

596.55

BG

# NPo-forskning fra Miljøstyrelsen

Nr. C4 1990

## Fosforbelastning i lavvandede eutrofe søer



Miljoministeriet **Miljøstyrelsen**

**NPo-forskning fra Miljøstyrelsen**  
**Nr. C4 1990**

# **Fosforbelastning i lavvandede eutrofe søer**

Henning Skovgaard Jensen  
Frede Østergård Andersen

Biologisk Institut  
Odense Universitet

Miljøministeriet  
**Miljøstyrelsen**

**MILJØSTYRELSEN**  
BIBLIOTEKET  
Strandgade 29  
1401 København K



<u>Indhold</u>	
<u>Forord</u>	7
<u>0.</u>	
<u>1.</u>	
<u>1.1</u>	Projektets baggrund og formål
<u>1.2</u>	Introduktion
1.2.1	Fosforcyklus i en lavvandet sø
1.2.2	Fosforbinding i sedimentet og faktorer som påvirker fosforfrigivelsen
1.2.3	Formulering af problemstillinger
<u>2.</u>	Metoder
<u>2.1</u>	Undersøgelsernes omfang
<u>2.2</u>	Lokalitetsbeskrivelse
<u>2.3</u>	Prøvetagning og analyser
2.3.1	Prøvetagning
2.3.2	Vandanalyser og planktonanalyser
2.3.3	Sedimentanalyser
<u>2.4</u>	Udveksling mellem sediment og vand
2.4.1	Massebalancer
2.4.2	Udvekslingsforsøg m. uforstyrret sed.
2.4.3	Fosfatsorption til sedimentet
<u>3.</u>	<u>Belastningshistorie, massebalancer og undersøgelser af vandkemi og fosforflukse i 1987 i de fire NPO-søer</u>
<u>3.1</u>	Udvikling i søerne
3.1.1	Belastningshistorie og massebalancer
3.1.2	Udvikling i søernes fosforindhold
<u>3.2</u>	NPO-søernes sedimentkarakteristik
<u>3.3</u>	Intern fosforbelastning samt vandkemiske undersøgelser i søerne i 1987
3.3.1	Brutto- og nettofrigivelse af fosfor fra sedimentet
3.3.2	Fosfor i svovæter
3.3.3	Kvælstof i svovæter
3.3.4	Temperatur
3.3.5	pH og secchidybde
<u>3.4</u>	Planteplankton i Arreskov Sø og Kvind Sø
<u>3.5</u>	Betydningen af blågrønalger for nettofluksens størrelse i Arreskov Sø og Kvind Sø

<u>4.</u>	<u>Styrende faktorer for udvekslingen af fosfat mellem sediment og vand (1): Eksperimentelle undersøgelser af temperatur-, nitrat-, pH- og sulfateffekten.</u>	40
4.1	Indledning	40
4.2	Sedimentets oxiderede overfladelag	40
4.3	Temperatureffekt	41
	4.3.1 Metode	41
	4.3.2 Resultater og diskussion	42
4.4	Nitrateffekt	46
	4.4.1 Metode	46
	4.4.2 Resultater og diskussion	46
4.5	pH-effekt	49
	4.5.1 Metode	49
	4.5.2 Resultater og diskussion	50
4.6	Sulfateffekt	52
4.7	Konklusion	53
<u>5.</u>	<u>Styrende faktorer for udvekslingen af fosfat mellem sediment og vand (2): Sedimentets karakteristik</u>	54
5.1	Indledning	54
5.2	Fosfatfrigivelse fra uforstyrrede sedimentkerner fra 15 sører	55
	5.2.1 Metode	55
	5.2.2 Resultater og diskussion	55
5.3	Sorptionskinetik	59
5.4	Analyse af Boströms forsøg	61
5.5	Fosforindholdet i danske sører	62
5.6	Diskussion og konklusion	63
<u>6.</u>	<u>Mineralisering af fosfor og kvælstof i sedimentteret materiale</u>	65
6.1	Indledning	65
6.2	Metode	65
6.3	Resultater	66
6.4	Diskussion	75
6.5	Konklusion	77

<u>7.</u>	<u>Chironomidelarvers effekt på udverkslingen af fosfat og uorganiske kvælstofioner mellem sediment og vand i Arreskov Sø</u>	78
7.1	Indledning	78
7.2	Metode	78
7.3	Resultater	78
7.4	Diskussion	81
7.5	Konklusion	82
<u>8.</u>	<u>Samlende diskussion og konklusion</u>	83
8.1	Intern P-belastning i de fire NPO-søer	83
8.2	Betydningen af blægrønalger for søernes fosforbalance	83
8.3	Sedimentkarakterer, som kunne beskrive fosfatfrigivelsen	84
8.3.1	Betydningen af jern:fosfor-forholdet i overfladesedimentet	84
8.3.2	Udviklingen i NPO-søerne i lyset af denne "tommelfingerregel"	85
8.3.3	Andre sedimentkarakterer	86
8.4	Styrende faktorer for fosfatfrigivelsen fra overfladesedimentet	86
8.4.1	Temperatur	86
8.4.2	Mineralisering af organisk stof	87
8.4.3	Nitrateffekt på fosfatfrigivelsen	88
8.4.4	Bioturbation	88
8.4.5	pH-effekt på fosfatfluksen	89
	<u>Referenceliste</u>	90



## Forord

Denne rapport omfatter resultaterne fra NPO-projekt 4.3 "Intern fosforbelastning i lavvandede sører efter reduktion af den eksterne næringssaltskifte". Samtidig med NPO-projektet blev der udført et konto 12 projekt "Sæsonvariationen i kvælstofudvekslingen mellem sediment og vand i lavvandede sører". En del af resultaterne fra denne undersøgelse indgår også i rapporten.

NPO-projektet er udført ved Biologisk Institut, Odense Universitet og gennemført i samarbejde med Miljøstyrelsens Ferskvandslaboratorium (nu Danmarks Miljøundersøgelser - afd. for Ferskvand), Fyns Amtskommune og Århus Amtskommune. Vi takker medarbejderne i disse institutioner for et godt samarbejde.

Følgende personer har deltaget i felt- og laboratoriearbejdet ved Odense Universitet: Ove Larsen, Jeanette Endersen, Henning Fjord Aaser, Susanne M. B. Hansen, Torben Lauritsen og Axel Skytthe. Uden disse personers ihærdige indsats kunne projektet ikke være gennemført. Stud. scient. Susanne M. B. Hansen og stud. scient. Torben Lauritsen har udarbejdet en projektrapport "Fyto- og zooplanktons årstidsvariation i to lavvandede sører, Kvind Sø og Arreskov Sø", som kan lånes via Odense Universitetsbibliotek. Resultaterne fra NPO-projekt 4.3 har yderligere dannet grundlag for en specialrapport "En dynamisk model for intern fosforbelastning i en lavvandet sø", som er udarbejdet af stud. scient. Axel Skytthe. Den vil ligeledes kunne lånes gennem Odense Universitetsbibliotek.

Endvidere ønsker vi at takke lodsejerne ved Arreskov Sø og Kvind Sø, som interesseret har fulgt vores arbejde og velvilligt har givet os adgang til sørerne.

Medarbejderne ved Miljøstyrelsens NPO-kontor takkes for godt samarbejde og for stor tålmodighed.

Databilag til rapporten er tilgængelig på 5,25" disketter. Disse fås hos Miljøstyrelsen.

Biologisk Institut,  
Odense Universitet, den 1. februar 1990

Henning S. Jensen

Frede Ø. Andersen

## 0. Sammendrag

Baggrund og formål	Danske lavvandede søer er præget af intern fosforbelastning om sommeren - en mekanisme, som forsinker bedringen af vandkvaliteten efter en reduktion af den eksterne fosfortilførsel. Formålet med dette projekt har i korthed været at klarlægge de faktorer, som styrer den interne belastning i disse søer.
4 lavvandede søer blev undersøgt	Undersøgelsen blev koncentreret om fire søer, hvor den eksterne belastning blev reduceret i 1982. Elleve andre søer blev indraget i studiet for at belyse sediment-karakterens betydning for fosforfrigivelsen.
Betydningen af et højt Fe:P-forhold i overfladesedimentet	Studier af fosfatfrigivelsen fra oxiderede sedimentoverflader i 15 søer viste, at denne korrelerede negativt med jern:fosfor-forholdet i overfladesedimentet. Vi konkluderede, at det er muligt at få kontrol over fosforfrigivelsen fra sedimentet i lavvandede søer når jern:fosfor-forholdet i overfladesedimentet er større end 15 (på vægtbasis); mens denne mulighed ikke er til stede ved jern:fosfor-forhold lavere end 10.
Balancen mellem fosforfrigivelse og sedimentation blev ændret af blågrønne alger	Ofte er der fundet et inverst forhold mellem nitrat og fosfor i svavandet i lavvandede søer. Vi fandt, at denne sammenhæng ikke skyldtes, at nitrat oxiderede sedimentet og derved reducerede den interne fosforbelastning sådan, som man tidligere har antaget. I Arreskov Sø og Kvind Sø skyldtes den inverse sammenhæng opblomstringen af blågrønne alger, der ofte findes nær kvælstofsalte ikke kan måles i svavandet. Der var muligvis en sammenhæng mellem kvælstoftilførslen og varigheden af de blågrønne algens dominans og hvis dette er alment gældende, vil ændrede kvælstoftilførsler til en øø have meget stor betydning for fosforbalancen i søen.
Temperaturen var den vigtigste styrende faktor	Vandtemperaturen var den faktor, som havde størst indflydelse på fosfatfrigivelsen fra sedimentet i den enkelte øø i sammenligning med de andre testede faktorer: nitrat, pH, sulfat, tæthed af dansemyggelarver og tilsætning af planktonmateriale. Høje temperaturer øgede mineraliseringsraten i sedimentet, hvorved organisk bundet fosfor hurtigere blev frigivet. Samtidig blev oxidationsforholdene i sedimentet forringet således, at også noget af den jernbundne fosfor blev frigjort. Høje nitratkoncentrationer førte til lavere fosfatfrigivelsesrater vinter og forår; mens nitraten stimulerede fosfatfrigivelsen om efteråret.
Nitrat påvirke-de fosfatfrigivelsen på to måder	

## 1. Indledning

### 1.1 Projektets baggrund og formål

Danske søer  
har det skidt!

Vandkvaliteten i de danske søer er blevet stadigt forringet gennem de seneste 10-20 år til trods for en forstærket indsats overfor udledning af næringsalte (pressemeldelse fra Miljøstyrelsen dec. 1987 og Kristensen og Jeppesen 1988).

I søer, hvor der er foretaget indgreb mod næringsalttilførslen, kan der imidlertid ofte spores en bedring; men bedringsprocessen går langsommere end det skulle forventes udfra de eksisterende modeller for søers respons på nedsat belastning (Ahlgren 1980). Dette synes især at være gældende for lavvandede søer, som er den almindeligste danske søtype (Jeppesen et al. 1987). Tilsvarende iagttagelser er gjort for svenske søer (Ryding 1985).

Vandkvaliteten  
er ofte bestemt  
af fosfor.

Vandkvaliteten i søer - målt som biomassen af plantoplankton - er ofte tæt forbundet med fosforindholdet i sværvandet (f.eks. Wetzel 1983). Det skyldes, at fosforkoncentrationen i sværvandet hyppigt er begrænsende for væksten af plantoplankton. De nuværende eutrofieringsproblemer i søerne har da også deres oprindelse i øgede fosfortilførsler med bryspildevand og indgrebene mod forurenningen koncentreret derfor om en reduktion af fosfortilførslen.

Hvad er intern  
belastning?

Den "forsinkede" bedring af vandkvaliteten i søerne efter reduktion af den eksterne næringsalttilførsel skyldes først og fremmest at sværvandet stadig får tilført meget fosfor, som frigives fra sør bunden (sedimentet) i sommerperioden; den såkaldte interne fosforbelastning.

Sedimentets fosforpulje er opbygget gennem den periode, hvor søen var næringsaltpræget. Hastigheden hvormed puljen udtømmes efter reduceret tilførsel, samt i hvilken grad fosforet kan bindes stabilt i sedimentet, er styret af forskellige kemiske og biologiske faktorer i søen.

Problematikken omkring sørestaurering ved reduktion af fosfortilførslen er senest blevet "reviewet" af Marsden (1989) og i bogen -P!? (Sas 1989) beskrives 18 "case stories" om søers respons på reduceret fosforbelastning.

Formål

Formålet med dette projekt har været at klarlægge hvilke faktorer, der er styrende for frigivelsen af sedimentets fosforpulje i lavvandede eutrofe søer. Det har været ønsket

at fremskaffe en viden, der i højere grad vil gøre det muligt at forudsige lavvandede søers respons på en nedsat næringssaltsførsel.

Den biologiske struktur kan også forsinke en bedring af vandkvaliteten.

En anden grund til at vandkvaliteten i søerne kun langsomt forbedres efter reduceret belastning er at den biologiske struktur i søen (planteplankton, dyreplankton, fisk m.m.) fastholder søen i den dårlige tilstand (f.eks. Jeppesen et al. 1989). Denne problemstilling berøres kun indirekte i dette projekt; men projektet skal ses i sammenhæng med andre undersøgelser i lavvandede søer, hvor effekten af reduceret belastning i lavvandede søer studeres. Det drejer sig især om NPO-projektet C9 (Eutrofieringsmodeller for søer), hvor man reviderer de simple sømodeller, der bruges som "prognoseværktøj" (Kristensen et al. 1988a).

## 1.2 Introduktion

### 1.2.1

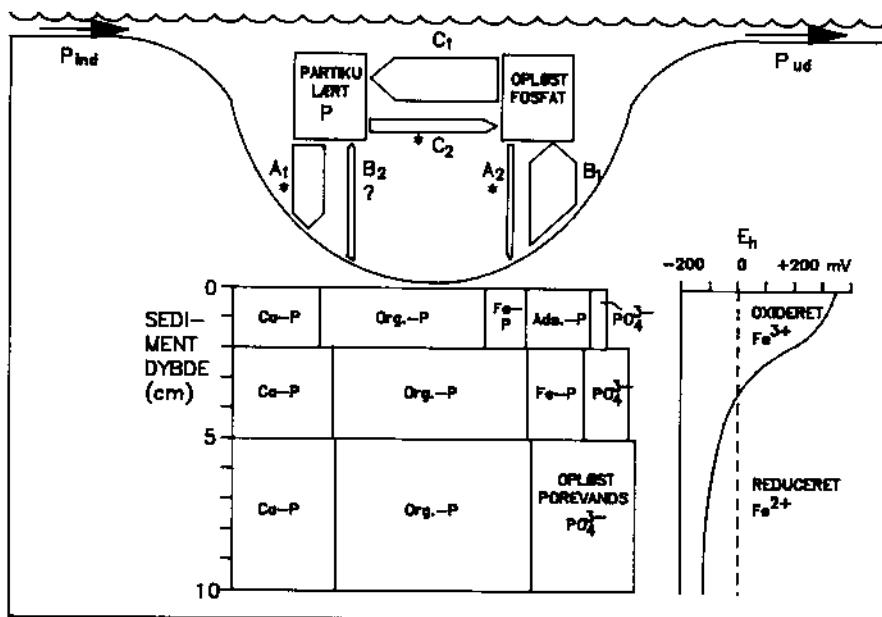
#### Fosforcyklus i en lavvandet eutrof sø.

De væsentlige led i fosforomsætningen i en lavvandet eutrof sø er skitseret i figur 1.1, som illustrerer fosforflux og fosforpuljer i Arreskov Sø 1/5 - 1/10 1987.

Kort gennemgang af figur 1.1

Opløst fosfat (målt som SRP - Opløst reaktivt fosfat) optages og indbygges i planteplankton ved fotosyntese (pilen C<sub>1</sub>). Der vil være et nogenlunde konstant forhold mellem algernes fosfor-, kvalstof- og kulstofindbygning - den såkaldte "Redfield-Ratio": 1P:16N:106C (molære forhold) (Parsons et al. 1984). En del af den organisk bundne fosfor (partikulært P) mineraliseres og frigives i vandfasen (C<sub>2</sub>), mens resten sedimenteres og mineraliseres i sedimentet (A<sub>1</sub>). Balancen mellem C<sub>2</sub> og A<sub>1</sub> vil bl.a. bero på søens middeldybde, græsning af dyreplankton, synkehastighed for planteplankton m.m. I sedimentet mineraliseres det sedimenterede materiale og fosfat frigives til sedimentporevandet, hvor det indgår i sorptionsligevægt med sedimentpartiklerne. Den resulterende fosfatgradient mellem sedimentporevandet og det ovenstående svavd bestemmer fluksen af fosfat til det ovenstående vand (B<sub>1</sub>). Hvis fosfatkoncentrationen i svavdet er højere end i sedimentet vil fluksen være rettet mod sedimentet (A<sub>2</sub>). Disse forhold forekommer især om vinteren eller under kraftig vind, når de øverste sedimentlag er veloxiderede. En eventuel direkte transport af partikulært fosfor fra sediment til vand (B<sub>2</sub>) kan tænkes i forbindelse med blågrønne algens opstigning fra sedimentet. For kolonidannende blågrønalger af slægten Microcystis er det rapporteret, at de ved opstigning er årsag til en betydelig

fosfortransport (Trimbee og Harris 1984). Om en sådan mekanisme er af kvantitativ betydning i danske sører er ikke undersøgt.



Figur 1.1

Fosforcyklus i den lavvandede, eutrofe Arreskov Sø i perioden 1/5 - 1/10 1987. Figuren er baseret på resultater fra dette projekt. På figuren er arealet af "kasserne" sat i forhold til de nævnte puljers størrelse (sommer-gennemsnit) og bredden af "pilene" er sat i forhold til størrelsen af de respektive fosforflukse.

Alle de følgende værdier er i kg P: **Fosforpuljer:** Sediment-P (0-10 cm)=29500; Fosfat i svovand = 1550; Partikulært P i svovand=1550. **Fosforflukse:** P<sub>ind</sub>=230; P<sub>ud</sub>=690; B<sub>1</sub>+B<sub>2</sub>=12500; A<sub>1</sub>+A<sub>2</sub>=9100; C<sub>1</sub>=10100

P<sub>ind</sub> og P<sub>ud</sub>, som udtrykker tilførsel og afstrømning af fosfor er målt ved massebalance. B<sub>1</sub> udtrykker fosfatfrigivelse fra sedimentet og er målt på uforstyrrede sedimentkerner. C<sub>1</sub>, som repræsenterer algernes optag af fosfat fra vandet er beregnet ud fra den målte fotosynteserate og under antagelse af et molært forhold mellem indbygget kulstof og fosfor på 106:1. Summen af A<sub>1</sub> og A<sub>2</sub> er beregnet ud fra massebalancen samt raten B<sub>1</sub>. Der er ved tidlige undersøgelser (Andersen og Lastein 1981) fundet sedimentationsrater for partikulært fosfor - A<sub>1</sub> - af den angivne størrelsесorden. Størrelsen af den mineralisering og dermed forbundne fosfatfrigivelse, der foregår i vandfasen - C<sub>2</sub> - samt sorptionen af fosfat på sedimentet er ikke målt. Derfor er de med \* mærkede flukse gættede værdier. B<sub>2</sub>, som udtrykker en eventuel transport af partikulært fosfor fra sedimentet til vandfasen er heller ikke målt, men er medtaget for oversigtens skyld.

### 1.2.2

#### Fosforbinding i sedimentet og faktorer, som påvirker fosforfrigivelsen fra sedimentet.

Klassisk jernteori

Den klassiske teori for fosforfrigivelse fra søsedimenter er udviklet af Einsle (1936) og Mortimer (1941 og 42) og går på, at fosfor i fosfatform bindes til oxiderede jernhydroxider ( $Fe^{3+}$ ) og at fosfat frigives fra sedimentet ved faldende redoxpotentiale, hvor  $Fe^{3+}$  reduceres til  $Fe^{2+}$ . Det er bl.a. den mekanisme, som fører til høje fosfatkoncentrationer i det iltfri bundvand i mange lagdelte søer. Oxidation/reduktion af mangan i sedimentet virker på samme måde; men i de fleste søsedimenter er manganindholdet betydeligt mindre end jernindholdet.

Anaerob fosfatfrigivelse kan forudsiges udfra jernbundet fosfor

Denne teori er blevet bekræftet i mange senere undersøgelser; senest er det demonstreret, at den mængde fosfat, som frigives til det iltfri vand i lagdelte søer kan korreleres til den jernbundne fosforpulje i overfladesedimentet. Udfra bestemmelser af den pulje kan man derfor forudsige størrelsen af den interne fosforbelastning i sådanne søer (Nürnberg 1988).

Bakteriers redox betingede polyfosfatmetabolisme.

Det diskuteres i øjeblikket hvorvidt redoxbetingede skift i bakteriers polyfosfatmetabolisme (opbygning af polyfosfater under oxiske forhold og nedbrydning under anoxiske forhold) er af kvantitativ betydning i søsedimenter (Gächter et al. 1988). Mekanismen er demonstreret hos bakterier af slægten Acinetobacter og er virksom i biologisk fosforfjernelse i rensningsanlæg. Der er dog ikke i de publicerede undersøgelser noget bevis for, at denne mekanisme udgør mere end et supplement til den "klassiske jernteori" i søsedimenter.

I lavvandede søer er problemet anderledes end i dybe lagdelte søer, idet der næsten altid er ilt til stede ved sedimentoverfladen. Yderligere er der ofte høje nitratkoncentrationer, som også kan "holde" jern i en oxideret form. Der har været knyttet stor interesse til nitratens virkning, idet undersøgelser i danske og svenske søer har vist, at en øget nitratkoncentration i vandet kan føre til en mindsket totalfosforkoncentration (Andersen 1982, Ryding 1985).

pH-effekt på jernbundet fosfor

Også i lavvandede søer spiller den jernbundne fosforpulje imidlertid en direkte rolle, idet fosfat-jern bindingen er en ionbinding, der f.eks. kan ionbytte med hydroxylioner, således at fosfat frigives fra aerobe sedimenter ved høje pH-værdier. Danske undersøgelser fra 70'erne har haft stor værdi for belysning af disse problemstillinger (Andersen 1975, Jacobsen 1977 og 1978 og Kamp-Nielsen 1974).

Fosfatsorption til oxiderede sedimenter.

Jacobsen (1977) studerede fosfatsortionen til oxideret sediment fra 8 danske sør og viste, at sorptionskinetikken kunne beskrives ved en Langmuir-isoterm, som er en mætningskinetik, og at sorptionskapaciteten kunne korreleres til puljen af reaktivt jern i sedimentet (oxalatekstraherbart jern). Hvis der er stor kontakt mellem sediment og vand vil sorptionskinetikken være den vigtigste styrende faktor for fosfatkoncentrationen i vandet. For nogle vandløb er det således vist, at fosfatkoncentrationen i vandet er identisk med den ligevegtskoncentration, som bestemmes ved sorptionskinetikken (Klotz 1988).

Styrende faktorer for fosforfrigivelse fra sedimentet

En gennemgang af de mekanismer, som påvirker fosforfrigivelsen fra søsedimenter er foretaget af Boström et al. (1982) og Boström et al. (1988). Det drejer sig i korthed om: 1) Mekanismer, som stimulerer mineraliseringshastigheden i sedimentet - f.eks. temperatur og tilgængeligheden af let nedbrydeligt organisk materiale. 2) Mekanismer, som påvirker sorptionskapaciteten for fosfat - f.eks oxidationsgraden af jernpuljen bestemt af ilt og nitrat. 3) Mekanismer, som virker specifikt på bestemte fosforpuljer - f.eks. pH ændringer i det ovenstående vand og 4) Mekanismer, som øger udvekslingshastigheden mellem sediment og vand - f.eks. bioturbation af dansemyggelarver, vindinduceret turbulens.

Også mekanismer, som fører til en immobilisering af jern i sedimentet (dannelse af tungtopløselige ferrosalte) må forventes at spille en rolle for fosfatfrigivelse fra oxiderede sedimenter idet nydannelsen af ferrioxider/hydroxider i overfladesedimentet mindskes med en reduceret flux af  $jern^{2+}$ -ioner fra det anoxiske sediment. En sådan mekanisme kunne være sulfatreduktion, som kan føre til dannelsen af tungtopløselige ferrosulfider og pyrit. Ohle (1954) opsatte på baggrund af ovennævnte mekanisme den hypotese, at fosfatfrigivelsen i nordtyske lavvandede sør blev accellereret p.g.a. øgede sulfattilførsler. Andre mineraldannelser, hvor jern blev immobiliseret kunne have samme effekt. F.eks. kan der i det anoxiske sediment forventes en dannelse af siderit ( $FeCO_3$ ) ved høj pH i porevandet (Postma 1981). Søndergård (in press) har vist, at sådanne forhold er til stede i porevandet i Søbygård Sø.

Vandplanter kan også spille en rolle

Endvidere diskuterer Boström et al. (1988) af undervandsplanter for transporten af fosfor fra sedimentet til svøndet - en proces, som har ringe betydning i eutrofe danske sør, hvor bundvegetationen ofte er skygget væk.

**Fraktionering  
af sedimentets  
fosforpuljer**

En rekapitulering af den eksisterende viden om fraktionering af sedimentets fosforpuljer er givet af Boström et al. (1982) og Pettersson et al. (1988). Det har også været prøvet at relatere fosforfrigivelses-mønstrene fra nogle forskellige søsedimenter til fosforpuljerne i sedimentet (Boström 1984). I undersøgelsen fra 1984 anvendtes den metodik for fraktionering af fosforpuljer, som nu anbefales i forbindelse med det danske miljøovervågningsprogram og som vi også har anvendt i dette projekt (Hieltjes og Lijklema 1980, Rebsdorf et al. 1988). Efter dette skema inddeltes sedimentets fosfor i 4 puljer: 1) Opløst fosfat plus let adsorberet fosfat (ADS-P el.  $\text{NH}_4\text{Cl}$ -P) bestemt ved udrystning af vådt sediment med 1 N  $\text{NH}_4\text{Cl}$ . 2) Jern- og aluminiumsbundet fosfor (Fe-P el.  $\text{NaOH}$ -P) bestemt ved efterfølgende udrystning med 0.1 N  $\text{NaOH}$ . 3) Calcium- og magnesiumbundet fosfor (Ca-P el.  $\text{HCl}$ -P) bestemt ved efterfølgende udrystning med 0.5 N  $\text{HCl}$  og 4) Residual-P (Res-P) bestemt som differensen mellem total-P og summen af de tre første fosforpuljer. Residual-P betegnes ofte som organisk bundet fosfor. Totalfosfor (TOT-P) bestemmes på syreekstrakt af glødet sediment. Fosfor måles i de enkelte ekstrakter som SRP (Dansk Standard DS 291).

**Hvad kan fosforpuljerne sige om fosforfrigivelsen.**

Boström konkluderede at den jern- og aluminiumsbundne fosforpulje er mobiliserbar ved lave redoxpotentialer og/eller høje pH-værdier, samt at sedimentet fra eutrofe sør indeholdt mere let adsorberet fosfor end andre søsedimenter. Denne pulje udgør i Boströms undersøgelser kun nogle få procent af TOT-P; mens Søndergård (1988) i den lavvandede, eutrofe Søbygård Sø finder, at ADS-P i perioder med højt pH i søvandet kan udgøre op til 25% af TOT-P i overfladesedimentet. I det sidste tilfælde er virkningsmekanismen tydeligvis, at jernbundet fosfor frigives og genfindes i ADS-P puljen.

**Kritik af metoden.**

Der har været rejst kritik af den nævnte fraktioneringsmetode. Specielt synes  $\text{NaOH}$ -P fraktionen at være uspecifik; idet der ekstraheres meget humusmateriale (brunfarvning af ekstraktet) og ofte meget "ikke-SRP" (Boström 1984). Nürnberg (1988) fandt, at  $\text{NaOH}$ -P ikke korrelerede med den anoxiske fosfatfrigivelse i lagdelte sør, mens jernbundet fosfor bestemt ved ekstraktion med en redoxbuffer gav en god korrelation! Endvidere synes Res.-P at være et noget groft mål for organisk bundet fosfor, idet puljen både omfatter letomsætteligt organisk fosfor og meget refraktært organisk fosfor og derfor er svær at relatere til fosforfrigivelseshastigheden (Pettersson et al. 1988).

**Alternativt  
forslag**

Det anbefales nu af flere, at der indskydes en ekstraktion med en redoxbuffer som det andet led i ovennævnte ekstraktionssekvens. En bufferet opløsning af natriumdithionit kan anvendes hertil. Den fosforpulje, som bliver ekstraheret, skulle give en bedre bestemmelse af jernbundet fosfor. (Psenner et al. 1988, Petterson et al. 1988).

**1.2.3.**

**Formulering af problemstillinger**

Med baggrund i ovennævnte "eksisterende viden" vil rapporten behandle flg. problemstillinger vedrørende intern fosforbelastning i lavvandede eutrofe sører:

- 1) Hvor stor betydning har ændringer i vandkemien (nitrat, sulfat, pH) og ændringer i vandtemperaturen for bruttofrigivelsen af fosfor fra sedimentet i sører, som har forskellig sedimentkarakter? Og i hvor høj grad afspejles disse mekanismer i den beregnede netto interne fosforbelastning i sørerne?
- 2) Hvilke sedimentkarakterer kan bedst beskrive fosforfrigivelsen fra oxiderede sedimentoverflader?
- 3) Hvad betyder kvantiteten og kvaliteten af det sedimenterende materialet for fosforfrigivelsen og hvor hurtigt mineraliseres materialet? Hvor stor en del af den observerede fosforflux kan tilskrives mineralisering af sedimenterende alger og hvor stor en del hidhører fra de minerogene puljer i sedimentet?
- 4) Hvor meget betyder tætheden af bioturberende dyr for udvekslingen af fosfat, kvalstofsalte ogilt mellem sediment og vand?
- 5) Er de store interne (netto)-fosforbelastninger, som er observeret i lavvandede sører ved nitratmangel i virkeligheden et resultat af ændrede sedimentationsrater p.g.a. blågrønalgers opblomstring?

Som et kuriosum kan det bemærkes, at de første fire punkter var blandt de emner, som blev anbefalet for den fremtidige forskning i fosforomsætningen i søsedimenter på den første "International Workshop on Phosphorus in Sediments", afholdt i Wien 1986 (Jansson et al. 1988).

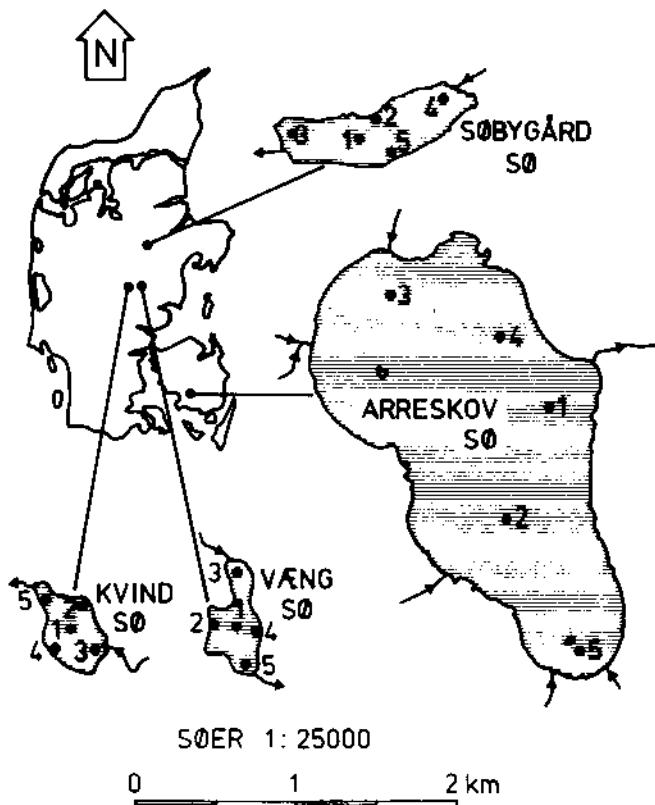
## 2. Metoder

### 2.1 Undersøgelsernes omfang

4 søer blev grundigt undersøgt.

