ratio i tilførslen er den sandsynlige forklaring på, at fytoplanktonsamfundet i sommermånederne 1992 og 1993 var domineret af blågrønne bakterier (Viborg Amt, 1993).

Figur 17. Fosfor- og kvælstoftilførsler til overfladevandet i Hjarbæk Fjord i 1992 fordelt på de enkelte måneder. Værdierne for tilførsel med ferskvand er baseret på Viborg Amts datamateriale. Tilførsel med saltvand er beregnet i henhold til afsnit 2.3.1, og frigivelsen fra sedimentet er baseret på de direkte målinger på 4 stationer (afsnit 2.2) multipliceret med arealerne af de pågældende bundtyper (Tabel 2). N:P ratioen i tilførslen er beregnet ud fra TN og TP værdier. Ratioen vil generelt være mindre, hvis den blev beregnet for uorganiske næringsalte, da en relativt større del af kvælstoffet er organisk bundet.



2.4 Resumé af eksperimentelle studier

Saltvandets direkte effekt på adsorption af NH_4^+ og PO_4^{3-} er af ringe betydning

2.4.1 Salinitetens indflydelse på adsorption af NH_4^+ og PO_4^{3-}
Både ferskvands- og saltvandssediment indeholder en mængde let adsorberet ammonium og fosfat. Det har været foreslået, at den højere ionstyrke i saltvand mindsker adsorptionskapaciteten i sedimentet både for ammonium (Seitzinger et al., 1991) og for fosfat (Caraco et al., 1990). Disse hypoteser blev efterprøvet i laboratoriet med sediment fra station 3 i Hjarbæk Fjord, men det lykkedes ikke at påvise en signifikant effekt på adsorptionskinetikken, hverken for ammonium eller for fosfat.

Derimod var det muligt at påvise en langtidseffekt af højere saltholdighed på puljen af KCl-extraherbar ammonium i sedimentet. Sedimentkerner fra station 3 blev inkuberet i 3 måneder ved hhv. 1.5 ppt og 15 ppt saltholdighed, og efter denne periode var der omkring $1 \mu\text{mol g TV}^{-1}$ ekstra (svarende til 30% mere) ammonium i sedimentet, som var inkuberet ved lav saltholdighed. Denne mængde svarer til $20 \text{ mmol NH}_4^+ \text{ m}^{-2}$ i det sediment, som blev akkumuleret i ferskvandsperioden - en absolut ubetydelig pulje i forhold til den målte ammoniumfrigivelse på 2000-5000 mmol m^{-2} for sommerhalvåret.

2.4.2 Eksperimentel undersøgelse af sulfat effekt på P-frigivelse fra sedimentet

Sulfat har også en effekt når der er ilt ved sedimentoverfladen

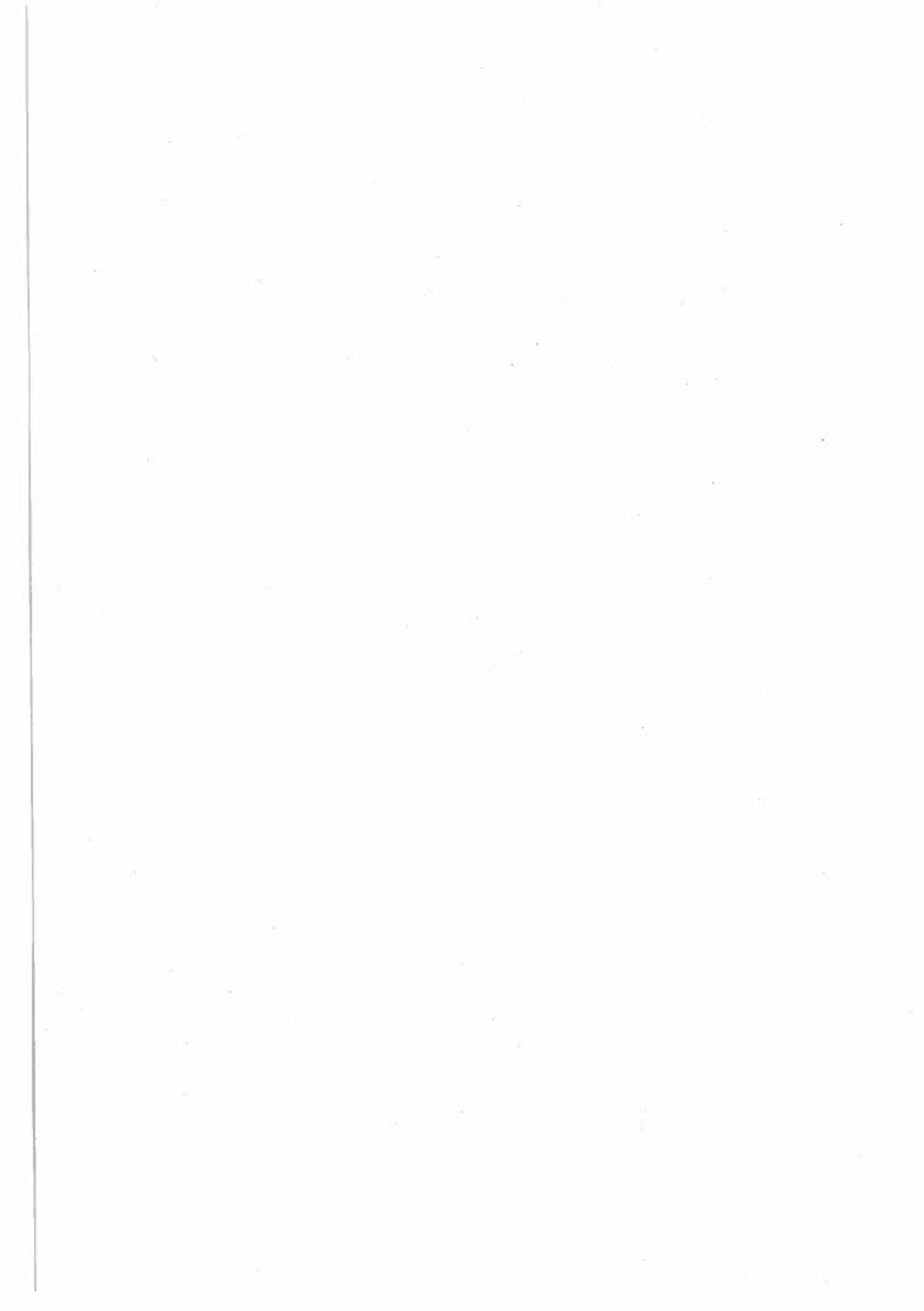
I et andet eksperiment blev sedimentkerner fra station 3 langtidsinkuberet ved 3 forskellige saltholdigheder. Eksperimentets formål var at eftervise, at sulfat også påvirker fosforfrigivelsen fra et sediment med oxideret sedimentoverflade. Hypotesen for virkningsmekanismen er, at udfældning af jernsulfider i dybere liggende sediment formindsker nydannelsen af FeOOH i sedimentoverfladen og dermed mindsker tilbageholdelsen af fosfat i det oxiderede overfladelag.

