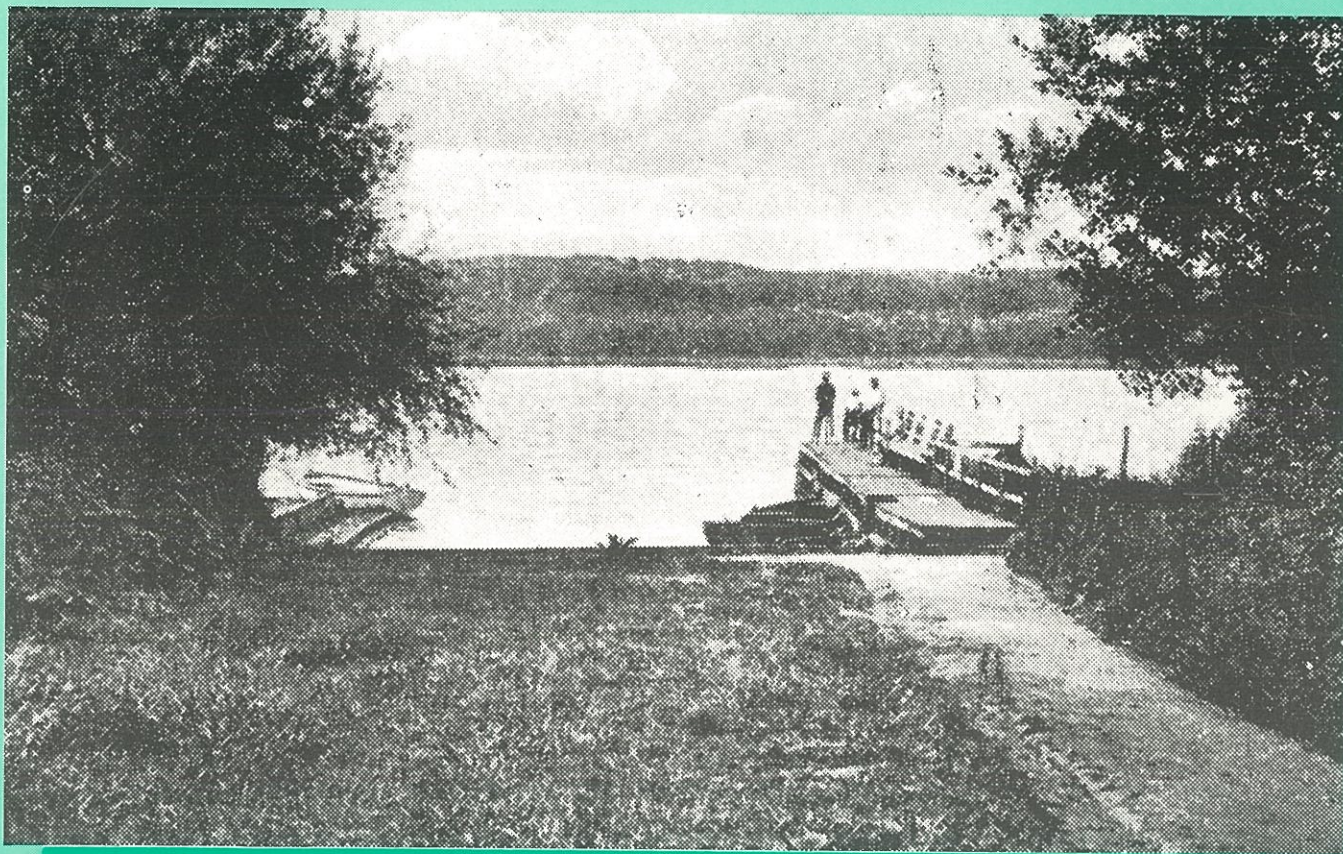


Restaurering af Brabrand Sø



Sedimentkarakteristik og fosforudveksling



Gammelt fotografi af Brabrand Sø ved Søvej.

delrapport nr 1



Århus Kommune
Århus Amtskommune



1987

REGISTRERINGSBLAD

- Udgiver: Århus Amtskommune og Århus Kommune.
- Titel: Brabrand Sø 1986. Sedimentkarakteristik. Fosforudvekslingsforhold. Effekt af forskellige grader af sedimentfjernelse på eutrofieringsforholdene.
- Forfattere: Henning Jensen, Martin Søndergaard og Erik Jeppesen, Miljøstyrelsens Ferskvandslaboratorium.
- Resumé: Fosforindhold og fosforbindingstyper i sedimentet i Brabrand Sø blev kortlagt ved kemisk analyse af sedimentet i 7 dybder (0-70 cm) ved 35 stationer i søen. 60-80 % af P-indholdet på 0,5 - 10 mg P/g TS er bundet til jern. P-indholdet er højest i det øverste sedimentlag. Udvekslingsforsøg viser, at en stor del af P i sedimentet vil kunne frigøres til søvandet og dermed forsinke virkningen af fosforfjernelse fra spildevand. Ved fjernelse af ca. 400.000 m³ overfladesediment forventes det, at en sigtdybde på 0,7 - 1,1 m nås allerede i 1993. Uden sedimentfjernelse forventes sigtdybden i år 2000 at være 0,4 - 0,8 m; i 1984 var den 0,4 m.
- Emneord: Søer, eutrofiering, sørestaurering, sedimentfjernelse, P-udveksling, P-binding.
- Format: A4.
- Sidetal: 121.
- Oplag: 200.
- ISBN: 87-7295-175-3.
- Tryk: Århus Amtskommunes trykkeri.
Juli 1987.
- Forsideillustration: Brabrand Sø.

BRABRAND SØ

Sedimentkarakteristik
Fosforudvekslingsforhold
Effekt af forskellige grader af
sedimentfjernelse på
eutrofieringsforholdene

B R A B R A N D S Ø 1 9 8 6

Sedimentkarakteristik

Fosforudvekslingsforhold

Effekt af forskellige grader af sediment-
fjernelse på eutrofieringsforholdene

af

Henning Jensen

Martin Søndergård

Erik Jeppesen

med teknisk assistance fra især:

Lissa Hansen og Birte Laustsen (laboranter)

Bjørn Bachmann (tegninger, layout)

Pia N. Jensen og Kirsten Thykjær (tekst)

Hilda Nordberg og Margit Troelsen (økonomi)



**Miljøstyrelsens
Ferskvandslaboratorium**

1	<u>SAMMENFATNING</u>	1
2	<u>INDLEDNING</u>	9
	2.1 Baggrund og formål med projektet	9
	2.2 Søbeskrivelse	10
3	<u>SEDIMENTKARAKTERISTIK</u>	13
	3.1 Sedimentbeskrivelse	13
	3.2 Vurdering af sedimentforholdene	19
4	<u>FOSFORUDVEKSLING MELLEML VAND OG SEDIMENT</u>	27
	4.1 Laboratoriemålinger af fosforudveksling	27
	4.2 Samlet vurdering af forsøg A, B og C	39
5	<u>VURDERING AF FOSFORUDVEKSLINGEN MELLEML BUND OG VAND VED FORSKELLIGE GRADER AF SEDIMENTFJERNELSE</u>	41
	5.1 Belastningsudviklingen i de kommende år	42
	5.2 Fosfordynamikken i 1978 og 1984	43
	5.3 Modelværktøjer og proceshastigheder	46
	5.4 Ændringerne i fosforniveauet i søen om sommeren ved forskellige indgreb	56
	5.6 Vurdering af effekten på eutrofierings-tilstanden	63
	5.7 Konklusion	68
6	<u>REFERENCER</u>	72
7	<u>APPENDIKS</u>	76
	Appendiks 1: Sedimentkarakteristik	76
	Appendiks 2: Fosforudvekslingsforsøg	95
	Appendiks 3: Alternative beregninger af den fremtidige tilstand	102
	Appendiks 4: Rådata	106

1. SAMMENFATNING

1. Denne rapport er resultatet af en undersøgelse foretaget af Miljøstyrelsens Ferskvandslaboratorium for Århus amtskommune og Århus kommune, 1986. Formålet var at undersøge muligheden for at restaurere Brabrand Sø ved at fjerne dele af søbunden (sedimentet). Undersøgelserne har omfattet en karakteristik af sedimentet; herunder en vurdering af den fremtidige forureningstilstand under forskellige betingelser, bl.a. sedimentfjernelse. Sedimentet er karakteriseret på grundlag af sedimentprøver udtaget fra 35 stationer jævnt fordelt i søen. Vurderingen af den fremtidige forureningstilstand er foretaget på basis af sedimentkarakteristikken, den forventede fremtidige eksterne fosforbelastning samt laboratorieforsøg til måling af fosforfrigivelsen fra sedimentet.

Sedimentkarakteristikken har omfattet bestemmelser af tørstof, glødetab og totalfosforindhold i syv dybder ned til 70 cm's dybde. Desuden er der fra tre steder i søen bestemt hvor stor en del af sedimentets pulje af fosfor, som er på en sådan form, at det vil kunne frigives til vandet.

Ved laboratorieforsøgene er fosforfrigivelsen fra sedimentet målt under forskellige forhold med det formål at simulere forskellige fremtidige sedimentforhold. Herunder fosforfrigivelsen fra det nutidige sediment og fra den nye sedimentoverflade, som blotlægges ved en sedimentfjernelse.

2. Den nuværende forureningstilstand i Brabrand Sø er ikke tilfredsstillende og i høj grad præget af den store spildevandstilførsel af især fosfor. I øjeblikket tilføres der søen omkring 80-90 tons fosfor årligt, men denne belastning forventes fra 1990 nedbragt til ca. 14 tons. På grund af fosforfrigivelsen, som finder sted fra den store

fosforpulje, som har ophobet sig på bunden af søen, kan der dog heller ikke efter 1990 forventes nogen væsentlig forbedring i forureningstilstanden i det første årti efter den reducerede fosfortilførsel.

Brabrand Sø er meget lavvandet og på grund af den store tilførsel af sand- og lerpartikler med vandløbene og den store algevækst i søen vokser bunden i øjeblikket med 1-2 cm om året. Der er derfor risiko for, at søens frie vandspejl efterhånden helt vil forsvinde.

3. Fosforindholdet i sedimentet fra Brabrand Sø er over store dele af søen forhøjede i forhold til de fleste andre søer. Indholdet varierer dog meget både horisontalt og vertikalt.

De højeste fosforkoncentrationer findes omkring Døde Åen's udløb og i det vestlige søbassin. Ved Døde Åen's udløb er der i et område på ca. 10 hektar fosforkoncentrationer på mellem 7 og 9 mg fosfor pr. g tørstof, mens der i store dele af det vestlige bassin er koncentrationer på mellem 4 og 6 mg fosfor pr. g tørstof. I det midt/midt-østlige bassin er fosforindholdet i et ca. 50 hektar stort område forholdsvis lille, nemlig kun omkring 2-3 mg fosfor pr. g tørstof. Det gennemsnitlige fosforindhold i overfladesedimentet er godt 4 mg fosfor pr. g tørstof.

Det meget fosforholdige og kulturpåvirkede sediment når dybest ned ved Døde Åen's udløb, hvor der stadig i 60 cm's dybde er 4-5 mg fosfor pr. g tørstof. Også i dele af det vestlige bassin når det fosforrige sediment relativt dybt ned. Allerede i 10 cm's dybde derimod, er fosforindholdet meget lille, under 1 mg fosfor pr. g tørstof, i store dele af det midt/midt-østlige bassin.

Alt i alt findes der i de øverste 50 cm af sedimentet omkring 300 tons fosfor; heraf 100 tons alene i de øverste 10 cm. Størstedelen af dette

fosfor er bundet til jern, mens kun mindre dele er bundet til kalk eller organisk materiale. Overvægten af jernbundet fosfor betyder, at en stor del af sedimentets fosforpulje kan frigives til vandfasen og dermed være med til at belaste søen. Samtidigt er jernindholdet dog fortsat relativt højt også dybt nede i sedimentet, hvilket i relation til en sedimentfjernelse betyder, at den nye sedimentoverflade vil have en vis evne til at binde fosfor og derved reducere fosforindholdet i vandet.

For helt at fjerne risikoen for en fosforfrigivelse fra sedimentet vil det være nødvendigt at fjerne så meget sediment, at fosforindholdet bliver under 1 eller måske på kun omkring 0.5 mg fosfor pr. g tørstof. For overalt i søen at opnå en sedimentoverflade, hvor fosforindholdet højest er 1 mg fosfor pr. g tørstof, vil det kræve, at der bliver fjernet omkring 400.000 kubikmeter sediment. Det vil dog formentlig rent praktisk være vanskeligt differentieret at fjerne sediment ned til netop denne dybde. Der vil derfor nok nærmere blive tale om at fjerne sediment i lagtykkelser på 30 cm. Dette indebærer enten, at der skal fjernes mere end de 400.000 kubikmeter eller at sedimentfjernelsen begrænses til visse områder af søen.

4. Der blev gennemført tre serier af laboratorieforsøg med sediment fra Brabrand Sø for at belyse forholdene omkring den fremtidige interne fosforbelastning i søen. I den første forsøgsserie målttes frigivelsen af fosfat fra en uforstyrret sedimentoverflade til søvandet i en "simuleret" fremtidig sommersituation. I den anden forsøgsserie målttes fosfatfrigivelsen også fra en uforstyrret sedimentoverflade; men her var de øverste 50 cm af sedimentet fjernet, hvorefter små lagtykkelser af det nuværende overfladesediment var blevet pålejret. Dette forsøg skulle simulere sommersituationen i søen i en årrække på 5-10 år efter en kombineret sedimentfjernelse og spilde-

vandsaflastning. I den tredje forsøgsserie blev der målt på fosfatudvekslingen mellem vand og totalopblandet sediment. Denne forsøgsserie simulerede forholdene i blæsevejr, hvor en del af det øvre sediment midlertidig ophvirvles i søvandet. Der blev her udført forsøg både med det nuværende og det "fremtidige" overfladesediment.

Forsøgene viste, at frigivelsen af fosfat fra den nuværende sedimentoverflade var høj (180 mg P/m² pr. døgn) sammenlignet med frigivelser målt i andre danske søer; men at fosfatfrigivelsen kan reduceres væsentligt ved bortgravning af de øverste 50 cm af sedimentet. Den største effekt vil man have umiddelbart efter sedimentfjernelsen; men selv efter dannelsen af nyt organisk overfladesediment (5-10 år efter bortgravning) vil den interne belastning være væsentligt reduceret i forhold til den nuværende.