NPO-søerne

Fire lavvandede, eutrofe søer, hvor der eksisterer et godt baggrundsmateriale i form af rapporter fra tidligere undersøgelser blev udvalgt til detaljerede studier af sedimentkarakteristik og fosforudveksling mellem sediment og vand. De 4 søer var: Arreskov Sø (Fyns amt), Kvind Sø og Søbygård Sø (Århus Amt) og Væng Sø (Vejle Amt). Søernes beliggenhed samt positionerne for prøvetagning i søerne er vist på figur 2.1. Undersøgelserne foregik i perioden okt. 86 til dec. 87.



Figur 2.1

Beliggenheden af de fire undersøgte søer.  
Tallene viser prøvetagningsstationer.

I Arreskov Sø og Kvind Sø blev der desuden udført undersøgelser af massebalancer for kvalstof og fosfor, vandkemi og planktonunder-

søgelses i 1987. I Søbygård Sø og i Væng Sø blev disse undersøgelser foretaget af Danmarks Miljøundersøgelser - afd. for Ferskvand.

11 andre sør blev inddraget. I maj-juni 1988 blev yderligere 11 sører inddraget i projektet for at studere sammenhængen mellem sedimentkarakteristik og fosfatfrigivelse fra sedimentet lidt bredere.

## 2.2 Lokalitetsbeskrivelse

De 4 sørers fysiske data fremgår af tabel 2.1. De er alle 4 lavvandede og uden sommerlagdeling af vandmasserne. I Arreskov Sø er vandudskiftningen ringe sammenlignet med de 3 andre sører, som kan karakteriseres som "hurtigt gennemstrømmede". De repræsenterer den almindeligste danske søtype.

Tabel 2.1 Søernes morfometri og vandgennemstrømning.

	Areal km <sup>2</sup>	Middel- dybde m	Max.- dybde m	Vandets opholdstid måneder
Arreskov Sø	3.88	2.0	3.2	17
Kvind Sø	0.15	1.8	2.5	0.5
Søbygård Sø	0.39	1.0	2.0	0.9
Væng Sø	0.15	1.2	1.9	0.6

Baggrunds-  
litteratur.

Alle fire sører har tidligere været undersøgt. Nedenstående er refereret de mest fyldige beskrivelser af sørerne: Arreskov Sø er beskrevet af Fyns Amtskommune i rapporten "De syv sører" (1976) samt af Andersen og Lastein (1981). Kvind Sø er beskrevet af Århus Amts-kommune i rapporterne "Bryrup Søerne 1978" (1979) og "Bryrup Søerne 1987" (1989), Søbygård Sø er beskrevet af Århus Amtskommune i rapporten "Søbygård Sø 1978" (1979) samt af M. Søndergård et al. (1987). Væng Sø er beskrevet i rapporterne fra Vejle Amtskommune "Væng Sø 1986" og "Væng Sø 1988" (in press).

## 2.3 Prøvetagning og analyser

### 2.3.1.

#### Prøvetagning

Vand- og sedimentprøver blev normalt udtaget ved station 1 i sørerne; men i oktober 1986 blev der dog taget sedimentprøver på 5 stationer i hver af de 4 sører (se figur 2.1).

Vandprøver	Vandprøver blev udtaget fra 0.5 og 2.0 meters dybde og derefter blandet sammen. Der blev anvendt en "hjerteklapvandhenter", som også er velegnet ved zooplanktonprøvetagning. Der blev lavet vand- og planktonanalyser 20-25 gange i Arreskov Sø og Kvind Sø. I resultaterne indgår yderligere data fra amternes undersøgelser i de samme sører i 1987.
Sedimentprøver	Sedimentprøver blev udtaget med en "Kajak-prøvetager", som ikke forstyrrer sedimentets lagdeling. De udtagne sedimentkerner havde en diameter på 52 mm. Der blev udtaget sedimentprøver 8-10 gange i hver sø.

### 2.3.2.

#### Vandanalyser og planktonanalyser

Vandkemiske analyser blev foretaget efter "Dansk Standard". Plankontællinger og målinger til volumen- og tørvægtsbestemmelser blev foretaget i omvendt mikroskop (Limnologisk Metodik, 1985). Kun zooplankton, som blev tilbageholdt på et 40 µm net blev talt.

### 2.3.3.

#### Sedimentanalyser

Sedimentkernerne blev opdelt i 5 dybde-intervaller (0-2 cm, 2-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm og 20-30 cm) og for hver dybde blev sedimentet fra 5 kajakrør blandet sammen inden analyserne. Der blev analyseret for densitet, tørvægt, glødetab, totalfosfor, fosforpuljer, total jern, total calcium, kulstof og kvælstof. De fleste af disse analyser er udført efter Limnologisk Metodik (1985). Fosforpuljerne blev bestemt ved en extraktionssekvens beskrevet af Hieltnes og Lijklema (1980). Metalanalyserne blev lavet på saltsyreakstrakter af gløderesten v.h.a. atomabsorptionsspektrofotometri.

### 2.4 Udveksling mellem sediment og vand

Udvekslingsprocesserne blev studeret på 3 forskellige måder.

- Nettofrigivelsen af fosfor mellem sediment og vand blev studeret på 3 forskellige måder.
- Bruttofrigivelsen af fosfat, udveksling af kvælstofsalte samt sedimentets iltoptag blev målt direkte på uforstyrrede sedimentkerner (afsnit 2.4.2).
- Sedimenternes fosfat-sorptionskinetik under aerobe forhold blev fastlagt ved forsøg med totalopblandet sediment (afsnit 2.4.3).

#### 2.4.1

#### Massebalancer

Massebalancen og nettoudvekslingen af fosfat mellem sediment og vand i Arreskov Sø blev beregnet udfra 19 målinger af stoftransport i 6 tilløb, kontinuerlig måling af vandføringen i afløbet og 38 prøvetagninger i sø og afløb. I vandbalance og stoftilførslen er medregnet nedbør og fordampning. Fordampning er beregnet ud fra antallet af solskinstimer i henhold til Lønholdt (1976). Der er taget hensyn til ændringer i vandstand ved beregning af den fosformængde, der var magasineret i svandet.

I Kvind Sø er massebalancen beregnet ud fra 24 målinger i tilløb, afløb og midt i søen, samt oplysninger om vandføring og stoftransport i afløbet fra Bryrup renningsanlæg.

Massebalancen giver et mål for netto-udvekslingen.

Når massebalancerne er fastlagt med så stor prøvetagningshyppighed som her, kan man få et mål for nettoudvekslingen mellem sediment og vand  $(B_1+B_2)-(A_1+A_2)$  på figur 1.1). I de fleste situationer svarer dette til bruttofrigivelsen af næringssalte minus sedimentationen af partikulært materiale ( $B_1-A_1$ ).

#### 2.4.2

#### Udvekslingsforsøg med uforstyrret sediment

Formål

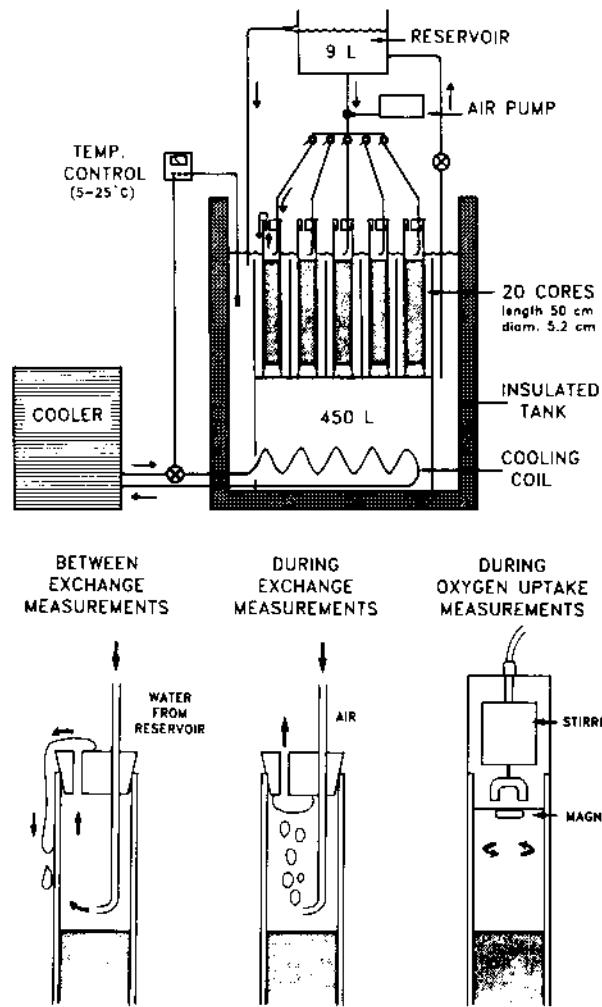
Udvekslingsforsøg med uforstyrrede sedimentkerner blev lavet dels for at måle den aktuelle brutto-fosfatfrigivelse fra sedimentet (pilen  $A_1$  på figur 1.1) på forskellige årstider, dels for at undersøge betydningen af forskellige fysiske, kemiske og biologiske faktorer for fosfatfrigivelsesraten - de såkaldte styrende faktorer.

Metodik

Sedimentkerner til udvekslingsmålinger blev udtaget samtidig med prøverne til sedimentkemi. Kajakrørene, hvor sedimentsøjlen var ca. 30 cm høj og hvor vandsøjlen i røret var ca. 15 cm høj, blev placeret i termostaterede vandbade ved hjemkomst til laboratoriet. Vandfasen over sedimentet var hele tiden veliltet. I hvert vandbad blev der placeret 20 kajakrør - som regel 5 fra hver af de 4 søer. Vandet i karrene var demineraliseret vand tilsat salte, så sammensætningen svarede nogenlunde til svandet i de eutrofe søer på den pågældende årstid.

Kun udveksling over aerobe sedimentoverflader blev studeret.

Vandet, der altid var fuldt iltet, blev cirkuleret gennem rørenes vandfase, således, at denne blev udskiftet ca. hvert 5. minut. Gennemstrømningen skabte samtidig omrøring i vandfasen. Vandvolumenet i karrene var så stort (450 l), at inkubationsforholdene var konstante over en meget lang tidsperiode; kun pH krævede kontrol og justering et par gange om ugen. Forsøgsopstillingen ses på figur 2.2.



Figur 2.2

Laboratorieopstilling til måling af fluxe mellem sediment og vand i uforstyrrede sedimentkerner, samt til landtidsinkubationer af sedimentkerner.

Målinger af udvekslingsraterne blev foretaget ved at standse gennemstrømningen, gennemboble med en svag luftstrøm og måle på koncentrationsændringen i rørenes vandfase over 24 timer. Måling af sedimentets iltoptag blev lavet ved at udskifte låget i rørene med en tæt-sluttende magnetomrører og måle på ændringer i iltkoncentrationen over 3-8 timer.

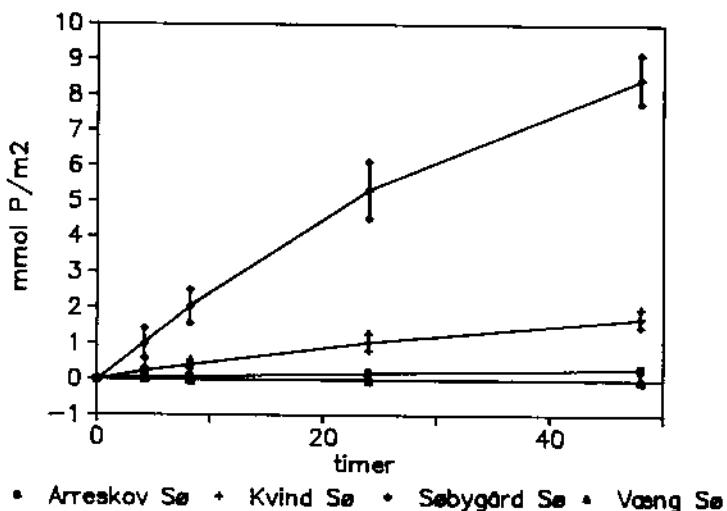
Disse målinger blev typisk foretaget 6 gange i en 3 ugers inkubationsperiode.

4 forsøgs-  
systemer med  
kontrollerede  
betingelser.

Der blev anvendt op til 4 forsøgssystemer med plads til i alt 80 kajakrør. Det var med denne teknik muligt at kontrollere forsøgsbetingelserne sådan, at sedimentet fra de 4 sør blev inkuberet fuldstændig ens og at kun en parameter ad gangen blev varieret fra kar til kar.

De initiale udvekslingsrater (målt 2-6 dage efter prøvetagning) blev taget som udtryk for den aktuelle rate i søen; mens effekten af de forskellige styrrende faktorer (nitrat, sulfat, pH, temperatur, dansemyggelarver m.m.) blev vurderet på den kumulerede værdi efter 21 dage.

De målte værdier for sedimentets næringssaltudveksling eller iltoptag er altid angivet som gennemsnit af mindst 5 sedimentkerner inkuberet ved ens betingelser.



**Figur 2.3**  
Tidsforløb for fosfatfrigivelse fra sedimentet i en 48 timers måleperiode i de fire NPO-søer

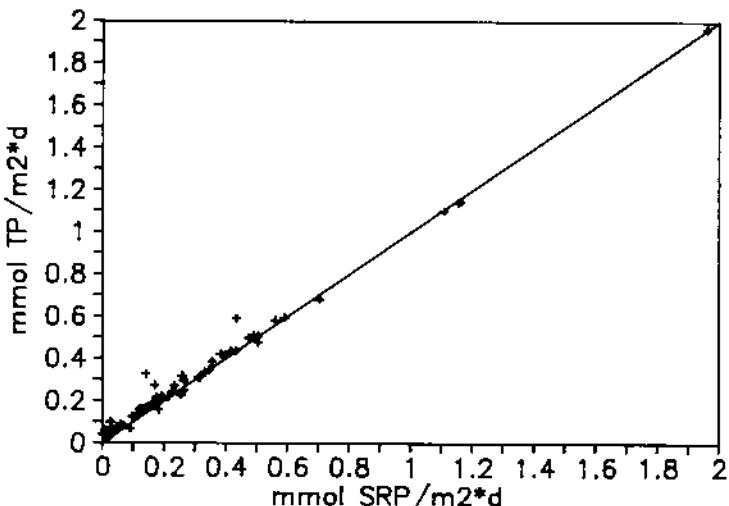
**Metodekritik:**  
Tidsfaktor i  
målingen.

Når næringssaltudvekslingen måles over 24 timer sker der en ændring af gradienterne mellem sediment og vand i løbet af måleperioden. Herved introduceres en lille fejl og f.eks. de målte fosfatfrigivelsesrater bliver lidt for små (figur 2.3). Som det fremgår af figur 2.3 er denne fejl dog acceptabel, når man vurderer den usikkerhed, der ville være på en måling over et kortere tidsinterval.

**Fluxen af andre  
P-forbindelser  
end fosfat.**

Det, at der normalt kun blev målt fluxen af opløst fosfat (SRP) og ikke af total fosfor (TP), kan i nogle tilfælde have ført til en underestimering af fosforfluxen fra sedimentet.

Sammenlignende målinger med 60 sedimentkerner i hver blev lavet i maj 88 (figur 2.4). Generelt ligger punkterne i figur 2.4 på 1:1-linien, hvilket betyder, at al fosfor frigives i form af fosfat. Når punkterne ligger over linien sker der tillige en frigivelse af andre fosforforbindelser (opløst organisk P eller partikulært P).



Figur 2.4

Forholdet mellem frigivet total fosfor (TP) og frigivet fosfat (SRP) i 12 sører, 60 sedimentkerner, maj 88. Den fuldtoplukne linie viser forholdet 1:1.

#### 2.4.3

#### Fosfatsorption til sedimentet

Sorptionskinetikken i forskellige sedimentdybde-intervaller blev undersøgt 3 gange for de 4 sører og effekten af høje pH værdier blev studeret i sommersituationserne.

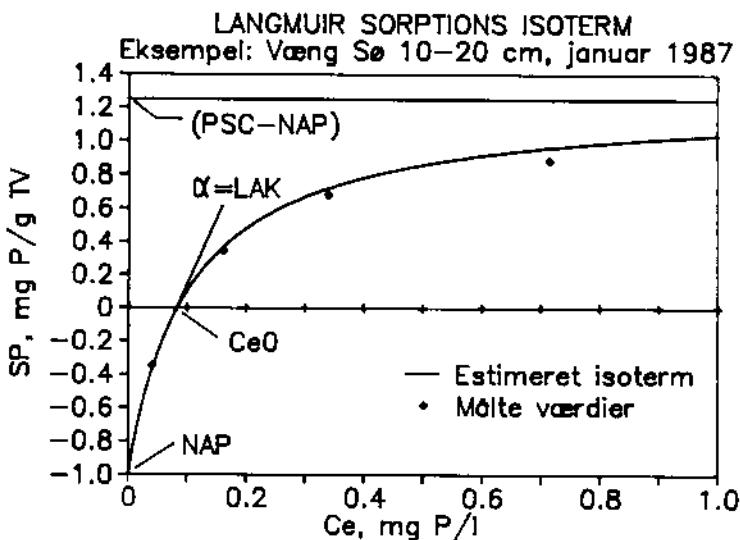
##### Forsøgsteknik

Teknikken bestod i, at 0.5 grams portioner af vådt, homogeniseret sediment blev opslemmet i 0.1 M NaCl-opløsning tilsat NaHCO<sub>3</sub> til 2 mM og justeret til en fastsat pH-værdi. Sediment fra samme dybde blev opslemmet i 4-6 forskellige koncentrationer af fosfat, og efter 24 timers omrystning blev ligevægtskoncentrationen (Ce) af fosfat målt.

I hver sedimentsuspension blev mængden af udvekslet fosfat (SP) sat i forhold til den målte Ce. Resultaterne blev "fittet" til en Langmuir-isoterm (figur 2.5), der har vist sig, at være den bedste matematiske beskrivelse af aerob fosfat-sorptionskinetik (Jacobsen 1977, Gunatilaka 1982, Froelich 1988):

Langmuir ligningen	$SP = -NAP + (PSC \cdot Ce) / (k + Ce)$ , eller omskrevet til lineært udtryk: $1/(SP+NAP) = 1/PSC + (k/PSC) \cdot (1/Ce)$ , hvor
Definitioner:	
NAP	NAP er mængden af let adsorberet fosfat i sedimentet ved starten af udrystningen (Native Adsorbed Phosphate),
PSC	PSC er en konstant, som udtrykker sedimentets adsorptionskapacitet og
k	k er halvmætningskonstanten. Isotermens skæring med X-aksen ( $Ce_0$ ) kaldes også "cross over" koncentrationen og er den fosfatkoncentration i suspensionen, hvor der ikke udveksles noget fosfat. $Ce_0$ kan beregnes udfra udtrykket:
Ce <sub>0</sub>	$Ce_0 = NAP \cdot k / (PSC - NAP)$
LAK	LAK udtrykker den lineære adsorptionskoefficient i isotermens skæring med X-aksen (hældningskoefficienten for tangenten i skæringspunktet) og er et udtryk for sedimentets evne til at bufre opløsningens fosfatkoncentration. $LAK = (PSC - NAP)^2 / (PSC + k)$

I praksis blev isotermene "fittet" ved at variere NAP indtil den bedste korrelation blev opnået. Hvis det ikke var muligt at opnå et statistisk sikkert "fit" ( $p < 0.05$ ) blev datasættet kasseret.



**Figur 2.5:**  
Eksempel på en Langmuir sorptionsisoterm. Se teksten for forklaring af termerne.

Hvad kan isotermerne sige om fosforudvekslingen?

Ved at bestemme sorptionsisotermerne får man et mål for den ligevægtskoncentration i svandet, som det oxiderede sediment vil "tilstræbe" ( $CeO$ ) samt sedimentets evne til at bufre denne koncentration ved ændret belastning (LAK). NAP giver et mål for den udvekslige fosfatpulje i det oxiderede sediment (f.eks. ved resuspension) i lighed med  $NH_4Cl$ -extraherbart fosfat (se afsnit 1.3.2) mens PSC er sedimentets maximale kapacitet for sorption af fosfationer ved udveksling over kort tid.

### 3 Belastningshistorie, massebalancer og undersøgelser af vandkemi og fosforflukse i 1987 i de fire NPO-søer.

#### 3.1 Udviklingen i søerne

##### 3.1.1

Fosforbalancer før og efter indgreb.

##### Belastningshistorie og massebalancer.

Et fællestørk for de fire NPO-søer er, at der skete en reduktion af den eksterne fosforbelastning omkring 1982, som resulterede i at den arealspecifikke fosfortilbageholdelse i søerne faldt med belastningen (tabel 3.1). I Arreskov Sø og i Søbygård Sø var der på årsbasis i 1987 en nettofrigivelse af fosfor fra sedimentet.

Tabel 3.1 Søernes arealspecifik belastning og tilbageholdelse af P og N før og efter indgreb mod den eksterne belastning. (g/m<sup>2</sup>\*år).

	Arreskov Sø		Kvind Sø		Søbygård Sø		Væng Sø	
	1974	1987	1978	1987	1978	1987	1978	1987
P-belastning	0.40	0.22	12.3	10.7	27.7	3.28	5.5	1.5
P-retention	0.30	-0.34	0.87	0.13	15.9	-2.67	1.5	0.9
N-belastning	9.34	5.83	273	331	125	118	84	71
N-retention	4.19	2.17	63.3	60	61.2	58.3	31	48

Er 1987-resul-

taterne karakteristiske for

Der er en risiko for, at resultaterne for 1987 ikke er karakteristiske for udviklingen i søerne; men for Væng Sø, hvor der foreligger gode tidsserier for 1980-erne afviger 1987 ikke fra den generelle udvikling. I Søbygård Sø var fosfatfrigivelsen lavere i 1987 end i 1986 og 88, hvilket kan bero på den kolde sommer (E. Jeppesen - pers. kommentar).

##### 3.1.2

##### Udviklingen i svovlets fosforindhold

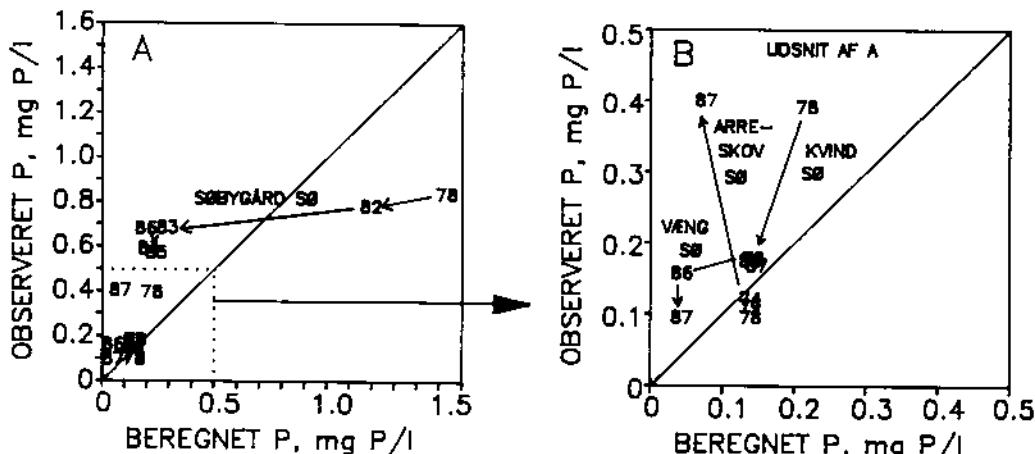
Udviklingen i totalfosforkoncentrationen (TP) i søernes vandfase er vist i figur 3.1, hvor de observerede årgennemsnit er afbilledet mod de teoretiske værdier, som kan beregnes ud fra vandets opholdstid i søen og den gennemsnitlige fosforkoncentration i tilløbet.

Hvad viser Fig. 3.1 ?

Observerede værdier, som er mindre end de beregnede antyder, at søen tilbageholder noget af den tilførte fosfor i sedimentet mens observerede værdier større end de beregnede antyder, at søerne har en nettoafgivelse af fosfor fra sedimentet. For yderligere forklaring

og diskussion af de simple sømodeller henvises til rapporten fra NPO-projekt C9.

### UDVIKLING I SØERNES FOSFORINDHOLD ÅRSGENNEMSNIT FOR VANDFASE



Figur 3.1

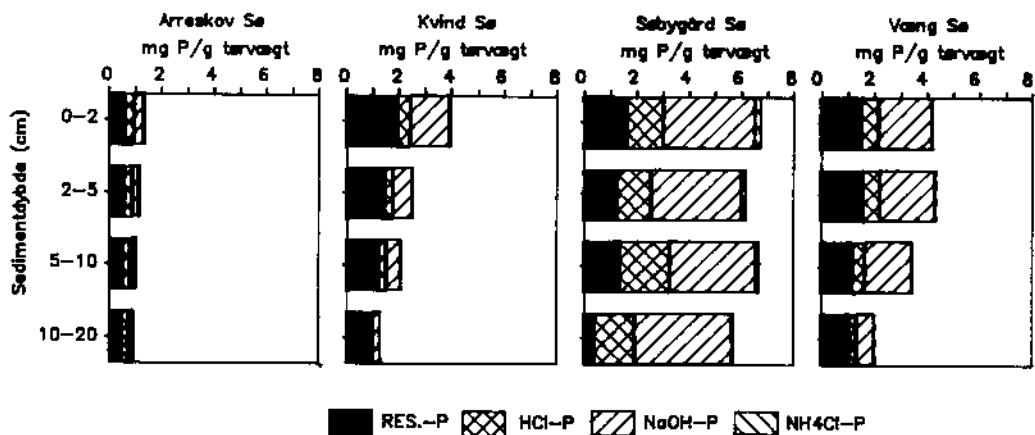
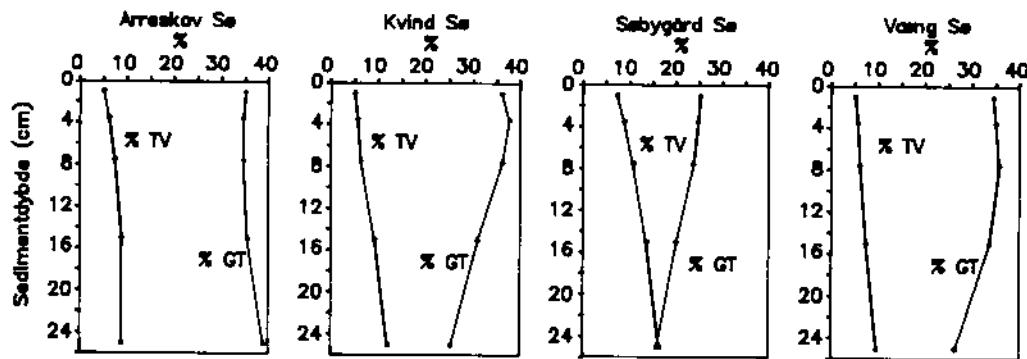
Observerede årsgennemsnit for totalfosfor i de fire NPO-søer afbildedet mod de teoretisk beregnede værdier:  $P_{kalk} = P_{ind} / (1 + vT_w)$ , (Vollenweider/OECD-modellen bl.a. refereret i Sas 1989), hvor  $P_{kalk}$  er den beregnede værdi,  $P_{ind}$  er den gennemsnitlige fosforkoncentration i tilløbet og  $T_w$  er vandets opholdstid i søen målt i år.

Hvorfor ligger punkterne i figur 3.1 over 1:1-linien?

Når punkterne i figur 3.1 ligger over 1:1-linien kan det skyldes intern fosforbelastning i søerne. Det er normalt, at fosforkoncentrationen i søernes vandfase - i årene lige efter en reduktion af den eksterne fosfortilførsel - er højere end de beregnede værdier, idet punkterne (i et plot som Fig. 3.1) bevæger til venstre med en faldende x-værdi, hvorefter punkterne bevæger sig ned mod 1:1-linien - mod en ny ligevægt i søernes fosforbalance. Et sådant mønster kan observeres i de tre af søerne, mens Arreskov Sø har reageret lige modsat! Som det diskuteres senere kan dette skyldes ændringer i planktonstrukturen i søen.

### 3.2 NPO-søernes sedimentkarakteristik

Den vertikale fordeling af tørvægtsprocent, glødetabsprocent og fosforpuljer i sedimentet



**Figur 3.2** Vertikalfordeling af tørvegtsprocent (%TV), glødetabsprocent (%GT) og fosforpuljer i sedimentet fra midtstationerne i de fire NPO-søer. Figuren er baseret på 8 målinger på forskellige årstider i sørerne.

fra midten af sørerne (station 1) ses i figur 3.2. Talværdier for overfladesedimentets indhold af fosfor, jern og calcium findes i tabel 5.1 og overfladesedimentets fosforpuljer er angivet på volumenbasis i figur 5.1. Sedimentkarakteristik for de andre 4 stationer i sørerne findes i databilaget (på 5,25" disketter).

Gennemsnit af  
8 målinger Værdierne, som er vist i figur 3.2, er gennemsnit af 8 målinger på forskellige årstider. Kun puljen af let adsorberet fosfat ( $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ ) udviste en sæsonvariation, som fremgår af tabel 3.2.

Organisk rigt sediment Som det ses i figur 3.2 har alle søsedimenterne et lavt tørstofindhold og et relativt højt glødetab - sedimenterne er rige på organisk stof (organogene). Arreskov Sø og Søbygård Sø har kalkholdigt sediment (8-12 procent af tørvevægten); Søbygård Sø, Væng Sø og til dels Kvind Sø har et højt jernindhold og de sidste tre sører har også et højt fosforindhold i de øverste sedimentlag.

Stor jernbundet fosforpulje i tre af sørerne Med hensyn til sedimentets fosforpuljer kan det konkluderes, at den jernbundne pulje ( $\text{NaOH-P}$ ) er relativ stor i Søbygård Sø, Væng Sø og de øverste to centimeter af Kvind Sø sedimentet; mens den er ubetydelig i Arreskov Sø sedimentet. I alle fire sedimenter udgør residualpuljen en stor fraktion.

Dato:	Arreskov Sø			Kvind Sø			Søbygård Sø			Væng Sø		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
861013	4.8			2.0			22.2			1.3		
861211	7.0			1.3			7.9			0.1		
870115	5.2	1.3± 0.6		1.5 -0.2± 0.9	18.4	6.7± 1.6	0.6	-2.0± 2.2				
870511	3.1	14.9± 8.7		2.2 17.4±14.6	16.9	46.5± 7.1	2.3	4.7± 5.0				
870618		32.9±33.0			17.7± 9.0		72.9±18.6			10.5± 8.0		
870722	4.7	23.6±13.3		6.3 48.4±47.0	22.9	164 ±60	3.4	5.9± 5.8				
870824	6.1			7.6			23.2			6.5		
870921	11.6	14.6± 5.5		5.5 38.1± 9.9	26.0	135 ±19.5	6.9	35.3± 9.0				
871118	2.8	9.6± 1.9		2.6 7.8± 4.5	10.5	18.9± 5.6	3.5	5.3± 1.2				
880516		19.3±13.5										
880628	3.7	24.2±14.3		0.8 51.5±28.6	12.5	239 ±61.6	1.9	17.5± 6.8				

#### Gennemsnitlige fosforfrigivelser fra sedimentet i sommerhalvåret 87:

GS. Netto	5.7	11.2	14.8	4.3
GS. Brutto	21	33	106	15

#### Korrelation mellem ADS-P puljen og fosfatfrigivelsesraten:

$R^2$	0	0.16	0.02	0.67
-------	---	------	------	------

Tabel 3.2.