Sedimentets frigivelse af fosfat og total kuldioxid (TCO_2) blev målt løbende og vertikalprofiler af jern-, sulfid- og fosforforbindelser blev målt i sedimentet før og efter inkubationen. Forsøget viste en signifikant højere P-frigivelse fra sediment, som blev inkuberet ved 10 mM sulfat (15 ppt saltholdighed) end ved sedimentet inkuberet ved hhv. 1 og 0,1 mM sulfat. Samtidig blev der akkumuleret mindre jernbundet P i sedimentoverfladen ved den høje sulfatkoncentration end ved de lave koncentrationer, hvilket er i overensstemmelse med den opstillede hypotese (Jensen et al. "i review"; manuskriptet kan fås ved henvendelse).

En konklusion af dette forsøg er, at sulfat effekten på fosfatfrigivelse fra sedimentet er et generelt fænomen, og at effekten også er til stede, selvom sedimentoverfladen er iltet. Det er dog sandsynligt, at effekten er størst i iltfrit sediment. For Hjarbæk Fjord betyder dette, at selvom det skulle lykkes at skabe velilte forhold for sedimentet under haloklinen, vil sedimentets evne til at tilbageholde fosfor permanent være ringere i saltvandstilstanden end i ferskvandstilstanden. Denne konklusion er i overensstemmelse med andres iagttagelser af P-regenerering fra ferske og salte sedimentter (Caraco et al., 1990). Caraco et al. fandt, at fra marine sedimentter blev fosfor og TCO_2 generelt frigivet i et molært forhold på 1:100, svarende til

Er der en generel forskel på P-tilbageholdelse i ferske og marine sedimenter?

forholdet i det organiske stof, som blev mineraliseret, mens i ferskvandsedimenter var det molære forhold mere varierende, men generelt mindre. Den iagttagelse kan tolkes derhen, at al den biologisk aktive fosfor, som tilføres marine sedimenter med sedimentation, bliver regenereret til vandfasen, mens en større eller mindre fraktion bliver tilbageholdt i søsedimenter. Størrelsen af den tilbageholdte fraktion i søer synes (i samme datamateriale Caraco *et al.*, 1989) især at være afhængig af søvandet sulfatkoncentration og sedimentets jernindhold - i overensstemmelse med den generelle hypotese for sulfat effekt (Figur 1).



3. Diskussion

3.1 Effekten af sluseåbningen på P-omsætningen

Saltvandsindstrømningen fra Lovns Bredning har skabt mulighed for en stor sulfiddannelse i sedimentet; primært p.g.a. saltvandets høje sulfatindhold og sekundært p.g.a. vandmassernes lagdeling med iltsvind i bundvandet til følge.

De tre uafhængige estimater for P-frigørelsen stemmer overens. Ingen tvivl om saltvandseffekten!

Sulfiddannelsen fører til frigivelse af den jernbundne fosfor, som er akkumuleret i sedimentet igennem ferskvandsperioden. Ud fra sammenligning af sulfidproduktion i, og sulfid efflux fra sedimentet kan det estimeres, at ca. 900 mmol FeOOH m⁻² blev reduceret og fældet som FeS₂ i akkumuleringsområderne i sommeren 1992. Ud fra en Fe:P ratio i BD-ekstraktet på (gennemsnitlig) 4.5-6 vil omdannelsen af FeOOH føre til frigivelsen af 150-200 mmol fosfat m⁻² i sommerperioden. Denne værdi er i rimelig god overensstemmelse med de målte fosfat effluxe.

Sammenlagt udgjorde de målte fosfateffluxe i sommerperioden 1992 43 tons P for det undersøgte areal. Massebalanceberegninger viste, at Hjarbæk Fjord i 1992 og 1993 afgav netto ca. 35 tons P årligt. Dette tal er i meget god overensstemmelse med den målte fosfat-frigivelse fra sedimentet, idet noget af den frigjorte fosfat vil nå at blive tilbageholdt i fjorden via optagelse i fytoplankton og efterfølgende sedimentation.