Forsøgene med totalopblandet sediment viste en positiv sammenhæng mellem indholdet af fosfor i sedimentet og fosfatfrigivelsen til søvandet. Fosfatfrigivelsen steg kraftigt med stigende pH i vandet, hvilket understreger betydningen af at mindske hyppigheden af perioder med højt pH i søvandet. Det vil i praksis sige, at mindske fosfatkoncentrationen i søvandet i sommerperioden.

5. Med baggrund i sedimentkarakteristikken og laboratorieforsøgene samt den eksisterende viden om Brabrand Sø blev der foretaget konsekvensberegninger af 3 ud af 4 skitserede løsningsforslag for "sørestaurering": Løsning 1 omfatter en reduktion af fosfortilledningen fra 85 til 14 tons om året; men ingen sedimentfjernelse. Løsning 2: omfatter samme reduktion i ekstern belastning kombineret med en bortgravning af 50 cm sediment over hele søen. Løsning 3: Samme aflastning som i

1; men med differentieret bortgravning af sediment til et niveau så fosforindholdet i det nye overfladesediment bliver på 1 mg P tv eller derunder. Denne løsning blev anset for teknisk kompliceret og er derfor ikke konsekvensberegnet. Løsning 4 omfatter samme aflastning som i 1; men kombineret med en sedimentfjernelse fra de områder, hvor fosforindholdet i sedimentet er særlig højt. Der fjernes således først et lag på 30 cm i et 60 ha stort område i vestenden af søen og et 40 ha stort område i østenden. Herefter fjernes der yderligere 30 cm i de områder, hvor det fosforrige sediment går dybdt ned. Et område på 50 ha i den midt/midt-østlige ende af søen friholdes helt, dels fordi fosforindholdet i sedimentet her ikke er så højt som i den øvrige del af søen, og dels fordi både ynglende vandfugle og de karakteristiske "polder" her forekommer i stor tæthed. Dette område samt det sydøstlige hjørne af søen anses for særligt bevaringsværdigt ud fra en fuglebeskyttelsesmæssig synsvinkel /ref. 20/.

Konsekvensberegningerne blev foretaget vha. en modificeret "simpel sømodel", der som beregningsresultat giver de gennemsnitlige sommerkoncentrationer af fosfor i søvandet frem til år 2000. Beregningsgrundlaget til modellen blev skabt ved at opstille massebalancer for søen i sommerhalvåret. Det blev herunder beregnet, at kun en trediedel af det spildevand, som tilledes med Døde Å opblandes i hele søen; hvilket imidlertid ikke har afgørende betydning for de generelle tendenser af konsekvensberegningerne. Den nuværende årsvariation af fosfatkoncentrationen i søvandet er i øvrigt præget af spildevandstilledningen og den interne belastning, der giver en meget stor sommertilførsel af fosfor til søvandet; men som til dels modsvares af en (beregnet) stor sedimentation af fosfor. Den gennemsnitlige nettotilbageholdelse af det tilledte fosfor i søen kunne beregnes til 6-18% på årsbasis; resten passerede ud af søen med Århus Å.

Sammenhængen mellem en given sommerkoncentration af fosfor og vandkvaliteten i søen er vurderet ud fra en opstillet sammenhæng mellem målte fosforniveauer og sigtddybder i en række lavvandede danske søer.

De nedennævnte modelberegninger bør tages med forbehold, dels fordi erfaringsgrundlaget fra lavvandede, hurtigt gennemstrømmede søer er ringe og dels fordi de simple sømodeller ikke tager højde for denne søtype og heller ikke kan tage højde for effekten af ændringen i feks. planktonsamfundets udvikling og betydning.

Ved løsning 1 blev det beregnet, at fosforniveauet i år 2000 ville ligge på omkring 200 µg P/l om sommeren, hvilket svarer til en sigtddybde på 0,4-0,8 m. Forbedringen af sigtddybden vil kun ske langsomt fra år 1990; men til gengæld er niveauet i år 2000 heller ikke udtryk for en balance i søen, idet denne først opnås noget senere med en sigtddybde på 0,5-0,9 m. Ved løsning 2, hvor det formodes, at sedimentfjernelsen udføres i perioden 1987-95 og den eksterne belastning reduceres fra år 1990, viser beregningerne, at der først fra 1990 sker en forbedring af vandkvaliteten. Forbedringen sker dog hurtigt i de første år og allerede i år 1993 kan der forventes en sigtddybde på 0,7-1,1 m; et niveau som vil holdes i en længere årrække. Responsforløbet ved løsning 4 vil næsten være den samme som ved løsning 2, men sigtddybden kan dog i perioden frem til år 2000 forventes at være lidt mindre end ved løsning 2. Derefter udlignes forskellen på de to løsninger.

Såfremt der skal foretages en sedimentfjernelse vil vi anbefale løsning 4, fordi den 1) giver et tilfredsstillende resultat med hensyn til fjernelsen af de fosforrige dele af sedimentet 2) reducerer oppumpningsmængden til 420.000 m³ og 3) skåner de fugletætte og poldertætte område.

Det vil i så fald være hensigtsmæssigt at starte oppumpningen i vestenden. For det første er pumpeafstanden til det formodede deponeringsareal relativt kort, hvilket vil lette indkøringsfasen. For det andet vil man i de første oppumpningsår få et godt billede af slammets egenskaber og hvordan det skal håndteres. Herved kan man få et beslutningsgrundlag for deponeringen af slam fra østenden af søen: Kan det aflejres på et af de alternative depoter i østenden af søen uden, at der skal lægges en membran i bunden, eller skal det i modsat fald pumpes til depotet i vestenden af søen.

Da puljen af udvekslelig fosfor i sedimentet er overordentlig stor i sammenligning med nuværende årlige fosfosedimentation, vil en evt. sedimentfjernelse kunne påbegyndes nogle år før fosforbelastningen af søen er reduceret, uden at det får mærkbare konsekvenser for udviklingen i søen eller i det endelige resultat af restaureringen.

På baggrund af analyser af forholdene i andre lavvandede hurtigt gennemstrømmede søer vurderer vi endvidere

at algesammensætningen også efter en belastningsreduktion og evt. sedimentfjernelse som nu vil være domineret af kiselalger. Der vil dog stadig være perioder i sensommeren, hvor der vil kunne forekomme vandblomst af blågrønalger. Generelt vil algemængden om sommeren dog være væsentlig lavere end tilfældet er i dag.

at der vil ske en meget markant yderligere forbedring i vandets gennemsigtighed og den økologiske tilstand iøvrigt, hvis der sker en væsentlig indvandring af undervandsvegetation. Der vil i så fald kunne ske et skift fra et skalle/brasen-domineret fiskesamfund til et gedde/aborre-samfund og dette vil medføre en betydelig reduktion i algemængden, nok først og fremmest fordi det algeædende dyreplankton og algeædende filtrende hvirvelløse dyr på planternes overflade vil få bedre vilkår. Det

er usikkert om undervandsvegetationen kan vende tilbage inden for en kortere årrække uden f.eks. indplantering og/eller skidtfiskebekæmpelse og om en indvandring vil kunne gå hurtigere efter en sedimentfjernelse end på det nuværende sediment. Igangværende eller planlagte projekter vil kunne give bedre oplysninger herom, men vi skønner, at der et behov for at undersøge disse forhold specifikt i Brabrand Sø med henblik på at få en hurtigere forbedring af søens økologiske tilstand. Der vil dog i en overgangsperiode kunne optræde trådalgevækst i søen.

2. INDLEDNING

2.1 BAGGRUND OG FORMÅL MED PROJEKTET

Brabrand Sø har stor naturmæssig og rekreativ betydning, ikke mindst på grund af dens beliggenhed i udkanten af Århus. Søen er imidlertid stærkt kulturpåvirket, hvilket i 1985 foranledigede Århus amtskommune og Århus kommune til at nedsætte en fælles teknikergruppe. Teknikergruppens arbejdsopgave har været at vurdere mulighederne for at løse forureningsproblemerne i Brabrand Sø og dermed at bevare området som et attraktivt naturområde.

Gruppens arbejde har resulteret i en rapport /ref. 2/, i hvilken der blandt andet lægges op til et undersøgelsesprogram, der skal kunne danne det endelige beslutningsgrundlag for en evt. restaurering af søen.

Miljøstyrelsens Ferskvandslaboratorium blev anmodet om at indgå i dette program på emneområderne: Sedi-mentkarakteristik, fosforudveksling mellem bund og vand, samt fremtidig eutrofieringstilstand ved forskellige grader af sedimentfjernelse.

Det mere detaljerede formål med vort delprojekt har været:

- at karakterisere sedimentet og bestemme kultur- lagets tykkelse i Brabrand Sø ved at måle tørstof, glødetab og fosforindholdet på en række stationer, samt på udvalgte stationer at bestemme fosforbind- ingstypen. Karakteristik af tungmetalindholdet i sedimentet afrapporteres af Botanisk Institut, Århus Universitet.
- at vurdere fosforudvekslingsforholdene mellem sediment og vand efter en reduktion af fosfortil- førslen til søen; med og uden sedimentfjernelse. Denne vurdering foretages på baggrund af labora- torieeksperimenter.

- som konklusion, at opstille alternative forslag til sedimentfjernelse og vurdere effekten af hvert forslag på søens fremtidige eutrofieringstilstand.

2.2 Søbeskrivelse:

Brabrand Sø er en lavvandet eutrof sø med et overfladeareal på ca. 1,5 km² og en gennemsnitlig dybde om sommeren på 0,85 m. Søen har et stort opland (ca. 311 km²), der overvejende består af landbrugsarealer og bymæssig bebyggelse (ialt ca. 100.000 personer). Søen har en hurtig vandudskiftning; den gennemsnitlige opholdstid for vandet blev i 1978 og 1984 bestemt til 5-7 døgn på årsbasis og 11-18 døgn om sommeren.

Brabrand Sø har i en lang årrække modtaget store mængder af næringsstoffer med det tilstrømmende vand. Fosfortilførslen, der for 90% vedkommende hidrører fra spildevand, har således betydet, at totalfosforkoncentrationen i søvandet i 1984 svingede mellem 0,5 og 1,0 mg P/l og at fosfat var i overskud i søvandet året rundt. Dette har muliggjort en stor vækst af planteplankton og har resulteret i sommersigtedybder på 30-40 cm.

Den gennemsnitlige sommerværdi for klorofyl a var i 1984 0,4 mg/l og den årlige primærproduktion af planteplankton var 600 g C/m²/år. Planteplanktonet var domineret af kiselager /ref.1 og 2/. Den store algeproduktion har medført en betydelig sedimentation og slamakkumulering på søbunden.

Brabrand Sø tilføres endvidere store mængder mineralogent materiale med Århus Å, som aflejres i søbasinet. Da søen er meget lavvandet har den øgede sedimentation fremmet tilgroningen af søen og det frie vandspejl er således i fare for at forsvinde.

I /ref. 2/ fastslås nødvendigheden af indgreb overfor fosfortilledningen til søen eventuelt kombineret med bortgravning af dele af sedimentet, hvis man ønsker at bevare søens frie vandspejl og righoldige fugleliv.

Sedimentet i Brabrand Sø er primært præget af tre forhold:

1. Brabrand Sø var i stenalderen en del af stenalderhavet og dermed del af en saltvandsfjord. Det nuværende søsediment afgrænses derfor nedadtil af stenalderhavets bund. Dybden ned til havsedimentet varierer meget, men især i søens midtparti er søsedimentets tykkelse ringe, typisk ligger havsedimentet her kun i 30-50 cm's dybde. Årsagen er formentlig at den hurtige vandgennemstrømning her på søens smalleste sted har begrænset sedimentationen. Også uddybning af den 2 km lange robane på langs af søen kan have spillet en rolle. Havsedimentets store indhold af skalfragmenter afspejles i det høje tørstofindhold.

2. Ved indløbene fra henholdsvis Århus Å og Døde Å er der sket en aflejring i søen af vandløbenes transport af suspenderet stof. Sedimentationen af suspenderet stof har i disse områder derfor været større end i den øvrige del af søen. Det tilførte suspenderede stof har været en blanding af minerogent og organogent materiale, hvoraf det minerogene og tungeste er sedimenteret tættest ved indløbene. Dette forhold afspejles for Århus Å's vedkommende i det relative høje tørstofindhold samt lave glødetabsprocent i et tungeformet område ved indløbet. Ved indløbet fra Døde Å er der ikke samme tendens, hvilket formentlig skal ses i relation til et større indhold af organogent materiale i det tilførte suspenderede stof. Derimod er der i et område ved Døde Å's udløb stærkt forhøjede koncentrationer af fosfor som følge af spildevandsudledningen fra Viby renseanlæg.

3. Søens meget høje algemængde samt lave vanddybde har især i de senere år ført til en stor sedimentation af organisk materiale over hele søen. En stor del af dette omsættes hurtigt ved sedimentoverfladen p.g.a. de normalt velilteede forhold i vandet. Sedimentationen og omsætningen af organisk materiale er dog sekundært af stor betydning for fosforudvekslingen mellem vand og sediment.

I følge /ref.1/ er den nuværende sedimenttilvækst på 1-2 cm om året, hvoraf størsteparten skyldes tilførsel af suspenderet stof med vandløbene /ref.2/.

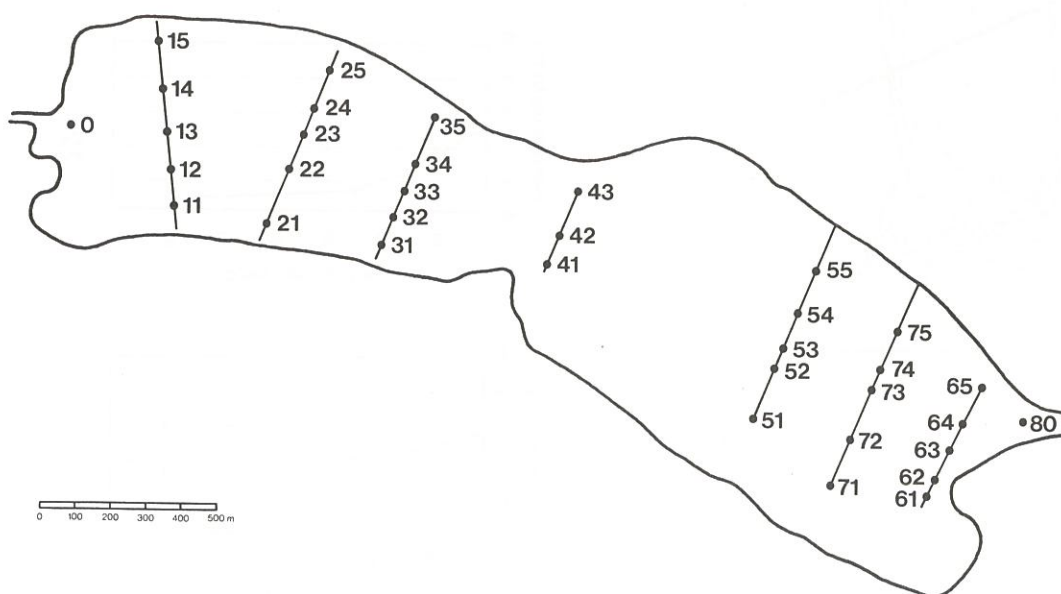
3. SEDIMENTKARAKTERISTIK

Sedimentet i Brabrand Sø er i høj grad et resultat af tidligere tiders kulturpåvirkning og indgår som et betydningsfuldt led i søens forureningstilstand. Af hensyn til sedimentets fremtidige rolle for eutrofieringstilstanden er det derfor vigtigt at have et rimeligt godt indblik i dette sediments sammensætning.