Kolonne 1: Let adsorberet fosfat ( $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ ) i overfladesedimentet (0-5 cm) i mgP/l. Kolonne 2: Fosfatfrigivelse fra uforstyrrede sedimentkerner (gennemsnit af 5 kerner) mgP/( $\text{m}^2 \cdot \text{dg}$ ). Kolonne 3: Standard afvigelsen for 5 kerner. Rækken ( $R^2$ ) giver regressionskoefficienten for den lineære sammenhæng mellem kolonne 1 og kolonne 2.

### 3.3 Intern fosforbelastning samt vandkemiske undersøgelser i søerne i 1987.

I figurene 3.3., 3.4., 3.5 og 3.6 gives årsvariationen i brutto- og netto intern fosforbelastning (A), TP og fosfat i svævet (B), TN og kvælstofsalte i svævet (C), temperatur (D), pH i svævet (E) og secchidybde (F) i de fire NPO-søer.

#### 3.3.1

##### Brutto- og nettofrigivelse af fosfor fra sedimentet, delfigur (A).

###### **Nettoflux**

På delfigurerne A viser den fuldt optrukne linie nettoudvekslingen af fosfor mellem sediment og vand (jvnf. metodeafsnit 2.4.1). Positive værdier betyder, at sedimentet afgiver mere fosfor end der tilføres ved sedimentation mens negative værdier betyder, at sedimentationen af partikulært fosfor (PP) er større end fosfatfrigivelsen fra sedimentet eller at der er en flux af fosfat fra vand til sediment p.g.a. sorption til det oxiderede overfladesediment. Den sidstnævnte situation forekommer især om vinteren mens sommerperioden er præget af fosfatfrigivelse fra sedimentet og sedimentation af PP.

Beregningerne i Væng Sø er usikre; men i de 3 andre søer er de gode

Nettofluksberegningerne i Væng Sø er usikre, idet 80 % af vandtilførslen kommer fra undersøiske kilder, hvor vi ikke kender fosfortransporten nøjagtigt. Sæsonvariationen i samme størrelse er heller ikke kendt. For de andre tre søer er beregningerne derimod ret sikre, idet vandføringen i tilløbene redegør for mere end 80 % af vandbalancen.

###### **Bruttoflux**

Bruttofrigivelsen af fosfat fra sedimentet (trekanter på delfigurerne A) er målt i laboratoriet ved ens inkubationsbetingelser for alle fire søer, hvorfor den enkelte sø's svingninger i vandtemperatur, nitrat- og fosfatkoncentration ikke har kunnet simuleres fuldt ud. Vandkemi og temperatur for de enkelte målinger er angivet i tabel 3.3.

Sedimentets gennemsnitlige brutto- og nettofrigivelser af fosfor for sommerhalvåret 1987 er givet i tabel 3.2. Bruttofrigivelsen af fosfat fra sedimentet i Arreskov Sø var 55 gange større end den eksterne fosforbelastning i sommerhalvåret (se også Fig. 1.1). For Kvind Sø var forholdet 15, for Søbygård Sø 14 og for Væng Sø 3. Forskellen på brutto- og nettoaftigelserne (tabel 3.2) viser, at det meste af den frigjorte

fosfor bliver tilbageholdt i søen. Forskellen på de daglige fluksrater (Fig 3.3 -3.6 A) viser også, at der er en meget stor recirkulering af fosfor i søgerne.

Tabel 3.3

Vandkemi i inkubationssystemet ved måling af sedimentets fosfatfrigivelse for de målinger, som er angivet i tabel 3.2 og i figurerne 3.3, 3.4, 3.5 og 3.6 (delfigur A).

Måned	Temp. gr.C	pH	Fosfat uM	Nitrat uM	Ammonium uM
Januar	5	8	3.2	178	14
Maj	15	9	0	70	10
Juni	15	9(*)	0	16	10
Juli	18	8.5	0	5	10
September	15	9	0.65	0	10
November	7	8	0.65	34	10

(\*): For Væng Sø var pH-værdien i inkubations-systemet 8.

Er bruttoflux-målingerne realistiske?

Ved målingerne i januar og november var fosfatkoncentrationen i inkubationssystemet for lav i forhold til koncentrationerne i søgerne. Derfor var det ikke muligt at måle den fosfatflux rettet mod sedimentet, som i følge nettofluxberegningerne har fundet sted. I de øvrige målinger var fosfatkoncentrationerne realistiske.

Standard afvigelser på målingerne.

Sedimentets fosfatfrigivelse blev altid målt på 5 parallelle sedimentkerner og standard-afvigelserne var betydelige (tabel 3.2). For alle 6 målinger var den gennemsnitlige standard-afvigelse for søgerne: Arreskov Sø: 54%, Kvind Sø: 62%, Søbygård Sø: 24% og Væng Sø 68%. Endnu større standardafvigelser for tilsvarende målinger i to eutrofe søger er rapporteret af Theis og McCabe (1978)

Signifikans i årsvariationen.

Det betyder, med hensyn til årsvariationerne i fosfatfrigivelse, at for Arreskov Sø og Kvind Sø er kun stigningen fra januar til maj og faldet fra september til november signifikant ( $p<0.05$ ). I Søbygård Sø er alle variationer undtaget ændringen fra juli til september signifikante og i Væng Sø er alle variationer undtaget ændringerne fra maj til juni og fra juni til juli signifikante.

Hvilke faktorer styrer sæson-variationen i bruttofluxen?

Eksperimentelle undersøgelser af de styrende faktorer for bruttofluxen af fosfat fra sedimentet er beskrevet i kapitel 4. Disse studier vurderer en faktors betydning ved at se på fosfatfluxen over 21 dage. Hvis man derimod sammenligner fluxmålingerne i tabel 3.2, som repræsenterer bruttofluxen i de første dage

efter prøvetagning, med søvandets pH og nitrat lige inden prøvetagning samt temperaturen ved den pågældende måling (tabel 3.3) fås flg. sammenhænge: I Arreskov Sø, Kvind Sø og Søbygård Sø kunne temperaturen alene beskrive 70% af sæsonvariationen (A.Sø:  $r^2=0.72$ ;  $p<0.05$ , K.Sø:  $r^2=0.73$ ;  $p<0.05$ , S.Sø:  $r^2=0.70$ ;  $p<0.05$ ). Korrelationen kunne ikke forbedres ved at inddrage nitrat eller pH. I Væng Sø var temperaturkorrelationen dårlig ( $r^2=0.18$ ) mens pH alene gav en bedre beskrivelse ( $r^2=0.61$ ;  $p<0.1$ ). Heller ikke i Væng Sø kunne korrelationen forbedres ved at inddrage flere styrende faktorer. At multiple korrelationanalyser giver mindre signifikante beskrivelser skyldes dog først og fremmest at der kun arbejdes med 6 datasæt!

Sammenligning mellem de fire søer.

De højeste fosfatfrigivelsesrater blev altid målt i Søbygård Sø med en maximumsværdi på  $239 \text{ mgP} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  målt i juni 1988. De næsthøjeste rater blev normalt målt i Kvind Sø, dernæst Arreskov Sø og generelt var frigivelsesraten lavest i Væng Sø. Eneste undtagelse herfra var målingen september 1987, hvor Væng Sø sedimentet frigav fosfat med en rate på  $35.3 \text{ mgP} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ .

Andres resultater.

Litteratur giver også eksempler på lavvandede søer, hvor de styrende faktorer for sæsonvariationen i fosforfrigivelse fra sedimentet er temperatur (Boers 1986) og pH (Istvánovics 1988).

Søndergård (1987, 1989) har målt lige så høje fosfatfrigivelsesrater i Søbygård Sø, som vi har gjort i denne undersøgelse. Intensive studier af nettofluxen i klarvandsperioder har bekræftet at disse rater er realistiske (Søndergård et al. in press). Jensen et al. (1987) har målt fosfatfrigivelsesrater på  $150-240 \text{ mg P m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  i den lavvandede Brabrand Sø og nogle af de rater, som rapporteres for søerne i kapitel 5 er af samme størrelsesorden. Men i øvrigt er de målte rater generelt højere end de, som er rapporteret i den internationale litteratur (f.eks. Holdren & Armstrong 1980).

### 3.3.2

#### Fosfor i søvandet, delfigur (B)..

Fælles for alle fire søer ses det, at TP i søvandet stiger i løbet af sommeren som resultat af fosforfrigivelsen fra sedimentet.

I sommerhalvåret følger variationerne i søvandets TP stort set variationerne i nettoudvekslingen af fosfor mellem vand og sediment, hvilket kan forklares ved, at søerne

har en ringere vandgennemstrømning om sommeren, hvorfor ændringer i fosforfluxene mellem sediment og vand afspejler sig i søvandets TP.

Den ringe gennemstrømning betyder også, at selvom der frigives meget fosfor fra sedimentet bliver det ikke transporteret ud af sørerne; men det når at blive bundfældet og tilbageholdt i sørerne.

I sommerperioden er ortofosfat til stede i søvandet i koncentrationer, som kun i meget korte perioder kan tænkes at begrænse væksten af plantoplankton.

### 3.3.3

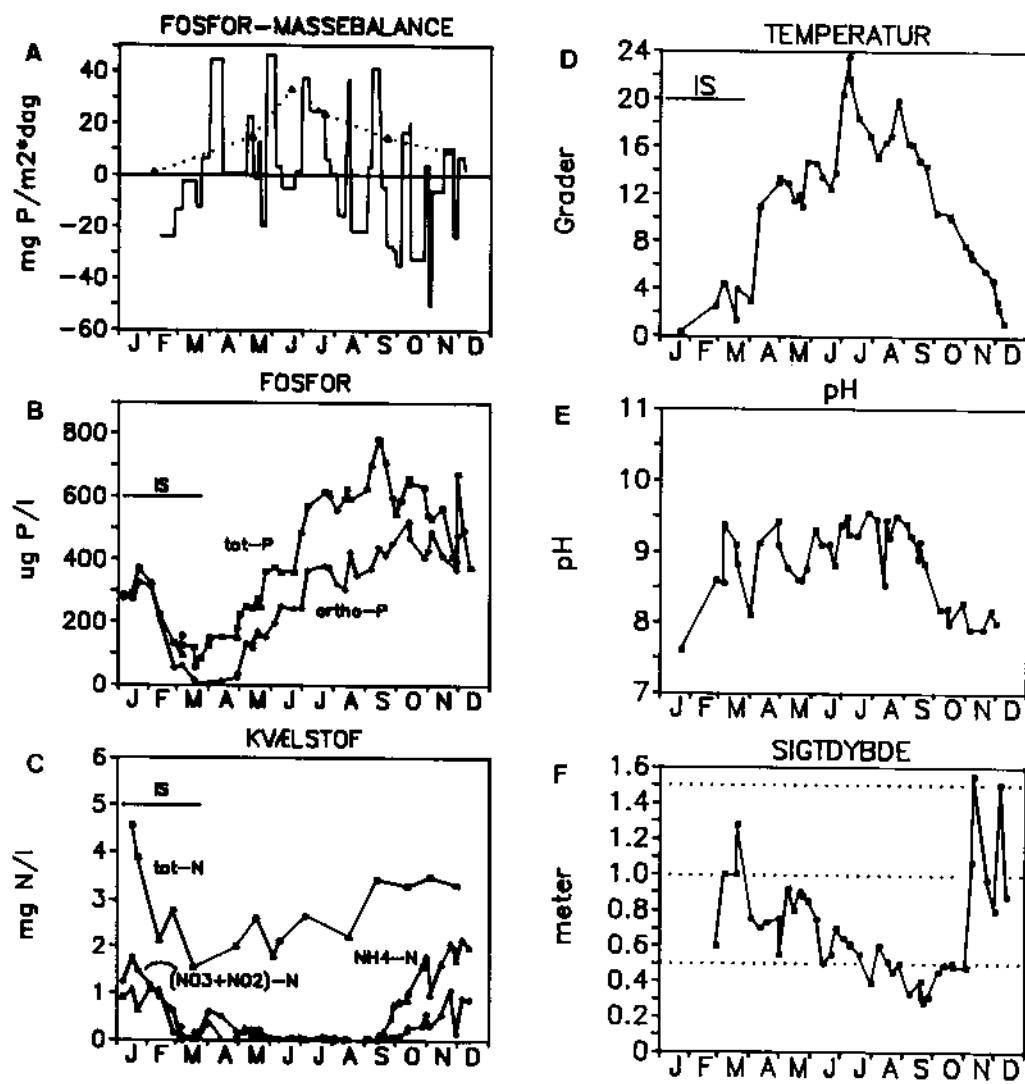
#### Kvælstof i søvandet (C):

Det er karakteristisk, at søvandet har meget høje koncentrationer af kvælstofsalte (især nitrat) om vinteren. Som det diskuteres i kapitel 4 har nitraten en oxiderende virkning på sedimentet, som er af betydningen for den fosfatflux mod sedimentet, der kan iagttares om vinteren. Koncentrationen af kvælstofsalte falder i løbet af foråret og i alle sør undtaget Søbygård Sø optræder der perioder om sommeren, hvor kvælstofsaltene ikke kan måles i vandet. I Arreskov Sø og i Kvind Sø er den "nitratfri" periode sammenfaldende med maximumsværdier for netto intern fosforbelastning. Dette forhold diskuteres også i kapitel 8 i sammenhæng med fytoplanktonsammensætningen (afsnit 3.4) og undersøgelsen af styrende faktorer for fosfatfrigivelsen (kapitel 4).

### 3.3.4

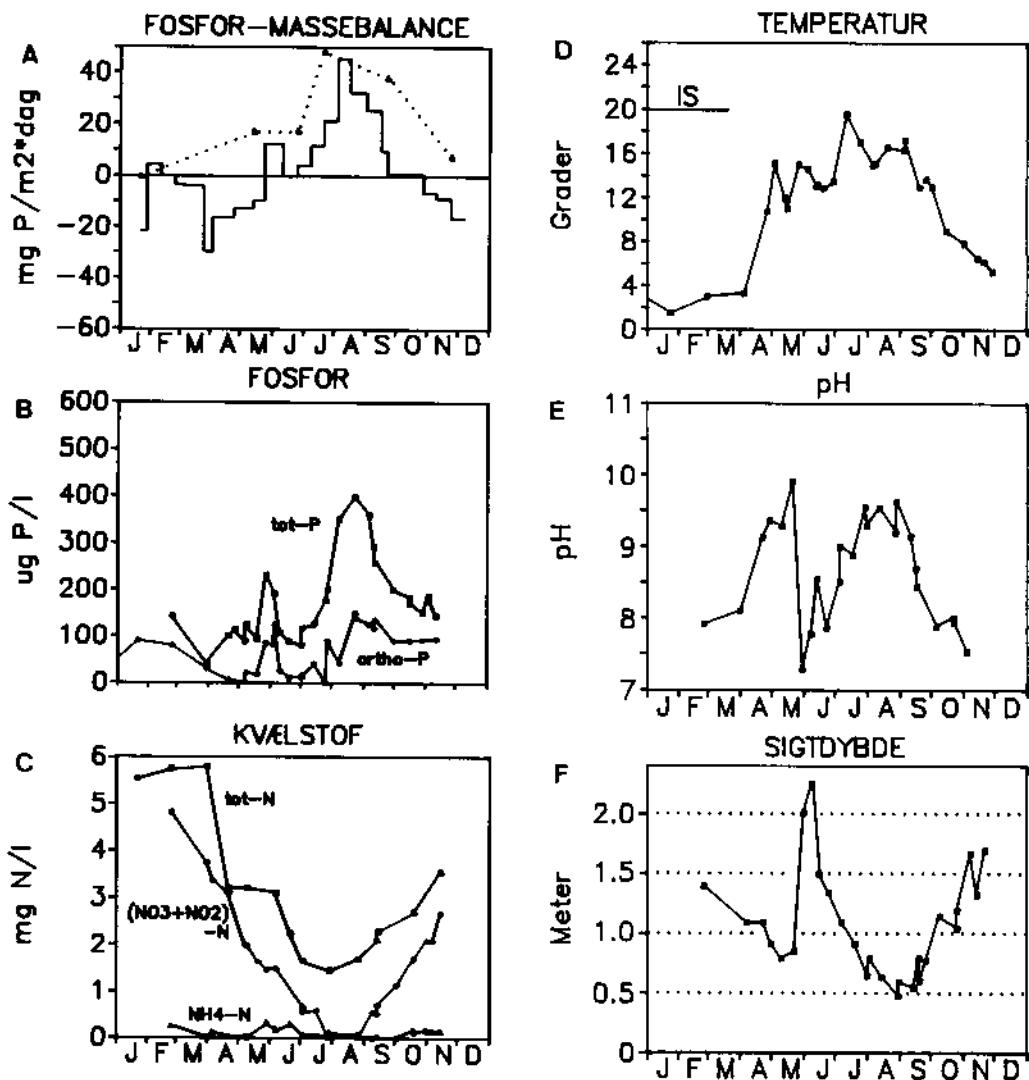
#### Temperatur, (D).

De lavvandede sør reagerer meget hurtigt på ændringer i lufttemperaturen, hvilket illustreres af de store fluktuationer i søvandets temperatur, som kan iagttares i alle fire sør. De højeste temperaturer blev målt i juni, juli og august og som det diskuteres senere er temperaturen en af de mest betydningsfulde faktorer for fosfatfrigivelsen fra sedimentet i de fire sører. Det er således karakteristisk, at de højeste frigivelsesrater i 3 af sørerne blev målt i juli ved 18 gr.C. Kun i Væng Sø måltes den maximale fosfatfrigivelse ved 15 gr.C i september.



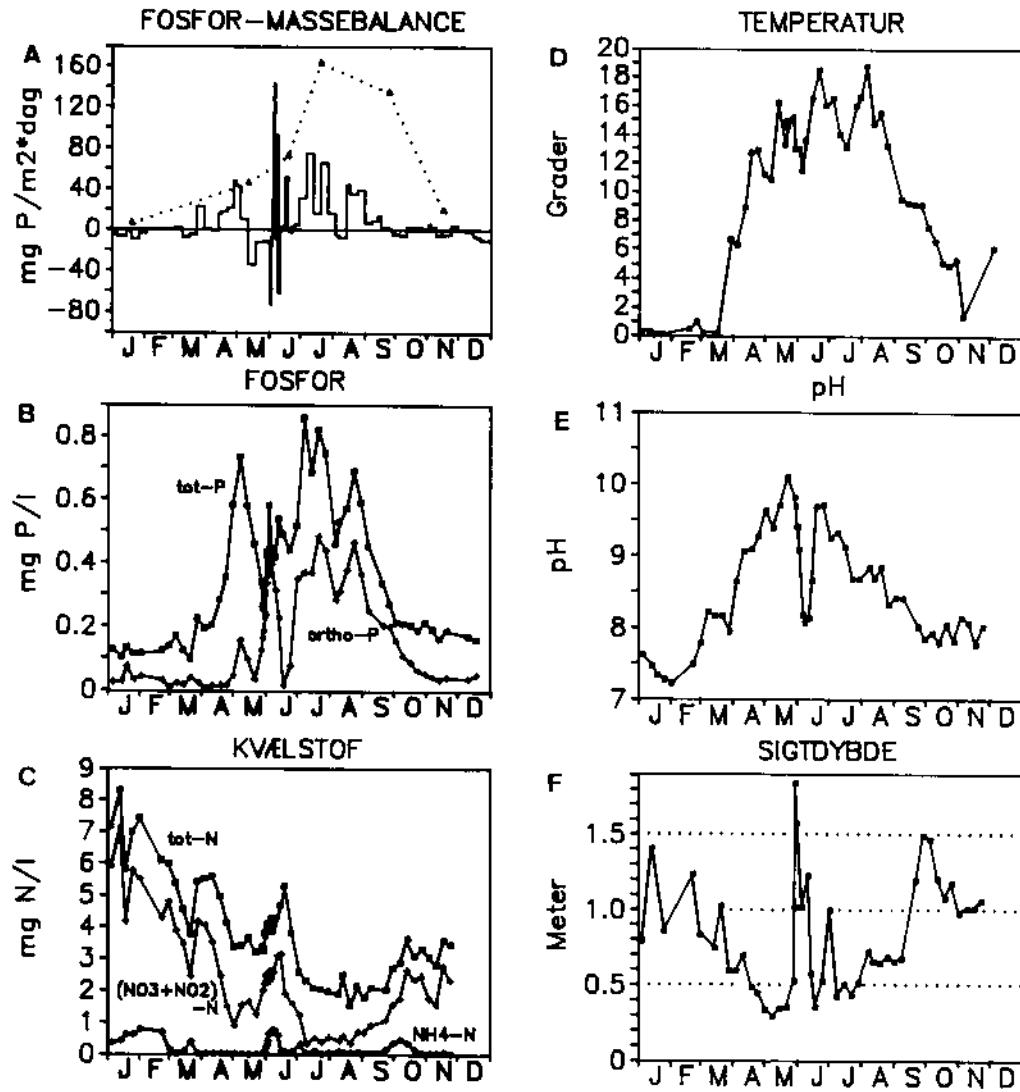
Figur 3.3

Arreskov Sø 1987: (A): Målte fosfatfrigivelsesrater fra sedimentet (trekanter) og beregnet nettoudveksling af fosfor mellem vand og sediment (fuldt optrukken linie). (B): Totalfosfor og opløst ortofosfat i svævet. (C): Total kvælstof og kvælstofsalte i svævet. (D): Vandtemperatur. (E): pH og (F): Secchidybde.



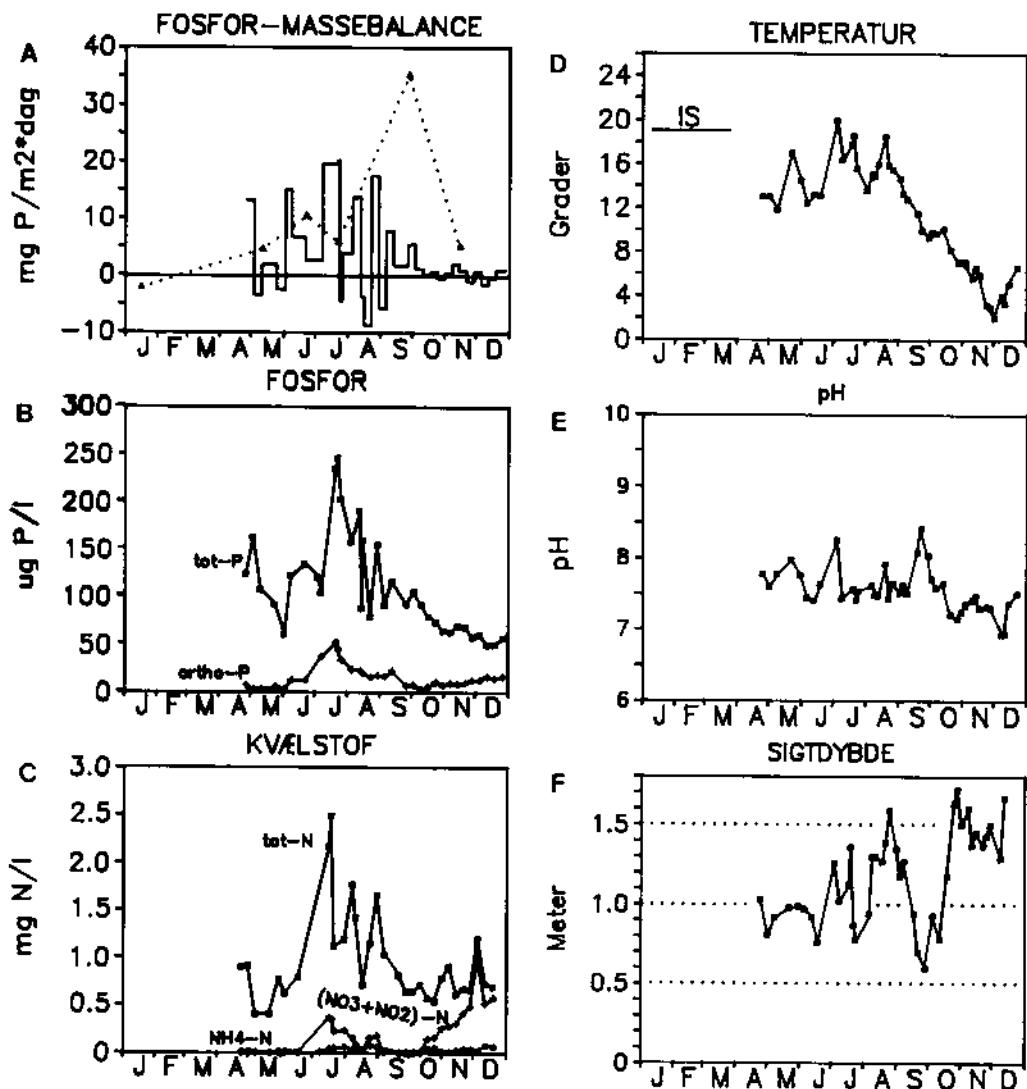
**Figur 3.4**

Kvind Sø 1987: (A): Målte fosfatfrigivelsesrater fra sedimentet (trekanter) og beregnet nettoudveksling af fosfor mellem vand og sediment (fuldt optrukken linie). (B): Totalfosfor og opløst ortofosfat i søvandet. (C): Total kvælstof og kvælstofsalte i søvandet. (D): Vandtemperatur. (E): pH og (F): Secchidybde.



**Figur 3.5**

Søbygård Sø 1987: (A): Målte fosfatfrigivelsesrater fra sedimentet (trekanter) og beregnet nettoudveksling af fosfor mellem vand og sediment (fuldt optrukken linje). (B): Totalfosfor og opløst ortofosfat i sværvandet. (C): Total kvælstof og kvælstofsalte i sværvandet. (D): Vandtemperatur. (E): pH og (F): Secchidybde.



**Figur 3.6**

Væng Sø 1987: (A): Målte fosfatfrigivelsesrater fra sedimentet (trekanter) og beregnet nettoudveksling af fosfor mellem vand og sediment (fuldt optrukken linie). (B): Totalfosfor og opløst ortofosfat i sørsvandet. (C): Total kvælstof og kvælstofsalte i sørsvandet. (D): Vandtemperatur. (E): pH og (F): Secchidybde.

### 3.3.5

#### pH, (E) og secchidybde (F)

pH-værdierne i sværvandet afspejler intensiteten i plantoplanktonets fotosyntese idet, der ved fotosyntesen produceres hydroxylioner, som bevirker at sværvandets pH stiger. Som nævnt i kapitel 1 kan høje pH-værdier i sværvandet føre til øgede fosfatfrigivelsesrater fra oxideret sediment. Det er imidlertid ikke muligt udfra figurerne A og E at drage klare konklusioner om pH-effekten på den interne belastning, idet høje pH værdier også er sammenfaldende med høje værdier af andre styrende faktorer (temperaturer, planktonbiomasser osv.). Den relative betydning af pH som styrende faktor er undersøgt eksperimentelt (kapitel 4) og som det konkluderes udfra den undersøgelse synes kun en ringe del af variationen i fosfatfrigivelsen at kunne forklares udfra pH.

#### Secchidybde og pH afspejler hinanden.

Secchidybden er et udtryk for biomassen af plantoplankton og i perioder uden stort grænningstryk vil der være en positiv sammenhæng mellem biomasse og produktion af plantoplankton. Derfor ser man også, at pH- og secchidybdekurverne i nogen grad er spejlbilleder af hinanden. Mest tydeligt ses det i forbindelse med klarvandsperioden i juni i Kvind Sø og Søbygård Sø.

### 3.4

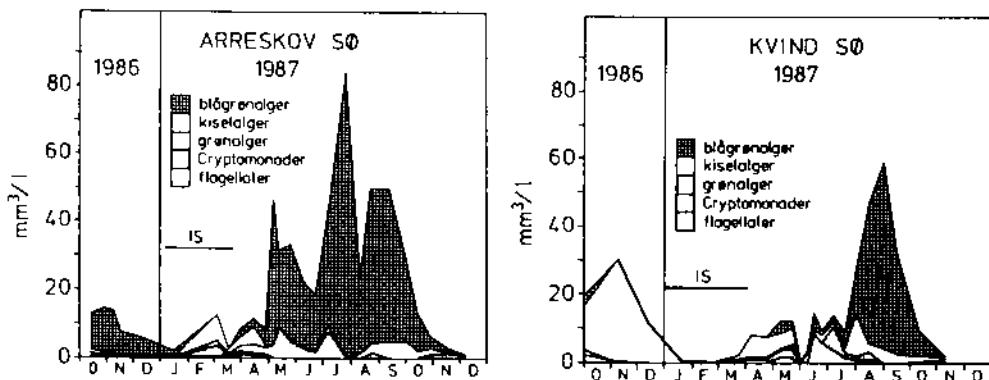
#### Planteplankton i Arreskov Sø og Kvind Sø

Årstidsvariationen i biovolumen af plantoplankton (de 5 vigtigste familier) i Arreskov Sø og Kvind Sø er vist i figur 3.7. Jensen & Andersen (in press) giver en mere uddybende liste over de dominerende slægter; men i øvrigt henvises til rapportens databilag, hvor der findes artslistér, tællinger m.m.. Zooplankton-tællinger findes ligeledes i databilaget.

#### Opblomstring af blågrønalger i begge sører

Karakteristisk for begge sører er, at der i en periode om sommeren er en kraftig dominans af blågrønne alger. I Kvind Sø består disse udelukkende af Microcystis wesenbergii; mens Microcystis aeruginosa dominerer i forsommerven og M. wesenbergii i sensommerven i Arreskov Sø. I juli udgør Aphanizomenon flos aquae 10-15% af blågrønalgeberiomassen i Arreskov Sø. Af disse arter er kun A. fl. aquae kvælstoffikserende; men alligevel er dominansen af de blågrønne alger sammenfaldende med den periode, hvor der ikke kunne måles uorganiske kvælstofsalte i sværvandet (Fig. 3.3-C og 3.4-C). Denne periode er

også karakteriseret af maximale TP koncentrationer (Fig. 3.3-B og 3.4-B) og det er bemærkelsesværdigt, at hver "top" i blågrønalgebiomassen modsvarer af en "top" i den interne nettoflux af fosfor fra sedimentet (Fig. 3.3-A og 3.4-A). Denne problematik diskuteres i afsnit 3.5.



**Figur 3.7**

Biovolumen af de 5 dominerende familier af plantoplankton i Arreskov Sø og Kvind Sø 1986-87. Volumenet af de *Microcystis* spp., som udgør hoveddelen af de blågrønne alger, er korrigeret for vandindhold i kolonierne ved at multiplicere koloniernes volumen med 0.1.

### 3.5 Betydningen af blågrønne alger for nettofluxens størrelse i Arreskov Sø og Kvind Sø.

#### Et kort resumé af publicerede artikler

Lavere sedimentationsrater fører til P-akkumulering i søvandet

Hvis sedimentationen af partikulært fosfor mindskes eller helt ophører skulle den beregnede nettoflux af fosfat fra sedimentet nærme sig den målte bruttoflux. Det er netop, hvad man ser i juni måned i Kvind Sø og Søbygård Sø når der optræder klarvandsperioder (Fig. 3.4 A og F, 3.5 A og F). Dette forhold er også beskrevet af Søndergård et al. (i tryk).