Den jernbundne P-pulje udtømmes hurtigt

Det er et åbent spørgsmål, hvor meget af den akkumulerede pulje af jernbundet P, der vil blive mobiliseret i de følgende år, og hvor hurtigt det vil gå. I det undersøgte areal ligger der mellem 70 og 125 tons jernbundet P, afhængig af hvilken dybde i sedimentet, som man regner til. Med en nettoafgivelse af P fra Hjarbæk Fjord på 35 tons årligt vil denne pulje teoretisk set kunne udtømmes på 2-4 år. I praksis vil processen nok tage længere tid, da udtømningen vil foregå langsommere, jo dybere puljen ligger begravet.

3.2 Effekten af sluseåbningen på N-omsætningen

Massebalanceberegninger viste, at der efter sluseåbningen ikke var noget tilbageholdelse af kvælstof i Hjarbæk Fjord, mens der i ferskvandsperioden var en tilbageholdelse på 900-1000 tons N årligt, svarende til 43% af det kvælstof, som blev tilført med ferskvandet.

Denitrifikationen er næsten ophørt ved sluseåbningen

En væsentlig årsag til den manglende tilbageholdelse efter sluseåbningen synes at være, at den koblede nitrifikation/denitrifikation, der er en vigtig proces i kvælstoffjernelsen, er formindsket kraftigt p.g.a. de dårlige iltforhold, som er fremherskende især i bundvandet. De store ammonium effluxe, som blev observeret på alle 4 stationer i perioder med iltfrit bundvand, bekræfter denne teori. Hvis al den ammonium, som blev frigivet i løbet af sommeren, i stedet var blevet fjernet ved nitrifikation/denitrifikation, ville det imidlertid kun forklare 220 tons ud ad en øget N-afgivelse på ca. 900 tons. Det er derfor muligt, at en betydelig del af N-omsætningen

(i modsætning til P omsætningen) i fjorden foregår på den sandede bund på lavere vand, og ikke blev målt i denne undersøgelse.

Også den øgede vandudskiftning har mindsket N-tilbageholdelsen

Den øgede vandudskiftning efter sluseåbningen kan imidlertid være en anden væsentlig årsag til den mindskede N-tilbageholdelse. Da denitrifikation af vandfasens nitrat formodentligt er direkte koncentrationsafhængig og da såvel koncentration, som opholdstiden af nitrat (teoretisk set) er blevet halveret p.g.a. tilstrømningen af nitratfattigt vand fra Lovns Bredning, kan alene den ændrede hydraulik have haft betydelig indflydelse på kvælstoffjernelsen.

Den mængde kvælstof, som fjernes ved akkumulering i sedimentet, synes at være ubetydelig i forhold til den årlige N-tilførsel (ca. 2%). Akkumuleringen er formodentligt uændret efter sluseåbningen.

3.3 Fremtidsperspektiver

Der skal sættes ind over for iltsvindet i bundvandet

3.3.1 Muligheden for bedre iltforhold ved bunden

Den ændrede næringssalttilbageholdelse i Hjarbæk Fjord skyldes i nogen grad, både for N's og P's vedkommende, det iltfri bundvand under haloklinen. En bedring af situationen kunne derfor opnås, hvis der kunne skabes bedre iltforhold ved bunden.

Ud fra de hypsografer (dybde-areal diagram og dybde-volumen diagram), som er givet i Viborg Amts's rapport nr. 56 (1986) kan det beregnes, at arealet under haloklinen er 10 km^2 , og volumenet er $12 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Vandsøjleens gennemsnitlige højde under springlaget er dermed 1.2 m. Da det indstrømmende saltvand er tungere end vandet i fjorden, må det altid strømme ned i bunden og udskifte bundvandet. Hvis man studerer samtidige målinger af saltholdigheden i Lovns Bredning og i bundvandet på station 1 i Hjarbæk Fjord (S_1 og S_B på Fig. 14), kan man se, at de som regel er ens, hvilket bekræfter, at det indstrømmende vand søger ned til bunden. Det er derfor realistisk, at beregne en vandudskiftning under haloklinen alene ud fra saltvandstilførslen.

Bundvandet udskiftes hver 6. dag, men ilten opbruges på 3 dage

For de kritiske sommermåneder (juni, juli, august og september), hvor iltsvindet observeres, var vandets gennemsnitlige opholdstid under haloklinen 5.5 - 6 dage i 1992-93. Bundens iltforbrug var mindst $100 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ i sommerperioden, og antages det, at det indstrømmende vand var fuldt mættet med ilt ($8.3 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$, svarende til $260 \text{ } \mu\text{M}$), vil hele iltmængden i 1.2 m's vandsøjle være forbrugt på 3.1 dag.

Ovenstående beregning viser, at lange periode med iltsvind vil forekomme hver sommer fremover, idet der forsat må forventes en høj produktion af planteplankton ud fra den fortsat store tilførsel af næringsalte til fjorden. Dermed synes det udelukket, at der kan etableres et blivende samfund af bioturberende/ventilerende makrofauna på det areal, som dækkes af springlaget. Etableringen af en sådan biomasse kunne måske have genskabt noget af kvælstoffjernelsen og have mindsket fosforfrigivelsen.