Grundlaget for denne sedimentkarakteristik har bestået i udtagning af en række 60-70 cm lange sedimentsøjler til bestemmelse af tørstof, glødetab og totalfosforindhold. Ialt blev der udtaget prøver fra 35 forskellige stationer i søen, fordelt på 7 transekteer. For hver søjle er analyserne gennemført på 7 dybdefraktioner: 0-2, 2-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-50 og 50-70 cm (se i øvrigt appendiks 1).

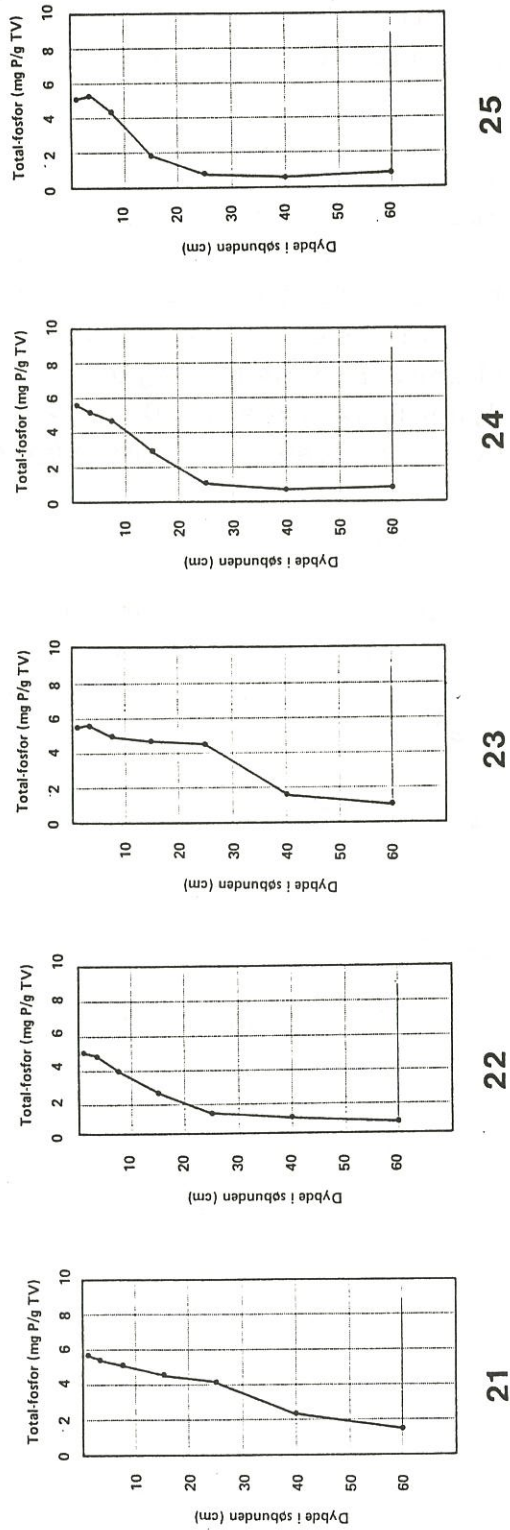
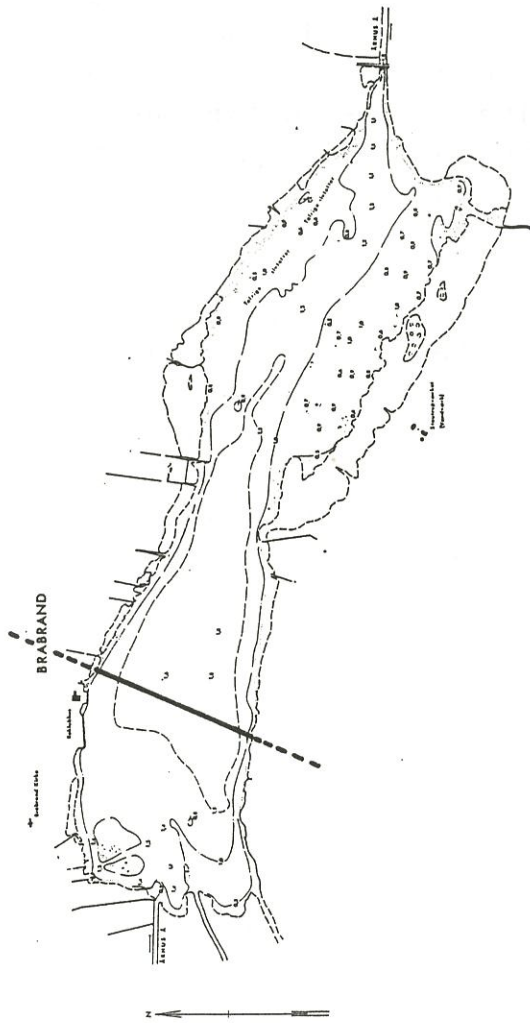
3.1 Sedimentbeskrivelse:

Transekt- og stationsplaceringerne er vist på figur 1 og samtidigt er der på figur 2 vist en transekt som eksempel på hvordan totalfosforindholdet i forskellige dybder af sedimentet varierer på tværs af søen. De øvrige transekteer samt profiler af tørstof og glødetab er vist i appendiks 1 (figur A1 og A2).



Figur 1. Placering af transekteer og stationer i Brabrand Sø.

TRANSEKT 2



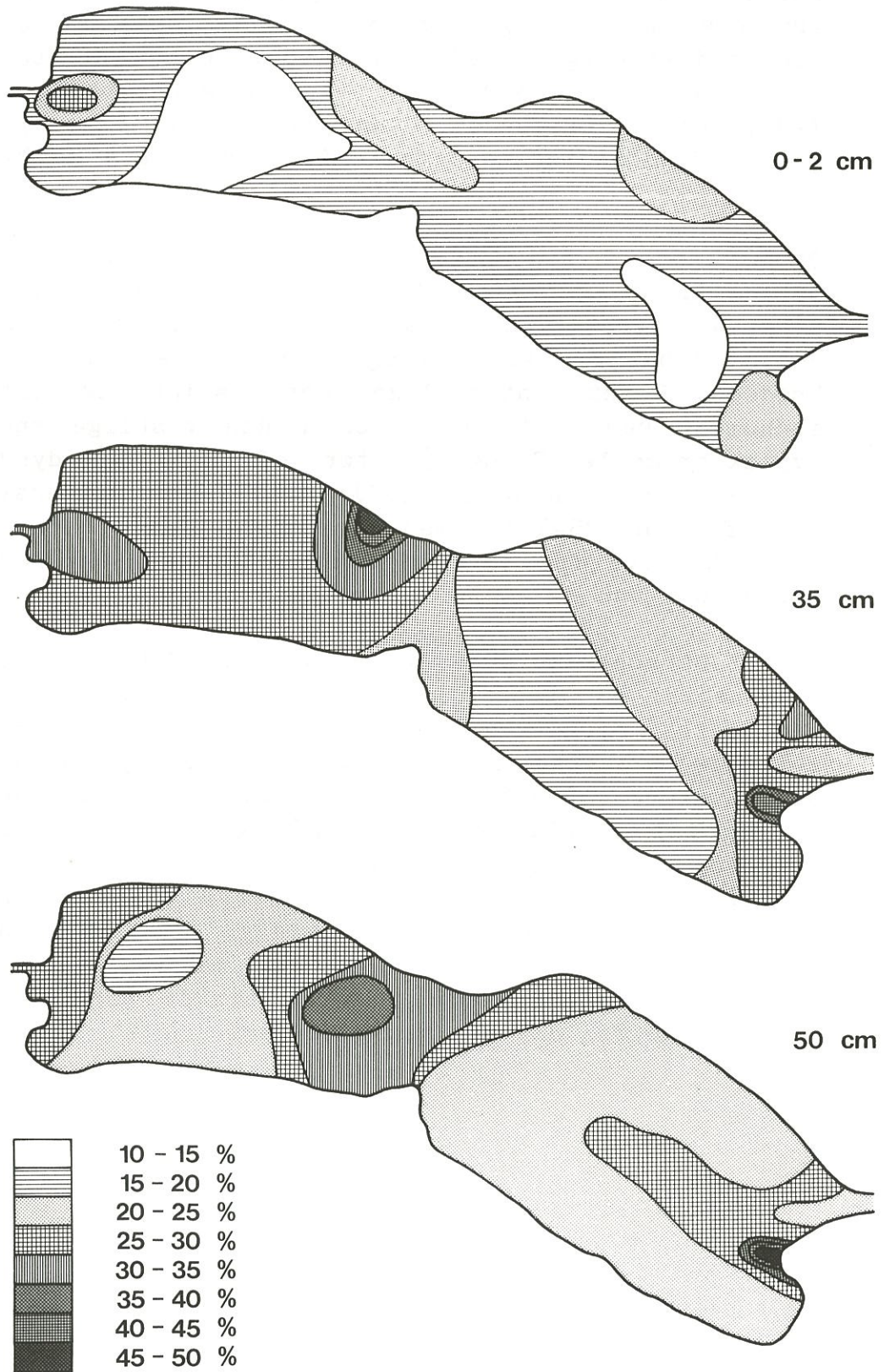
Figur 2. Dybdeprofiler af tot-P på de 5 stationer på transekt 2.

Den nuværende sedimentoverflade har over det meste af søen et tørstofindhold mellem 15 og 20 % og en glødetabsprocent mellem 12 og 16 (figur 3 og 4). Fosforindholdet derimod er meget mere varierende, fra omkring 2-3 mg P/g tv i store dele af det midt/midt-østlige område til et ca. 10 hektar stort område ved Døde Åens udløb med koncentrationer på 7-9 mg P/g tv (figur 5). Gennemsnitlig for hele søen er overfladesedimentets fosforindhold godt 4 mg P/g tv.

Dybere nede i sedimentet tiltager tørstofindholdet betydeligt. I 35 cm's dybde er der i hele vestbassinet et tørstofindhold mellem 25 og 35 %; størst ved tilløbet fra Århus Å og i et område ved nordbredden. I det midt-østlige bassin stiger tørstofindholdet kun lidt, mens der i den vestlige ende typisk er mellem 25 og 35 % tørstof. I 50 cm's dybde er der især et højt tørstofindhold i den midterste del af søen (25-40%), mens der i den øvrige del af søen, bortset fra områder omkring Århus Å og Døde Å's udløb, kun er et tørstofindhold på 20-25 %.

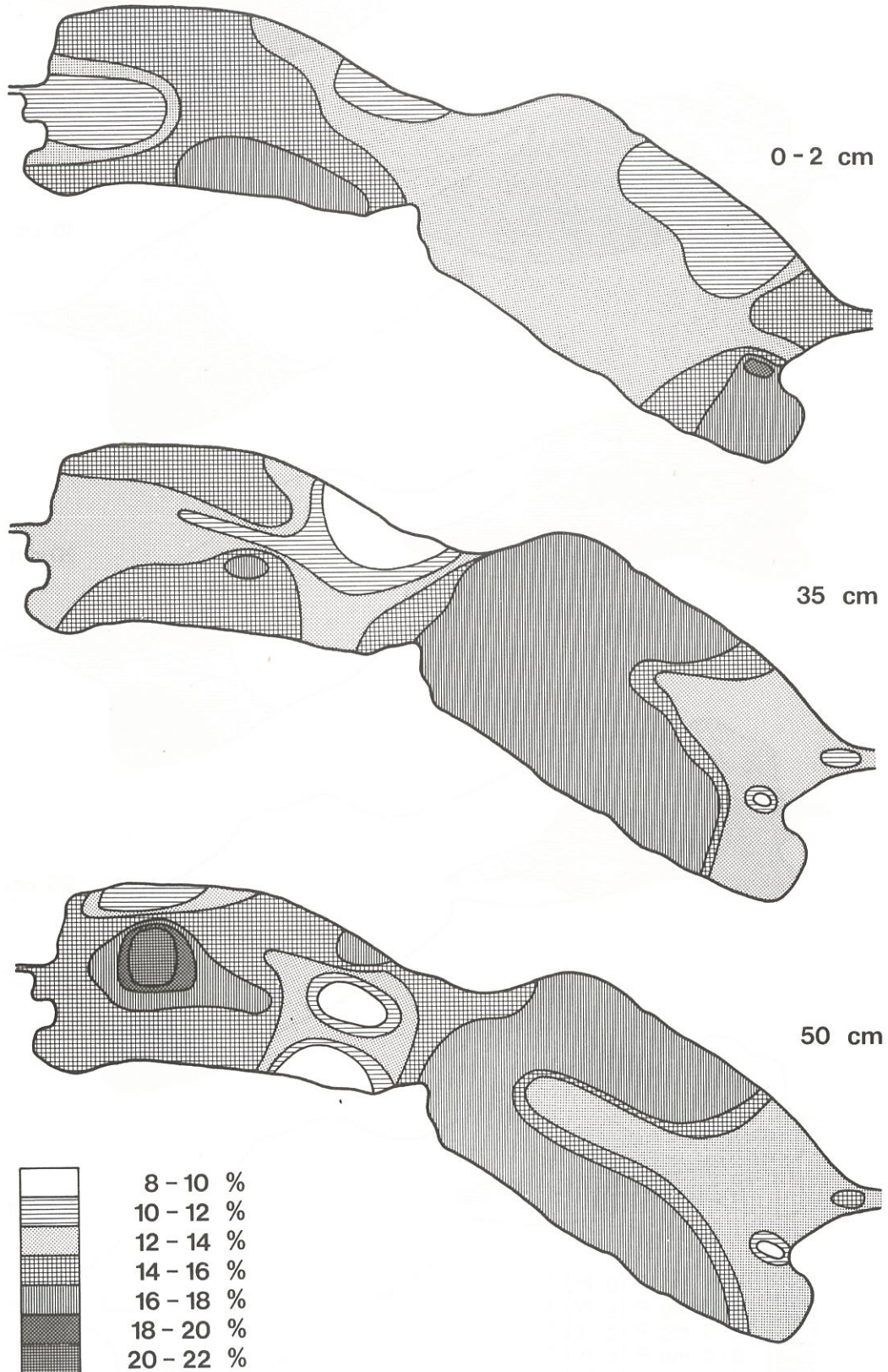
Glødetabsprocenten (svarende til indholdet af organisk stof) er generelt også stigende ned gennem sedimentet, omend kun beskedent. Mest udpræget er et stigende glødetab i det midt/midt-østlige område samt i midten af det vestlige bassin, hvor glødetabet stiger til 16-20%. I 30-50 cm's dybde er der et tungeformet område af det østlige bassin ud for afløbet, hvor der er en noget lavere glødeprocent (12-14%). Dette område har samtidigt også et relativt højt tørstofindhold, hvilket må skyldes, at sedimentationsforholdene i dette område har været forskellige fra det omgivende bassin.