Blågrønalger har lav synkehastighed

Blågrønalger er kendt for periodevis at have meget lave sedimentationsrater eller ligefrem positiv opdrift (f.eks. Takamura & Yasono 1988). En forskydning af forholdet mellem brutto- og nettoflux af fosfor kan derfor ventes ved dominans af blågrønne alger. Hvis man sammenligner figur 3.3A og 3.4A med figur 3.7 ser man, at nettoflux og bruttoflux er næsten

lige store netop når der sker en opvækst af blågrønne alger. Dette fører til en akkumulering af totalfosfor i svændet (Fig. 3.3B og 3.4B) I andre perioder svarer differensen mellem brutto- og nettofluxene meget godt til den sedimentationsrate, som kan estimeres udfra den stående biomasse af partikulært fosfor og de specifikke sedimentationsrater for dominerende planteplanktonarter.

**Har algerne  
fosfor med op  
fra sedimentet?**

Der er imidlertid også den mulighed, at kolonier af blågrønne alger, som stiger op fra sedimentet, medbringer et overskud af polyfosfat (pilen B<sub>2</sub> på Fig. 1.1). En sådan opadrettet transport af partikulært fosfor er bl.a. observeret af Trimbee & Harris (1984).

**IN:TP-forholdet**

Andersen (1982) og Ryding (1985) fandt, at der var et inverset forhold mellem nitrat og totalfosfor (TP) i lavvandede søer. De antog, at nitraten oxiderede overfladesedimentet og derved reducerede fosfatfrigivelsen. Vores resultater (kapitel 4) viser, at dette næppe er forklaringen på det inverse forhold mellem uorganisk kvælstof (IN) og TP. Forklaringen kunne i stedet være, at der i nogle søer var dominans af blågrønne alger og i andre ikke!

**Tidsserier for  
Arreskov Sø og  
Kvind Sø**

De gennemsnitlige sommerkoncentrationer af IN og TP i Arreskov Sø og Kvind Sø (1972-87) udviste samme inverse forhold som der kunne iagttages i sæsonvariationen. I Arreskov Sø er IN faldet og TP er steget og i Kvind Sø er IN steget og TP er faldet (Fig. 3.1). Forklaringen ligger ikke i ændrede fosfortilførsler; men ændrede kvælstoftilførsler kan forklare IN-niveauerne (tabel 3.1). Vi antager, at de ændrede TP-niveauer skyldes ændret varighed af de blågrønne algers opblomstring i de enkelte somre. Disse antagelser er baseret på tidlige plankontællinger i Arreskov Sø samt udviklingen i svændets TN:TP-forhold.

**Kvælstoftill-  
førslen påvir-  
ker fosforba-  
lancen**

Vores resultater antyder, at ændrede kvælstoftilførsler til de lavvandede søer kan have stor betydning for fosforbalancen i søerne. Reduceret kvælstoftilførsel kan betyde, at sedimentets fosforpulje hurtigere bliver udtømt. (Jensen & Andersen - in press, Jensen & Andersen 1989).

#### 4. Styrende faktorer for udvekslingen af fosfat mellem sediment og vand (1): Eksperimentelle undersøgelser af temperatur-, nitrat-, pH- og sulfateffekten.

##### 4.1 Indledning

Naturlige sedimenter er heterogene

I talrige studier af fluxe over sedimentoverflader har man brugt at inkubere uforstyrrede sedimentkerner i laboratorie-systemer. Et problem ved denne metode er, at sedimentets heterogenitet ofte er så stor, at effekten af forskellige forsøgsbetingelser ikke kan registreres p.g.a. "støj". En væsentlig kilde til denne "støj" er tilstedevarelsen af chironomider i sedimentkernerne (jvnf. kapitel 7). Ved at forenkle inkubationssystemet så vi undgår at bruge peristaltiske pumper, har vi kunnet inkubere mange sedimentsøjler fuldstændigt parallelt (jvnf. 2.4.2). Vi har herved opnået (1): at vi kan vurdere en effekt i forhold til standard afvigelsen på 5 sedimentkerner og (2): at alle sedimentkerner i et system har fået nøjagtig samme behandling, hvorved vi kan sammenligne sørerne indbyrdes.

Oversigt over de gennemførte forsøg.

Med denne teknik har vi gennemført en række forsøg i de fire NPO-søer, hvor betydningen af "styrende faktorer" er blevet undersøgt en ad gangen:

- Temperatureffekten blev undersøgt i november 1987 (afsnit 4.3).
- Nitrateffekten blev undersøgt i januar, maj og september 1987 (afsnit 4.4).
- pH-effekten blev undersøgt i juni 1987 og juni 1988. pH-effekten på sorptionskinetikken blev undersøgt i maj 1987.
- Sulfateffekten blev undersøgt i maj 1987 og i juni 1988 (afsnit 4.6).

Også sorptions-kinetik

##### 4.2 Sedimentets oxiderede overfladelag

Visuel bedøm-  
melse af sedi-  
mentet

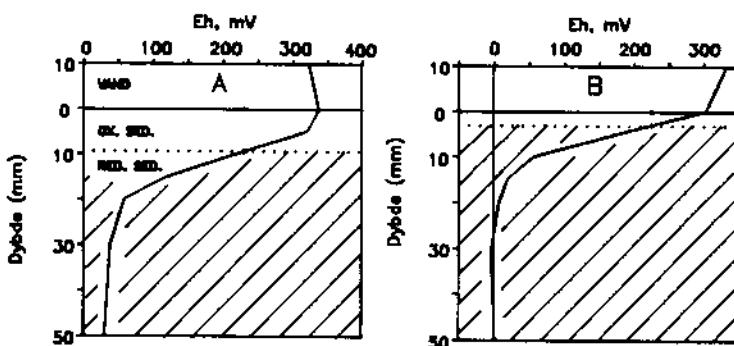
Som nævnt i kapitel 1 har det oxiderede overfladelag i sedimentet stor betydning for tilbageholdelsen af fosfat. Da flere af de testede faktorer (temperatur, nitrat, tilsætning af seston) påvirker redoxforholdene i sedimentet har vi, for at vurdere denne effekt, målt tykkelsen af det oxiderede (lyse) overfladelag i hver sedimentkerne ved afslutningen af et forsøg.

## Hvad ser man?

Med denne metode bestemmer man grænsen mellem det lag, hvor jern er på oxidationstrin 3 (i form af rødbrunne ferrihydroxider) og hvor jern er på oxidationstrin 2 (i form af sorte ferrosulfider).

## Sammenligning med redoxprofilen

Metoden er hurtig og kan gennemføres uden at forstyrre sedimentets lagdeling. En sammenligning af metoden med den traditionelle måling af redoxprofilen viste, at der var stor reproducerebarhed i denne visuelle vurdering af oxidationsforholdene. I 30 sedimentsøjler fra Arreskov Sø, Kvind Sø og Væng Sø gik grænsen mellem lyst og mørkt sediment ved et redoxpotentiale på  $230 \pm 6$  mV (bestemt ved lineær interpolation) og ved den største redoxgradienten. I figur 4.1 gives to eksempler på denne sammenligning. I Søbygård Sø var begge målemetoder behæftet med større usikkerhed p.g.a. en større chironomidtæthed i denne sø.



**Figur 4.1**  
Redoxprofil og tykkelse af det lyse (oxiderede) overfladelag i to grupper af sedimentkerner fra Arreskov Sø. Gennemsnit af 5 kerner inkuberet ved 7 gr.C. (A) og 21 gr.C. (B) i 42 dage.

## 4.3 Temperatureffekt

### 4.3.1

#### Metode

Temperatureffekten på sedimentets fosfatfrigivelse og iltoptag i de fire NPO-søer blev studeret i tre parallelle systemer (jvnf. afsnit 2.4.2), hvor temperaturen var henholdsvis 7, 14 og 21 gr.C. (tabel 4.1).

**Tabel 4.1.** Vandets sammensætning i de tre inkubationssystemer. Sulfat- og bikarbonatkonzentrationerne var henholdsvis 0.6 mM og 2 mM.

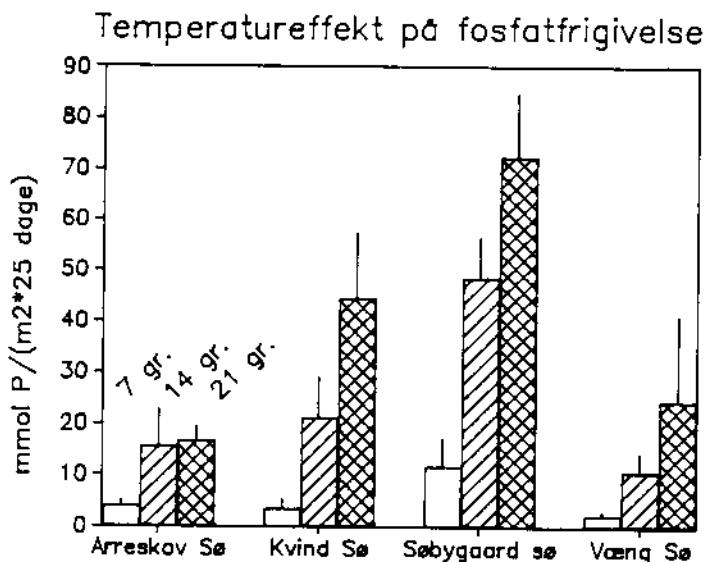
System	Temp.	pH	Fosfat	Nitrat	Ammonium
1	7	8.0	0.65 uM	34 uM	10 uM
2	14	8.0	0.65 uM	34 uM	10 uM
3	21	8.0	0.65 uM	34 uM	10 uM

#### 4.3.2

#### Resultater og diskussion

Temperaturen havde en markant effekt på fosfatfrigivelsen fra alle fire søsedimenter. Efter 7 dages inkubation var der for hver af søgerne signifikante forskelle på frigivelsesraterne i de tre systemer ( $p<0.05$ ). De kumulerede fosfatfrigivelser over 25 dage viste også en tydelig temperatureffekt; men i Arreskov Sø var der ikke længere signifikant forskel på system 2 og 3 (Fig. 4.2). Dette kan skyldes, at puljen af let nedbrydeligt organisk stof var opbrugt inden 25 dage (jvnf. kapitel 6).

**Figur 4.2**  
Temperatur-  
effekt på fos-  
fatfrigivelsen  
i 25 dage i de  
4 NPO-søer. De  
lodrette linier  
angiver standard  
afvigelsen.



$Q_{10}$

Temperatureffekten beskrives ofte ved en  $Q_{10}$ -værdi, som angiver, hvor mange gange en rate  $\frac{dR}{dT}$  forøges ved en temperaturstigning ( $T_2 - T_1$ ) på 10 grader.

$$\log Q_{10} = 10 * \log(R_2/R_1) / (T_2 - T_1)$$

En  $Q_{10}$ -værdi på 2 svarer til, at en proceshastighed fordobles ved 10 graders temperaturstigning og denne værdi antages normalt at gælde for f.eks. aerobe respirationsprocesser.

Forskellig effekt på ilt-optag og fosfatfrigivelse.

I tabel 4.2 har vi sammenlignet  $Q_{10}$ -værdier for sedimenternes fosfatfrigivelse med  $Q_{10}$ -værdierne for sedimentets iltoptag. Der var også en signifikant effekt på iltoptaget; men stigningen i iltoptaget med temperaturen var ikke så stor som stigningen i fosfatfrigivelsen.  $Q_{10}$  for iltoptaget var - som gennemsnit for alle fire søer i de to temperaturintervaller - 2.1, mens  $Q_{10}$  for fosfatfrigivelsen tilsvarende var 4.9.

Tabel 4.2.  $Q_{10}$ -værdier for sedimentets iltoptag og fosfatfrigivelse over 25 dage i de fire NPO-søer.

	Temp. interval	Arreskov	Kvind	Søbygård	Væng
		Sø	Sø	Sø	Sø
ILT	7-14	3.9	1.6	3.6	1.6
	14-21	1.6	1.9	1.2	1.7
FOSFAT	7-14	5.9	10.7	6.6	7.3
	14-21	1.1	2.8	1.7	3.0

C:P-støkiometri i fluxene

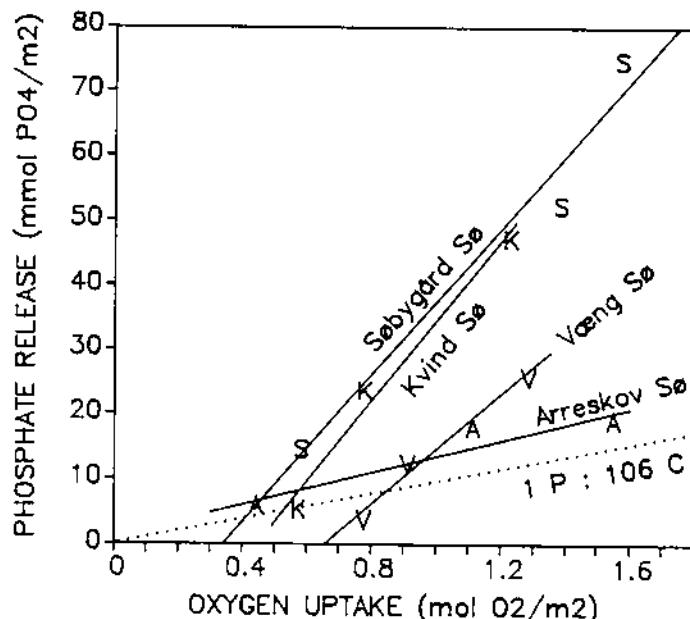
En anden måde at illustrere forskellen i temperatureffekten på iltoptaget og fosfatfrigivelsen er ved at sammenligne fluxenes størrelse på molær basis (Fig. 4.3). Hvis fosfatfluxen havde sin oprindelse i den direkte mineralisering af frisk organisk planktonmateriale ville man forvente en sammenhæng mellem ilt- og fosfatfluxen svarende til den stippled linie på figur 4.3. Denne linie er tegnet under antagelse af (1), at planktonet har et støkiometrisk forhold mellem fosfor og kulstof på 1P:106C (Redfield ratioen) og (2) at der oxideres et mol kulstof for hvert mol  $O_2$  der forbruges i sedimentet.

Man bemærker, at Arreskov Sø næsten følger dette forhold, mens den stejle hældning på regressionslinien for de tre andre søer illustrerer, at der frigives mere fosfor ved høje mineraliseringsrater end, hvad der kan forklares udfra aerob mineralisering af frisk organisk stof.

En del af forklaringen på dette forhold kan ligge i, at de anaerobe processers andel i mineraliseringen stiger uden at dette kan spores i iltoptaget. Det kunne være tilfældet ved denitrifikation og ferrijernsrespiration. En anden del af forklaringen er, at redoxforholdene forringes ved høje mineraliseringsrater, hvorved

fosfat friges fra den jernbundne fosforpulje, hvilket stemmer godt overens med, at effekten er mindst i Arreskov Sø, hvor den jernbundne fosforpulje er ubetydelig (jvnf. Fig. 3.2).

**Figur 4.3**  
Sedimentets  
fosfatafgivelse  
på 25 dage  
afbildede mod  
iltoptaget for  
de 4 NPO-søer.  
Den stiplede  
linie angiver  
et teoretisk  
støkiometrisk  
forhold mellem  
fluxene svaren-  
de til C:P-for-  
holdet i frisk  
planteplankton.



Det oxiderede  
overfladelag  
påvirkes af  
temperaturen

Iagttagelse af det oxiderede overfladelag efter 42 dages inkubation ved de tre forskellige temperaturer viser tydeligt, at der er en markant effekt af højere temperatur på tykkelsen af dette lag (tabel 4.3). Det bekræfter den hypotese, at den øgede fosforflux relativt til iltfluxen ved høje temperaturer skyldes en redoxbetinget frigivelse af fosfat.

**Tabel 4.3.** Tykkelsen af det oxiderede overfladelag (gennemsnit af 5 sedimentkerner) efter 42 dages inkubation ved 3 forskellige temperaturer. Standard afvigelser er ikke angivet; men alle forskelle indenfor den enkelte sø er signifikante ( $p < 0.05$ ) undtaget forskellen mellem 14 og 21 gr.C. i Væng Sø.

System	Temp. gr.C.	Arreskov Sø	Kvind Sø	Søbygård Sø	Væng Sø
1	7	9.4	10.0	12.4	9.6 mm
2	14	6.8	7.2	10.8	7.6 mm
3	21	3.0	4.8	7.2	7.0 mm

Andres resultater.

Størst temperatureffekt om sommeren

Lavere  $Q_{10}$  i steriliseret sediment.

Højere  $Q_{10}$  i aerobe end i anaerobe sedimentkerner

Konklusion på temperatur-effekten.

Ved målinger af aerob fosforfrigivelse fra uforstyrrede sedimentkerner fra den lavvandede Loosdrecht sø (Holland) har Boers (1986) fundet en temperaturafhængighed med  $Q_{10}$  på 3 som års gennemsnit; men fandt også, at temperatureffekten var størst om sommeren. Som forklaring på dette antog Boers, at en større tilførsel af organisk materiale til sedimentet om sommeren bevirke, at redoxforholdene var mere følsomme for temperaturpåvirkning. Sinke (1988) har fundet værdier fra 2.7 til 4.8 i samme sø. Sinke udførte tilsvarende eksperimenter med steriliserede sedimentkerner og fandt her en  $Q_{10}$ -værdi på 1.4. Kamp-Nielsen fandt i Esrom Sø, at mens anaerob fosfatfrigivelse var temperaturafhængig med en  $Q_{10}$  på 2.0-2.9, så var  $Q_{10}$ -værdien for aerob fosfatfrigivelse i parallele forsøg omkring 12 (beregnet ud fra Fig. 16 i Boström et al. 1982). Kamp-Nielsen fandt, at ved temperaturer over 17 gr.C. var frigivelsesraterne lige store fra anaerobe og aerobe sedimentkerner. Som forklaring på denne observation foreslog Kamp-Nielsen, at høje mineraliseringshastigheder ved høje temperaturer førte til nedbrydning af det oxiderede overfladelag i sedimentkernerne.

De ovennævnte observationer viser samstemmende med vores resultater, at fosforfrigivelsen fra aerobe sedimentoverflader accellereres forholdsvis meget ved temperaturstigning p.g.a. den indirekte effekt på redoxforholdene i sedimentet. Effekten er betinget af, at der er tilstrækkeligt frisk organisk materiale til mineraliseringsprocessen og at sedimentet har en redoxfølsomt bundet fosforpulje. Disse betingelser er opfyldt i de fleste lavvandede, eutrofe sører og temperatureffekten på fosforfrigivelsen må derfor generelt antages, at være større i denne søtype end i oligotrofe sører eller lagdelte sører, hvor temperaturen og temperaturudsvingene ofte er lavere og hvor hypolimnion ofte er anoxisk.

#### 4.4 Nitrateffekt

##### 4.4.1

##### Metode

Nitratkoncentrationens betydning for fosfatfluxen over sedimentoverfladen blev undersøgt på tre årstider ved betingelser, som afspejlede forholdene i sørerne (tabel 4.4)

Tabel 4.4. Vandets sammensætning i inkubations-systemerne ved de tre "nitrateffekt"-forsøg. Sulfat- og bikarbonatkonzentrationerne var henholdsvis 0.6 mM og 2 mM.

Januar 1987:

	System	Temp.	pH	Fosfat	Nitrat	Ammonium
1		5	8.0	3.2 uM	7 uM	10 uM
2		5	8.0	3.2 uM	178 uM	10 uM

Maj 1987:

	System	Temp.	pH	Fosfat	Nitrat	Ammonium
1		15	9.0	0 uM	0 uM	10 uM
2		15	9.0	0 uM	70 uM	10 uM

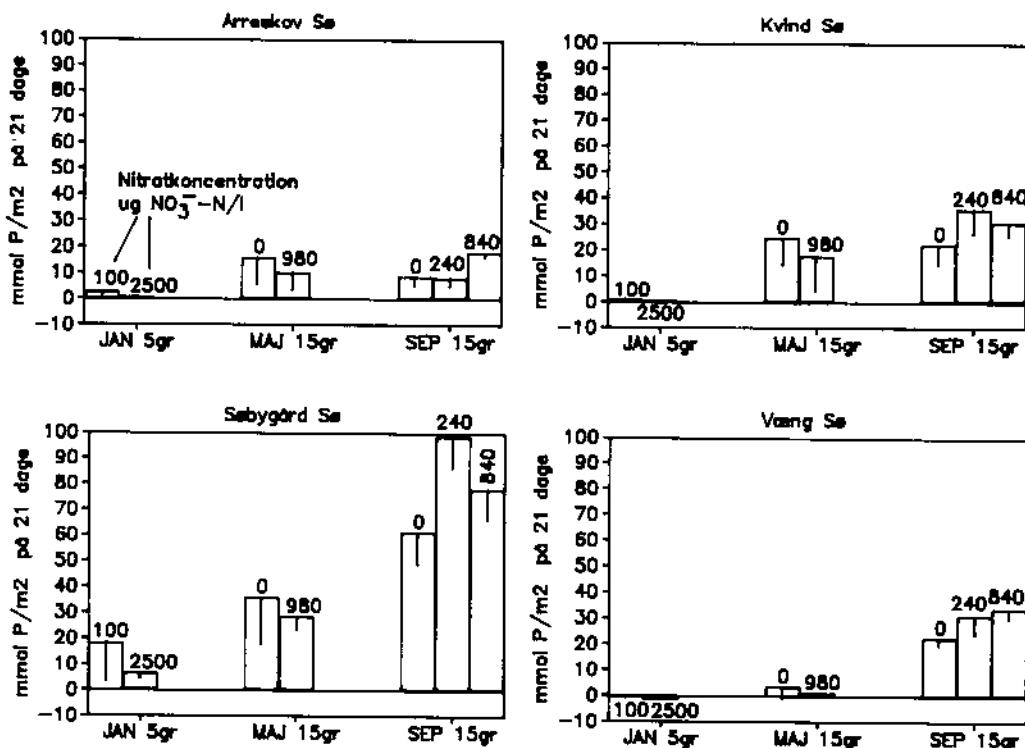
September 1987:

	System	Temp.	pH	Fosfat	Nitrat	Ammonium
1		15	8.5	0.65 uM	0 uM	10 uM
2		15	8.5	0.65 uM	17 uM	10 uM
3		15	8.5	0.65 uM	60 uM	10 uM

##### 4.4.2

##### Resultater og diskussion

Resultaterne af de tre forsøg er præsenteret i figur 4.4. I januar, hvor nitratkoncentrationen var høj i alle fire sører (jvnf. delfigur c på figurene 3.3 - 3.6), medførte en sænkning af nitratkoncentrationen fra 178 til 7 uM at fosfatfrigivelsen steg signifikant ( $p<0.05$ ) i alle sørerne. I maj kunne samme tendens registreres ved en koncentrationssænkning fra 70 til 0 uM nitrat; men effekten var ikke signifikant i nogen af sørerne. I september, hvor nitraten var opbrugt i alle sørerne, medførte en øget nitratkoncentration (til enten 17 eller 60 uM) en signifikant øget fosfatfrigivelse i alle fire sører. I Arreskov Sø kom denne effekt først ved den højeste nitratkoncentration; men i de tre andre sører kunne effekten ses ved 17 uM nitrat i vandet. I Søbygård Sø skete der et signifikant fald i fosfatfrigivelsen ved yderligere koncentrationsstigning fra 17 til 60 uM nitrat.



Figur 4.4

Effekten af vandets nitratkonzcentration på fosfatfrigivelsen fra uforstyrrede sediment-kerner på tre årstider i de fire NPO-søer. Søjlerne angiver den kumulerede fosfatfrigivelse i 21 dage efter forsøgsstart. De lodrette linier angiver standardafvigelsen på de 5 parallelle sedimentkerner i hvert system. Tallene over søjlerne angiver vandets nitratkonzcentration i ug N/l. Se teksten m.h.t. signifikans af effekterne.

Tykelsen af det oxiderede overfladelag:  
Januar

Maj

September

At en høj nitratkonzcentration i januar mindskede sedimenternes fosfatafgivelse var uden tvivl et resultat af nitratenes oxiderende effekt; idet det oxiderede overfladelag var tykkere ved den høje nitratkonzcentration end ved den lave (tabel 4.5). Denne effekt var signifikant ( $p<0.025$ ) i alle søerne. I maj var tendensen igen den samme; men kun i Kvind Sø var det oxiderede lag signifikant tykkere ved den høje nitratkonzcentration. I september så vi i alle fire søer det mønster, at en svag nitrattilsætning (17  $\mu\text{M}$  i system 2) førte til mindsket tykkelse af det oxiderede overfladelag (effekten var signifikant i Kvind Sø og Væng Sø), mens en kraftig nitrattilsætning (60  $\mu\text{M}$  i system 3) førte til øget tykkelse af det oxiderede overfladelag (signifikant i alle fire søer).

Tabel 4.5. Tykkelsen af det oxiderede overfladelag efter inkubation ved forskellige nitratkoncentrationer.

Januar 1987:

	System Nitrat	Arreskov	Kvind	Søbygård	Væng	
	uM.	Sø	Sø	Sø	Sø	
1	7	10.6	8.6	8.6	9.3	mm
2	178	16.8	13.6	15.6	18.2	mm

Maj 1987:

	System Nitrat	Arreskov	Kvind	Søbygård	Væng	
	uM.	Sø	Sø	Sø	Sø	
1	0	5.6	5.6	7.8	6.2	mm
2	70	6.6	6.6	8.8	7.0	mm

September 1987:

	System Nitrat	Arreskov	Kvind	Søbygård	Væng	
	uM.	Sø	Sø	Sø	Sø	
1	0	4.0	6.6	7.4	7.2	mm
2	17	3.0	4.8	6.0	2.4	mm
3	60	5.8	8.0	10.4	9.4	mm

Nitrats oxiderende virkning

Resultaterne viser, at forhøjede nitratkoncentrationer har en oxiderende effekt på sedimentet, som om vinteren og i foråret er i stand til at mindske fosfatfrigivelsen. Dette er i overensstemmelse med teorien om, at nitrat "holder jern på oxidationstrinnet 3". Om efteråret, hvor sørerne i en lang periode har været uden uorganiske kvalstofsalte i svævet, har nitraten formodentlig en stimulerende effekt på mineraliseringen af organisk stof i sedimentet, hvilket resulterer i øget fosfatfrigivelse. Denne effekt ses endda også i system 3, hvor det lyse overfladelag øgedes p.g.a. den oxiderende effekt!

Nitrats stimulerende virkning

Resultaterne viser, at forhøjede nitratkoncentrationer har en stimulerende effekt på mineraliseringen af organisk stof i sedimentet, hvilket resulterer i øget fosfatfrigivelse. Denne effekt ses endda også i system 3, hvor det lyse overfladelag øgedes p.g.a. den oxiderende effekt!

Andres resultater.

Jensen & Andersen (1982) fandt, i et forsøg, hvor Arreskov Sø sedimentet blev tilsat noget kvalstoffattigt tagrørsmateriale, at øgede nitratkoncentrationer accelererede mineraliseringshastigheden, idet både iltoptaget, nitratoptaget og sulfat-reduktionsraten steg med stigende nitrat-koncentration. Jansson (1987) og Bostrom et al. (1988) finder i lighed med vore resultater, at nitrat er i stand til at stimulere sedimentets fosfatfrigivelse når svævet i en periode har været uden nitrat. Jansson (1986) har gjort den iagttagelse for anaerobe sedimenter, at den forøgede fosfatfrigivelse "sætter ind" når nitraten er opbrugt og at størrelsen af fosfatfluxen korrelerer positivt med størrelsen af den forudgående nitrattilsætning. I vores septemberforsøg så vi - i modsætning til Jansson - en øjeblikkelig øgning af fosfatfrigivelsen i

systemerne 2 og 3 og i system 3 var nitratkoncentrationen stadig høj ved afslutningen af forsøget.

#### Konklusion på nitrateffekten

Nitrat påvirker fosfatfrigivelsen fra sedimentet i lavvandede, eutrofe sører på to måder: Dels har nitraten en oxiderende effekt på sedimentet, som øger sedimentets evne til at sorbere fosfat, dels kan nitraten i nogle tilfælde stimulere mineraliseringen af det organiske stof, hvad der fører til direkte frigivelse af fosfor og samtidig modvirker den oxiderende virkning. Denne effekt er øjensynlig dominerende om sensommeren, hvor niveauet af uorganiske kvælstofsalte er lavt i sørerne. Resultaterne af disse forsøg har stor betydning for tolkningen af sæsonvariationen i den interne netto belastning af fosfor i de fire sører (afsnit 3.5 og kapitel 8).

### 4.5 pH-effekt

#### 4.5.1

##### Forsøg med uforstyrrede sedimentkerner

Der blev gennemført to forsøgsserier med pH-effekt på fosfatfrigivelsen fra uforstyrrede sedimentkerner. I juni 1987 blev fosfatfrigivelsen over 21 dage målt ved tre forskellige pH-niveauer og i juli 1988 ved to forskellige niveauer (tabel 4.6). I juli 1988 blev forsøget udført på den måde, at sedimentkernerne i de to systemer først blev inkuberet ved samme pH i 8 dage og derefter blev pH hævet til 9.5 i det ene system. Denne teknik blev brugt for at se, om de to grupper af sedimentkerner fra hver sør "opførte sig ens" under ens inkubationsbetingelser.

##### Forsøg med totalopblandet sediment

I maj 1987 blev fosfat-sorptionskinetikken for overfladesedimentet bestemt ved tre forskellige pH-værdier. Det lykkedes ikke at få tilstrækkelig sikker bestemmelse af sorptionskinetikken for Søbygård Sø i dette eksperiment; hvorfor vi kun bringer resultaterne fra de andre sører.

**Tabel 4.6.** Inkubationsbetingelser ved de to pH-eksperimenter.

Juni 1987:

System	Temp.	pH	Fosfat	Nitrat	Ammonium
1	15	8.1	0	16 uM	10 uM
2	15	8.9	0	16 uM	10 uM
3	15	9.7	0	16 uM	10 uM

Juli 1988:

Sys.	Dag	Temp.	pH	Fosfat	Nitrat	Ammonium
1	0-25	19	8.3	0	0	10 uM
2	0-8	19	8.3	0	0	10 uM
2	8-25	19	9.5	0	0	10 uM

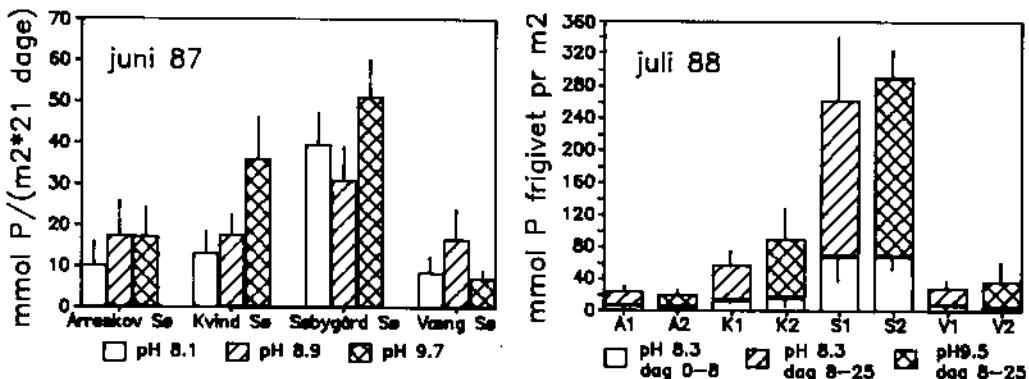
#### 4.5.2

#### Resultater og diskussion

Arreskov Sø

I Arreskov Sø var der ikke i nogen af forsøgene en signifikant effekt af pH på fosfatfrigivelsen (Fig. 4.5). Der var imidlertid en pH-effekt på sorptionskinetikken; idet cross-over koncentrationen ( $C_e^0$ ) steg ved pH-stigning fra 8.9 til 9.7 og bufferkapaciteten (LAK) faldt med stigende pH (Fig. 4.6 a og b).