Vandudskiftningen ville være tilstrækkelig ved 3 m's slusedybde

3.3.2 Uddybning af slusen

Man kan gennemføre samme regnestykke under antagelse af, at haloklinen lå i 3 m's dybde i stedet for 2 m (dybden i afvandings-slusen var 3 m i stedet for 2). Arealet, som blev berørt af bundvandet, ville blive mindsket til 6.4 km², og den gennemsnitlige vandsøjlehøjde under haloklinen ville blive 1.3 m. Ilten i denne vandsøjle ville blive forbrugt på 3.4 dage, og vandets gennemsnitlige opholdstid ville være 3 dage for de fire kritiske måneder. Dette regnestykke baserer sig på, at samme mængde saltvand som nu løber ind i fjorden, men modelberegninger fra DHI (Viborg Amt, 1986) viser, at den indstrømmende saltvandsmængde vil stige med tværsnittet af indstrømningsåbningen. Der kunne derfor forventes en betydelig bedring af iltforholdene ved bunden, hvis tærskeldybden i hele slusen var 3 m, men perioder med iltsvind ville dog stadig kunne forekomme - ligesom de gør det andre steder i Limfjorden.

Undervandsvegetation kunne muligvis hjælpe lidt

3.3.3 Udbredelse af undervandsvegetation

Etablering af et udbredt dække af undervandsplanter i de lavvandede dele af fjorden, som det fandtes i slutningen af ferskvandsperioden, ville flytte noget af produktionen og sedimentationen til disse områder og dermed mindske iltforbruget på den dybe bund. Der er imidlertid sket et skift i fytoplanktonsamfundet til en dominans af blågrønne bakterier om sommeren, hvilket betyder, at lysgennemtrængningen til bunden er blevet endnu mindre end den var i ferskvandsperioden. Der er således ikke grund til at forvente en øget udbredelse af undervandsplanter, og der er næppe nogen idé i at forsøge at genskabe den ved direkte udplantning. Skiftet til blågrønne bakterier skyldes muligvis den lave N:P ratio i nærings-salttilførslen om sommeren, som er en effekt af den høje P-frigivelse fra sedimentet. Der kan således ventes lidt højere N:P ratio i fremtidige sommereperioder i takt med udtømningen af den jernbundne P-pulje, men det er dog højst usikkert, om sigtdybden vil blive tilstrækkelig høj til at tillade reetablering af undervandsvegetationen.

Nedsat P tilførsel

3.3.4 Nedsættelse af eksternt nærings-salttilførsel

I månederne marts-maj vil det være muligt at opnå forbedret sigtdybde i Hjarbæk Fjord ved en nedsættelse af den eksterne P tilførsel fra ferskvandssiden. I forårmånederne er primærproduktionen af plantep plankton øjensynligt P-begrænset (Figur 17), og såvel frigivelsen af P fra bunden som tilførslen af P fra Lovns Bredning er i disse måneder meget begrænset. Derfor kan en nedsat P-tilførsel forventes at have en effekt i disse måneder. I resten af vækstsæsonen (juni-oktober) kan der derimod ikke forventes nogen effekt af reduceret P-tilførsel. Dette skyldes først og fremmest, at P-tilførslen fra ferskvandssiden kun udgør en lille brøkdel af den samlede P-tilførsel til overfladevandet i sommerperioden, og samtidig er primærproduktionen i højere grad N-begrænset i sommerperioden. En eventuel nedsættelse af primærproduktion/fytoplanktonbiomasse i forårmånederne vil fremme udbredelsen af makrofyter og vil ligeledes forsinke iltsvindet i sommermånederne. En forsinkelse af iltsvindet er begrundet i, at sedimentationen af kiselalger fra forårsopblomstringen udgør en væsentlig del af kulstoftilførslen til sedimentet i kystnære områder, men at nedbrydningen (og dermed iltforbruget) i sedimentet ofte først tager fart, når vandtemperaturen stiger om

Nedsat N-tilførsel

sommeren. Nedsat forårsproduktion vil således medføre nedsat iltsvind.

N-tilførslen fra ferskvandssiden udgør hele året en væsentlig andel af den samlede N-tilførsel til overfladevandet. I de kritiske sommermåneder dog kun 40-50%. Der skal derfor ske en markant reduktion af N-tilførslen i sommermånederne for, at det vil have en effekt på primærproduktionen. N-tilførslen i vinter- og forårsmånederne har formodentlig ringe betydning for produktionen og dermed sigt dybden i Hjarbæk Fjord.

Appendix 1: Metode til bestemmelse af sedimentets fosfor- og jernpuljer

Fosfordynamik

Baggrund og formål

Fosfor optræder stort set altid i en eller anden form af orto-fosfat (PO_4^{3-}) i biologiske og geokemiske sammenhænge, og P undergår ikke ændringer i oxidationstrin ved biologisk omsætning, sådan som det ofte er tilfældet for C, N, S, O, Fe m.m. Dette forhold vanskeliggør direkte målinger af "fosfor-omsætning" i sedimentet, idet man f.eks. kun vanskeligt kan anvende isotoper hertil pga. isotopudveksling. Selvom P altid optræder som fosfat, kan man alligevel tale om funktionelt forskellige fosforpuljer i sedimentet, idet der er stor forskel på mobiliteten af P fra forskellige bindingsformer, f.eks. letomsættelige eller tungtnedbrydelige, biologiske forbindelser, overfladeabsorberet fosfat eller fosfat, som er kemisk indbygget i mineraler, overfladeadsorption til reducerbart jern eller til lerminerale.