TØRVÆGT

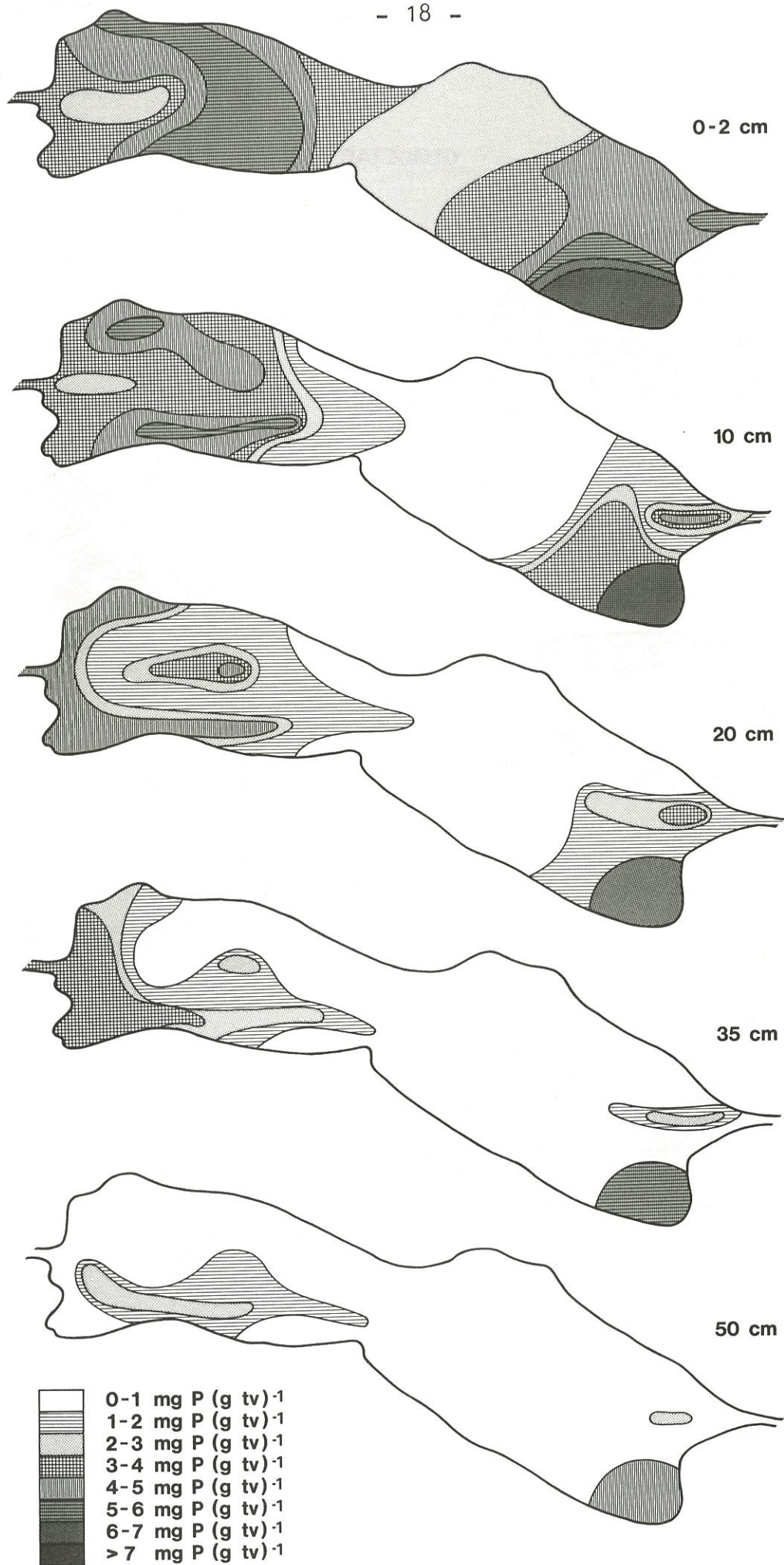


Figur 3. Isopleter af tørvægt i henholdsvis overflade, 35cm's og 50cm's dybde af sedimentet. Isolinierne er angivet med forskelle på 5%

GLØDETAB



Figur 4. Isopleter af glødetab i henholdsvis overfladen, 35cm's og 50cm's dybde af sedimentet. Isolinierne er angivet med forskelle på 2%.



Figur 5. Isopleter af totalfosforkoncentrationer i forskellige dybder af sedimentet. Isolinerne er angivet med forskelle på 1 mg

Det meget fosforholdige sediment når især dybt ned ved Døde Å's udløb, hvor der i 50-70 cm's dybde stadig er et indhold på 4-5 mg P/g tv. Men også i områder af det vestlige bassin er der i 30-50 cm's dybde koncentrationer på over 3 mg P/g tv. Generelt er der dog i 35 cm's dybde kun få og mindre områder hvor fosforindholdet overstiger 1 mg P/g tv (se tabel 1 og figur 5). Således ville omkring 70 % af den nye sedimentoverflade have et fosforindhold på mindre end 1 mg P/g tv, hvis de øverste 35 cm af sedimentet blev fjernet. Ved fjernelse af sediment ned til 50 cm's dybde indeholder godt 80 % af sedimentet mindre end 1 mg P/g tv i det øverste lag. Skønsmæssigt findes der i de øverste 50 cm af sedimentet i hele søen omkring 300 tons fosfor. Heraf findes næsten de 100 tons alene i de øverste 10 cm. I de øverste 20 cm er der omkring 150 tons.

Tabel 1. Den arealmæssige fordeling af fosforindholdet i forskellige dybder af sedimentet (baseret på fig. 5).

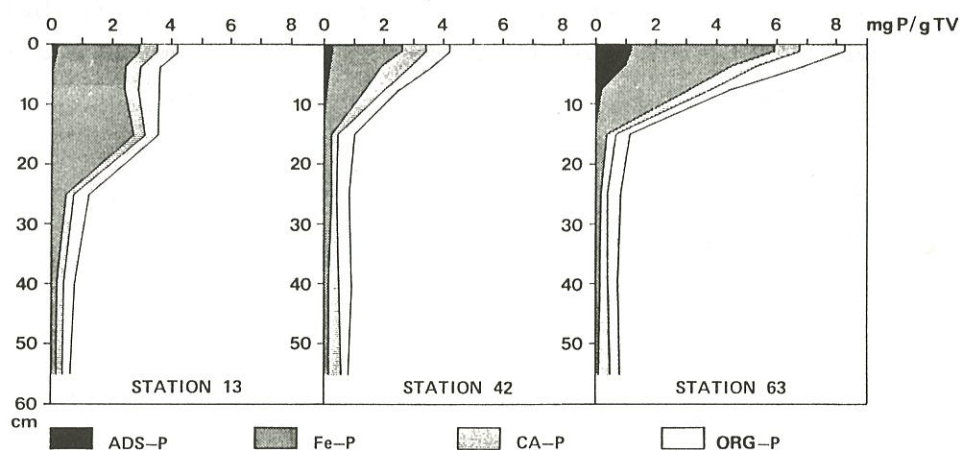
tot-P mg P/g tv	0-2cm		10cm		20cm		35cm		50cm	
	areal ha	% tot	areal ha	% tot	areal ha	% tot	areal ha	% tot	areal ha	% tot
7-	9	6	7	4	7	4	0	0	0	0
6-7	2	2	1	1	1	1	0	0	0	0
5-6	27	17	6	3	1	1	5	3	0	0
4-5	38	25	21	11	2	2	1	1	5	3
3-4	37	24	45	24	17	11	13	8	1	1
2-3	37	25	7	3	10	7	9	6	7	4
1-2	0	0	30	16	43	29	17	11	15	10
0-1	0	0	72	38	71	47	106	71	123	82
total	150	100	150	100	150	100	150	100	150	100

3.2 Vurdering af sedimentforholdene:

Det forholdsvis beskudne område omkring Døde Åens udløb hvor fosforindholdet er forhøjet i forhold til den øvrige del af søen (ca. 5-10 hektar) tyder på, at Døde Åens indflydelse på søen er forholdsvis ringe og dermed, at vandet fra Døde Å for størstedelens vedkommende fortsætter direkte nedstrøms Århus Å. Det er dog muligt, at sedimentforholdene ikke fuldstændigt afspejler vandbevægelserne, idet

sedimentationen og bindingen af fosfor godt kan være begrænset til mindre områder. Tungmetalanalyser /ref. 3/ peger dog også i retning af, at vandet fra Døde Å ikke når langt op i Brabrand Sø.

Sammenlignet med andre lavvandede søer er fosforindholdet i sedimentet fra Brabrand Sø højt i store dele af søen. Ikke-kulturopåvirkede søer har normalt et indhold mindre end 1-2 mg P/g tv, mens der i kulturopåvirkede søer i overfladesedimentet typisk er fra 2-5 mg P/g tv afhængig af bindingskapaciteten (figur 7).

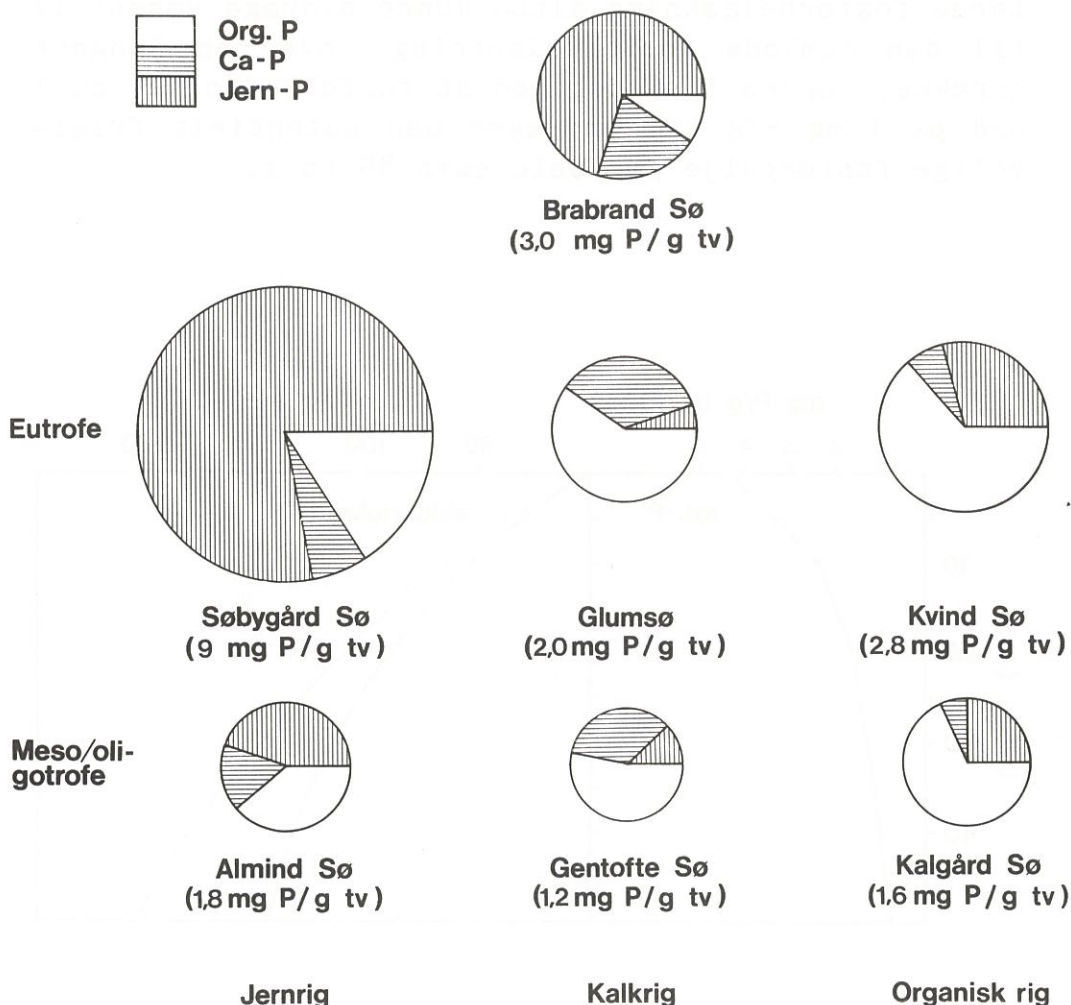


Figur 6. Fosfor fraktioneringsprofil fra station 13,42 og 63. Bestående af fraktionerne: Let adsorberet fosfor (ADS-P), jern bundet fosfor (Fe-P), kalcium og magnesium bundet fosfor (Ca-P) og organisk bundet fosfor (org-P).

Langt den største del af det fosfor som findes i sedimentet er bundet til jernforbindelser (Fe-P), figur 6. Der synes ikke at være nogen væsentlig forskel på fosforforbindingstyperne mellem vest, midt og østbasinet. Omkring 60-80 % er bundet til jernforbindelser, enten som Fe-P eller ADS-P, mens 10-20 % er bundet som kalcium-fosfor (Ca-P) og ca. 10-20 % som organisk bundet fosfor.