#### pH EFFEKT PÅ FOSFATFRIGIVELSE



**Figur 4.5**

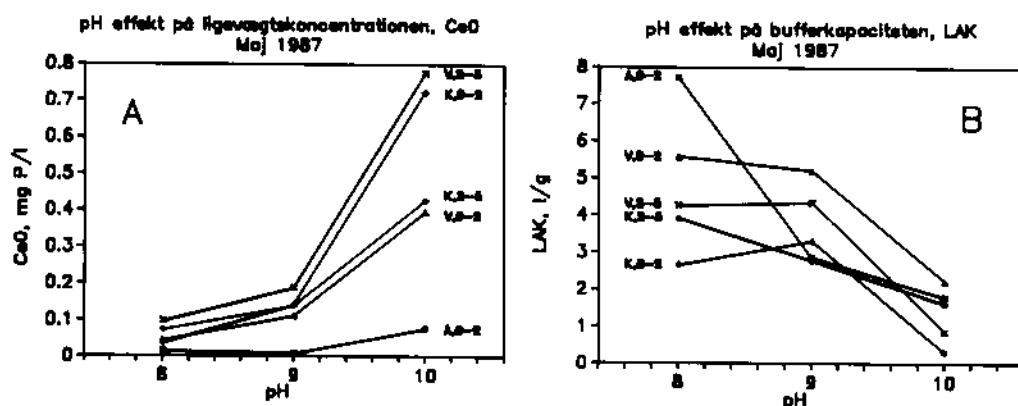
Effekten af vandets pH på fosfatfrigivelsen fra uforstyrrede sedimentkerner i to sommersituitioner i de fire NPO-søer. Søjlehøjden angiver fosfatfrigivelsen over 21 dage, de lodrette linier angiver standard afvigelsen ved 5 parallelle sedimentkerner i hver gruppe. Gruppenavnene A1, K2 osv. i figur 4.5b refererer til sønavn og nummer på inkubationssystemet (jvnf. tabel 4.6).

Kvind Sø

I Kvind Sø fandt vi en signifikant øget fosfatfrigivelse ved pH-værdier over 9. I overensstemmelse hermed fandt vi også, at sorptionskinetikken blev kraftigt påvirket i området fra pH 9 til pH 10 - men kun ubetydeligt i området pH 8 til pH 9. Fosfatfrigivelsen fra Søbygård Sø sedimentet viste stort set samme respons på øget pH som Kvind Sø sedimentet. Fosfatfrigivelsen ved pH 9.7 i juli 1987 var signifikant større end ved pH 8.1 og 8.9. Der var ingen signifikant effekt i juli 1988. Tidligere forsøg med totalopblandet sediment fra Søbygård Sø har vist samme pH-effekt på sorptionsevnen, som vi finder i Kvind Sø og Væng Sø (Søndergård 1987). I Væng Sø ses igen en tydelig pH-effekt på sorptionskinetikken i intervallet pH 9-10 (Fig. 4.6 a og b); men dette "slår ikke igennem" på fosfatfrigivelsen fra de uforstyrrede sedimentkerner. Forskellen på to grupper af 5 sedimentkerner fra Væng Sø var øjensynlig større end pH-effekten på fosfatfrigivelsen!

Søbygård Sø

Væng Sø



Figur 4.6

pH-betingede ændringer i cross-over koncentration ( $C_e$ ) (a) og bufferkapacitet (LAK) (b) ved bestemmelse af sorptionskinetikken på tre af NPO-søerne (maj 1987). Se afsnit 2.4.3 for forklaring af termerne.

Hvorfor er pH-effekten ikke mere tydelig?

Den jernbundne fosforpulje er allerede opløst p.g.a. reducerede forhold!

Når pH-effekten på fosfatfrigivelsen fra forstyrrede sedimentkerner generelt er svag (insignifikant) kan det skyldes, at vi udfører eksperimenterne i højsommeren, hvor puljen af oxideret, reaktivt jern formodentlig er på sit minimum p.g.a. dårlige oxidationsforhold i sedimentet. pH-effekten, som skyldes en ionbytning mellem hydroxylioner og fosfationer på overfladen af ferrihydroxider (jvnf. kapitel 1), har derfor en mindre P-pulje at virke på i et mere reduceret sediment. Samtidig er der en

høj frigivelse af fosfat fra nedbrydningen af organisk stof, som giver en høj "baggrundsværdi" at teste pH-effekten på. Dette var især tilfældet i juli 1988. Ved forsøg med totalopblandet sediment holder man hele sedimentsuspensionen fuldt oxideret i 24 timer. Indenfor denne periode kan der ske en stor nydannelse af reaktivt jern fra reducerede puljer, hvilket bevirker, at pH-effekten på sorptionskinetikken bliver meget mere tydelig.

At pH-effekten er svagere i Arreskov Sø end i de andre sører skyldes formodentlig, at den jernbundne fosforpulje er betydeligt mindre i Arreskov Sø end i de andre sører.

#### Konklusion på pH-effekten

pH i de eksperimentelle systemer blev varieret indenfor det område, som præger de lavvandede, eutrofe sører i sommerhalvåret; men effekten af pH på fosfatfrigivelsen fra uforstyrrede sedimentkerner var i mange tilfælde insignifikant. I forsøg med suspenderet sediment under oxiderede forhold kunne vi se en tydelig forringelse af sedimentets evne til at sorbere fosfat ved pH stigende fra 9 til 10. Forsøgene med suspenderet sediment kan sammenlignes med den situation i sørerne, hvor overfladesedimentet er resuspendederet p.g.a. kraftig vind og i hvert fald under sådanne forhold må det forventes, at pH-niveauet har stor betydning for den interne fosforbelastning.

#### pH-effekten i Væng Sø

Årsvariationen i brutto frigivelsen af fosfat fra sedimentet i Væng Sø korrelerede positivt med sørvandets pH (kapitel 3); hvilket stemmer dårligt overens med den svage pH-effekt, som er observeret i disse forsøg. En rimelig forklaring på denne divergens kan være, at høje pH-værdier skyldes høj primærproduktionsrate og at sedimentationen af frisk organisk materiale derfor er højere under høje pH-værdier. Secchidybden i Væng Sø synes at bekræfte dette, idet den nærmest et et spejlbillede af pH-værdien (Fig. 3.6 E og F). Forskellen på brutto- og nettofrigivelsen er også størst ved høj pH, hvilket antyder at sedimentationen er kraftigere her. Det man observerer ved målingen i september 87 er måske derfor en øget fosfatfrigivelse fra sedimentet, som skyldes højere mineraliseringsrate og dårligere oxidationsforhold.

#### 4.6 Sulfateffekt

I to forsøg med uforstyrrede sedimentkerner (maj 1987 og juli 1988) blev sulfatkonzcentrationen i vandet varieret betydeligt mere end årsvariationen i søerne. Det lykkedes ikke i nogen af disse forsøg at påvise en signifikant sulfateffekt på fosfatfrigivelsen over 21 dage. Vi konkluderer derfor, at ændringer i søernes sulfatkonzcentration ikke har nogen større betydning for årsvariationen i den interne fosforbelastning i søerne. Det udelukker imidlertid ikke, at en permanent forhøjet sulfatkonzcentration i et ferskvandssystem kan medfører ændringer i jerndiagenesen som har betydning for puljen af reaktivt jern i overfladesedimentet og dermed sedimentets sorptionsegenskaber. Berner (1980) beskriver forskellen i jerndiagenese i ferskvands- og marine sedimentter.

#### 4.7 Konklusion

Af de fysisk-kemiske faktorer i sværvandet, som vi testede i disse eksperimenter, var temperaturen tydeligt den mest betydningsfulde faktor for fosfatfrigivelsen fra uforstyrrede sedimentkerner. Denne effekt skyldtes, at der ved øgede temperaturer blev induceret en frigivelse af fosfat fra den jernbundne fosforpulje p.g.a. mere reducerede forhold i sedimentet.

Høje nitratkoncentrationer var i stand til at oxidere overfladesedimentet; men i sensommeren havde nitraten en stimulerende virkning på mineraliseringsraten i sedimentet, hvilket førte til øget fosfatfrigivelse på dette tidspunkt. Med de årsvariationer i sværvandets nitratindhold, som er observeret de fire NPO-søer, er der ingen tvivl om, at nitrat er en af de faktorer, som kan styre søernes fosforbalance.

Sværvandets pH har muligvis ikke så stor betydning for sedimentets fosfatfrigivelse, som man skulle antage ud fra pH-effekten på sedimentets sorptionsegenskaber. Dette syntes i hvert fald ikke at være tilfældet midt på sommeren. I det tidlige forår, hvor sedimentet er veloxidert, kan der også forekomme høje pH-værdier i søerne og det er muligt, at disse situationer fører til en betydelig fosfatfrigivelse fra sedimentet. Dette blev ikke afprøvet i vores eksperimenter.

## 5. Styrende faktorer for udvekslingen af fosfat mellem sediment og vand (2): Sedimentets karakteristik.

### 5.1 Indledning

Nürnberg (1988) fandt, at fosforfrigivelsen fra det anoxiske sediment i dybe, lagdelte øer korrelerede positivt med puljen af jernbundet fosfor og med total fosfor i sedimentet. Kamp-Nielsen (i Sas 1989) fandt ligeledes, at i 18 europæiske øer (både dybe, lagdelte og lavvandede) var sedimentets total fosfor indhold den sedimentparameter, som gav den bedste beskrivelse af den interne fosforbelastning; imidlertid fandtes der ikke data for sedimentets fosforpuljer fra alle de øer, som indgik i undersøgelsen. For uforstyrrede, aerobe sedimentoverflader er der os bekendt ikke publiceret nogen undersøgelse, som beskriver sammenhængen mellem fosforudvekslingen og sedimentkarakteristikken. Det har derfor været formålet med denne del af projektet!

Formålet med  
denne del af  
projektet

Bearbejdning  
af andres data

Boström (1984) gennemførte en række forsøg med forskellige søsedimenter i kolber, hvor han målte fosforfrigivelsen ved 20 gr.C. over 3 uger. En af disse forsøgsserier (med 5 øer) blev gennemført med aerobt sediment og pH-værdier mellem 8 og 9. Resultaterne fra dette forsøg vil blive bearbejdet i afsnit 5.4. Jacobsen (1977) bestemte den aerobe sorptionskinetik for 8 forskellige danske søsedimenter og også hans resultater vil blive inddraget i dette kapitel (afsnit 5.3). Endelig er der i NPO-projekt 4.5 (se Kristensen et al. 1988a) oprettet en sødatabase og med data fra denne er der opstillet en sammenhæng mellem svaveldets fosforindhold og Jern:Fosfor forholdet i sedimentet for 123 danske øer (afsnit 5.5).

Egne resultater

I dette projekt har vi for at belyse problemstillingen lavet en måling af fosfatfrigivelsen fra uforstyrrede sedimentkerner i de 4 NPO-øer og yderligere 11 andre øer (hvoraf de 9 er lavvandede). Samtidig har vi undersøgt sedimentets fosforpuljer og indhold af jern og kalcium (afsnit 5.2). Endelig er resultaterne fra bestemmelse af sorptionskinetik for NPO-øerne bearbejdet i afsnit 5.3.

## 5.2 Fosfatfrigivelse fra uforstyrrede sedimentkerner fra 15 søer

### 5.2.1

#### Måling i juni

De 4 NPO-søer  
indgår også i  
materialet

#### Metode

I maj/juni 1988 blev der indsamlet sediment i 12 søer, hvoraf Arreskov Sø var den eneste af NPO-søerne (tabel 5.1). 5 sedimentkerner fra hver ø blev "puljet" og analyseret i dybdeintervallerne 0-5 og 5-10 cm m.h.t sedimentkemi og P-puljer; 5 andre sedimentkerner blev etableret i inkubationssystemet (jvnf. 2.4.2) for at måle fosfatfrigivelsen fra sedimentet. Inkubationsbetingelserne var ens for alle søerne (16 gr.C, pH 8.0, fosfat 0, nitrat 0, ammonium 10  $\mu$ M, sulfat 0.4 mM og bikarbonat 2 mM). Disse inkubationsbetingelser svarede stort set til målingen i de fire NPO-søer i juni 1987 og resultatet fra denne måling er derfor medtaget i talmaterialet. Der er således 16 samhørende datasæt, hvor sedimentparametre og udveksling er målt under ens betingelser og med samme metodik. Arreskov Sø optræder to gange i dette materiale, så reelt repræsenterer det kun 15 søer.

### 5.2.2

#### Resultater og diskussion

I tabel 5.1 er angivet en række sedimentkarakteristika (i koncentration pr. tørvgætsenhed) tillige med de initiale fosfatfrigivelsesrater (kolonne 1), de kumulerede fosfatfrigivelser over 21 dage (kolonne 2) og standard afvigelserne på samme (kolonne 3). I figur 5.1 er sedimentets fosforpuljer i de 15 søer angivet pr. volumen enhed; og det er dette mål, som er anvendt ved sammenligning med fosfatfrigivelsen pr. arealenhed idet, det er mere relevant end at sammenligne med stofkoncentrationer pr. tørvgætsenhed. Angivelser af forholdet mellem jern og fosfor (Fe:P-forholdet) er baseret på vægt-ratiorer.

#### Korrelationsmatricer

Korrelationmatricen (tabel 5.2) giver r-værdierne for den lineære sammenhæng mellem to parametre. Hvis man vælger at diskriminere på signifikansniveauet:  $p < 0.05$  kræver det, at korrelationskoefficienten numerisk er større end 0.43.

Det ses, at parametrene 12 og 13 korrelerer, således at det er underordnet, om man ser på de initiale fosfatfrigivelsesrater (12) eller om man ser på de kumulerede frigivelser (13). Kun Fe:P-forholdet og ADS-P korrelerer signifikant med fosfatfrigivelsen. Den bedste korrelation fås med (4): ADS-P.

Tabel 5.1: Sedimentparametre og målte fosfatfrigivelser for sedimentet fra de 15 sører, som indgår i undersøgelsen. Kol. 1 angiver de initiale fosfatfrigivelsesrater i  $\text{mgP} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , kol. 2 angiver de kumulerede fosfatfrigivelser over 21 dage i  $\text{mgP} \cdot \text{m}^{-2}$  og kol. 3 angiver standard afvigelsen på samme tal for 5 parallelle sedimentkerner. Alle sører er målt under ens betingelser. FA: sører beliggende i Fyns Amt, ÅA: beliggende i Århus Amt, VA: beliggende i Vejle Amt.

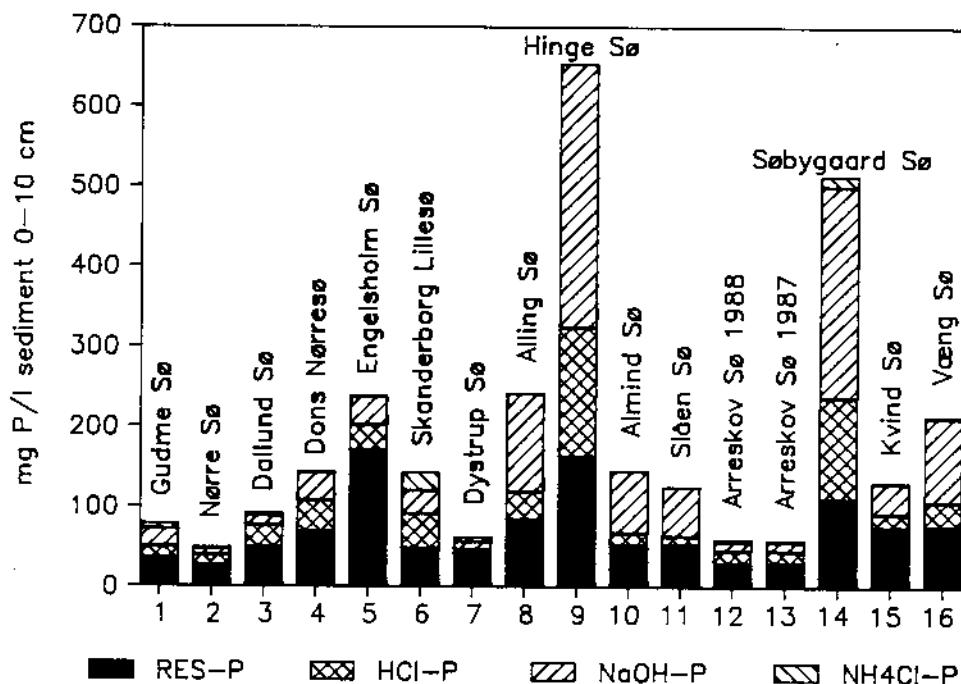
0 - 10 cm sediment dybde

SØ Nr.	Havn	% TV	% GT	Fe mg/g TV	Ca mg/g TV	TOT P mg/g TV	Kol. 1	Kol. 2	Kol. 3
1	Gudme Sø, FA	3.0	54	5.3	75	2.9	2.0	68	43
2	Nørre Sø, FA	5.0	40	10	122	1.2	2.5	79	42
3	Dallund Sø, FA	11.5	19	3.9	223	0.9	13	179	77
4	Dons Nørre Sø, VA	13.3	22	17	166	1.1	13	394	237
5	Engelholm Sø, VA	68.5	1.9	5.1	1.4	0.3	3.7	127	52
6	Skanderborg Lilleø, ÅA	3.6	40	6.3	143	4.1	28	1039	682
7	Dystrup Sø, ÅA	4.8	57	4.8	17	1.5	19	277	176
8	Aalling Sø, ÅA	8.2	29	77	18	3.1	8.3	247	91
9	Hinge Sø, ÅA	16.3	22	153	20	4.0	3.7	97	61
10	Almind Sø, ÅA	11.6	22	82	7.5	1.3	1.7	14	11
11	Slåen Sø, ÅA	8.9	29	91	8.7	1.5	1.7	13	10
12	Arreskov Sø, 88, FA	6.7	35	13	80	1.2	19	313	245
13	Arreskov Sø, 87, FA	6.7	35	13	80	1.2	21	362	326
14	Sæbygård Sø, ÅA	9.5	24	51	123	6.6	40	1001	484
15	Kvind Sø, ÅA	5.9	37	32	7.7	2.6	20	741	357
16	Vang Sø, VA	5.9	35	54	12	3.9	3.4	88	124

Tabel 5.2 Korrelationsmatrix for lineær sammenhæng ( $r$ -værdier) i 16 samhørende datasæt fra 15 sører med sedimentkarakteristik og fosfatfrigivelsesrater fra aerobe sedimentoverflader. (12) INITR er den initiale fosfatfrigivelsesrate. (13) KUM21 er fosfatfrivelsen over 21 dage. Række- og søjlenumre svarer til hinanden.

Parameter	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	Korrelationskoefficient "r" for lineær regression												
1  Fe	1												
2  Ca	-.19	1											
3  TOT-P	.76	.01	1										
4  ADS-P	-.31	.24	.14	1									
5  Fe-P	.73	0	.95	.18	1								
6  Ca-P	.79	-.10	.93	.14	.90	1							
7  Res.-P	.63	-.09	.79	-.15	.58	.64	1						
8  Fe/P	.60	-.27	.10	-.46	.17	.05	.10	1					
9  Ca/P	-.37	.84	-.35	.01	-.36	-.19	-.32	-.31	1				
10  % TV	.29	-.03	.35	-.25	.08	.15	.82	.12	-.11	1			
11  % GT	-.47	-.33	-.47	.32	-.33	-.33	-.66	-.38	-.19	-.72	1		
12  INIT.r	-.36	-.31	.12	.78	.17	.10	-.15	-.47	.06	-.25	.19	1	
13  KUM21	-.30	.22	.17	.82	.19	.13	-.05	-.44	-.04	-.20	.18	.90	1

### Sediment P-puljer i 15 søer, 0–10 cm



**Figur 5.1**

Sedimentets fosforpuljer i de 15 søer. Fraktioneringen er efter Hieltjes & Lijklema (1980) jvnf. kapitel 2.

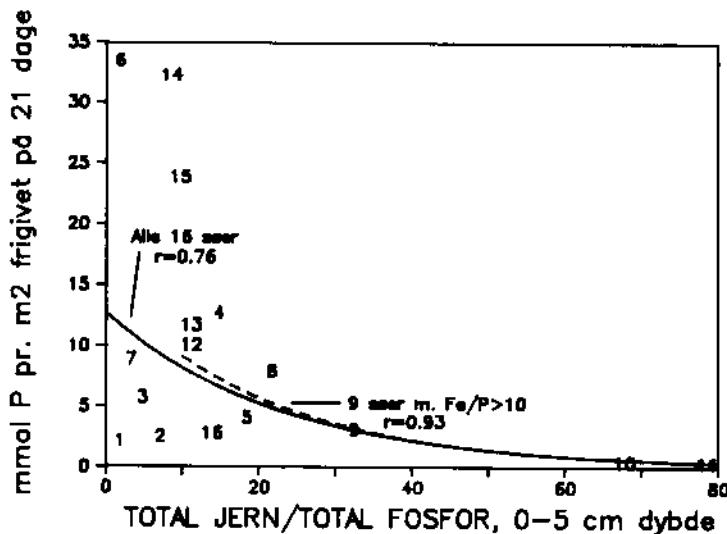
(puljen af  $\text{NH}_4\text{Cl}$ -ekstraherbart fosfor) og næstbedste korrelation fås med Fe:P-forholdet (8).

Korrelationen til Fe:P-forholdet bliver endnu bedre ( $r=0.76$ ), hvis der anvendes et eksponentielt udtryk (Fig. 5.2):

$KUM21 = 12.7 * \text{EXP}(-0.044 * \text{Fe/P})$ , eller omregnet til en gennemsnitlig daglig fosfatfrigivelsesrate:

$[R] = 0.6 * \text{EXP}(-0.044 * \text{Fe/P})$ , hvor  $[R]$  er angivet i  $\text{mg P} * \text{m}^{-2} * \text{d}^{-1}$  og Fe og P er angivet på vægtbasis.

**Figur 5.2**  
 Den aerobe fosfatfrigivelse fra uforstyrrede sediment-søjler fra 15 søer afbildedet mod overflade-sedimentets Fe:P-forhold.  
 Den fuldtop-trukne linie angiver den signifikante eksponentielle sammenhæng.



Puljen af ADS-P hænger sammen med Fe:P

Som det bemærkes er der autokorrelation mellem de to parametre ADS-P (4) og Fe:P (8) og da Fe:P-forholdet er den konservative sediment-karakter i denne sammenhæng kunne det betyde at ADS-P fulgtes med Fe:P-forholdet. En anke mod at bruge ADS-P som beskrivende for fosfatfrigivelsen er, at årsvariationen af ADS-P i overfladesedimentet i de fire NPO-søer ikke korrelerede med de målte fosfatfrigivelsesrater de i tre af søerne (tabel 3.2). Tilbage har vi således kun Fe:P-forholdet som den sediment-karakter, der kan beskrive fosfatfrigivelsen fra den aerobe, uforstyrrede sedimentoverflade. I de følgende afsnit vil vi derfor "forfølge" denne observation.

I korrelationsmatricen (tabel 5.2) finder vi nogle andre interessante sammenhænge, som bør kommenteres:

- 1) Totalfosfor (TP)(3) korrelerer med jern (1).
- 2) Jern-P (NaOH-ekstraherbart P) (5) korrelerer med både jern og TP.
- 3) Kalcium-P (HCl-ekstraherbart P) (6) korrelerer ikke med kalcium! men med TP.

Det er bemærkelsesværdigt, at hverken TP eller nogen af de øvrige fosforpuljer kunne beskrive sedimentets fosfatfrigivelse i lighed med studierne af 18 europæiske søer (Sas 1989) og af anoxiske sedimenter i lagdelte søer (Nürnberg 1988).

### 5.3 Sorptionskinetik

Sorptions-  
kinetikken på-  
virker fluksen

Porevandskoncentrationen af fosfat i overflade-sedimentet er styret af sorptionskinetikken for det oxiderede sediment. Da gradienten af fosfat over sedimentoverfladen styrer fosfatfluxen (f.eks. Löfgren 1987) må der forventes en sammenhæng mellem fosfatfrigivelsen og de betydende isotermparametre (CeO og LAK jvnf. afsnit 2.4.3).

3 datasæt for  
sorptions-  
kinetik

Vi har derfor foretaget en analyse af sammenhængen mellem sorptionskinetikken og sedimentkemiene i tre sæt datamateriale: Det første repræsentere sorptionsisotemerne ved pH 9 for fire dybder i de fire NPO-søer (16 talsæt), hvor der dog er en klar gruppering i de fire søer og hvor variationen i sedimentkemiene ikke er særlig stor! Det andet og tredie sæt data repræsentere to forsøg af Jacobsen (1977) med sediment fra 8 vidt forskellige danske søer.

**Tabel 5.3:** Korrelationsmatricer for sorptions-isoterm parametre og sedimentkarakteristik i tre talsæt: (A): De fire NPO-søer, fire dybder, august 87, pH 9. (B): Jacobsen (1977) - forsøgs-serie 1. (C): Jacobsen (1977) - forsøgsserie 2.

A

Sediment Karakteristik	NAP	PSC	CeO	LAK	TOT P
Fe	0.44	0.69	0.32	0.03	0.80
Ca	0.65	0.33	0.62	-0.63	0.48
TOT P	0.77	0.69	0.71	-0.37	1
Fe/P	-0.45	-0.03	-0.53	0.72	-0.47

B

Sediment Karakteristik	NAP	PSC	CeO	LAK	TOT P
Fe	0.96	0.85	-0.31	0.64	0.59
Ca	-0.38	-0.11	0.01	-0.08	-0.68
TOT P	0.69	0.60	-0.19	0.37	1
Fe/P	0.83	0.78	-0.37	0.67	0.29
pH	-0.15	0.17	-0.05	0.31	-0.56

C

Sediment Karakteristik	NAP	PSC	CeO	LAK
Fe	0.96	0.95	-0.36	0.24
Ca	-0.38	-0.22	-0.02	+0.16
TOT P	0.69	0.59	-0.22	0.29
Fe/P	0.83	0.91	-0.41	-0.21
pH	-0.30	-0.21	0.25	0.11

I det andet datasæt er sorptionsisotermerne bestemt i svøvand fra den pågældende sø og i det tredie datasæt er der brugt destilleret vand. korrelationsmatricer for sedimentkarakter og parametre i sorptionskinetikken er givet i tabel 5.3 A,B og C.

Resultaterne  
er ikke helt  
entydige

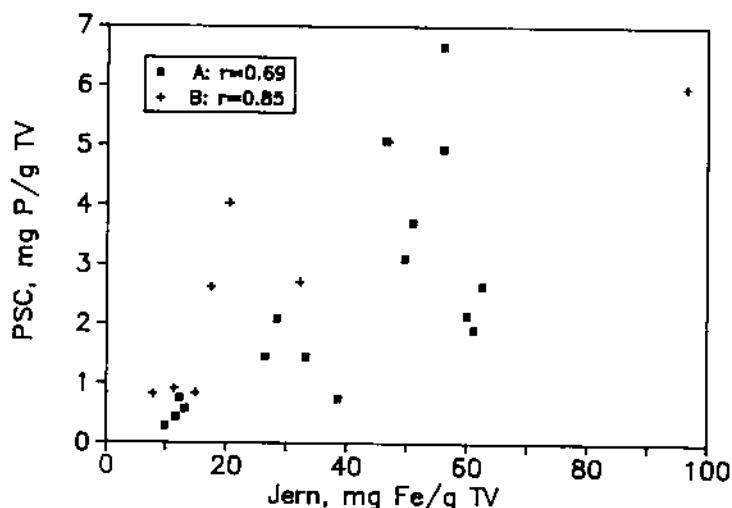
Der er ikke særlig god overensstemmelse mellem de tre korrelationsmatricer; men flg. signifikante sammenhænge kan dog ses:

- 1) Sorptionskapaciteten (PSC) korrelerer med jernindholdet (Fig. 5.3) og totalfosfor.
  - 2) Jernindholdet og fosforindholdet korrelerer positivt i B og C ( $p<0.1$ ).
  - 3) Bufferkapaciteten (LAK) kan beskrives ved Fe:P-forholdet i A og C ( $p<0.05$ ) (Fig. 5.4).
  - 4) NAP kan beskrives med jern og totalfosfor i alle talsæt ( $p<0.05$ ).
- Cross-over koncentrationen ( $Ce_0$ ) kan i A beskrives ved total-P, kalcium og Fe:P-forholdet ( $p<0.05$ ); men i B og C korrelerer  $Ce_0$  ikke signifikant med nogen af de testede parametre. Bedste beskrivelser i disse talsæt fås ved Fe:P-forholdet ( $p<0.2$ ).

**Figur 5.3**

A: 16 talsæt fra  
de fire NPO-søer  
B: 8 talsæt fra  
Jacobsen 1977.

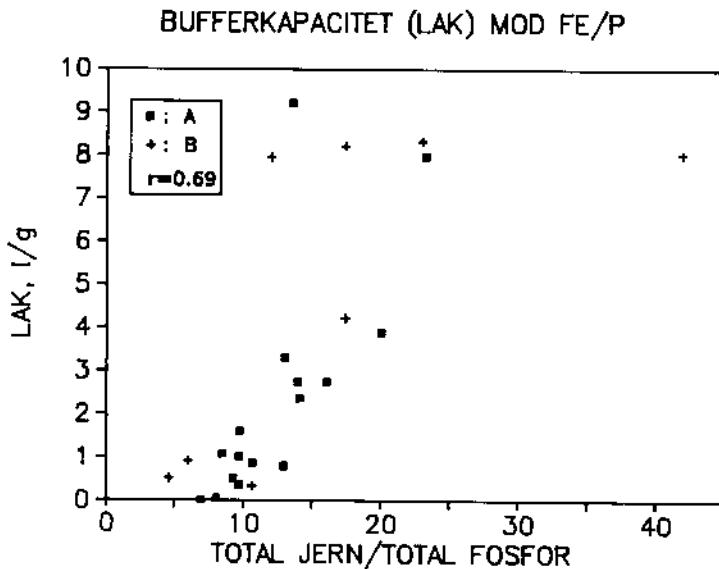
#### SORPTIONSKAPACITET MOD TOTAL JERN



Jacobsen (1977) fandt en overbevisende relation mellem puljen af oxalatekstrahert jern (reaktivt jern) og den aerobe sorptionskapacitet (PSC). I hans talmateriale udgør den reaktive jernpulje 53% af den totale jernpulje som gennemsnit for de 8 søer.

Figur 5.4

A: 16 talsæt fra  
de fire NPO-søer  
B: 8 talsæt fra  
Jacobsen 1977.



#### Konklusion

- En forsiktig konklusion på analysen af talmaterialet i de tre nævnte forsøg vil være:
- at jernindholdet styrer sorptionskapaciteten (PSC) i overensstemmelse med den klassiske "jernteori" (jvnf. kapitel 1).
  - Totalfosfor korrelerer med PSC fordi mange af de undersøgte søer har været kraftigt fosforbelastede (sedimentets reaktive jernpulje er blevet mættet med fosfor).
  - CeO og LAK, som er de to parametre, der betyder mest i henseende til fosfatfrigivelsesraten, beskrives bedst ved Fe:P-forholdet. CeO falder og LAK øges med stigende Fe:P.

#### 5.4 Analyse af Boströms forsøg

##### Udtømning af P-puljen i oxideret sediment

Boström (1984) lavede en undersøgelse af mobiliteten af fosfor fra aerobt, suspenderet sediment i fem søer (pH 8-9, 20 gr.C. i 3 uger serie F). Hvis man sammenligner de fundne fosfatfrigivelsesrater med sedimentkarakteristikken, som blev udført samtidig finder man, at fosfatfrigivelsen signifikant kan beskrives ved ADS-P, RES-P og Fe:P-forholdet (tabel 5.4).