En metodik, som har været meget anvendt for at belyse fosfats bindingsformer i jord og sedimentet, er sekventiel ekstraktion med forskellige kemiske opløsninger (f.eks. Boström et al. 1982). Anvendeligheden af metoderne, dvs. hvor specifik er en given ekstraktion i forskellige sedimenter, og hvor godt repræsenterer ekstraktionen en funktionelt defineret pulje, har været ivrigt diskuteret i de sidste 10-15 år (f. eks. Boström et al. 1982, Lucotte & d'Anglejan 1985, Pettersson et al. 1988; Ruttenberg, 1992).

Jernbundet-P

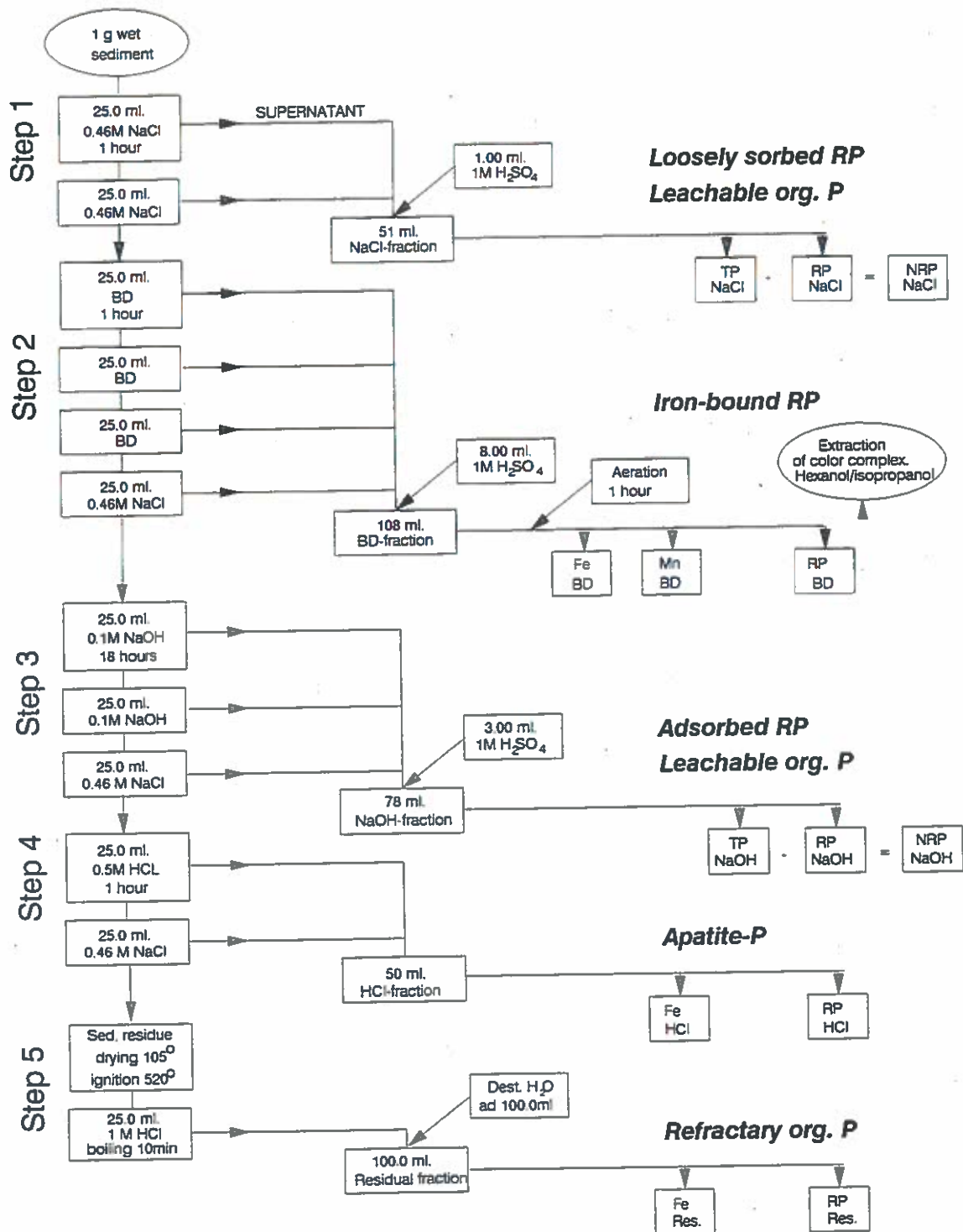
I kystnære, marine sedimenter, hvor der temporært både sker en stor sedimentation af fosfor og en stor frigivelse af fosfat fra sedimentet, er det vigtigt at kunne identificere og kvantificere mobile og immobile fosforpuljer. Det er specielt ønskeligt at kunne kvantificere den fosfat, som er bundet til reducerbare former af jern og mangan, idet denne pulje er potentiel mobiliserbar ved iltvind.

Immobil-P

Det er også vigtigt at kunne bestemme immobile former, som deponeres varigt i sedimentet. Et eksempel er apatit-mineralerne (f.eks. hydroxyapatit $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$), der enten tilføres sedimentet fra kyst- og brinkerrosion eller dannes autogent i sedimentet. Sammen med refraktære, organiske forbindelser udgør apatit hovedparten af den fosfor, som deponeres varigt i havbunden. En tredje stor fraktion, som deponeres varigt, er fosfat, som er adsorberet til lerminerale.