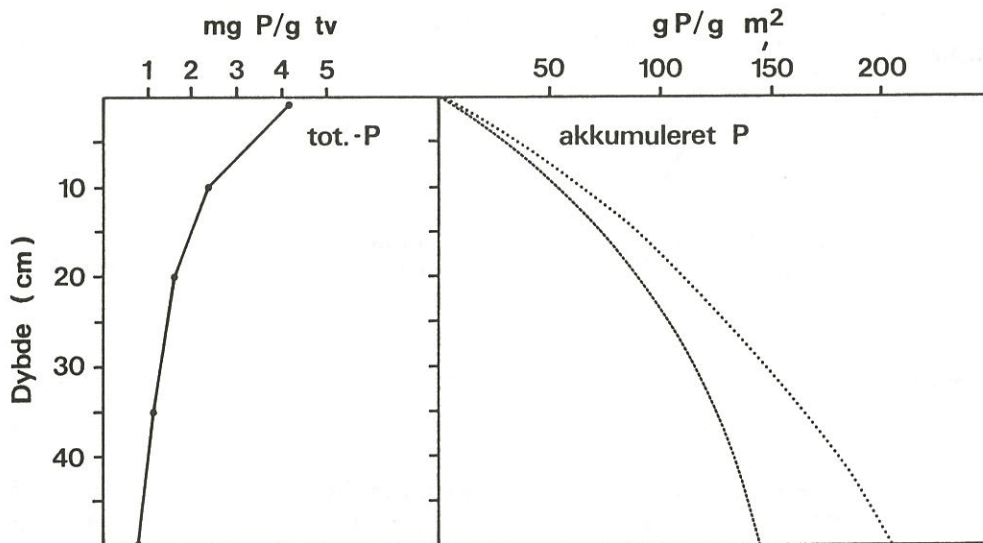
ADS-P er fosfor som kun er meget løst bundet og

derfor forventelig også meget let frigivelig fra sedimentet. Denne del udgør dog kun en mindre del af total fosforindholdet og findes overvejende i den øverste del af sedimentet. ADS-P indholdet kan dog variere gennem sæsonen og er som regel størst om sommeren /ref. 4/. Med hensyn til bindingstyper ligner sedimentet i Brabrand Sø meget det i Søbygård Sø, idet omkring 3/4 af fosforpuljen er bundet til jern (figur 7). De fosforfrigivelsesmekanismer, der er fremherskende i Søbygård Sø, dvs. redoxforhold, pH og resuspension, er derfor formentlig også betydningsfulde i Brabrand Sø.



Figur 7. Sedimentets (0-15 cm) indhold af totalfosfor og fosforfraktionernes fordeling i Brabrand Sø sammenlignet med 6 andre søer. De 6 søer er udvalgt efter kriterierne: Eutrof eller meso-oligotrof samt jernrig, kalkrig eller organisk rig. (Baseret på /ref. 4/, /ref. 12/ og /ref. 21/.

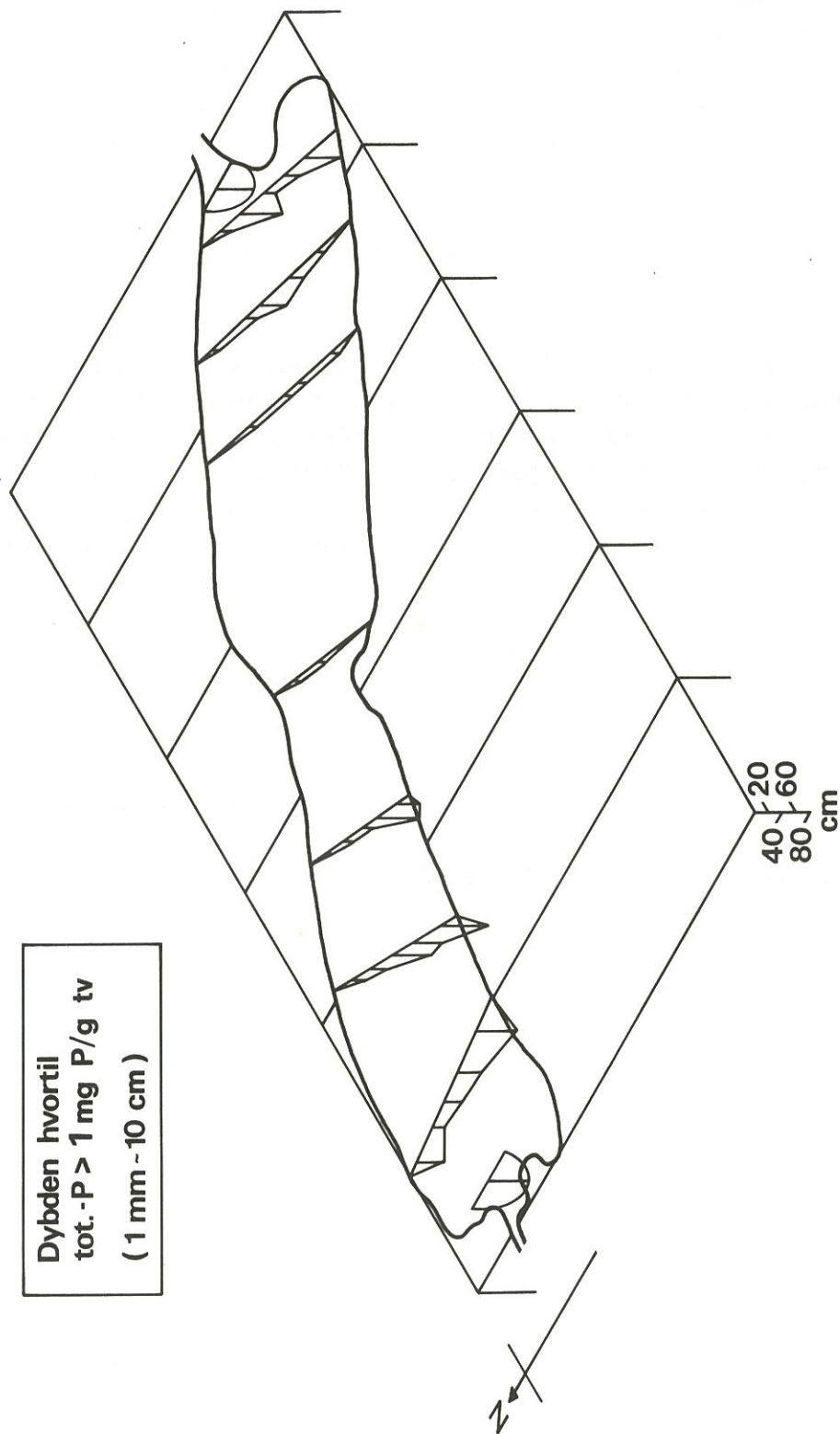
Sedimentets høje indhold af jernbundet fosfor betyder, at en forholdsvis stor del af sedimentets fosforpulje potentielt er frigivelig til vandfasen. Man skal derfor regne med, at størstedelen af det fosfor, som findes ned i en dybde af 10-20 cm, kan frigives. Hvis man som udgangspunkt regner med, at fosforindholdet skal helt ned på 0,5 mg P/g tv, før der ikke længere frigives fosfor fra sedimentet, findes der i de øverste 15 cm i gennemsnit 73 g P/m², som kan frigives (figur 8). Den potentielle frigivelige fosforpulje for søen som helhed andrager således omkring 110 tons. I forhold hertil er den forventede eksterne fosfortilførsel, hvis der etableres 95% fosforfjernelse i byer over 500 PE, anslået til 14 tons/år /ref. 2/. Afhængig af fosforfrigivelseshastigheden fra sedimentet vil den interne fosforbelastning altså kunne bidrage væsentlig til den samlede fosforbelastning over en længere årrække. Regnes i stedet med at fosforindholdet skal ned på 1 mg P/g tv, andrager den potentielt frigivelige fosforpulje for hele søen 85 tons.



Figur 8. Sedimentets gennemsnitlige fosforindhold samt akkumulerede fosforindhold (prikket) og akkumulerede fosforindhold over 0,5 mg P/g tv (punkteret). (Baseret på tabel 1 og figur 5).

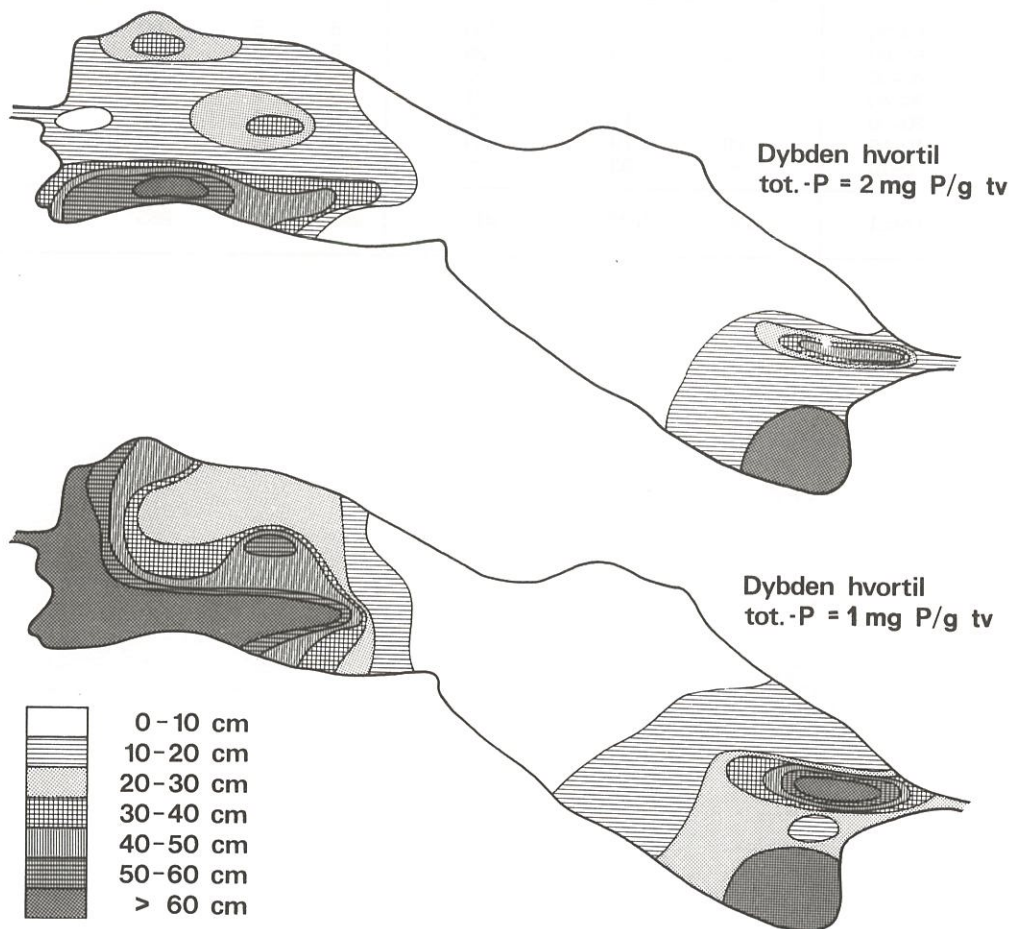
Det store indhold af jernbundet fosfor skal ses i relation til sedimentes jernindhold, der over det meste af søen er omkring 20-30 mg/g tv /ref.3/ og dermed højere end i de fleste søer. Jernindholdet er fortsat højt i dybere dele af sedimentet og ved en sedimentfjernelse ville den nye sedimentoverflade have en betydelig evne til at binde fosfor. Hvis den eksterne fosforbelastning reduceres betydeligt i forbindelse med sedimentfjernelsen vil den nye sedimentoverflade altså yderligere kunne begrænse fosforindholdet og dermed bidrage til at forbedre vandkvaliteten i søen. Sedimentets forholdsvis høje jernindhold også i dybere lag vil således styrke effekten af sedimentfjernelsen. Hvis den eksterne fosforbelastning derimod ikke reduceres betydeligt vil der efterfølgende en sedimentfjernelse til stadighed være en risiko for fosforfrigivelse fra sedimentet, da puljen af jernbundet fosfor som så opbygges er forholdsvis mobil og vil kunne frigives, f.eks. i forbindelse med stor omsætning af organisk materiale i sedimentet.

For helt at undgå intern fosforbelastning fra det nuværende sediment vil det formentlig være nødvendig af fjerne sedimentet ned til en dybde hvor totalfosforindholdet er 1 mg P/g tv eller derunder (omtales nærmere i de følgende afsnit). Dette betyder først og fremmest, at der kan blive tale om at fjerne sediment omkring Døde Åens udløb, ned til en dybde af mindst 50-70 cm samt fra den sydlige/østlige del af det vestlige bassin i en tilsvarende dybde (figur 9). I det øvrige søbassin vil man de fleste steder kunne nøjes med at fjerne 30 cm eller mindre.



Figur 9 Dybdiagram med angivelse af det sedimentlag som skal fjernes for at opnå en sedimentoverflade med en totalfosforkoncentration på 1 mg P/g tv.

For at nå ned på et totalfosforindhold på 1 mg P/g tv i den nye sedimentoverflade skal der sammenlagt fjernes omkring 400.000 m³ sediment, fordelt på 24 hektar med mere end 60 cm, 22 hektar med 30-60 cm og 105 hektar med 0-30 cm (se tabel 2 og figur 10). Hvis udstyret til at fjerne sedimentet ikke kan fjerne i varierende lagtykkelser, men kun i lag på 30 cm, vil der i stedet blive tale om at fjerne omkring 660.000 m³ for overalt i søen at opnå en ny sedimentoverflade med et fosforindhold på 1 mg P/g tv eller derunder.



Figur 10 Dybde isopleter med angivelse af i hvilken dybde tot.-P er lig henholdsvis 2 og 1 mg P/g tv.

For at opnå en ny sedimentoverflade, hvor totalfosforindholdet overalt i søen er 2 mg P/g tv, fører tilsvarende beregninger til, at der skal fjernes omkring 250.000 m³ sediment.

I afsnit 5 er der foretaget en nøjere gennemgang af konsekvenserne for eutrofieringstilstanden ved en række alternative indgreb.

Tabel 2. Sedimentarealet og de tilhørende sedimentvolumener som skal fjernes for at opnå en sedimentoverflade med henholdsvis 1 og 2 mg P/g tv. (baseret på figur 10)

dybde cm	areal med tot-P = 1 mg P/g tv			areal med tot-P = 2 mg P/g tv		
	areal ha	% tot	m ³ sediment x 1000	areal ha	% tot	m ³ sediment x 1000
60-90	24	16	180	8	5	60
50-60	5	3	28	5	3	28
40-50	11	7	50	5	3	23
30-40	6	4	21	3	2	11
20-30	26	17	65	9	6	23
10-20	29	19	44	48	32	72
0-10	50	33	25	72	48	36
total	150	100	413	150	100	253

4. FOSFORUDVEKSLING MELLEM VAND OG SEDIMENT

Fra søer, der i en lang årrække er blevet tilført store fosformængder med tilløbene, frigives der om sommeren ofte fosfor fra søbunden til vandfasen. Denne fosforfrigivelse kaldes intern belastning (i modsætning til ekstern belastning, hvor næringsstoffertilførslen kommer fra tilløbene eller nedbøren).