**Tabel 5.4**

Korrelationsmatrix for aerob fosforfrigivelse i 21 dage og sedimentkarakteristik i Boströms forsøgsserie F (Boström 1984).

Parameter	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Korrelationskoefficient "r" for lineær regression									
1 Fe	1									
2 Ca	-.28	1								
3 TOT-P	.59	-.28	1							
4 ADS-P	.33	.37	.78	1						
5 Fe-P	.57	-.37	.99	.72	1					
6 Ca-P	.89	-.23	.56	.38	.58	1				
7 Res.-P	.47	-.08	.93	.83	.89	.34	1			
8 Fe/P	-.32	.04	-.89	-.88	-.89	-.47	-.80	1		
9 Ca/P	-.49	.95	-.51	.11	-.60	-.48	-.29	.29	1	
10 P-frig	.28	.33	.80	.99	.74	.33	.85	.90	.08	1

Igen opnås der en svagt bedre Korrelationskoefficient til Fe:P-forholdet ved et eksponentielt udtryk ( $r=0.91$ ) og igen korrelerer ADS-P og Fe:P negativt. Det kan ligeledes bemærkes, at HCl-ekstraherbart P heller ikke i denne analyse korrelerer med kalciumindholdet! Resultaterne i Boströms forsøg underbygger således konklusionerne fra afsnit 5.2 og 5.3.

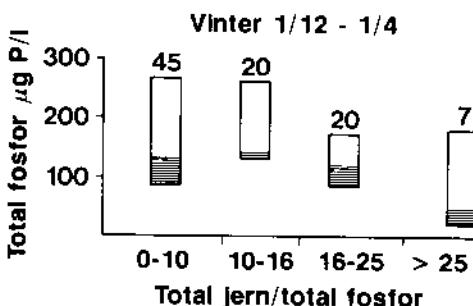
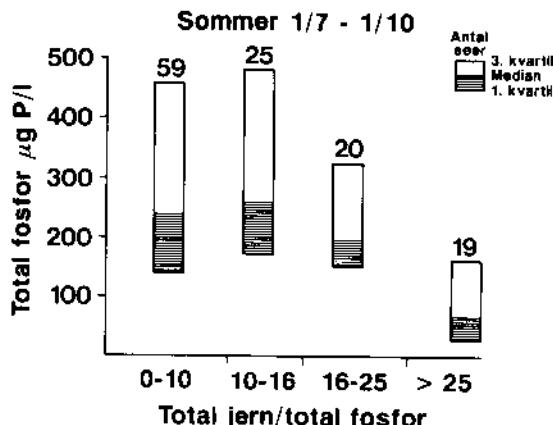
#### Fosforindholdet i danske sører

Resultater fra NPO-projekt C9

Kristensen et al. (1988b) præsenterede resultaterne af en analyse af søravandets fosforindhold i relation til Fe:P-forholdet i overfladesedimentet i 123 danske sører (Fig. 5.5). Talmaterialet repræsentere både dybe, lagdelte sører og lavvandede sører og der er ikke taget hensyn til den eksterne P-belastning, vandets opholdstid o.s.v.

Af figuren fremgår det, at sører med Fe:P-forhold under 16 har de højeste fosforkoncentrationer i vandet både sommer og vinter, samt at koncentrationsstigningen fra vinter til sommer er størst i disse sører. Det vil groft sagt sige, at sører med et lavt Fe:P-forhold har den højeste interne fosforbelastning.

Søvandets TP-koncentration sommer og vinter i 123 danske sører i relation til Fe:P i overfladesedimentet. Medianværdien, 1. og 3. kvartil er angivet for hver gruppe.



### 5.6 Diskussion og konklusion

De fire analyser af datamateriale, som er præsenteret i afsnit 5.2 til 5.5 peger alle på Fe:P-forholdet som den styrende faktor for fosfatfrigivelsen fra aerobe sedimentoverflader.

Fe:P-forholdet er let at mæle og let at bruge

Måling af total jern og total fosfor er en enkelt og pålidelig måling, hvilket betyder at dette redskab er særlig anvendeligt ved vurdering af en søs interne fosforbelastning. Der må dog advarses mod at bruge den givne ligning (afsnit 5.2) uden hensyntagen til årstidvariationen i fosfatfrigivelsen (jvnf. kapitel 3). En forbedret "forudsigelse" af fosfatfrigivelsen fra sedimentet i de lavvandede sører kan formodentlig opnås ved også at anvende en temperaturkoefficient ( $Q_{10}=4.9$ ) sammen med denne ligning.

Den aerobe fosfatsorptionskinetik (Langmuir-isotermen) er en mætningskinetik, hvilket forklarer, at hverken jern eller fosfor; men derimod forholdet mellem disse giver den bedste beskrivelse af såvel fosfatfrigivelsen som parametrene CeO og LAK.

Det er overraskende, at kalcium ikke synes at

have nogen som helst betydning for den aerobe fosforfrigivelse fra søsedimenterne eller for sedimentets indhold af HCl-ekstraherbart fosfor. Det er desuden bemærkelsesværdigt, at ingen af fosforpuljerne - inklusiv totalfosfor kunne beskrive fosfatfrigivelsen fra sedimenterne.

Forslag til en mere praktisk anvendelse af resultaterne diskuteres i afsnit 8.3.

## 6. Mineralisering af fosfor og kvælstof i sedimenteret materiale.

### 6.1 Indledning

Meget af det organiske stof, der dannes i de produktive lavvandede sører, sedimenterer og nedbrydes i sedimentet. Tilførslen af organisk stof til sedimentet vil afhænge af mange faktorer som f.eks. primærproduktion, de fysiske forhold og den biologiske struktur. Sedimentationen vil derfor variere meget på årsbasis og f. eks. være stor efter en planktonopblomstring. Efter stormperioder vil man også se en stor sedimentation, der dog især skyldes resuspendert sediment.

Direkte effekt på P-frigivelse

Det sedimenterede organiske stof bliver nedbrudt ved aerobe- og anaerobe processer. Ved disse processer bliver der frigjort uorganisk fosfor og kvælstof, der - afhængig af sedimentforholdene - igen kan afgives fra sedimentet til de ovenliggende vandmasser. Denne interne belastning med næringssalte kan være med til at holde primærproduktionen i sører på et højt niveau. Nedbrydningen af det sedimenterede organiske stof kan desuden have en indirekte effekt på næringssaltfrigivelsen fra sedimentet, idet ilt- og redoxforholdene ændres. Disse forhold er i høj grad styrende for fosforfrigivelsen og for den mikrobielle omsætning af kvælstof i sedimentoverfladen.

Indirekte effekt

Vore undersøgelser over fosforfraktioner i sedimentet viste, at den organisk bundne fosforfraktion ofte er stor. Det er derfor af stor interesse at vide, hvor hurtigt det organiske stof bliver mineraliseret og dermed hvor hurtigt næringssaltene kan blive frigjort og igen være til rådighed for primærproducenterne.

Formål

I denne undersøgelse har vi i laboratoriet simuleret en pludselig sedimentation af partikulært materiale (seston) ved at tilsætte seston til uforstyrrede sedimentkerner og derefter fulgt nedbrydningsforløbet ved målinger på iltoptagelsen og udvekslingen af næringssalte.

### 6.2 Metode

Indsamling af seston

Der er udført 2 mineraliseringsforsøg på sediment fra de fire NPO-sører startende den 23.7.87 og den 20.11.87. For hver sør blev der til 5 sedimentrør (i.d. 52 mm) tilsat seston og til 5 andre blev der ikke tilsat seston (kontrol). Sestonet blev indsamlet i Arreskov Sø ved filtrering af 5 l overfladevand gennem et 20 µm filter (juli) eller ved filtrering af 20 l

Tilsætning af seston

overfladevand gennem et 25 µm filter (november). Sestonmaterialet fandtes efter filtreringen i et vandvolumen mindre end 100 ml. Hvert sedimentrør blev tilsat ovennævnte sestonmængde. På 3 portioner af sestonmaterialet blev der ved forsøgets start målt tørvægt, kulstof, total-N og total-P. Sedimentrørene var anbragt i termostaterede tanke ved henholdsvis 18° og 14° i juli- og novemberforsøget. Med jævne mellemrum blev der målt iltforbrug og næringssaltudveksling i rørene (se metode i kapitel 2.3.2). Efter novemberforsøget blev tykkelsen af det lyse oxiderede overfladelag målt.

Vurdering af effekten af tilsætningen

Effekten af sestontilsætningen er beregnet som forskellen mellem fluksen i kontrolsøjlerne og de sjæller, hvortil der er sat seston. Såfremt de to grupper af sjæller afveg inden sestontilsætningen er en basislinie trukket mellem de sidste punkter inden sestontilsætningen og de punkter, hvor effekten tilsyneladende er ophört. I de tilfælde, hvor effekten ikke er ophört inden forsøgets afslutning, beregnes til de sidste målinger. Forsøgene, der startede i juli og november, strakte sig over henholdsvis ca. 4 og 6 uger, efter at sestonet var tilsat.

Også leaching forsøg

I juliforsøget blev den initiale leaching og mineralisering (uden sediment) af sestonet undersøgt ved at tilsætte hver sestonportion 400 ml vand i koniske kolber. Tre parallelle kolber blev anbragt ved samme temperatur som sediment-sjællerne og prøver til næringssaltanalyser blev udtaget med passende mellemrum.

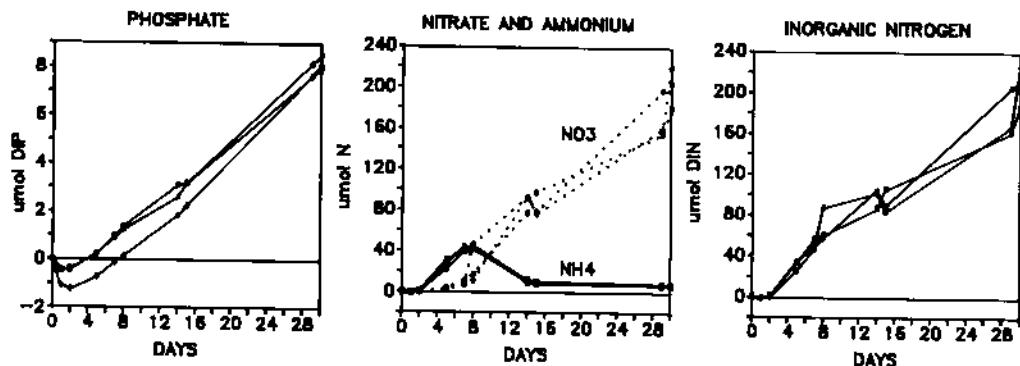
6.3 Resultater.

Leaching-forsøget

Mineraliseringsforsøget uden sediment (Figur 6.1) viste, at sestonet var i stand til at optage/sorbere lidt fosfat fra vandet i starten, hvorefter der skete en frigivelse af fosfat med konstant hastighed i resten af forsøget. Uorganisk kvælstof blev frigivet med varierende hastigheder i løbet af forsøget. Der var en to dages lag-fase i forsøgets start, i perioden dag 2-8 var der en høj frigivelsesrate og derefter en lavere i resten af perioden. Kvælstoffet blev i forsøgets begyndelse frigivet som ammonium, efter 6 dages forløb er nitrifikationen imidlertid så hurtig, at ammoniumkoncentrationen falder og derefter ses der en lineær frigørelse af nitrat. I løbet af de 30 dage blev der i gennemsnit frigivet 47% af den tilsatte total-P og 43 % af den tilsatte total-N.

Nedbrydning på sedimentet

Ved tilsætning af seston til sedimentet ses der en signifikant stigning i iltforbruget som tegn



Figur 6.1.

Frigivelse af fosfat og uorganiske kvalstofioner fra seston anbragt i flasker uden sediment (juliforsøget). Forløbet i 3 parallelle flasker er vist.

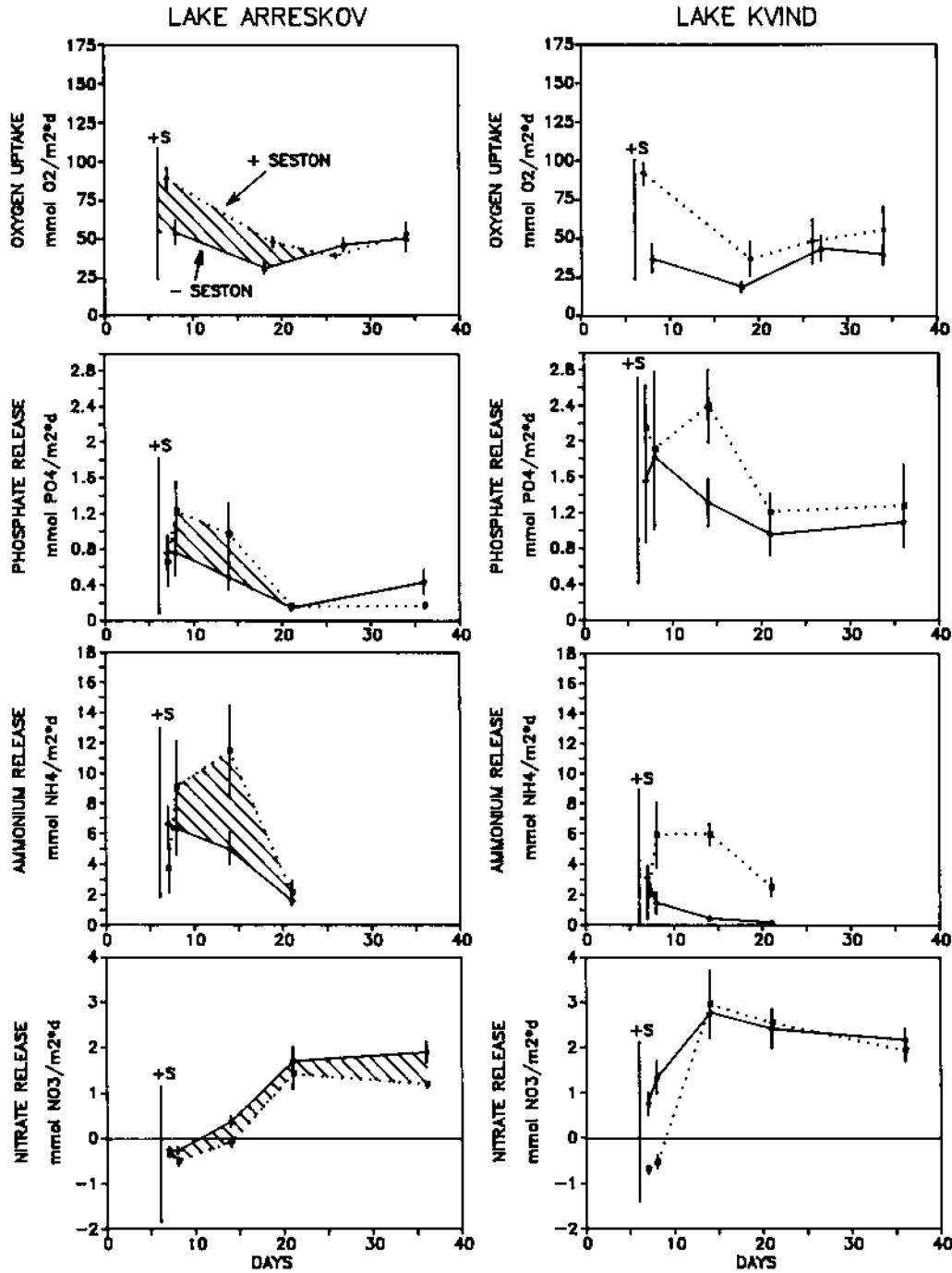
på at mineraliseringen straks starter (Figur 6.2-5). Kun i novemberforsøget ses der ingen stigning for Arreskov Sø (Figur 6.4). De forhøjede iltoptagelsesrater varer normalt 2-4 uger. Fosfatfrigivelsen stiger i Arreskov Sø og Kvind Sø efter sestontilsætningen, hvorimod der ingen effekt er i novemberforsøget i Væng Sø (Figur 6.5). I Søbygård Sø ses der en modsat effekt, idet fosfatfrigivelsen nedsættes i forhold til kontrolsøjlerne (Figur 6.5).

#### N-omsætningen påvirkes

Ammoniumfrigivelsen stimuleres normalt ved sestontilsætningen. Resultaterne fra Søbygård Sø er dog vanskelige at tolke, da ammoniumfrigivelsen i kontrolsøjlerne før eller ved starten af forsøgene ligger over de søjler, der tilsættes seston (Figur 6.3 og 6.5). Nitratfrigivelsen nedsættes normalt ved tilsætning af seston. Igen afviger Søbygård Sø i juliforsøget, hvor nitratfrigivelsen forøges efter sestontilsætningen. På nitratfrigivelsesfigurerne fra novemberforsøget ses der en top på dag 9; hvilket skyldes at temperaturen i det foregående døgn havde været oppe på ca. 20° p.g.a. termostatsvigt (Figur 6.4 og 6.5).

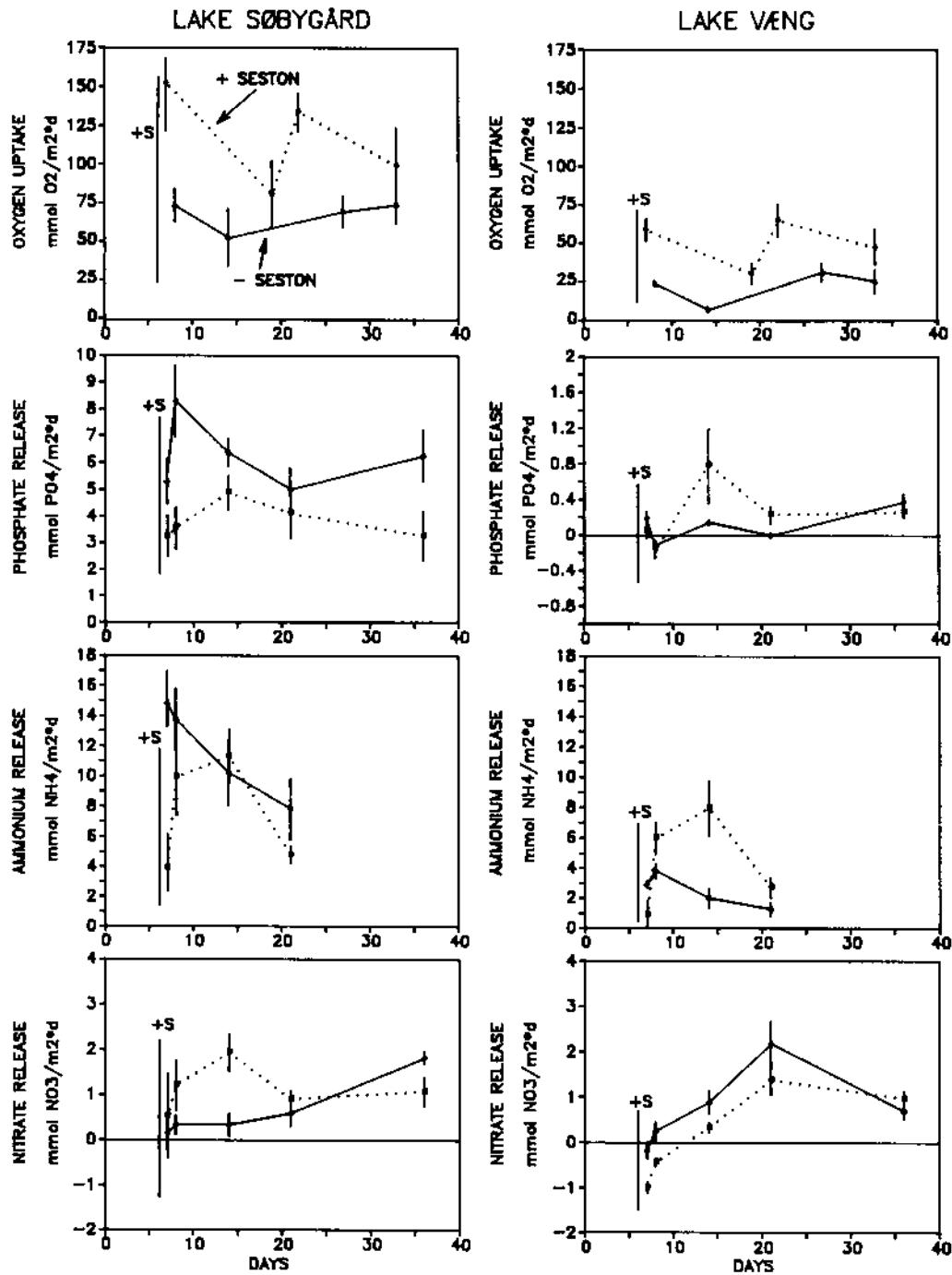
#### Sestontilsætningens effekt på fluxene

For at kunne vurdere, hvor stor en del af det tilsatte C, N og P i sestonmaterialet, der mineraliseres og friges, er effekten af sestontilsætningen beregnet (Tabel 6.1). Forøgelsen i iltoptaget svarer til, at der er mineraliseret mellem 21 og 75 % af det tilsatte kulstof. I Arreskov Sø ses der dog ingen effekt i novemberforsøget. Effekten på uorganisk kvalstof er meget variabel, idet en ammoniumfrigivelse tildels opvejes af nitratoptagelse. Generelt er nettofluxen af uorganisk kvalstof dog lille i forhold til den tilsatte kvalstofmængde. Fosforfrigivelsen i Arreskov Sø og Væng Sø (Juli) er af samme størrelsesorden som den tilsatte fosformængde. I Kvind Sø ses



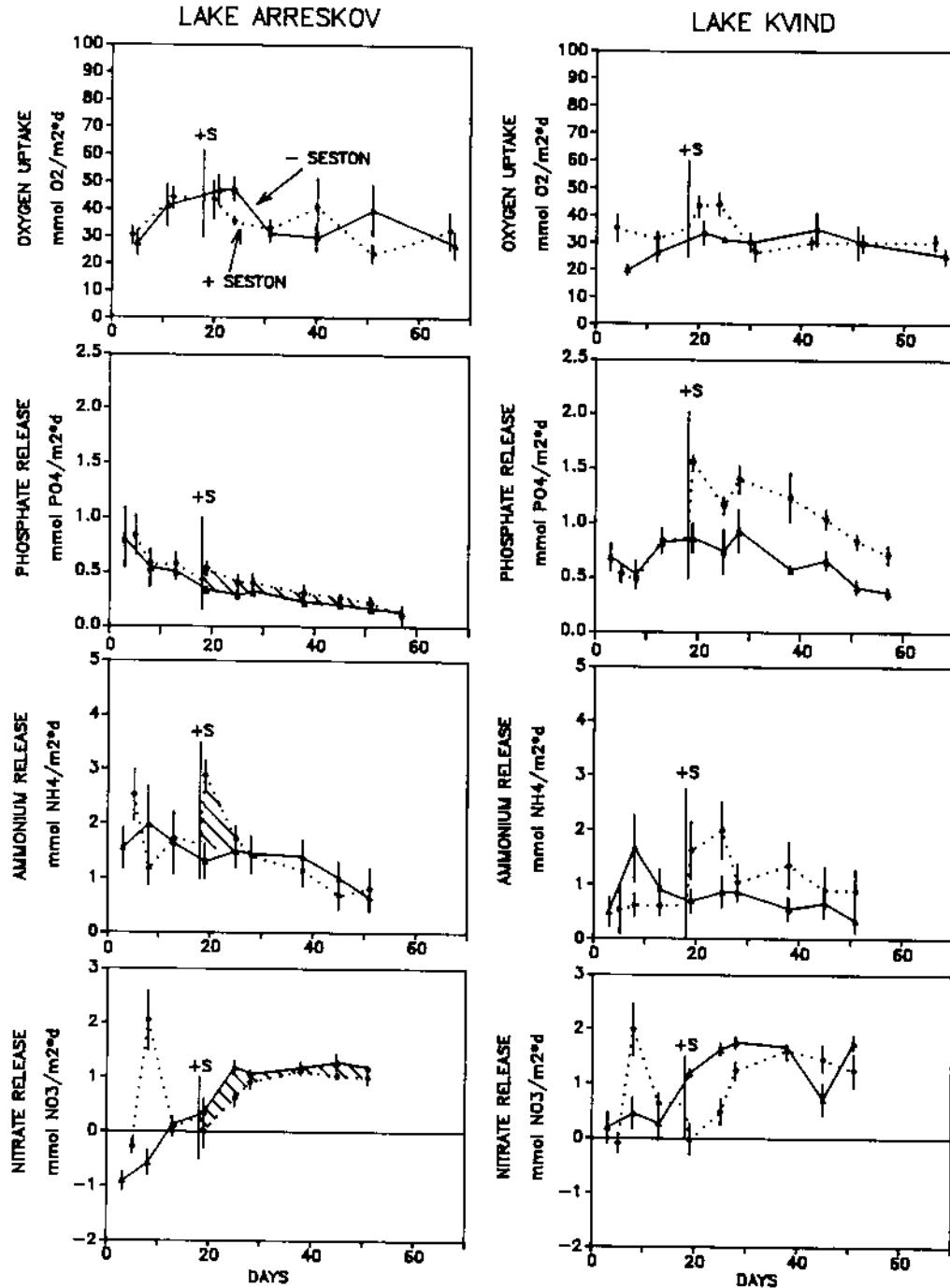
Figur 6.2.

Sedimentets iltoptagelse og frigivelseshastigheder for fosfat, ammonium og nitrat fra sedimentet i juliforsøget i Arreskov Sø og Kvind Sø. Den punkterede linie angiver søjler, der har fået tilsat seston ved den lodrette streg mærket +S. Standard error er angivet ved lodrette streger. De skraverede områder angiver effekten af sestontilsætningen (se også Tabel 6.1).



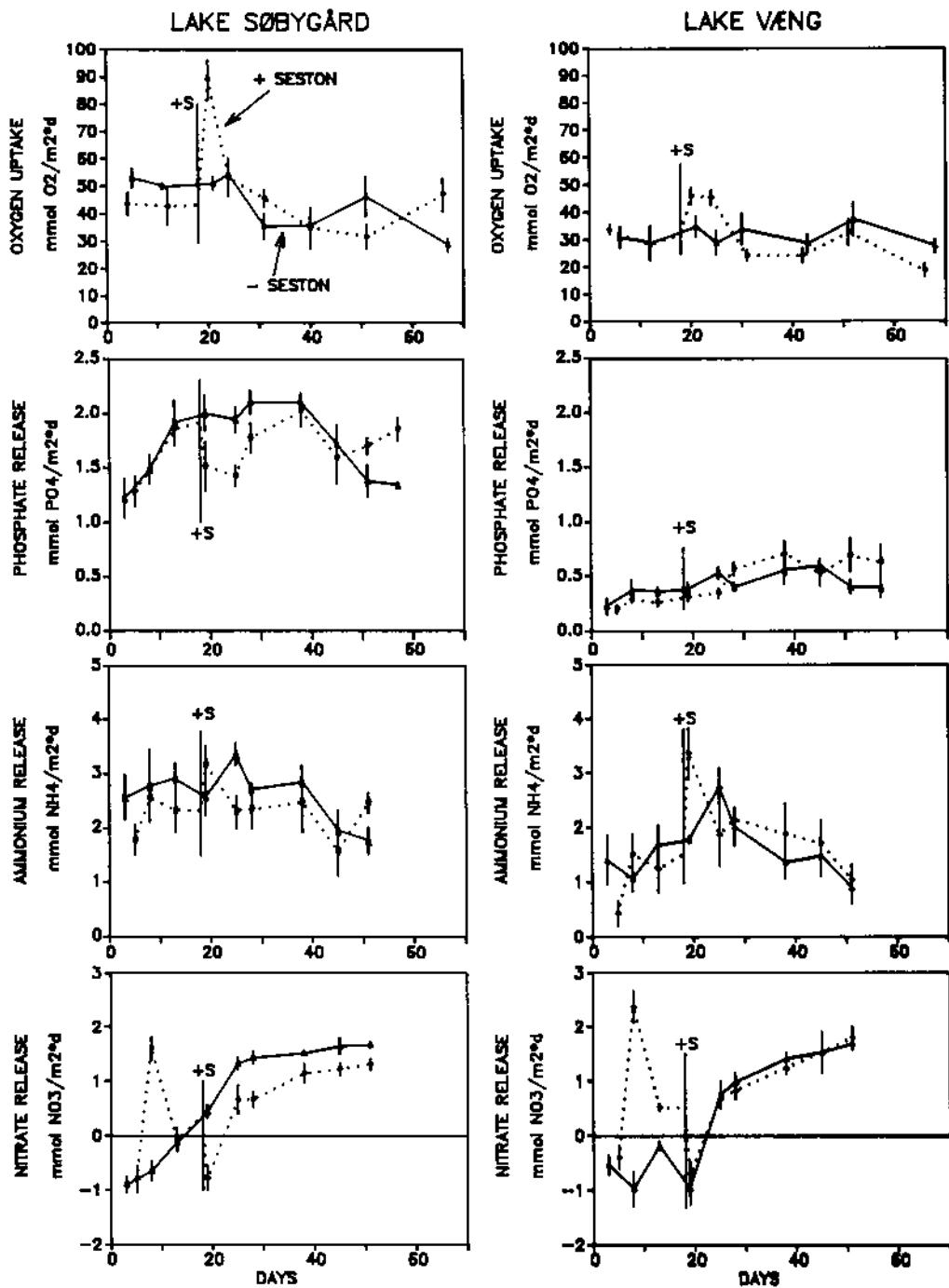
**Figur 6.3.**

Sedimentets iltoptagelse og frigivelseshastigheder for fosfat, ammonium og nitrat fra sedimentet i juliforsøget i Søbygård Sø og Væng Sø. Den punkterede linie angiver sjæler, der har fået tilsat seston ved den lodrette streg mærket +S. Standard error er angivet ved lodrette streger.



Figur 6.4.

Sedimentets iltoptagelse og frigivelseshastigheder for fosfat, ammonium og nitrat fra sedimentet i novemberforsøget i Arreskov Sø og Kvind Sø. Den punkterede linie angiver søjler, der har fået tilsat seston ved den lodrette streg mærket +S. Standard error er angivet ved lodrette streger. De skraverede områder angiver effekten af sestontilsætningen (se også Tabel 6.1).



Figur 6.5.

Sedimentets iltoptagelse og frigivelseshastigheder for fosfat, ammonium og nitrat fra sedimentet i novemberforsøget i Søbygård Sø og Væng Sø. Den punkterede linie angiver søjler, der har fået tilsat seston ved den lodrette streg mærket +S. Standard error er angivet ved lodrette streger.

Tabel 6.1.

Effekter af sestontilsætning til sedimentet fra 4 søer beregnet som differensen mellem fluksraterne i berigede og ikke berigede sedimentsøjler, svarende til det skraverede areal på Figur 6.2 og 6.4. Effekterne er beregnet som % af den mængde, der er tilsat. Positive- og negative værdier angiver henholdsvis stigning og fald i afgivelsen fra sedimentet.

	Arreskov Sø	Kvind Sø	Søbygård Sø	Væng Sø
<b>Juliforsøg</b>				
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -frigivelse	91	239	-1175*	115
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> } uorg.-N -	17	23*	-6	16*
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> } frigivelse				
O <sub>2</sub> -optagelse	21*	43*	75*	45*
<b>Novemberforsøg</b>				
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -frigivelse	111	1411*	-574*	n.e.
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> } uorg.-N -	n.e.	9	-27*	-4
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> } frigivelse				
O <sub>2</sub> -optagelse	n.e.	24	51*	32*

n.e. : ingen synlig effekt af sestontilsætningen

\*: signifikant forskel på 5% niveau på kontrollsøjler og søjler tilsat seston

der fosforfrigivelser, der langt overstiger den tilsatte mængde fosfor (op til 14 gange). I Søbygård Sø var der en meget stor nedsættelse af fosforfrigivelsen efter sestontilsætning.