Andre undersøgelser

P-pulje fraktionering har kun været anvendt i nogle få marine undersøgelser (f.eks. Balzer 1986, Yamada & Kayama 1987), men har været meget brugt i ferskvandssedimenter. Nogle af erfaringerne herfra blev opsummeret på 1. Internationale Workshop om Fosfor i Sedimenter i 1986 (Psenner et al. 1988) og udkrystalliseret i en metodeforskrift, som især var baseret på studier foretaget af Psenner et al. (Psenner et al. 1985, Psenner & Pucsko 1988). Denne metode blev modificeret til anvendelse i marine sedimenter af Jensen & Thamdrup (1993) (Figur A1) og blev brugt til studier af sæsonvariationen i sedimentets fosforpuljer (Mortensen *et al.*, 1992).



Figur A1. Skematisk fremstilling af ekstraktionsproceduren for bestemmelse af sedimentets P- og Fe-forbindelser.

1. trin

Metodens teori

Princippet i en sekventiel ekstraktion er, at man starter med så "milde" opløsninger som muligt for ikke at påvirke senere ekstraktionstrin. I dette ekstraktionsskema startes med en NaCl opløsning af samme Na⁺-koncentration, som 30% havvand. I princippet svarer dette til en kraftig fortynding af sedimentporevandet med fosfatfrit havvand. På denne måde ekstraheres porevands fosfat (DRP) og let adsorberet fosfat. Der ekstraheres også en del ikke-reaktivt opløst

fosfor ved denne ekstraktion (NRP). Denne pulje kommer formodentlig fra alger, som lyserer enten pga. det ændrede osmotiske tryk eller pga. den mekaniske belastning under centrifugering. Den første ekstraktionsfrekvens gennemføres under iltfri forhold for at undgå oxidation af reducerede jern- og mangan forbindelser, der er i stand til at adsorbere fosfat fra andre puljer i sedimentet.

2. trin

I dette trin ekstraheres den fosfat, som er adsorberet til overfladen af jern- og mangan oxider/hydroxider (BD-DRP). Dette gøres ved at tilsætte en kraftig reduktant (dithionit) i en opløsning, som er bufferet til pH ca. 7 vha. bicarbonat. Bicarbonaten modvirker, at der ekstraheres calciumbundet fosfor i dette trin. Det er sandsynligt, at let opløselige, fosforholdige mineraler som f.eks. vivianit $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_3$ også ekstraheres i dette trin.

Dithionit-behandlingen reducerer som sagt alle oxiderede (Fe^{3+}) jernforbindelser, som derfor kan måles i denne opløsning f.eks. ved atomabsorbtionsspektrofotometri (AAS). Yderligere ekstraheres letopløselige (Fe^{2+}) ferromineraler som vivianit og siderit (FeCO_3), men ferrosulfider bliver øjensynligt ikke ekstraheret (Jensen & Thamdrup, 1993).

3. trin

Tredje trin er en ekstraktion af overfladeadsorberet ortho-fosfat ved ionbytning med OH⁻ioner (NaOH-RP). Det drejer sig om overfladen af mineraler, som ikke påvirkes af redoxændringer f.eks. aluminium-oxider, lermineraler. Yderligere bevirker den langvarige behandling (18 timer) med NaOH, at der ekstraheres en organisk fosforpulje, som formodentlig kommer fra bakterielt bundet fosfor og måske også fra mere "solide" algearter (NaOH-NRP).

4. trin

I fjerde trin ekstraheres RP, som er bundet til calcium og magnesium (apatit) (HCl-RP) ved at opløse disse mineraler i saltsyre. Der ekstraheres ikke noget NRP i dette trin. Både NaOH og HCl ville ekstrahere det meste af den jernbundne fosfor, hvis ikke denne forud var ekstraheret med dithionit.

Andre ekstraktionsskemaer har vist, at jern-mono-sulfider såvel som oxiderede jernforbindelser ekstraheres ved "kold" HCl-behandling (f.eks. Cornwell & Morse, 1987). Da trin 2 fjernede alle de oxiderede jernforbindelser fra sedimentet antages trin 4 derfor at være specifik for jern-mono-sulfider (f.eks. FeS).

5. trin

Til sidst ekstraheres resten af den fosfor, som findes i sedimentet (Res.-P). Det gøres ved at gløde sedimentresten, så alt kommer over på en uorganisk form og efterfølgende opløse fosforforbindelserne ved kogning med HCl. Denne pulje omfatter bl.a. refraktære organiske forbindelser.

Den totale destruktion af sedimentresten i trin 5 er i stand til at oxidere pyrit (FeS_2). Den jern, som ekstraheres i dette trin, antages derfor at stamme fra pyrit. Der kan dog komme et bidrag også fra lermineraler (Jensen & Thamdrup, 1993).



Appendix 2: Beregnede vandbalancer

Tabel A2. Beregnede vandtransporter og årgennemsnitlige opholdstider for vandet i Hjarbæk Fjord 1987-1993.