Ofte er der i spildevandsbelastede søer akkumuleret så store mængder fosfor i sedimentet, at den interne belastning er af stor betydning for den samlede belastning, især hvis den eksterne reduceres.

Fosfor frigives fra sedimentet som opløst ortofosfat, i Brabrand Sø især fra den letbundne fosforpulje (ADS-P) og den jernbundne fosforpulje (Fe-P) (jvf. afsnit 3).

De mest betydningsfulde faktorer, som stimulerer fosforfrigivelsen fra sedimentets letbundne eller jernbundne P-puljer er:

Reducerede forhold ved sedimentoverfladen (lave ilt-og nitratkoncentrationer), høje pH-værdier i søvandet og høje temperaturer. Alle tre forhold er tilstede om sommeren og fosforfrigivelsen finder da også først og fremmest sted i sommerhalvåret, hvor den er til størst skade for vandkvaliteten.

Betydelige frigivelser af sedimentbundet fosfor kan også finde sted ved kraftig vindpåvirkning, hvor de øverste millimeter af sedimentet kan være helt opvirvlede i vandmasserne. Dette er især af betydning i lavvandede søer som Brabrand Sø.

4.1 Laboratoriemålinger af fosforudveksling

For at beskrive fosforudvekslingsforholdene mellem sediment og vand i en situation med reduceret fosfortilførsel til søen samt i en situation, hvor der yderligere var foretaget sedimentfjernelse, blev følgende tre typer af laboratorieforsøg gennemført:

- A) Forsøg med uforstyrrede sedimentsøjler med det nuværende sediment.
- B) Forsøg med sedimentsøjler efter fjernelse af de øverste 50 cm.
- C) Forsøg med totalopblandet sediment.

Nedenstående gives en kort metodebeskrivelse for hver af de tre typer udvekslingsforsøg og der redegøres for de overordnede resultater. I appendiks 2 uddybes metodebeskrivelsen; rådata for alle forsøgene er samlet i appendiks 4.

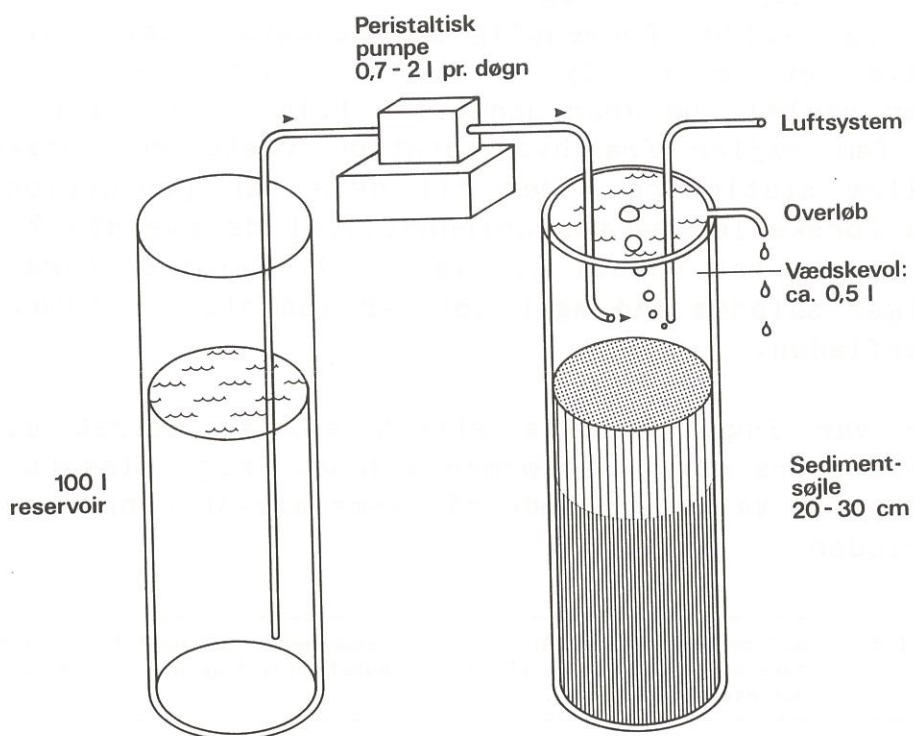
A) Forsøg med uforstyrrede sedimentsøjler med det nuværende sediment:

Forsøg A blev udført for at kunne beskrive den interne fosforbelastning i søen efter en reduktion af fosfortilledningen; men uden en sedimentfjernelse. Forsøget simulerer en sommersituation, hvor temperaturen er høj, fosfatkoncentrationen lav, og nitrat kun til stede i søvandet i begyndelsen af perioden, men senere opbrugt af planteplankton eller ved denitrifikation.

Sedimentprøverne blev udtaget i plexiglasrør med et prøvetagningsudstyr, som forstyrrer søbundens lagdeling mindst muligt ("Kajakprøvetager"). Prøverne blev udtaget på tre stationer, som var forskellige mht. fosforniveauet i overfladesedimentet.

I laboratoriet blev vandfasen i søjlerne langsomt gennemstrømmet med demineraliseret vand, samt justeret til konstant pH, nitrat- og fosfatkoncentration (figur 11). Ved at måle fosfatkoncentrationen i vandfasen dagligt var det muligt, at beregne fosforudvekslingen over sedimentoverfladen (se appendiks 2). I forsøgets første 14 dage var nitrat til stede i det tilstrømmende vand. Derefter blev nitraten fjernet og forsøget fortsatte i endnu 8-10 dage. Forsøget blev udført på fem parallelle sedimentsøjler fra hver af de tre stationer. På to søjler fra

hver station blev der ved forsøgets start målt tørstof, glødetab og totalfosfor i de øverste 2 cm af sedimentet.



Figur 11 Forsøgsopstilling til fosfatudvekslingsforsøg med uforstyrrede sediment-søjler:
Vandfasen over sedimentoverfladen bliver omrørt og iltet ved beluftning og langsomt gennemstrømmet med vand fra reservoiret. Herved fastholdes pH, fosfat- og nitratkoncentrationen i vand-søjlen.

De målte fosfatudvekslingsrater er præsenteret i tabel- og figurform i appendiks 2 og 4. I dette afsnit præsenteres kun hovedresultaterne af forsøgene.

Forsøget viste, at der i alle tilfælde var tale om en stor frigivelse af fosfat fra sedimentet til det ovenstående vand - også selvom fosfatkoncentrationen i enkelte tilfælde steg til over 400 ug P/l. Der var stor variation mellem frigivelsesraterne i de 5 søjler fra hver station på de enkelte måle dage (se figur A3, appendiks 2). En sådan variation er ikke ualmindelig ved forsøg med uforstyrrede sedimentsøjler og skyldes formentlig sedimentets heterogenitet (bl.a. et forskelligt antal af dansemyggelarver i hver søjle). De gennemsnitlige frigivelsesrater for de fem søjler fra hver station viste en forskel mellem stationerne, der til dels var proportional med forskellen på fosforindholdet i de øverste 2 cm af sedimentet (tabel 3, figur 12). Frigivelsesraten stiger således med øget total-P indhold i sedimentoverfladen.

Der var ingen tydelig effekt af, at nitrat blev fjernet fra det tilstrømmende vand. Frigivelsesraten af fosfat var nogenlunde på samme niveau gennem hele perioden.

Tabel 3 Sedimentets indhold af tot-P samt gennemsnitlige nettofrigivelsesrate af fosfat gennem 25 dages inkubation med og uden nitrat i det ovenstående vand.

<u>Stationsnr.</u>	<u>Total-P i 0-2 cm</u>	<u>Nettofrigivelse af fosfat</u>
	mg P/g tv	mg P/m ² /d
13	3,34	156 +/- 31
33	4,76	233 +/- 25
51	4,29	176 +/- 20

B) Forsøg med sedimentsøjler med "blotlagt" sediment:

Det "gamle" sediment, som bliver blotlagt ved en sedimentfjernelse vil have en anderledes beskaffenhed end det nuværende overfladesediment (se afsnit

3). Sedimentet vil reagere anderledes bl.a. mht. fosforudveklingsforhold. I løbet af de første par år efter sedimentfjernelse vil det blotlagte sediment blive pålejret varierende mængde friskt organisk materiale, formentlig af nogenlunde samme karakter som det nuværende overfladesediment. Disse forhold simuleres i forsøg B ved pålejringen af forskellig lagtykkelse af dette sediment.

På 15 sedimentsøjler udtaget midt i søen blev de øverste 50 cm af sedimentet fjernet. Søjlerne blev herefter etableret i en forsøgsopstilling som ved forsøg A. I den første måned af forsøget blev temperaturen holdt på 5 °C og fosfatkoncentrationen i det tilledte vand på 100 µg P/l, hvilket svarer til den forventede vinterkoncentration efter reduktion i næringsstofforholdet /ref. 2/. Denne behandling af sedimentet skulle simulere den første vinter efter en sedimentfjernelse.

Den efterfølgende sedimentation af friskt organisk materiale, som overvejende finder sted om sommeren, kan forventes at andrage mellem 0,5 og 1 cm om året. For at få et indtryk af fosforudveklingsforholdene i en årrække på fem til ti år efter sedimentfjernelsen, blev de 15 søjler i forsøg B delt op i fem grupper, som blev pålejret følgende lagtykkelser af friskt organisk sediment: 0 cm (serie a), 1 cm (serie b), 2 cm (serie c), 3 cm (serie d) og 5 cm (serie e). Temperaturen i søjlerne blev hævet til 20 °C og forsøget gennemførtes derefter som forsøg A.

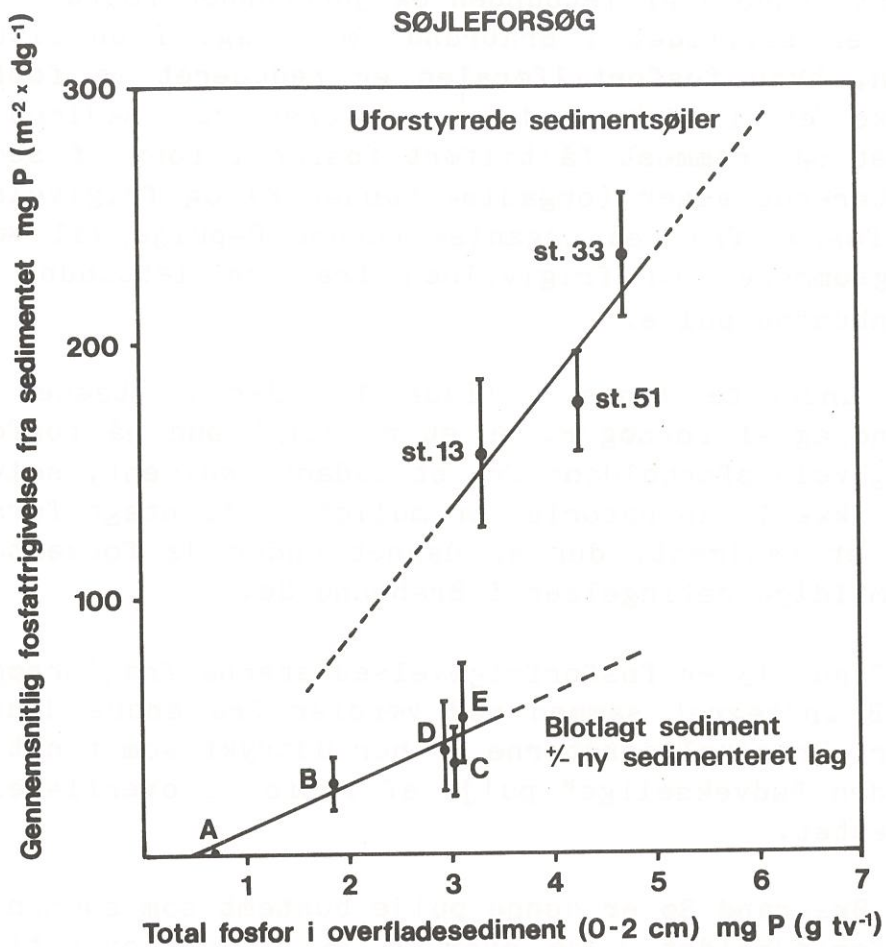
De målte fosfatudveklingsrater i forsøg B er fremstillet på tabel- og figurform i appendiks 2. Under den første måneds inkubation ved lav temperatur var der ingen målelig fosfatudveksling over sedimentoverfladen. Efter pålejring af organisk sediment, temperaturstigning til 20 °C og tilledning af demineraliseret vand uden fosfat, udviste søjlerne i serie a en svag fosfatfrigivelse i 5 dage, hvorefter der ikke var nogen målelig fosfatudveksling i resten af perioden. I serierne b-e faldt fosfatfrigivelsesraten fra et begyndelsesniveau på

50-100 $\mu\text{g P/m}^2/\text{dg}$ til 25-50 $\mu\text{g P/m}^2/\text{dg}$ efter 7 døgn. Derefter var frigivelsesraten mere stabil. Efter at nitraten blev fjernet fra indløbsvandet (12 dages inkubation) steg fosfatfrigivelsesraten i serie e øjeblikkeligt og i serierne b-d steg den efter 5 dages forløb (se figur A4, appendiks 2), men ialt var der dog kun en beskedent effekt af nitratfjernelsen. Der var ikke i forsøg B den samme store variation mellem de enkelte sedimentsøjler, som der var i forsøg A. Dette skyldes, at det pålejrede sediment var homogeniseret og dermed meget mere ensartet.

De gennemsnitlige fosfatfrigivelsesrater for hver af de fem serier for hele perioden fremgår af tabel 4 og figur 12.

Tabel 4 Gennemsnitlig fosfatfrigivelsesrate (i en 25 døgn periode) af fosfat fra "blotlagt" sediment pålejret varierende lagtykkelse af friskt organisk sediment.

<u>Serie</u>	<u>Lagtykkelse af på-</u> <u>lejret sediment (cm)</u>	<u>Fosfatfrigivelsesrate</u> <u>$\text{mg P m}^{-2} \text{ dg}^{-1}$</u>
a	0	0,8 \pm 1,1
b	1	27,5 \pm 11,6
c	2	36,5 \pm 14,3
d	3	41,5 \pm 18,5
e	5	54,1 \pm 21,1



Figur 12 Sammenhængen mellem overfladesedimentets fosforindhold og sedimentets fosfatfrigivelsesrate målt ved udvekslingsforsøgene A og B (På basis af tabel A1 og A2 i appendiks.) Fosfatfrigivelsesraterne er gennemsnit for hele forsøgsperioden (ca. 25 dage) for hver gruppe af søjler. Der var 5 søjler fra hver af stationerne 13,33, og 51 og 3 søjler i hver af grupperne A,B,C, D og E. De indtegnede standardafvigelser udtrykker variationen mellem måledagene for gennemsnitsværdierne for hver gruppe af søjler. Total-P indholdet i overfladesedimentet er målt på prøver udtaget ved starten af forsøgene.