#### C/N/P- ratioer

I Tabel 6.2. er angivet C/N/P eller O<sub>2</sub>/N/P ratioer for sedimentet, det tilsatte seston og for de målte fluks. Ratioerne kan bruges til at se ændringerne i det organiske stof under nedbrydningen og om mineraliseringen og frigivelsen af N og P foregår parallelt med C. Overfladesedimentet havde en relativ konstant sammensætning med hensyn til C/N (11,1 - 13,5) i de fire søer. Derimod varierede C/P forholdet meget. Det var meget højt (377) i Arreskov Sø p.g.a. et relativt lavt fosforindhold. I Søbygård Sø var forholdet meget lavt (63), fordi fosforindholdet i sedimentet var meget højt. Sammensætningen af den fluks, der er resultatet af sestontilsætningen ("Effekt" i Tabel 6.2), afviger meget fra sestonets sammensætning. C/N forholdet er generelt højere og C/P lavere i den resulterende fluks fra sestonet. Sammensætningen af fluksen fra sediment, hvortil der ikke er sat seston ("Fluks" i Tabel 6.2), afviger også fra overfladesedimentets sammensætning. Fluksens sammensætning varierer dog med årstiden; således er C/N forholdet i fluksen om sommeren i Arreskov Sø, Kvind Sø og Væng Sø laverere end sedimentets C/N, medens det om vinteren er

højere. Både C/P og N/P forholdet i fluksen er normalt lavere end i sedimentet.

På Figur 6.6 er de kumulerede værdier for fluksene i de forskellige sører i novemberforsøget plottet på samme graf. Der er medtaget grupper af sedimentsøjler, der har været inkubered ved forskellig temperatur (temperatureffekt forsøgene er omtalt i kapitel 4). Til trods herfor ses der signifikante sammenhænge mellem P, N og O<sub>2</sub> fluksene. Ud fra hældningerne på regressionslinierne kan følgende ratioer beregnes: O<sub>2</sub>/N = 11,0, O<sub>2</sub>/P = 24,8 og N/P = 2,34. O<sub>2</sub>/N forholdet er altså af samme størrelse som i sedimentet, medens O<sub>2</sub>/P og N/P forholdene ligger væsentligt under.

Tabel 6.2.

C/N, C/P og N/P-ratioer i overfladesediment (års gennemsnit) og det seston, der er anvendt til berigning af søjlerne (Seston). For fluksen i kontrolsøjlerne (Fluks) og for effekten på fluksen efter tilsætning af seston (Effekt) er O<sub>2</sub>/N, O<sub>2</sub>/P og N/P angivet. Det tilsatte seston var indsamlet i Arreskov Sø. Molære ratioer er angivet.

	Sommerforsøg				Vinterforsøg		
	Overflade- sediment	Fluks	Effekt	Seston	Fluks	Effekt	Seston
<b>Arreskov Sø</b>							
C(O <sub>2</sub> )/N	12.3	7.5	18.4	7.78	23.9	- d)	9.44
C(O <sub>2</sub> )/P	377	110	78	347	64	- d)	418
N/P	30.7	14.6	8.5	44.7	2.7	- a)	44.3
<b>Kvind Sø</b>							
C(O <sub>2</sub> )/N	11.1	9.6	29.6		16.4	23.7	
C(O <sub>2</sub> )/P	137	271	62		34	7.5	
N/P	12.3	28.1	4.2		2.1	0.3	
<b>Søbygård Sø</b>							
C(O <sub>2</sub> )/N	13.5	21.2	- a)		17.3	- a)	
C(O <sub>2</sub> )/P	63	55	- b)		26	- b)	
N/P	4.7	2.6	0.22 c)		1.5	2.1 c)	
<b>Væng Sø</b>							
C(O <sub>2</sub> )/N	11.1	1.9	21.9		23.5	67.2	
C(O <sub>2</sub> )/P	106	3.5	135		77.3	- e)	
N/P	9.5	1.8	6.2		3.3	- e)	

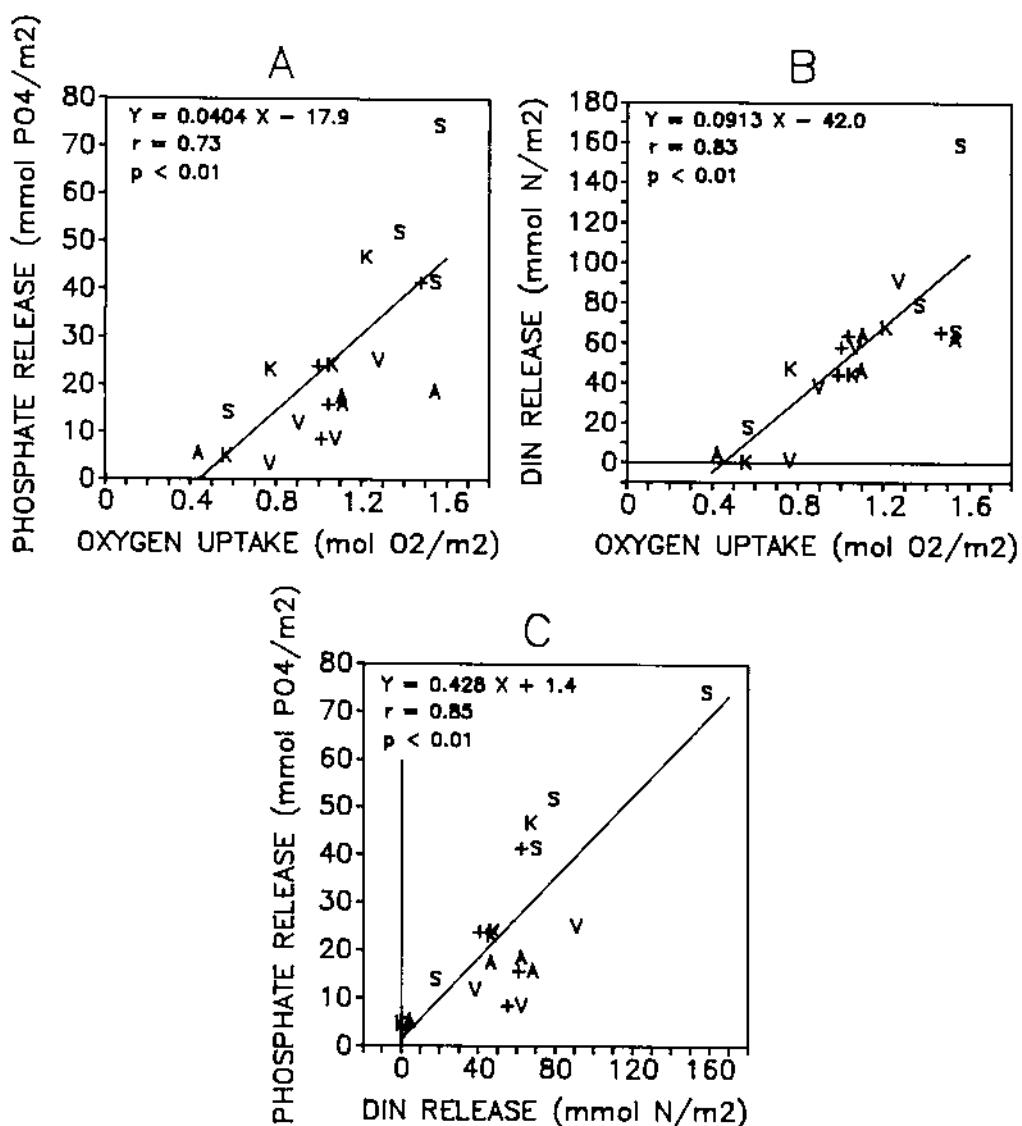
a): negativ effekt på N-frigivelsen af sestonberigelsen

b): negativ effekt på P-frigivelsen af sestonberigelsen

c): negative effekter på både N og P-frigivelsen

d): ingen effekt på O<sub>2</sub>-optagelsen af sestonberigelsen

e): ingen effekt på P-frigivelsen af sestonberigelsen



Figur 6.6.

Relationer mellem fosfatfrigivelsen og iltoptagelsen (A), frigivelsen af uorganiske kvalstof og iltoptagelsen (B) og frigivelsen af fosfat og uorganisk kvalstof. Punkterne er middelværdier for de kumulerede flukse i de 4 sører over hele novemberforsøget. + indikerer grupper af søjler, hvortil der er sat seston.

**Tabel 6.3.** Effekten af sestontilsætning på tykkelsen af sedimentets oxiderede overfladelag. Tykkelsen er målt 29 dage efter sestontilsætningen i novemberforsøget.

Sø	Tykkelse af oxideret lag i mm			Signifikans niveau
	Tilsat seston	Ikke tilsat seston		
Arreskov Sø	5,5	6,8		p<0,1
Kvind Sø	6,4	7,2		p<0,25
Søbygård Sø	9,6	10,8		p<0,2
Væng Sø	7,0	7,6		p<0,15

**Effekt på redox-potentialet**

Der ses en tydelig effekt af tilførselen af organisk stof til sedimentet. I alle fire søer var tykkelsen af det oxiderede overfladelag størst i de sedimentsøjler, der ikke var tilsat seston.

#### 6.4 Diskussion

**To mekanismer**

Fosforfrigivelsen fra sedimentet efter sedimentation af organisk stof skyldes to mekanismer: 1) Det organiske stof indeholder uorganisk fosfor og organisk bundet fosfor, som frigives fra cellerne ved leaching og nedbrydning, 2) Det organiske stofs nedbrydning medfører reducerede forhold i sedimentoverfladen (Tabel 6.3) og et lavt redoxpotentiale er en vigtig faktor for fosfatfrigivelsen fra den jernbundne fosforpulje i sedimentet. Den sidste mekanisme er sandsynligvis årsagen til at vi i Kvind Sø får frigivet 2,4 - 14 gange så meget fosfor, som der er tilsat sedimentet. I Søbygård Sø fandt vi derimod en markant nedsættelse af fosforfrigivelsen. Dette skyldes, at det tilsatte seston (fra Arreskov Sø) var meget fattigere på fosfor end det organiske stof, der fandtes i sedimentoverfladen. Herved kommer det tilsatte materiale til at fungere som et filter for den opadgående fosforfluks. Det tilsatte seston bestod for størsteparten af blågrønalger (især *Microcystis* arter), som kan leve videre i sedimentet (Reynolds et al. 1981) og eventuelt optage fosfat der. Vi observerede i overensstemmelse hermed en optagelse af fosfat i de første dage af forsøget over den initiale nedbrydning uden sediment, som foregik i mørke.

**Blågrønalger**

DePinto og Verhoff (1977) fandt en lagfase på 12 dage for frigivelsen af fosfor fra grønalger. Lagfasens længde er dog formodentlig bestemt af det eksperimentelle design. De fandt endvidere en meget varierende regenerering af fosfor (31 -

Denitrifikationen stiger

95%, gns. 74%; vi fandt 47% på 30 dage). Regenereringen af fosfor var direkte korreleret med ratioen mellem uorganisk P og organisk P i cellerne (en høj ratio er udtryk for en stor luksusoptagelse af P) (DePinto og Verhoff 1977).

Frigivelsen af uorganiske kvælstofioner fra sedimentet efter sestontilsætningen var lille set i forhold til den tilsatte kvælstofmængde; i nogle tilfælde var der endog et nettooptag. Dette skyldes at denitrifikationen også stimuleres ved tilførsel af organisk stof. Forsøgene viser, at det mineraliserede kvælstof kun i ringe grad vil bidrage til ny fytoplanktonproduktion.

Jones (1976) fandt, at bestanddelene i seston (især diatomeer) blev mineraliseret i følgende rækkefølge: N > C > P. I vort forsøg (Figur 6.1) fandt vi derimod, at der efter 30 dage var frigjort lige store %-dele af N og P. De varierende resultater, der er i litteraturen, antyder at mineraliseringen af N og P vil være afhængig af sestonets artssammensætning og dets kemiske sammensætning.

Lav N/P  
indicium for  
denitrifikation

Det seston, vi har anvendt, afviger meget i kemisk sammensætning fra Redfield ratioen, som angiver sammensætningen af marine planktonalger til: C/N = 6,6; C/P = 106; N/P = 16 (Parsons et al. 1984). Dette skyldes, at en del af sestonet i Arreskov Sø består af resuspended overfladesediment. Sestonets kvælstofindhold kan dog variere meget gennem året, således har Andersen og Lastein (1981) fundet en variation på 2 - 11% N af tørvgæten i Arreskov Sø. Sammensætningen af fluksen fra sedimentet varierer også i de to forsøg. Generelt er N/P-ratioen lavere i fluksen end i overfladesedimentet, hvilket formodentlig skyldes at kvælstoffet tabes ved denitrifikation.

Generelt  
nedbrydnings-  
mønster

Nedbrydningsforløbet for organisk stof inddeltes normalt i flere faser: 1) Initial leaching af vandopløselige stoffer, der nedbrydes meget hurtigt, 2) Initial, hurtig nedbrydning af letnedbrydelige (labile) stoffer og 3) Langvarig, langsom nedbrydning af sværtnedbrydelige (refraktære) forbindelser. Ved sestonnedbrydningsforsøget uden sediment så vi ikke nogen hurtig frigørelse af P eller N. Det kan skyldes, at blågrønalgerne kan holde sig levende i mørke i lang tid (Reynolds et al. 1981) og at en bakteriepopulation, der kan optage mineraliseret N og P, kan nå at blive opbygget. Cole og Likens (1979) fandt ligeledes en konstant kulstofnedbrydningsrate for <sup>14</sup>C-mærket plankton i de første 72 timer.

I forsøgene, hvor sestonet blev tilsat sedimentet, kunne vi dog observere en meget hurtig stigning (ofte i løbet af en dag) i iltforbrug og ændring i P og N flukse. Den hurtige start på nedbrydningen skyldes sedimentets indhold af mikroorganismer, som hurtigt er i stand til at kolonisere og starte nedbrydningen af det tilførte organiske stof.

Effekten varede 2-4 uger

Effekten af tilført organisk stof forsvandt ofte i løbet af 2-4 uger, i hvilken periode 24 - 75% af det organiske kulstof blev nedbrudt. Effekten på Arreskov Sø var mindre, men da sestonmaterialet er næsten identisk med det materiale, som i forvejen findes på sedimentoverfladen, kan der kun forventes en mindre effekt her. Lignende eksperimenter er udført med marine sedimentssystemer (Graf 1987), hvor man fandt en respons i løbet af få timer efter tilsætning af plankton og hvor redoxpotentialet blev lavere helt ned til 7 cm's dybde.

Størrelsen af den refraktære pulje af organisk stof, som ikke bliver oxideret i den første periode, varierer meget. Cole og Likens (1979) fandt i eksperimenter med ferskvandsplankton, at det var ca. 70% og Menzel og Goering (1966) angiver 43 - 84% for det partikulære materiale i havet.

#### 6.5 Konklusion

Effekten af tilførsel af organisk stof til sedimentet kan i nogle tilfælde være voldsom, idet nedbrydningsprocesserne sænker redoxpotentialet, således at noget af sedimentets jernbundne fosfat, kan frigøres. Herved kan der friges op til 14 gange den tilførte fosformængde.

Stigningen i nettofluksen af uorganiske kvælstofioner ud af sedimentet efter tilførsel af organisk stof er lille, fordi størsteparten af kvælstoffet denitrificeres.

Forsøgene viser, at både den aerobe nedbrydning (iltoptagelse) og den anaerobe nedbrydning ved denitrifikation (nitratoptagelse) starter næsten øjeblikkeligt efter tilførselen af seston til sedimentet. Nedbrydningseffekten aftager efter 2 - 4 uger. I denne periode blev der nedbrudt 24 - 75% af det organiske stof.

## 7. Chironomidelarvers effekt på udvekslingen af fosfat og uorganiske kvælstofioner mellem sediment og vand i Arreskov Sø

### 7.1 Indledning

Bunddyrene  
laver  
bioturbation

I søers sedimenter findes der ofte en stor tæthed af chironomidelarver (dansemyggelarver) og oligochaeter. Bundinvertebraterne bidrager til sedimentsamfundets stofskifte og forøger sedimentets iltforbrug og kuldioxidproduktion (f.eks. Andersen, 1976; Granéli, 1979). Forøgelsen er imidlertid ofte mere end det, der svarer til dyrenes eget stofskifte, hvilket skyldes, at den mikrobielle aktivitet i sedimentet forøges. Gravende dyr som chironomider og oligochaeter påvirker forholdene i sedimentet ved at forøge den vertikale opblanding mellem sediment og vand. Dette skyldes især dyrenes pumpebevægelser i forbindelse med respiration. Den vertikale opblanding p.g.a. dyrenes aktivitet kaldes bioturbation.

I denne undersøgelse har vi undersøgt chironomidetætheds betydning for udvekslingen af fosfat og uorganisk kvælstof mellem sediment og vand i den lavvandede, eutrofe Arreskov Sø. Dyrenes stimulering af stofskiftet blev desuden undersøgt ved måling af sedimentets iltforbrug.

### 7.2 Metode

Chirono-  
midelarver  
tilsættes  
sedimentet

Der blev startet forsøg i januar (vinterforsøg) og i juni (sommerforsøg) med tilsætning af chironomidelarver til uforstyrrede sedimentprøver fra station 1 i Arreskov Sø. Tyve sedimentrør (i.d. 52 mm) blev anbragt i termostaterede tanke med flow gennem det ovenstående vand (se kapitel 2.4.2 for en nærmere beskrivelse af den eksperimentelle opstilling). Vinterforsøget blev udført ved 5° og sommerforsøget ved 15°. Til sedimentrørene blev der tilsat 0, 2, 5 og 10 chironomidelarver pr. rør, svarende til 0, 952, 2380 og 4760 chironomidelarver pr. m<sup>2</sup>. Der var 4 - 8 rør i hver gruppe. Med jævne mellemrum blev der målt iltforbrug og udveksling af næringssalte i rørene (se kap. 2.4.2). Før og efter forsøget blev næringssaltkoncentrationen målt i porevandet på rør fra hver gruppe.

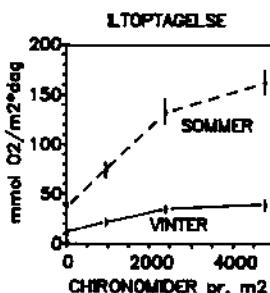
### 7.3 Resultater.

Iltoptagelsen  
øges

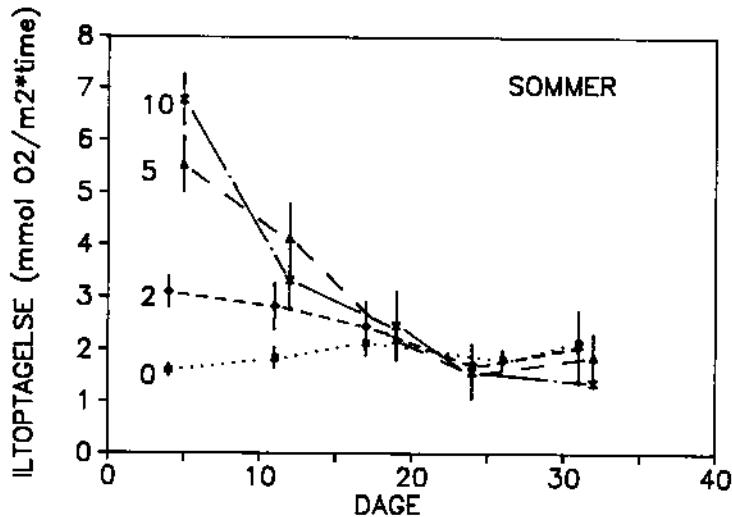
Iltoptagelse. Den initiale iltoptagelse vokser i både vinter og sommerforsøget lineært med det tilsatte antal chironomider indtil en tæthed på 2380 ind/m<sup>2</sup> (Fig. 7.1). Over denne tæthed er stigningen pr. tilsat chironomide mindre. I

begge forsøg giver en tilsætning af ca. 1000 chironomidelarver pr.  $m^2$  en fordobling af iltforbruget i forhold til det ved den naturlig chironomidetæthed. Ved anvendelse af litteraturdata (Granéli 1979) kan det beregnes, at chironomidernes eget iltforbrug udgør 14% af forøgelsen af iltforbruget om vinteren, medens det udgjorde 8% i sommerforsøget.

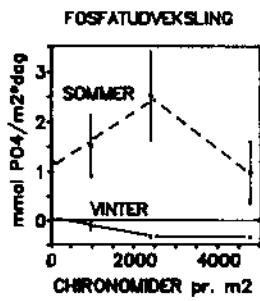
Chironomidernes stimulatoriske effekt på nedbrydningen i sedimentet kan udtrykkes ved iltforbruget i sedimentrørene. Iltforbruget udtrykker bedre den faktiske aktivitet i sedimentrørene end antallet af chironomider, da de kan have forskellig aktivitet, eller de kan være døde i løbet af forsøget. Iltforbruget er nogenlunde konstant gennem vinterforsøget, medens det falder gennem de første 20 dage af sommerforsøget (Fig. 7.2). Faldet er størst ved de højeste chironomide tæheder, hvor den største mineralisering foregår.



**Figur 7.1**  
Initielle rater

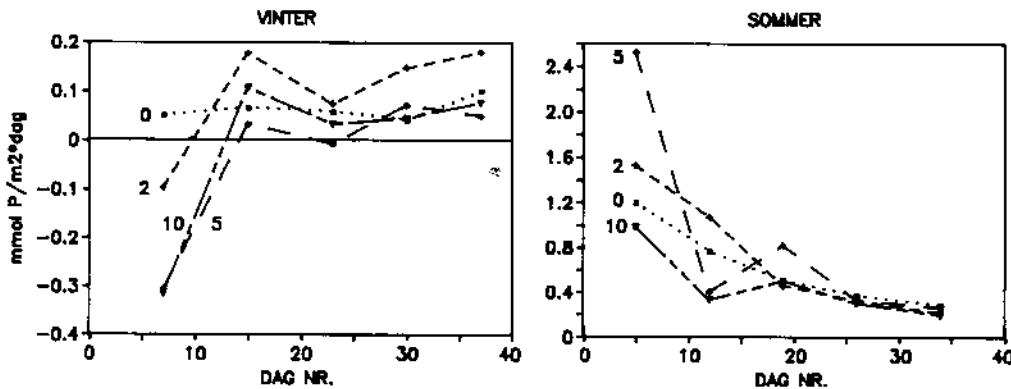


**Figur 7.2**  
Effekten af chironomider på iltoptagelsen gennem sommer forsøget. Tallene angiver antallet af chironomider, der er tilsat hvert rør.



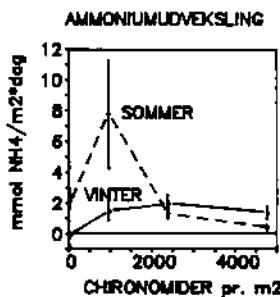
**Figur 7.3**  
Initielle rater

Fosfatudveksling. I vinterforsøget bevirket tilsætning af chironomider i starten en forøget optagelse af fosfat (Fig. 7.3). Om sommeren øger tilsætning af chironomider op til 2380 ind./ $m^2$  afgivelsen af fosfat fra sedimentet. Effekten af chironomiderne er størst i starten af forsøget, efter 15 aftager hastigheden af fosfatudvekslingen i begge forsøg (Fig. 7.4).

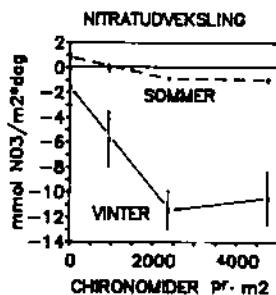


EFFEKT AF CHIRONOMIDER PÅ FOSFATUDVEKSLINGEN

**Figur 7.4.** Effekten af chironomider på fosfatudvekslingen. Positive værdier er afgivelse af fosfat fra sedimentet. Negative er optagelse fra vandet.



**Figur 7.5**  
Initielle rater

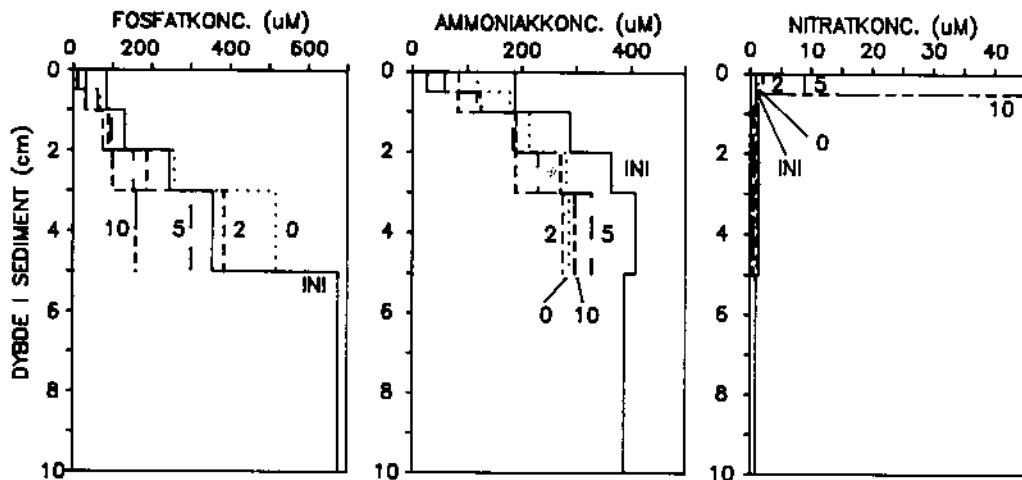


**Figur 7.6**  
Initielle rater

**Kvælstofudveksling.** Tilsætning af chironomider bevirker en forøget ammoniumfrigivelse, som dog ikke er lineær med antallet af chironomider (Fig. 7.5).

Der er derimod en lineær stimulering af nitratoptagelsen med antallet af tilsatte chironomidelarver op til en tæthed på  $2380 \text{ ind./m}^2$  (Fig. 7.6). Stimuleringen er størst om vinteren. I sommerforsøget skiftede forholdene efter 20 dage, således at chironomider derefter stimulerer nitratafgivelse. Nitrat- og ammoniumudvekslingen med tiden hen gennem sommerforsøget er næsten spejlbilleder af hinanden. Nitratoptagelsen i vinterforsøget er betydeligt større end ammoniumfrigivelsen, hvilket tyder på, at chironomiderne stimulerer denitrifikationen og den mikrobielle kvælstooptagelse (Andersen & Jensen - "in press").

**Porevandskoncentration.** Chironomidetætheden har en tydelig effekt på fosfatkoncentrationen i porevandet, således at der er en omvendt relation mellem fosfatkoncentrationen og chironomidetætheden (Fig. 7.7). Figur 7.3 viste, at chironomiderne i sommerforsøget forøgede afgivelsen af fosfat fra sedimentet, hvilket kan forklare de lavere koncentrationer i sedimentet. Ammoniumkoncentrationen i sedimentoverfladen falder med stigende chironomidetæthed, hvorimod nitratkoncentrationen vokser med stigende chironomidetæthed.



**Figur 7.7**  
Porevandskoncentrationer efter sommerforsøget.

#### 7.4 Diskussion

Udvekslingshastigheden forøges i mange tilfælde kun op til en chironomidetæthed på 2380 ind./m<sup>2</sup>. Dette skyldes formodentlig, at chironomiderne ikke er i stand til at oxidere/bearbejde en tykkere zone af sedimentet, selvom der tilsættes flere dyr.

Chironomiderne  
oxiderer  
sedimentet

I vinterforsøget kan sedimentet bringes til at sorbere fosfat fra vandfasen ved tilsætning af chironomider. Årsagen er, at det oxiderede lag af sedimentoverfladen bliver tykkere p.g.a. chironomidernes aktivitet. Om sommeren ses det modsatte, idet fosfatfrigivelsen stimuleres i grupperne op til 2380 chironomider pr. m<sup>2</sup>. Dette skyldes muligvis, at chironomiderne generelt stimulerer nedbrydningen af organisk stof og dermed også mineraliseringen af organisk bundet fosfor.

I litteraturen findes både eksempler på, at chironomider øger fosfatfrigivelsen fra sedimentet og at de kan medføre fosfatoptagelse (Krantzberg, 1985). Chironomidernes effekt på fosfatudvekslingen vil formodentlig være størst i de sører, hvor de redoxsensitive fosforpuljer (jernbundet fosfor) er store eller hvor der er en stor pulje af letnedbrydeligt organisk stof.

Chironomidernes store stimulerende effekt på nitratoptagelsen om vinteren skyldes formentlig især, at der sker en stor denitrifikation i sedimentet og at koncentrationen af nitrat i det ovenliggende vand er høj. Om sommeren, hvor nitratkoncentrationen i det ovenstående vand er

Kvælstof  
kredsløbet  
påvirkes  
også

lav, ses også en stimuleret optagelse i begyndelsen af forsøget p.g.a. chironomideaktivitet. Skiftet i nitratudvekslingen i sommerforsøget efter ca. 20 dage falder sammen med det tids punkt, hvor forøgelsen af iltforbruget ophører. Det er derfor nærliggende at antage, at det letomsættelige organiske stof er omsat på dette tidspunkt. Efter dette tidspunkt falder denitrifikationen og nitrat bliver igen afgivet fra sedimentet formodentlig fordi nitrifikationen også stimuleres. Denne antagelse bestyrkes af, at nitratkoncentrationen i porevandet efter forsøget er størst - og ammoniumkoncentrationen lavest - ved de høje chironomidetætheder.

Dette forsøg viser, at chironomider er blandt de vigtigste styrende faktorer for såvel udvekslingen af fosfat som uorganiske kvælstofioner - i hvert fald over de tidsskalaer på 20-40 dage, som vi har studeret! Med hensyn til kvælstof vil det i en sørestaureringssammenhæng være positivt hvis en større chironomidetæthed kan opnås, idet denitrifikationen øges. En større chironomidetæthed vil også kunne øge sedimentets fosfatsorption om vinteren; om sommeren skal man dog op på meget store tætheder for at få denne effekt.

### 7.5 Konklusion.

Chironomider stimulerer nedbrydningen og forøger sedimentets iltforbrug. De øger samtidig det oxiderede lags tykkelse, hvilket kan medføre en øget sorption af fosfat til sedimentet om vinteren. Om sommeren kan der dog ske en forøget frigivelse af fosfat i starten efter chironomidetilsætning p.g.a. stigningen i mineraliseringshastigheden.

En øget chironomide aktivitet har generelt den effekt, at der netto sker en transport af uorganiske kvælstofioner til sedimentet, idet kvælstofoptagelsen øges om vinteren og afgivelsen formindskes om sommeren.

Resultaterne fra denne undersøgelse er yderligere behandlet i Andersen & Jensen (in press).

## 8. Samlende diskussion og konklusion

### 8.1 Intern P-belastning i de fire NPO-søer

Om sommeren er frigivelsen af fosfor fra sedimentet meget større end tilførslen udefra

I Arreskov Sø, Kvind Sø, Søbygård Sø og Væng Sø blev den eksterne fosforbelastning reduceret i 1982. Søerne har imidlertid stadig høje fosforkoncentrationer i sværvandet som følge af en stor intern fosforbelastning i sommerhalvåret. I Arreskov Sø var fosfatfrigivelsen fra sedimentet i sommerhalvåret 1987 ca. 55 gange større end den eksterne tilførsel af fosfor. For Kvind Sø var forholdet 15, for Søbygård Sø 14 og for Væng Sø 3. Størrelsen af den interne fosforbelastning varierede fra  $15.3 \text{ mg P} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dg}^{-1}$  i Væng Sø til  $106 \text{ mg P} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dg}^{-1}$  i Søbygård Sø (som gennemsnit for sommerhalvåret).