1987	TILSTRØMNING		
	Fersk	Salt	I alt
Måned	m3*md-1	m3*md-1	m3*md-1
JAN	28172218		28172218
FEB	29327787		29327787
MAR	37060914		37060914
APR	33676032		33676032
MAJ	32000565		32000565
JUN	28428255		28428255
JUL	28194275		28194275
AUG	27223797		27223797
SEP	31956249		31956249
OKT	38781307		38781307
NOV	39018336		39018336
DEC	37700547		37700547
SUM	3,9E+08		3,9E+08

Tw(år) = 0,127701
Tw(dage) = 46,61079

1988	TILSTRØMNING		
	Fersk	Salt	I alt
Måned	m3*md-1	m3*md-1	m3*md-1
JAN	51681101		51681101
FEB	52634056		52634056
MAR	47885209		47885209
APR	40399651		40399651
MAJ	29869925		29869925
JUN	25505844		25505844
JUL	31004250		31004250
AUG	32577810		32577810
SEP	29020726		29020726
OKT	36450899		36450899
NOV	29584839		29584839
DEC	36066489		36066489
SUM	4,4E+08		4,4E+08

Tw(år) = 0,112948
Tw(dage) = 41,22609

1989	TILSTRØMNING		
	Fersk	Salt	I alt
Måned	m3*md-1	m3*md-1	m3*md-1
JAN	34785648		34785648
FEB	35196190		35196190
MAR	43195721		43195721
APR	34157815		34157815
MAJ	27961108		27961108
JUN	25177743		25177743
JUL	22289484		22289484
AUG	23937406		23937406
SEP	23897054		23897054
OKT	29451485		29451485
NOV	28126378		28126378
DEC	32564576		32564576
SUM	3,6E+08		3,6E+08

Tw(år) = 0,138604
Tw(dage) = 50,59037

1990 TILSTRØMNING			
Måned	Fersk m ³ *md ⁻¹	Salt m ³ *md ⁻¹	I alt m ³ *md ⁻¹
JAN	36913452		36913452
FEB	43265387		43265387
MAR	37552140		37552140
APR	27103046		27103046
MAJ	23224987		23224987
JUN	21183517		21183517
JUL	20507648		20507648
AUG	20376256		20376256
SEP	25006985		25006985
OKT	33934274		33934274
NOV	30305989		30305989
DEC	31814977		31814977
SUM	3,5E+08		3,5E+08

Tw(år) = 0,142374
Tw(dage) = 51,96637

1991 TILSTRØMNING			
Måned	Fersk m ³ *md ⁻¹	Salt m ³ *md ⁻¹	I alt m ³ *md ⁻¹
JAN	42129771	491787,2	42621558
FEB	30870306	275520,8	31145826
MAR	34600059	203018	34803077
APR	28004408	409155,3	28413563
MAJ	31319970	28662673	59982643
JUN	24247719	36185099	60432818
JUL	23345036	21048803	44393839
AUG	21233931	32293271	53527202
SEP	20759365	23527280	44286645
OKT	25534913	17862590	43397503
NOV	30568836	16817806	47386641
DEC	28414838	15162667	43577505
SUM	3,4E+08	1,9E+08	5,3E+08

Tw(år) = 0,093638
Tw(dage) = 34,17803

1992 TILSTRØMNING			
Måned	Fersk m ³ *md ⁻¹	Salt m ³ *md ⁻¹	I alt m ³ *md ⁻¹
JAN	30368397	34867419	65235817
FEB	26709488	24928856	51638344
MAR	38151126	28902368	67053495
APR	37646169	23005992	60652161
MAJ	30173042	31947926	62120968
JUN	19196619	32486586	51683205
JUL	18602928	73667594	92270522
AUG	21602587	29590098	51192685
SEP	23012768	26694811	49707579
OKT	23616014	40641512	64257525
NOV	33020441	24130322	57150763
DEC	32696914	20435571	53132486
SUM	3,3E+08	3,9E+08	7,3E+08

Tw(år) = 0,068861
Tw(dage) = 25,13443

1993		TILSTRØMNING		
Måned	Fersk	Salt	I alt	
	m3*md-1	m3*md-1	m3*md-1	
JAN	39892315	16136217	56028532	
FEB	29456140	16000866	45457006	
MAR	27911639	8431641	36343280	
APR	24805123	20592933	45398056	
MAJ	20509854	33300946	53810800	
JUN	17051769	62960378	80012147	
JUL	21330034	51282613	72612646	
AUG	23614123	59691255	83305379	
SEP	25682701	21731516	47414217	
OKT	32138574	28517327	60655901	
NOV	24741394	14482767	39224161	
DEC	39771951	23281142	63053092	
SUM	3,3E+08	3,6E+08	6,8E+08	

Tw(år) = 0,073173
Tw(dage) = 26,70803



4. Referencer

Balzer, W. (1986): Forms of phosphorus and its accumulation in coastal sediments of Kieler Bucht. *Ophelia* 26: 19-35.

Boström, B., Jansson, M., & Forsberg, C. (1982): Phosphorus release from lake sediments. *Arch. Hydrobiol. Beih.* 18, 5-59.

Caraco, N.F., Cole, J.J. & Likens, G.E. (1989): Evidence of sulphate-controlled phosphorus release from sediments of aquatic systems. *Nature* 341(6240): 316-318.

Caraco, N.F., Cole, J.J. & Likens, G.E. (1990): A comparison of phosphorus immobilization in sediments of freshwater and coastal marine systems. *Biogeochemistry* 9: 277-290.

Cornwell, J.C. & Morse, J.W. (1987): The characterization of iron sulfide minerals in anoxic marine sediments. *Marine Chemistry* 22: 193-206.

Fossing, H. & Jørgensen, B.B. (1989): Measurement of bacterial sulfate reduction in sediments: evaluation of a single-step chromium reduction method. *Biogeochemistry* 8: 205-222.