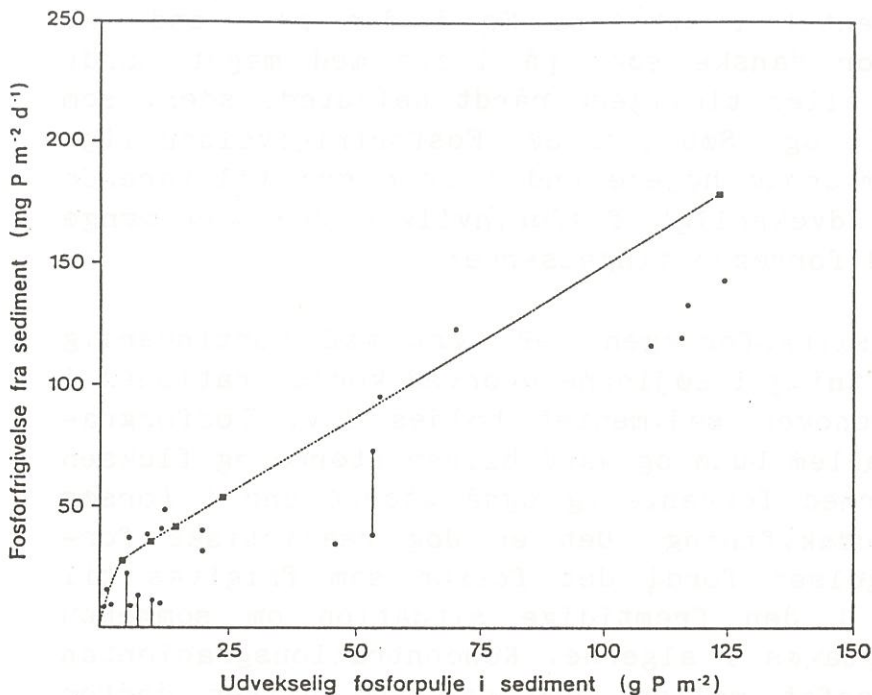
På figur 12 er indtegnet to rette linier, der udtrykker to forskellige forhold mellem total-P i overfladesedimentet og fosforfrigivelsesraten fra sedimentet. Den øverste linie, som repræsenterer

forsøg A vil være gældende, hvor sedimentet har et stort indhold af letbunden og jernbunden fosfor, som det er tilfældet i Brabrand Sø i dag. I en situation, hvor fosfortilførslen er reduceret og fosfat måske er i underskud om sommeren vil sedimentet først og fremmest få tilført fosfor i form af sedimenterende alger (organisk bundet P) og frigivelsen af fosfor fra den organisk bundne P-pulje vil være langsommere end frigivelsen fra den letbundne og jernbundne pulje.

Den underste linie i figur 12, der er tegnet på grundlag af forsøg B, er et rimeligt bud på fosforfrigivelsesforholdene fra et sådant sediment, selvom det ikke i laboratoriet er muligt at foretage forsøg med et sediment, der er dannet under de forventede fremtidige betingelser i Brabrand Sø.

På figur 13 er fosforfrigivelsesraterne fra forsøg A og B indtegnet sammen med værdier fra andre danske søer. Frigivelsesraterne er her udtrykt som funktion af den "udvekselige" pulje af fosfor i overfladesedimentet.

For Brabrand Sø er denne pulje bestemt som summen af fosforindholdet i de øverste 15 cm som overstiger 0.5 mg P/g tv. Når man tager i betragtning at de refererede udvekslingsforsøg er gennemført under meget forskellige betingelser (nogle aerobe andre anaerobe, nogle ved 20 °C andre ved 10-15 °C) er der en tendens til en lineær sammenhæng mellem den udvekselige pulje i sedimentet og fosforudvekslingen mellem sediment og vand for de danske søer.



Figur 13. Fosforfrigivelsen som funktion af mængden af udvekseligt fosfor (tot 0,5 mg P/g tv) i de øverste 15-20 cm af sedimentet for en række danske søer (efter ref. 4, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 25, 26, 29 og unpubl. resultater). Både metoder til opgørelse af den udvekselige puljes størrelse, udvekslingshastigheden og forsøgstemperaturen (10-20° C) har varieret fra sø til sø. De lodrette streger angiver intervallet mellem målinger ved hhv. anaerobe betingelser (størst) og aerobe betingelser. På figuren er der endvidere indtegnet en lineær relation mellem de to variable som er gældende for Brabrand sø ved 20° C (se tekst).

Ved at relatere fosforfrigivelsen til den udvekselige fosforpulje normaliseres resultaterne, der er afbildet i figur 13 da også, så der opnåes en lineær sammenhæng mellem de to variable for Brabrand Sø i intervallet 10-125 g P/m²:

$$\frac{\Delta(\text{udveks-pulje})}{\Delta t} = K_2 (\text{udveks-pulje}) + 0,025 \text{ g P/m}^2/\text{d}$$

$$K_2 = 1.23 \cdot 10^{-3} /\text{d}$$

hvor udveks-pulje er den udvekselige fosforpulje i sedimentet (g P/m²), Δt er tiden (i døgn).

Under de nuværende forhold ligger fosforfrigivelsen fra sedimentet i Brabrand Sø i den øvre ende af skalaen for danske søer på linie med meget hårdt belastede eller tidligere hårdt belastede søer, som Kornerup Sø og Søbygård Sø. Fosforfrigivelsen ligger gennemgående højere end i søer med tilsvarende pulje af udvekseligt fosfor, hvilket dog kan hænge sammen med forsøgsbetingelserne:

1.) udvekslingsforsøgene er kørt med kontinuerlig vandudskiftning i søjlerne hvorved koncentrationen i vandet ovenover sedimentet holdes lav. Fosforgradienten mellem bund og vand bliver større og fluksen bliver dermed forventelig også større end i forsøg uden vandudskiftning. Det er dog realistiske forsøgsbetingelser fordi det fosfor som frigives til vandfasen i den fremtidige situation om sommeren hurtigt optages i algerne. Koncentrationsgradienten af orthofosfat mellem bund og vand bliver derfor permanent stor.

2). I forsøgene med det blotlagte sediment med pålejret frisk sediment ligger hele den udvekselige pulje øverst i sedimentet (1-5 cm), hvorfor afstanden til vandfasen er kort. Det kan medføre en højere frigivelse end for søer hvor samme fosforpulje er fordelt over de øverste 15-20 cm.

C) Forsøg med totalopblandet sediment:

Som nævnt i indledningen til dette afsnit kan fosfor også udveksles mellem sediment og vand ved resuspension af sediment i søvandet under vindpåvirkning. Den fosforfrigivelse, som herved kan finde sted er afhængig af typen og puljen af udvekselig fosfor i overfladesedimentet, koncentrationen af fosfat i søvandet og af pH i søvandet. For hver kombination af disse tre faktorer vil der være en "ligevægtskoncentration" af fosfat i søvandet, hvor der ikke sker yderligere fosfatudveksling. Denne koncentration har vi søgt at bestemme i dette forsøg for fem forskellige blandinger af sediment fra overfladen og fra 50 cm's dybde. Disse blandinger repræsenterer

som i forsøg B det fremtidige overfladesediment i årene efter en sedimentfjernelse. Dog repræsenterer forsøget, hvor der kun er brugt overfladesediment, de nuværende udvekslingsforhold ved resuspension. Der er altså ikke i dette forsøg taget hensyn til, at det friske sediment ved fremtidige forhold har en mindre udvekselig fosforpulje end det nuværende overfladesediment.

I midten af søen (station 33) blev der fra dybderne 0-2 cm og 50-70 cm indsamlet sediment. Sedimentet fra 3 søjler blev blandet og omrørt og heraf blev følgende blandingsforhold (0-2 cm/50-70 cm) afvejet: 0/5, 1/4, 2/3, 4/1 og 5/0.

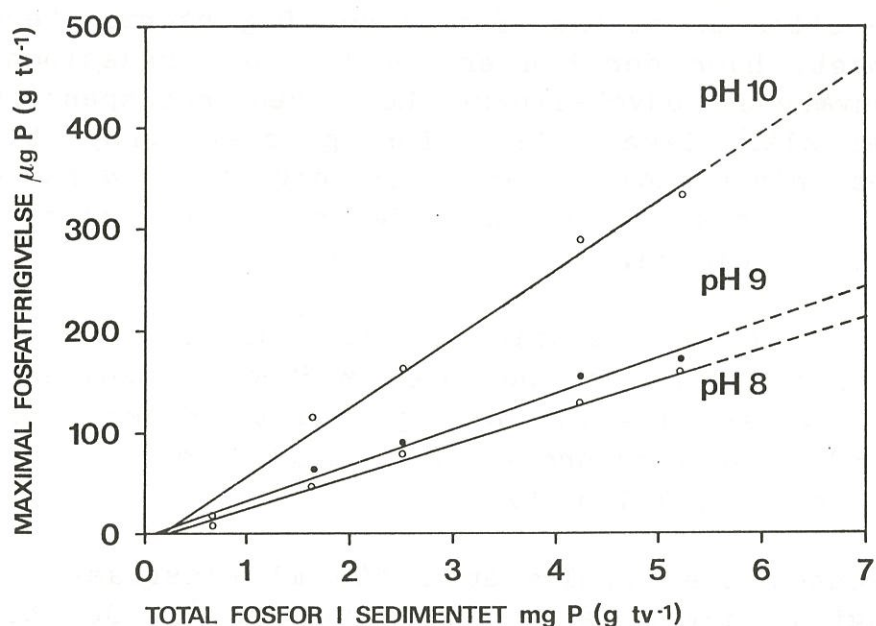
Sedimentet blev opslemmet i 300 ml glasflasker og anbragt 21 timer på rystebord ved 20 °C. Der blev ialt afvejet ca. 500 mg vådt sediment til hver flaske.

For hvert blandingsforhold af sediment blev der lavet en serie på 9 flasker med nedenstående variation i pH og fosfatkoncentration:
pH: 8,0, 9,0, 10,0; Fosfat: 0,100,300 µg P/l.

Efter endt inkubation målttes fosfatkoncentrationen i flaskerne. Denne koncentration repræsenterer ligevægtskoncentrationen mellem sediment og vand ved de pågældende forsøgsbetingelser.

I hver forsøgsserie blev der registreret stigende fosfatfrigivelse med stigende pH. Resultater for sedimentets fosfatfrigivelse i de enkelte flasker findes i appendiks 2 (tabel A3 og figur A5). Kun i de tilfælde, hvor sedimentsuspensionen bestod udelukkende af sediment fra 50 cm's dybde blev der registreret optagelse af fosfat fra vandet til sedimentet; dette fandt sted ved fosfatkoncentrationer over 100 µg P/l kombineret med pH værdier på 8 og 9. I alle andre tilfælde viste forsøgene, at sedimentet afgav fosfat til vandet ved opblanding. I figur 14 ses de størst målte fosfatfrigivelser ved 3 pH værdier som funktion af total-P i den pågældende sedimentblanding.

FLASKEFORSØG



Figur 14 De størst målte fosfatfrigivelser fra "overfladesediment" ved forsøg med totalopblandet sediment, som funktion af total-P i sedimentet og pH i væsken. (Baseret på tabel A3 i appendix).

Der ses en tydelig stigning i sedimentets fosfat-afgivelse ved pH-øgning fra 9-10, mens afgivelsen stiger mindre ved pH-øgning fra 8 til 9.

Den øgede fosfatfrigivelse ved større pH skyldes, at hydroxylionerne, som nu findes i større koncentration bytter plads med fosfationerne på f.eks. jernpartikler. I eutrofierede søer optræder der om sommeren ofte høje pH værdier i søvandet pga. planteplanktonets fotosyntese. Den herved inducerede fosfatafgivelse fra sedimentet kan yderligere øge planktonproduktionen og der opstår en "ond cirkel". Det er derfor af stor betydning, især i jernrige søer, hvis man ved at mindske planktonproduktionen i søvandet (f.eks. ved reduktion af både ekstern og intern P-belastning) også kan mindske hyppigheden af høje pH-værdier i søvandet.

4.2 Samlet vurdering af forsøg A, B og C:

De nuværende og fremtidige forhold vedrørende sedimentets fosforfrigivelse i Brabrand Sø er målt og "simuleret" ved laboratorieforsøgene.

Målinger på uforstyrrede sedimentsøjler (forsøg A) viste, at det nuværende Brabrand Sø sediment frigav fosfat til det ovenstående vand med en rate på mellem 160 og 230 mg P/m²/d. Det er nogle af de størst målte rater i danske søer (figur 13), og vidner om en betragtelig intern fosforbelastning i søen.

I de forsøg, som simulerede årene efter en sedimentfjernelse (forsøg, hvor de øverste 50 cm af sedimentet blev fjernet, og den nye sedimentoverflade blev pålejret varierende lagtykkelse af friskt organisk sediment), målttes fosfatfrigivelsesrater, der var mere end 5 gange mindre end ved det nuværende sediment. Selv, når fosfatfrigivelsesraterne blev set i forhold til indholdet af fosfor i de øverste 2 cm af sedimentet, var der en størrelsesorden til forskel på fosfatfrigivelsen mellem det "fremtidige" og det nuværende sediment (figur 12).

Forsøgene med totalopblandet sediment (forsøg C) viste, at ved de forventede lave fosfatkoncentrationer i søvandet efter reduktion af fosfortilførelsen (mindre end 100 µg P/l /ref. 1/) vil der altid frigives fosfat fra overfladesedimentet ved en resuspension. Hvor stor denne frigivelse bliver vil helt afhænge af mængden af fosfor i overfladesedimentet og pH i søvandet (figur 14).

Ved en evt. fjernelse af sediment til 50 cm's dybde vil fosfatfrigivelsen fra det "nye" overfladesediment være ubetydelig i det første år efter bortgravningen idet, det blotlagte sediment næsten ikke afgav fosfat i forsøgene B og C. I løbet af få år vil det nye overfladesediment imidlertid ændre karakter i retning af det nuværende overfladesediment og fosfatfrigivelsen vil igen stige uden dog at nå det nuværende niveau (figur 12). Forsøgsserien C

viste, at det er af stor betydning for fosfatfrigivelsen under resuspension af sediment at mindske hyppigheden af høje pH-værdier i søvandet.