Det meste blev frigivet som fosfat

Fosforfrigivelsen fra de aerobe sedimenter skete i form af fosfat, kun i Arreskov Sø (juli) blev der observeret en større frigivelse af total fosfor. Der kunne være tale om opstigende kolonier af *Microcystis* sp., som dominerede plantoplanktonet hele sommeren.

Høje rater i sammenligning med udenlandske undersøgelser

De målte brutto-frigivelsesrater af fosfat fra sedimentet i de fire søer var generelt højere end de rater for fosfatfrigivelse fra både aerobe og anaerobe sedimenter, som er rapporteret i den internationale litteratur (f.eks. Holdren & Armstrong 1980); men de var ikke atypiske for danske lavvandede søer (jvnf. kapitel 5 samt Jensen et al. 1987).

Forskellen på brutto- og nettofluxene

Bruttofrigivelsesraterne var mere end tre gange større end de beregnede nettorater; differensen skyldes formodentlig sedimentation af partikulært fosfor. I Arreskov Sø og Kvind Sø blev dette bekræftet ved at beregne sedimentationsraten ud fra den stående biomasse og artssammensætningen af plantoplankton (Jensen & Andersen - "in press").

I nogle situationer var brutto- og nettofluxene af samme størrelsесorden. Det drejede sig om klarvandsperioderne i Kvind Sø og Søbygård Sø i juni og perioder med kraftig opblomstring af blågrønne alger i Arreskov Sø og Kvind Sø.

### 8.2 Betydningen af blågrønalger for søernes fosforbalance

Brutto- og nettoraterne er ens ved op-

Det at brutto- og nettofrigivelsen af fosfor fra sedimentet var lige store under opblomstring af blågrønne alger i Arreskov Sø og Kvind Sø

blomstring af blågrønalger skyldes, at disse alger har meget lav synkehastighed (sedimentationsrate) eller ligefrem positiv opdrift. Observationerne i de to sører var interessante, fordi netop perioderne med dominans af blågrønne alger var karakteriseret ved høje koncentrationer af fosfor og ved at nitrat og ammonium ikke kunne måles i sværvandet. Laboratorieforsøg med sedimentkerner viste, at i disse perioder ville en øget nitratkoncentration i sværvandet føre til øget fosfatfrigivelse fra sedimentet. Derfor kunne de høje fosforkoncentrationer i sværvandet ikke forklares ved at nitratmanglen førte til ekstra frigivelse af jernbundet fosfor fra sedimentet; de høje koncentrationer var først og fremmest et resultat af den ændrede balance mellem frigivelse og sedimentation af fosfor i søen.

Herved akkumuleres fosfor i sværvandet

Dette er nok forklaringen på "nitrat-effekten"!

Vi må konkludere, at den inverse sammenhæng mellem nitrat og totalfosfor, som har været iagttaget i andre lavvandede sører (Andersen 1982, Ryding 1985) ligesom i Arreskov Sø og Kvind Sø, næppe skyldes, at nitraten styrer frigivelsen af fosfat fra sedimentet; men at perioder med nitratmangel meget ofte er præget af dominans af blågrønne alger. Dette har været en overset faktor i studiet af fosforbalancerne i de lavvandede sører. I Arreskov Sø og Kvind Sø er det sandsynligt, at varigheden af de blågrønne algers opblomstring i de enkelte sommerhalvår (1972-87) var styret af den eksterne tilførsel af kvælstof, hvilket betyder, at ændrede kvælstoftilførsler kan have meget stor indflydelse på fosforbalancen i de lavvandede sører. (Jensen & Andersen 1989 og Jensen & Andersen - i tryk).

### 8.3 Sedimentkarakterer, som kunne beskrive fosfatfrigivelsen

#### 8.3.1

#### Betydning af jern:fosfor-forholdet i overfladesedimentet

Forskellig fosfatfluks  
søerne imellem  
kunne forklaries  
ved Fe:P-for-  
holdet i sedi-  
mentet

I en sammenligning af den aerobe fosfatfrigivelse fra sedimentet i 15 sører viste det sig, at kun to af de undersøgte sedimentkarakterer kunne beskrive denne. Det var forholdet mellem total jern og total fosfor (Fe:P) og puljen af let adsorberet fosfat (ADS-P) i overfladesedimentet. To ting taler imidlertid imod at anvende ADS-P som sediment-karakter i denne sammenhæng. Den første er, at ADS-P var korreleret til Fe:P, som er den mest konservative faktor af de to. Den anden er, at sæsonvariationen i ADS-P i tre af NPO-søerne ikke korrelerede med sæsonvariationen i fosfatfrigivelsen fra sedimentet.

fosfatfrigivelsen fra sedimentet. Anvendelsen af Fe:P-forholdet som styrende sedimentkarakter for den aerobe fosfatfrigivelse blev derimod underbygget af sorptionskinetikkens sammenhæng med Fe:P og iagttagelser af søvandets fosforindhold i 123 danske søer grupperet efter Fe:P i overfladesedimentet (NPO-projekt 4.5). Et lavt Fe:P-forhold giver en stor intern fosforbelastning og et højt Fe:P-forhold giver en lille intern fosforbelastning. Dette princip er lige så enkelt som målingen af total jern og total fosfor i sedimentet og skulle derfor kunne finde udbredt anvendelse.

"Jern virker"  
når Fe:P>15

Ved Fe:P<10 var der ingen sammenhæng mellem fosfatfrigivelsen og Fe:P. For disse søer alene gav total fosfor i overfladesedimentet en bedre beskrivelse af fosfatfrigivelsen. Ved Fe:P>15 var beskrivelsen derimod meget sikker.

Tommelfinger-regel

Resultaterne kan derfor udmonthes i en "tommelfingerregel" for praktisk arbejde med ørestaurering på f.eks. måde: Hvis man skal gøre sig håb om at kunne kontrollere sedimentets fosfatfrigivelse (f.eks. via lavere pH og øget sigtdybde) skal overfladesedimentets Fe:P-forhold være større end 15 (vægtforhold). Observationer i Væng Sø og Søbygård Sø synes at bekræfte denne regel. I begge søer er der opnået lavere pH og større sigtdybde i søvandet i de sidste år. I Væng Sø, hvor Fe:P-forholdet er 16.3 har dette medført en kraftig reduktion af sedimentets fosforfrigivelse. I Søbygård Sø, hvor Fe:P-forholdet er 10.8 er sedimentets fosforfrigivelse stor set uændret i forhold til tidligere.

8.3.2

Udviklingen i NPO-søerne i lyset af denne "tommelfingerregel"

Man behøver ikke at vente til al fosfor i sedimentet udtømt

Beregninger baseret på tabel 3.1 og tabel 5.1 viser, at hvis udtømningen af fosfor fra sedimentet i Søbygård Sø fortsætter med samme hastighed som nu vil der gå 8 år før Fe:P-forholdet i de øverste 10 cm af sedimentet er oppe på 16. Efter ovennævnte tommelfingerregel vil man altså fra 1995 kunne gøre sig håb om at kontrollere sedimentets fosforfrigivelse. Der er dog ikke taget hensyn til søens jernbalance ved denne beregning og det er indlysende at jerntilførslen og nettosedimentation af jern er meget betydningsfulde faktorer for den fremtidige udvikling. For Arreskov Sø viser tilsvarende beregninger, at der vil gå 6 år fra 1987 før Fe:P i sedimentet kan få en styrende funktion. I Væng Sø og Kvind Sø sker der ikke nogen udtømning af fosforpuljen og et øget Fe:P-forhold kan derfor kun komme ved øgede

Jernmasse-  
balancer er  
vigtige

jerntilførsler.

Disse betragtninger viser, at det er nødvendigt at lave massebalance på jern for at kunne forudsige en fremtidig udvikling i en lavvandet sø.

### 8.3.3

#### Andre sedimentkarakterer

Kalcium havde  
ingen betyd-  
ning

I vores studier var der intet, som tydede på at kalcium havde nogen betydning for sæsondynamikken i den interne fosforbelastning. Den kalciumbundne fosforpulje repræsenterer dog en pulje af immobiliseret fosfor. Derfor er det vigtigt at beregne nettodeponeringen af kalciumbundet fosfor i en sø for at vurdere, hvor stor en fosforbelastning søen kan tåle uden at den udvekslelige pulje af fosfor i sedimentet øges (den pulje, som giver den årligt tilbagevendende interne P-belastning!).

Ingen af de øvrige sedimentkarakterer, som blev målt, kunne bruges til at beskrive sedimentets fosforfrigivelse.

### 8.4 Styrende faktorer for fosfatfrigivelsen fra sedimentet

#### 8.4.1

##### Temperatur

Temperaturen  
var den vigtig-  
ste styrende  
faktor

Laboratorieforsøg med sediment fra alle fire NPO-søer viste, at vandtemperaturen var den faktor, som havde den største effekt på fosfatfrigivelsen (ved temperaturer indenfor den naturlige sæsonvariation). Sæsonvariationen i sedimentets fosfatfrigivelse kunne da også forklares alene ved sværdets temperatur i tre af søgerne.

Temperaturen  
øger minerali-  
seringen og  
inducerer en  
frigivelse af  
jernbundet  
fosfor

Som gennemsnit for de fire NPO-søer var fosfatfrigivelsen temperaturafhængig med en  $Q_{10}$ -værdi på 4.9 (laboratoriemålinger); mens sedimentets iltoptag i samme forsøg havde en  $Q_{10}$ -værdi på 2.1. Denne forskel skyldes, at de øgede mineraliseringsrater, som kommer ved en temperaturstigning, skaber dårligere oxidationsforhold i sedimentet - det oxiderede overfladelag bliver tyndere. Herved sker der en frigivelse af fosfat fra sedimentets jernbundne fosforpulje og overfladesedimentets evne til at sorbere fosfaten mindskes. I overensstemmelse hermed fandt vi den mindste temperatureffekt på fosfatfrigivelsen i Arreskov Sø, hvor den jernbundne fosforpulje var mindst.

Da vandtemperaturen i de lavvandede søer hurtigt indstiller sig efter lufttemperaturen og ofte er omkring 20 gr.C. om sommeren bliver temperaturen en meget vigtig faktor for sedimentets fosforfrigivelse. Blandt andet herved adskiller de lavvandede søer sig fra de dybere lagdelte søer.

#### 8.4.2

#### Mineralisering af organisk stof

Der er en stor  
recirkulering  
af fosfor  
mellem sediment  
og vand

Mineraliseringen af det sedimenterede planteplankton er "krumtappen" i fosforfrigivelsen fra sedimentet i de lavvandede søer. De høje fosfatfrigivelsesrater, som måles i disse søer, er først og fremmest et produkt af store tilførsler af frisk organisk stof fra det ovenstående vand. I Arreskov Sø er det således anslået, at halvdelen af det producerede planteplankton sedimenterer og nedbrydes i sedimentet (Andersen & Lastein 1981). Samme forhold er fundet i Søbygård Sø (Kristensen & Jensen 1987). Da synkehastigheden for planteplankton i disse søer ofte er omkring  $0.2 \text{ m} * \text{dg}^{-1}$  ville sørvandet hurtigt blive tømt for fosfor, hvis sedimentationen ikke blev modsvaret af en høj mineraliseringsrate i sedimentet.

75 % er frigi-  
vet efter 4  
uger

Resultater af forsøg med en "puls"-tilsætning af seston til overfladesedimentet viste, at sedimentets iltoptagelse og denitrifikation blev påvirket i 2-4 uger når temperaturen var 15-18 grader. Den tilsatte sestonmængde svarede ca. til sestonmængden i vandsøjlen over sedimentet. Indenfor de 2-4 uger var 25-75% af det tilsatte kulstof mineraliseret.

Der induceres  
frigivelse af  
jernbundet  
fosfor

Effekten af sestontilsætning på sedimentets fosfatfrigivelse var i nogle tilfælde meget større end hvad der kunne forklares udfra den tilsatte mængde. Mekanismen bag den forøgede fosfatfrigivelse var den samme som ved temperaturstigningen: at det oxiderede overfladelag blev tyndere, hvorfed jernbundet fosfor blev frigivet.

"Kvaliteten"  
af det organi-  
ske stof spiller  
også en rolle

I Søbygård Sø så vi imidlertid den modsatte effekt: Fluxen af fosfat fra sedimentet faldt ved tilsætning af seston skønt iltforbruget steg. I dette tilfælde var forklaringen sandsynligvis, at P:C-forholdet i det organiske stof som blev tilsat var mindre end i det friske organiske stof i sedimentet. Det kan derfor tænkes, at mængden af overskudsfosfat i det sedimenteterende materiale har en ret stor betydning for den hastighed, hvormed fosfor bliver frigivet fra materialet under nedbrydning.

#### 8.4.3

#### Nitrat effekt på fosfatfrigivelsen

Nitrat virkede på to måder

I sensommeren, hvor der kun var lave koncentrationer af kvalstofsalte i svandet, viste det sig, at nitrattilsætning var i stand til at øge sedimentets fosfatfrigivelse i alle fire søer. Ingen synes virkningsmekanismen at være, at mineraliseringshastigheden blev øget og det oxiderede overfladelag tyndere. På andre årstider og ved højere koncentrationer havde nitrat som forventet en oxiderende virkning på sedimentet. Denne bevirke, at det oxiderede overfladelag blev tykkere, hvorved fosfatfrigivelsen blev mindsket. Tilsvarende nitrat effekter er observerede i svenske undersøgelser og konklusionen må blive, at man generelt ikke kan begrænse sedimenternes fosforfrigivelse ved at øge nitratkonzentrationen i svandet i lavvandede søer.

Søerne har en stor kapacitet for denitrifikation

Som diskuteret i afsnit 8.2 kan ændrede nitratkonzentrationer derimod have virkning på sammensætning og produktivitet af plant plankton og yderligere har søerne en stor kapacitet for denitrifikation selvom der altid er ilt ved sedimentoverfladen. Massebalance beregningerne i Kvind Sø og Søbygård Sø viser, at kvalstoffjernelsen i disse søer er over  $600 \text{ kg N} * \text{ha}^{-1} \text{ sør bund} * \text{år}^{-1}$ . Disse forhold kunne måske være en begrundelse for at lede nitratholdigt vand ud i søerne i stedet for at føre det udenom søerne.

#### 8.4.4

#### Bioturbation

Dansemygge larver

Forsøg med sediment fra Arreskov Sø viste, at en øget tæthed af chironomider (dansemyggelarver) øgede mineraliseringhastigheden i sedimentet og samtidig oxiderede sedimentet. Om sommeren førte dette til øget fosfatfrigivelse; mens vi i vintersituationen så, at fosfatsorptionen til sedimentet blev øget. I begge situationer blev denitrifikationen stimuleret.

Tætheden havde en markant effekt på fluksraterne

I vores undersøgelser af fosfatfrigivelsen fra sedimentet i 15 forskellige søer så vi ikke på tætheden af chironomider i rørene. Effekten af chironomider i Arreskov Sø var imidlertid så stor, at denne "sedimentkarakter" burde have være medtaget som en af de styrende faktorer. Chironomidetætheden kunne måske have forklaret meget af den variation i fosfatfrigivelsesraten, som vi så i søer med lavt Fe:P-forhold. Holdren & Armstrong (1980) fandt i en undersøgelse af styrende faktorer i fire nordamerikanske søer, at chironomidtætheden var af større betydning end både temperatur og pH.

#### 8.4.5

#### pH-effekt på fosfatfluksen

pH havde ringe effekt på fosfatfluksen

Der var en tydelig pH-effekt på fosfatfrigivelsen fra suspenderet sediment, idet sedimentets (aerobe) sorptionskinetik ændrede sig markant. Der var ikke den samme tydelige effekt på fosfatfluksen fra uforstyrrede sedimentkerner. Forklaringen på dette kan være, at pH-forsøgene blev udført om sommeren, hvor sedimentets oxiderede overfladelag var tyndt. Der var således ikke en stor jernbunden fosforpulje til stede, som kunne frigives ved høje pH-værdier. Resultaterne antyder, at pH måske ikke er en så betydningsfuld styrende faktor for fosfatfrigivelsen fra sedimentet i de lavvandede søer.

Referenceliste.

- Ahlgren, I. (1980): A dilution model applied to a system of shallow eutrophic lakes after diversion of sewage effluents. Arch. Hydrobiol. 89, 17-32.
- Andersen, F.Ø. & Lastein, E. (1981): Sedimentation and resuspension in shallow eutrophic Lake Arreskov, Denmark. Verh. Internat. Verein. Limnol. 21, 425-430.
- Andersen, F.Ø. & Jensen, H.S. (in press): The influence of chironomids on decomposition of organic matter and nutrient exchange in a lake sediment. Verh. Internat. Verein. Limnol.
- Andersen, J.M. (1975): Influence of pH on release of phosphorus from lake sediments. Arch. Hydrobiol. 76, 411-419.
- Andersen, J.M. (1976): Importance of the denitrification process for the rate of degradation of organic matter in lake sediments. In Golterman, H.L. (ed.) Interactions between sediments and fresh water. Dr. W. Junk B.V. Publishers. The Hague. 1977. p. 357-362.
- Andersen, J.M. (1982): Effect on nitrate concentration in lake water on phosphate release from the sediment. Wat. Res. 16, 1119-1126.
- Berner, R.A. (1980): Early diagenesis: a theoretical approach. Princeton Univ. Press.
- Boers, P.C.M. (1986): Studying the phosphorus release from the Loosdrecht Lakes sediments, using a continuous flow system. Hydrobiol. Bull. 20, 51-60.
- Boström, B. (1984): Potential mobility of phosphorus in different types of lake sediment. Int. Revue ges. Hydrobiol. 69, 457-474.
- Boström, B. & Pettersson, K. (1982): Different patterns of phosphorus release from lake sediments in laboratory experiments. Hydrobiologia 92, 415-429.
- Boström, B., Jansson, M., Forsberg, C. (1982): Phosphorus release from lake sediments. Arch. Hydrobiol. Beih. 18, 5-59.
- Boström, B., Andersen, J.M., Fleischer, S., Jansson, M. (1988): Exchange of phosphorus across the sediment-water interface. Hydrobiologia 170, 229-244.
- Cole, J.J. & Likens, G.E. (1979): Measurements of mineralization of phytoplankton detritus in an oligotrophic lake. Limnol. Oceanogr. 24, 541-547.
- DePinto, J.V. & Verhoff, F.H. (1977): Nutrient regeneration from aerobic decomposition from green algae. Environ. Sci. Technol. 11, 371-377.
- Einsele, W. (1936): Über die Beziehungen der Eisenkreislaufes zum Phosphorkreislauf im eutrophen See. Arch. Hydrobiol. 29, 664-686.

Froelich, P.N. (1988): Kinetic control of dissolved phosphate in natural rivers and estuaries: A primer on the phosphate buffer mechanism. Limnol. Oceanogr. 33, 649-668.

Fyns Amtskommune (1976): De 7 sører.

Gächter, R., Meyer, J.S., Mares, A. (1988): Contribution of bacteria to release and fixation of phosphorus in lake sediments. Limnol. Oceanogr. 33, 1542-1558.

Graf, G. (1987): Benthic energy flow during a simulated autumn bloom sedimentation. Mar. Ecol. Prog. Ser. 39, 23-29.

Granéli, W. (1979): The influence of Chironomus plumosus larvae on the oxygen uptake of the sediment. Arch. Hydrobiol. 87, 385-403.

Gunatilaka, A. (1982): Phosphate adsorption kinetics of resuspended sediments in a shallow lake, Neusiedlersee, Austria. Hydrobiologia 91, 293-298.

Hieltjes, A.H.M. og L.Lijklema (1980): Fractionation of inorganic phosphates in calcareous sediments. J. Environ. Qual. 9, 405-407.

Holdren, Jr., G.C., Armstrong, D.E. (1980): Factors affecting phosphorus release from intact lake sediment cores. Environ. Sci. Technol. 14, 79-87.

Istvánovics, V. (1988): Seasonal variation of phosphorus release from the sediments of shallow Lake Balaton (Hungary). Wat. Res. 22, 1473-1483.

Jacobsen, O.S. (1977): Sorption of phosphate by Danish lake sediments. Vatten 3, 290-298.

Jacobsen, O.S. (1978): Sorption, adsorption and chemosorption of phosphate by Danish lake sediments. Vatten 4, 230-243.

Jansson, M. (1986): Nitrate as a catalyst for phosphorus mobilization in sediments. I P.G. Sly (Ed.): Sediments and water interactions. Springer-Verlag, p. 387-389.

Jansson, M. (1987): Anaerobic dissolution of iron-phosphorus complexes in sediment due to the activity of nitrate-reducing bacteria. Microb. Ecol. 14, 81-89.

Jansson, M., Enell, M., Fleischer, S., Gächter, R., Keldermann, P., Löfgren, S., Nürnberg, G., Provini, A., Sinke, A. (1988): 2. Phosphorus release from lake sediments. Arch. Hydrobiol. Beih. 30, 90-93.

Jensen, H.S & Andersen, F.Ø. (1982): Effect of sulfate and nitrate on the sulfate reduction in freshwater sediment. I Bergström, Kettunen & Stenmark (editors): Proceedings of the 10th Nordic Symposium on Sediments. Rapport nr. 26 fra Helsinki University of Technology. ISBN 951-752-669-5

- Jensen, H.S., Søndergaard, M., Jeppesen, E. (1987): Brabrand Sø 1986. Sedimentkarakteristik. Fosforudvekslingsforhold.
- Effekten af forskellige grader af sedimentfjernelse på eutrofierings-forholdene. Rapport fra Århus Amtskommune og Århus Kommune.
- Jensen, H.S & Andersen, F.Ø (1989): Kvælstofs betydning for fosforudvekslingen mellem sediment og vand i to lavvandede søer. Vand & Miljø, 2, 103-109.
- Jensen, H.S. & Andersen, F.Ø. (in press): Impact of nitrate and blue-green algae abundance on phosphorus cycling between sediment and water in two shallow, eutrophic lakes. Verh. Internat. Verein. Limnol.
- Jeppesen, E., P. Kristensen, O. Sortkjær, M. Søndergaard, E. Dall (1987): Lavvandede, hurtigt gennemstrømmede søer's reaktion på nedsat fosforbelastning. Vand & Miljø, 4, 173-178.
- Jeppesen, E., Søndergaard, M., Rossen, H. (1989): Restaurering af søer ved indgreb i fiskebestanden. Rapport fra Danmarks Miljøundersøgelser - afd. for Ferskvand.
- Jones, J.G. (1976): The microbiology and decomposition of seston in open water and experimental enclosures in a productive lake. J. Ecol. 64, 241-278.
- Kamp-Nielsen, L. (1974): Mud-water exchange of phosphate and other ions in undisturbed sediment cores and factors affecting the exchange rates. Arch. Hydrobiol. 73, 218-237.
- Klotz, R.L. (1988): Sediment control of soluble reactive phosphorus in Hoxie Gorge Creek, New York. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 45, 2026-2034.
- Krantzberg, G. (1985): The influence of bioturbation on physical, chemical and biological parameters in aquatic environments: A review. Environ. Poll. (Series A) 39, 99-122.
- Kristensen, P. & Jensen, P. (1987): Sedimentation og resuspension i Søbygård Sø. Specialrapport fra Botanisk Institut, Århus Universitet og Miljøstyrelsens Ferskvandslaboratorium.
- Kristensen, P., Jensen, J.P., Jeppesen, E. (1988a): Revurdering af simple sømodeller. Midtvejsrapport for NPO-projekt C9 (tidligere NPO-4.5). Danmarks Miljøundersøgelser - Ferskvand.
- Kristensen, P., Jensen, J.P., Jeppesen, E. (1988b): Fosforindholdet i sedimentet i danske søer. I: "Årsrapport fra Miljøstyrelsens Ferskvandslaboratorium 1987". ISBN 87-503-7347-1.
- Kristensen, P. & Jeppesen, E. (1988): Vore søer har det skidt. Kaskelot 80, 20-25.
- Limnologisk Metodik (1985). Akademisk Forlag.
- Löfgren, S. (1987): Phosphorus retention in sediments - implications for aerobic phosphorus release in shallow lakes. Doktor afhandling fra Uppsala Universitet.
- Lønholdt, J. (1976): Gudenåundersøgelsen. Rapport nr. 20.

- Marsden, M.W. (1989): Lake restoration by reducing external phosphorus loading: the influence of sediment phosphorus release. *Freshwat. Biol.* 21, 139-162.
- Menzel, D.W. & Goering, J.J. (1966): The distribution of organic detritus in the ocean. *Limnol. Oceanogr.* 9, 179-186.
- Mortimer, C.H. (1941): The exchange of dissolved substances between mud and water in lakes. *J. Ecol.* 29, 280-329.
- Mortimer, C.H. (1942): The exchange of dissolved substances between mud and water in lakes. *J. Ecol.* 30, 147-201.
- Nürnberg, G.K. (1988): Prediction of phosphorus release rates from total and reductant-soluble phosphorus in anoxic lake sediments. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 45, 453-462.
- Ohle, W. (1954): Sulfat als "Katalysator" der limnischen Stoffkreislaufes. *Vom Wasser* 21, 13-32.
- Osgood, R.A. (1988): A hypothesis on the role of Aphanizomenon in translocating phosphorus. *Hydrobiologia* 169, 69-76.
- Parsons, T.R., Takahashi, M., Hargrave, B. (1984): Biological oceanographic processes. Pergamon Press. Oxford.
- Pettersson, K., Boström, B., Jacobsen, O.-S. (1988): Phosphorus in sediments - speciation and analysis. *Hydrobiologia* 170, 91-101.
- Postma, D. (1981): Formation of siderite and vivianite and the pore-water composition of a recent bog sediment in Denmark. *Chem. Geol.* 31, 225-244.
- Psenner, R., Boström, B., Dinka, M., Pettersson, K., Pucsko, R., Sager, M. (1988): 4. Fractionation of phosphorus in suspended matter and sediment. *Arch. Hydrobiol. Beih.* 30, 98-110.
- Rebsdorf, Aa., Søndergaard, M., Thyssen, N. (1988): Vand- og sedimentanalyser i ferskvand - særlige kemiske analyse- og beregningsmetoder. Miljøstyrelsens Ferskvandslaboratorium. Teknisk rapport nr. 21.
- Reynolds, C.S., Jaworski, G.H.M., Cmiech, H.A., Leedale, G.F. (1981): On the annual cycle of the blue-green alga *Microcystis aeruginosa* Kütz. emend. Elenkin. *Philos. Trans. R. Soc. London.* 293, 419-477.
- Ryding, S.-O. (1985): Chemical and microbiological processes as regulators of exchange of substances between sediments and water in shallow eutrophic lakes. *Int. Revue. ges. Hydrobiol.* 70, 657-702.
- Sas, H. (ed.) (1989): -P!?, Lake restoration by reduction of nutrient loading. Academia Verlag Richarz, Sankt Augustin.
- Sinke, A.J.C. & Cappenberg, T.E. (1988): Influence of bacterial processes on the phosphorus release from sediments in the eutrophic Loosdrecht Lakes, The Netherlands. *Arch. Hydrobiol. Beih.* 30, 5-13.

Søndergaard, M. (1987): Fosfordynamikken i lavvandede sører med udgangspunkt i Søbygård Sø. Miljøstyrelsens Ferskvandslaboratorium. Teknisk rapport nr. 15.

Søndergaard, M. (1988): Seasonal variations in the loosely sorbed phosphorus fraction of the sediment of a shallow and hypereutrophic lake. Environ. Geol. Water Sci. 11, 115-121.

Søndergaard, M. (1989): Phosphorus release from a hypertrophic lake sediment: Experiments with intact sediment cores in a continuous flow system. Arch. Hydrobiol. 116, 45-59.

Søndergaard, M. (in press): Pore water dynamics in the sediment of a shallow and hypertrophic lake. Hydrobiologia.

Søndergaard, M., Jeppesen, E., Sortkjaer, O. (1987): Lake Søbygård: A shallow lake in recovery after a reduction in phosphorus loading. GeoJournal 14, 381-384.

Søndergaard, M., Jeppesen, E., Kristensen, P., Sortkjær, O. (in press): Interactions between sediment and water in a shallow and hypertrophic lake: A study on phytoplankton collapses in Lake Søbygård, Denmark. Hydrobiologia.

Takamura, N. & Yasuno, M. 1988: Sedimentation of phytoplankton populations dominated by *Microcystis* in a shallow lake. J. Plankton Res. 10, 283-299.

Theis, T.L. & McCabe, P.J. (1978): Phosphorus dynamics in hypereutrophic lake sediments. Water Res. 12, 677-685.

Trimbee, A.M. & Harris, G.P. (1984): Phytoplankton population dynamics of a small reservoir: use of sedimentation traps to quantify the loss of diatoms and recruitment of summer bloom-forming blue-green algae. J. Plankton Res. 6, 897-918.

Vejle Amtskommune (1987): Væng Sø 1986. Rapport fra Vejle Amtskommune.

Vejle Amtskommune (in press): Væng Sø 1986. Rapport fra Vejle Amtskommune.

Wetzel, R.G. (1983): Limnology. Saunders College Publishing.

Århus Amtskommune (1978): Bryrup Søerne 1978. Rapport fra Århus Amtskommune.

Århus Amtskommune (1978): Søbygård Sø 1978. Rapport fra Århus Amtskommune.



# Registreringsblad

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

**Serietitel, nr.:** NPo-forskning fra Miljøstyrelsen, C4

**Udgivelsesår:** 1990

**Titel:**

Fosforbelastning i lavvandede eutrofe sører

**Undertitel:**

**Forfatter(e):**

Jensen, Henning Skovgaard; Andersen, Frede Østergaard

**Udførende institution(er):**

Odense Universitet. Biologisk Institut

**Resumè:**

Lavvandede eutrofe sører er om sommeren præget af en stor fosfatfrigivelse fra sedimentet til søvandet – den såkaldte interne fosforbelastning. I 4 sører, som blev studeret i 1987, havde faktorer, som påvirkede tykkelsen af det iltede overfladelag i sedimentet, også stor effekt på fosfatfrigivelsen. Det var især søvandets temperatur og nitratindhold. Forholdet mellem jern og fosfor (Fe:P) i overfladesedimentet var styrende for fosfatudvekslingen. Søsedimenter med højt Fe:P afgav kun ringe mængder fosfat.

**Emneord:**

sører; sedimenter; temperatur; fosfor CAS 7723-14-0; jern CAS 74-39-89-6; nitrogen CAS 7727-37-9

**ISBN:** 87-503-8372-8

**ISSN:**

**Pris:** 90,- (inkl. 22 % moms)

**Format:** A5

**Sideantal:** 96

**Md./år for redaktionens afslutning:** februar 1990

**Oplag:** 350

**Andre oplysninger:**

Rapport fra koordinationsgruppe C for vandløb, sører og marine områder

**Tryk:** Luna-Tryk ApS, København

# Fosforbelastning i lavvandede eutrofe sør

Lavvandede eutrofe sør er om sommeren præget af en stor fosfatfrigivelse fra sedimentet til sòvandet – den såkaldte **interne fosforbelastning**. I 4 sør, som blev studeret i 1987, havde faktorer, som påvirkede tykkelsen af det iltede overfladelag i sedimentet, også stor effekt på fosfatfrigivelsen. Det var især sòvandets temperatur og nitratindhold. Forholdet mellem jern og fosfor (Fe:P) i overfladesedimentet var styrende for fosfatudvekslingen. Søsedimenter med højt Fe:P afgav ringe mængder fosfat.



Miljøministeriet **Miljøstyrelsen**

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

**Pris kr. 90.- inkl. 22% moms**

ISBN nr. 87-503-8372-8