Howarth, R.W. & Jørgensen, B.B. (1984): Formation of ^{35}S -labelled elemental sulfur and pyrite in coastal marine sediments (Limfjorden and Kysing fjord, Denmark) during short term $^{35}\text{SO}_4^{2-}$ -reduction measurements. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 48: 1807-1818.

Howarth, R.W. (1988): Nutrient limitations of net primary production in marine ecosystems. *Ann. Rev. Ecol.* 19: 89-110.

Jensen, H.S. & Andersen, F.Ø. (1990): Fosforbelastning i lavvandede eutrofe søer. NPO-forskning fra Miljøstyrelsen. Nr. C4 1990. Miljøstyrelsen. 94 sider.

Jensen, H.S. & Andersen, F.Ø. (1992): Importance of temperature, nitrate and pH for phosphate release from aerobic sediments of four shallow, eutrophic lakes. *Limnol. Oceanogr.* 37(3): 577-589.

Jensen, H.S. & Thamdrup, B. (1993): Iron-bound phosphorus in marine sediments as measured by bicarbonate-dithionite extraction. *Hydrobiologia* 253: 47-59.

Jensen, H.S., P. Sampou & M. Holmer (i review): Sulfate effect on phosphate release from a eutrophic fjord sediment: An experimental approach. *Biogeochemistry*.

Jørgensen, B.B. (1977): The sulfur cycle of a coastal marine sediment (Limfjorden, Denmark). *Limnology and Oceanography* 22: 814-822.

Lucotte, M. & d'Anglejan, B. (1985): A comparison of several methods for the determination of iron hydroxides and associated orthophosphates in estuarine particulate matter. *Chemical Geology* 48: 257-264.

- Mortensen, P.B., Jensen, H.S., Rasmussen, E.K. & F.Ø. Andersen (1992): Fosforomsætning i sedimentet i Århus Bugt. Havforskning fra Miljøstyrelsen Nr. 17. Miljøstyrelsen.
- Petterson, K., Boström, B. & Jacobsen, O.S. (1988): Phosphorus in sediments - specification and analysis. *Hydrobiologia* 170: 91-101.
- Psenner, R. & Pucsko, R. (1988): Phosphorus fractionation: advantages and limits of the method for the study of sediment P origins and interactions. *Arch. Hydrobiol. Beih.* 30: 43-59.
- Ruttenberg, K.C. (1992): Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments. *Limnology and Oceanography*, 37(7): 1460-1482.
- Sas, H. [Ed.] (1989): Lake restoration by reduction of nutrient loading. Expectations, Experiences, Extrapolations. Academia Verlag Richarz GmbH. ISBN 3-88345-379-X.
- Seitzinger, S.P., Gardner, W.S. & A.K. Spratt (1991): The effect of salinity on ammonium sorption in aquatic sediments: Implications for benthic nutrient recycling. *Estuaries* 14(2): 167-174.
- Smith, V.H. (1986): Light and nutrient effect on the relative biomass of blue-green algae in lake phytoplankton. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 43: 148-153.
- Viborg amtskommune (1982): Hjarbæk Fjord Undersøgelser 1981-82. Recipientundersøgelser. Samlerapport. Rapport nr. 2.
- Viborg amtskommune (1982): Hjarbæk Fjord Undersøgelser 1981-82. Vandkemi, primærproduktion og sedimentkemi. Rapport nr. 3.
- Viborg amtskommune (1986): Hjarbæk Fjord Undersøgelser 1986-87. Recipientundersøgelser. Samlerapport. Vand- og miljøvesenets rapport nr. 54.
- Viborg amtskommune (1986): Hjarbæk Fjord Undersøgelser 1986-87. Hydrauliske undersøgelser. Vand- og miljøvesenets rapport nr. 56.
- Viborg amt (1993): Miljøtilstanden i Hjarbæk Fjord, 1992. Rapport nr. 115 i miljøserien.
- Yamada, H. & Kayama, M. (1987): Distribution and dissolution of several forms of phosphorus in coastal marine sediments. *Oceanol. Acta* 10: 311-321.

Danmarks Miljøundersøgelser

Danmarks Miljøundersøgelser - DMU - er en forskningsinstitution i Miljøministeriet. DMU's opgaver omfatter forskning, overvågning og faglig rådgivning inden for natur og miljø.

Henvendelser kan rettes til:

Danmarks Miljøundersøgelser
Postboks 358
Frederiksborgvej 399
4000 Roskilde

Tlf. 46 30 12 00
Fax 46 30 11 14

Direktion
Forsknings- og Udviklingssekretariat
Afd. for Forureningskilder og
Luftforurening
Afd. for Havmiljø og Mikrobiologi
Afd. for Miljøkemi
Afd. for Systemanalyse

Danmarks Miljøundersøgelser
Postboks 314
Vejlsovej 25
8600 Silkeborg

Tlf. 89 20 14 00
Fax 89 20 14 14

Afd. for Ferskvandsøkologi
Afd. for Terrestrisk Økologi

Danmarks Miljøundersøgelser
Grenåvej 12
8140 Rønde

Tlf. 89 20 14 00
Fax 89 20 15 14

Afd. for Flora- og Faunaøkologi

Publikationer:

DMU udgiver faglige rapporter, tekniske anvisninger, særtryk af videnskabelige og faglige artikler, Danish Review of Game Biology samt årsberetninger.

I årsberetningen findes en oversigt over det pågældende års publikationer. Årsberetning samt en opdateret oversigt over årets publikationer fås ved henvendelse til telefon: 46 30 12 00.