Vi mener derfor, at forsøgene med det nuværende sediment giver en ganske god beskrivelse af de fremtidige fosforudvekslingsforhold og at størrelses af de fremtidige afgivelsesrater fra sedimentet vil ligge inden for den ramme af værdier, der er angivet i figur 13. Med denne baggrund opstilles en vurdering af de fremtidige forhold i Brabrand Sø i afsnit 5.

5. VURDERING AF FOSFORUDVEKSLINGEN MELLEM BUND OG VAND VED FORSKELLIGE GRADER AF SEDIMENTFJERNELSE

I det følgende vil vi vurdere hvordan fosforudvekslingen mellem bund og vand vil ændres med ændringer i rensningsgraden på spildevandsanlæggene i søens opland og ved forskellige grader af sedimentfjernelse. Endvidere vurderes effekten på eutrofierings-tilstanden af disse ændringer i fosfornivauet.

Det er dog vanskeligt at opstille en sikker prognose for den fremtidige udvikling i søen efter et indgreb. Der er en række væsentlige grunde hertil:

1. Nationalt såvel som internationalt er der kun et meget beskedent erfaringsgrundlag for lavvandede hurtigt gennemstrømmende søers reaktion på en reduktion i den eksterne belastning. Det gælder ikke mindst for søer som Brabrand Sø der igennem længere tid har været udsat for en så stor fosforbelastning, og hvor der derfor er ophobet store mængder fosfor i bunden /ref. 8/.

2. De eksisterende empiriske modeller for sammenhængen mellem fosforbelastning, algemængde (klorofyl) og sigtdybde er ikke udviklet på meget lavvandede søer med hurtigt vandskifte. Modellernes prognoseværdi kan derfor betvivles.

3. Den hydrauliske belastning (vandtilførslen pr. arealenhed pr. tidsenhed) varierer meget over året, med en stor belastning i efterårs- og forårsmånederne og en generel lavere belastning om sommeren (tabel 6). Dette har afsmittende virkning på fosforbelastningen og fosfortilbageholdelsesevnen (se afsnit 5.2). Det er derfor vanskeligt at anvende årsgennemsnitsmodeller.

4. Det tilførte fosfor fordeles ikke jævnt i søen. Således tyder resultaterne af amtskommunens undersøgelse i 1984 på, at fosforbelastningen fra Viby rensningsanlæg ikke påvirker hele søen i lige stor grad, idet koncentrationsnivauerne for næringsstoffer og algemængde om sommeren generelt er højere i øst-enden af søen, hvor spildevandet fra dette anlæg udledes (se også afsnit 5.2). Dette kan få betydning for prognoserne, idet fosforbelastningen fra Vibyanlægget udgør ca. 60 % af den samlede belastning af søen.

På trods af disse vanskeligheder vil vi dog i det følgende foretage en række simple beregninger af konsekvenserne for søens tilstand af forskellige indgreb. Det har ikke inden for projektets ramme været muligt at opstille mere dynamiske eutrofieringsmodeller eller at anvende eksisterende modeller. De eksisterende modeller giver dog næppe heller et sandere billede af udviklingen end de simple modeller, fordi de dynamiske modeller i øjeblikket ikke kan beskrive de biologiske strukturændringer, som forventelig finder sted i takt med en reduceret ekstern og intern fosforbelastning af søen.

Med henblik på prognoseberegningerne foretages først en vurdering af den eksterne belastningsudvikling i de kommende år. Herefter beskrives fosfordynamikken i søen i 1978 og 1984, hvor Århus Amtskommune har foretaget et tilsyn med søen og det benyttede prognoseværktøj præsenteres. Endelig foretages prognoseberegninger for udviklingen i fosforkoncentrationen i søen og effekten på eutrofieringstilstanden af de forskellige tiltag diskuteres og sammenlignes med forhold i andre søer.

5.1 Belastningsudviklingen i de kommende år

Fosfortilførslen til Brabrand Sø er i øjeblikket 80-90 tons pr. år, hvoraf ca. 50 tons kommer fra Vibyanlægget./ref. 2/

I recipientkvalitetsplanen er der lagt op til en fosforfjernelse på spildevandsanlæggene i byerne i søens afstrømningsområde, således at disse anlæg skal være etableret senest i 1990, med 95 % effektivitet overfor fosfor i bysamfund over 500 PE og 90 % effektivitet i bysamfund under 500 PE./ref. 2/

I Skovby er man i gang med at etablere fosforfældning og når dette anlæg er i drift vil fosfortilførslen til søen blive reduceret med 7 % (1984 niveau /ref. 2/). Til gængæld vil sommerbelastningen i en periode øges med ca. 2 % som følge af spildevandsomlægningen i Solbjerg. Spildevandet pumperes nu uden om Stilling-Solbjerg sø, hvorved den tidligere fosfortilbageholdelse i søen på ca. 50 % er bortfaldet. I de øvrige byer, Solbjerg inkl., er etableringen af anlæg til fosforfjernelse endnu ikke påbegyndt. Man kan derfor nok næppe forvente en væsentlig belastningsreduktion før i 1989-90.

Ved beregningerne er der derfor pessimistisk regnet med, at fosforbelastningen først i 1990 reduceres fra de nuværende 80-90 t P/år til ca. 14 t P/år. /ref.2/

5.2 Fosfordynamikken i 1978 og 1984

I tabel 5 er gennemsnitskoncentrationen af fosfor angivet for forskellige årstider i 1984, hvor amtskommunen har foretaget målinger i søen og dens op-

Tabel 5 Gennemsnitlig fosforkoncentration i søer på forskellige årstider i 1984 (mg P l⁻¹). Efter /ref. 2/.

Total fosfor (mg P l ⁻¹)			
	Sommer(1/5-1/10)	Vinter(1/10-1/12,1/1-1/5)	År
Total fosfor	0,92-0,99	0,50	0,65-0,73

land. Koncentrationsnivauet varierer en del over året. Koncentrationen er således dobbelt så høj om sommeren som i den resterende del af året. Der er flere årsager hertil. For det første er koncentrationen i tilløbene højere om sommeren, fordi en større procentdel af vandføringen her udgøres af spildevand. For det andet er der forventelig en større netto fosforfrigivelse fra bunden om sommeren medens der er tale om nettobidrag om vinteren.

På baggrund af dataene i amtskommunens tilsynsrapporter kan der opstilles en massebalance for fosfor for h.h.v. sommerperioden (1/5-1/10), den resterende del af året, og for hele året (tabel 6).

Tabel 6 Massebalance for totalfosfor på Brabrand Sø i 1978 og 1984, samt fosfortilbageholdelse i søen ved anvendelse af model 1) og 2) (se nedenfor). Delvis efter /ref. 22 og 27/.

	Sommer(1/5-1/10)		År		Vinter(1/10-1/12,1/1-1/5)	
	mg P m ⁻² d ⁻¹		mg P m ⁻² d ⁻¹		mg P m ⁻² d ⁻¹	
	1978	1984	1978	1984	1978	1984
Målt tilførsel fra eksterne kilder	101	116	134	161	158	195
Målt fraførsel fra søen	85	108	126	132	156	152
Målt tilbageholdelse i søen	16	8	8	29		
	16%	7%	6%	18%		
Vandets opholdstid i søen (døgn)	22	15	7	5		
Beregnet tilbageholdelse	1) 48%	1) 44%	1) 35%	1) 28%		
	2) 44%	2) 38%	2) 29%	2) 24%		
Gennemsnit af 1) og 2)	46%	41%	32%	26%		
Beregnet + målt	30%	34%	26%	8%		

Den arealrelaterede fosfortilførsel (fosfortilførslen pr. m² pr. dag) fra eksterne kilder varierer ligesom koncentrationen en del over året, men i modsætning til denne er værdierne for fosfortilførslen høje i perioden 1/10 - 1/5 og lavere om sommeren.

Hovedparten af den tilførte fosfor løber ud af søen igen. Kun 7-18 % tilbageholdes om sommeren og 6-18% på årsbasis. Disse tal er dog bestemt med en relativ stor usikkerhed, fordi de er udregnet som differensen mellem to store og forholdsvis usikkert bestemte størrelser (få målinger).

Der er opstillet flere empiriske modeller for sammenhængen mellem den årlige hydrauliske belastning af søer og deres evne til at tilbageholde fosfor, hvoraf to modeller er testet med relativt godt resultat på danske søer /ref. 9/, nemlig 1) Kirchner og Dillon-modellen og 2) Larsen og Mercier-modellen:

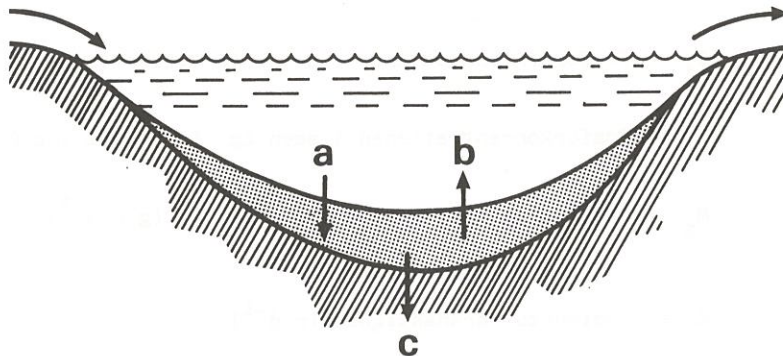
$$R = 0,426 e^{-0,271 Q/A} + 0,574 e^{-0,00949 Q/A} \quad 1)$$

$$R = \frac{1}{1 + (Q/V)^{0,5}} \quad 2)$$

Hvor Q er vandføringen ($m^3 \text{ år}^{-1}$), A søens areal (m^2) og V dens volummen (m^3). R er den del af fosforet som tilbageholdes i søen (dimensionsløs).

Modellerne overestimerer dog fosfortilbageholdelsesevnen væsentlig i tilfælde af betydelig intern belastning /ref. 9/. De to modeller giver næsten samme værdi for fosfortilbageholdelsen i Brabrand Sø (tabel 6), og værdierne er væsentlig større end de målte tilbageholdelser, ikke mindst om sommeren.

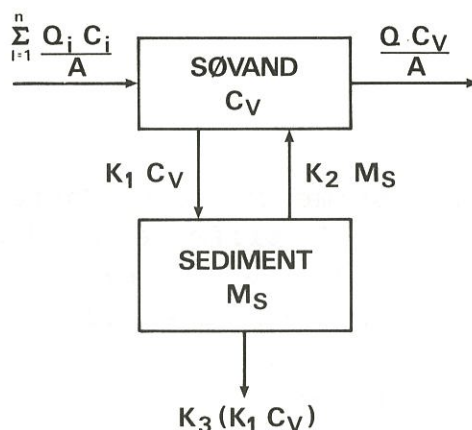
Denne forskel skyldes delt intern belastning og det forhold, at ikke al fosfat optages i alger, men løber gennem søer uden at sedimentere. Det illustrerer samtidig problemerne med at anvende de etablerede modeller som prognoseværktøjer.



Figur 15 Principskitse af den fosforudvekslingskomponenter der er medtaget i simuleringens model. Tilløb, afløb, sedimentation (a), frigivelse fra sedimentet (b) og et led der angiver, hvor stor en del af det sedimenterede fosfor som bindes permanent i sedimentet. (c).

5.3 Modelværktøjer og proceshastigheder

Som det fremgår af det foregående afsnit spiller den interne fosforbelastning en stor rolle for fosfordynamikken og fosforkoncentrationsniveauet i søen. Der er da også etableret modeller som inkluderer beskrivelser af udvekslingen af fosfor mellem sediment og vand /ref.9/. Den hyppigst benyttede model er Lorenzen-modellen /ref.9 og 6/. Principperne i denne model er illustreret i figur 15 og 16.



Figur 16 En mere detaljeret skitse af de medtagne fosforudvekslingskomponenter, hvor

Q_i = Vandføringen i det i 'te tilløb ($m^3 d^{-1}$).

A = Søens areal (m^2).

C_i = Fosforkoncentrationen i det i 'te tilløb ($mg P m^{-3}$).

C_v = Fosforkoncentrationen i søen og i afløbet ($mg P m^{-3}$).

M_s = Udvekselig fosforpulje i sedimentet ($g P m^{-2}$).

K_1 = Sedimentationshastighed ($m d^{-1}$).

K_3 = Brøkdelen af det sedimenterede fosfor som indgår i den ikke udvekselige pulje og som derfor ikke igen kan frigives. (dimensionsløs).

K_2 = Hastighedskonstant for frigivelsen af fosfor fra sedimentet (d^{-1}).

Modellen arbejder med et tidsskridt på et år og proceshastighederne er gennemsnitsværdier for et helt år. I Brabrand Sø varierer imidlertid både fosforbelastningen, fosforkoncentrationen, vandets opholdstid og også fosforfrigivelsen fra bunden meget over året, hvorfor årsgennemsnit forventeligt ikke giver noget godt billede af sommersituationen.

Vi har derfor valgt at skelne mellem sommer- og vinterhalvåret og så regne separat på de to perioder.

a) Sommersituationen

Ved laboratorieforsøgene på uforstyrret sediment blev den gennemsnitlige fosforfrigivelse fra bunden målt til 180 mg P/m²/d ved 20 °C og under aerobe forhold. Samtidigt blev der konstateret en positiv sammenhæng mellem fosforfrigivelsen og puljen af udvekseligt fosfor i sedimentet (figur 13). Antages denne sammenhæng at være gældende for sommerperioden bliver fosforfrigivelsen i gennemsnit for hele søen ca. 115 mg P/m²/d, idet den gennemsnitlige pulje i de øverste 15 cm af sedimentet var 73 g P/m² af udveksligt fosfor (figur 8).

Fosforfrigivelsen på 180 mg P/m²/d blev målt ved 20° C, men da gennemsnitstemperaturen i perioden 1/5 -1/10 var ca. 16 °C har gennemsnitfrigivelsen for hele denne periode formentlig været mindre. Benyttes en relation mellem temperatur og fosforfrigivelse for sediment i Søbygård sø (upubl. resultater) fås en frigivelse på ca. 80 mg P/m²/d ved 16 °C og 73 g udvekseligt P/m². Denne værdi vil blive benyttet i beregningerne, og vi vil endvidere antage at linien på figur 13 kan parallelforskydes med skæringspunkt i (73 g P/m², 80 mg P/m²/d). Dvs.

$$\frac{\Delta(\text{udveks-pulje})}{\Delta t} = K_2 (\text{udveks-pulje}) - 0,01 \text{ g P/m}^2/\text{d}$$
$$K_2 = 1.23 \cdot 10^{-3} /\text{d}$$

hvor udveks-pulje er den udvekselige fosforpulje i sedimentet (g P/m²), Δt er tiden (i døgn).

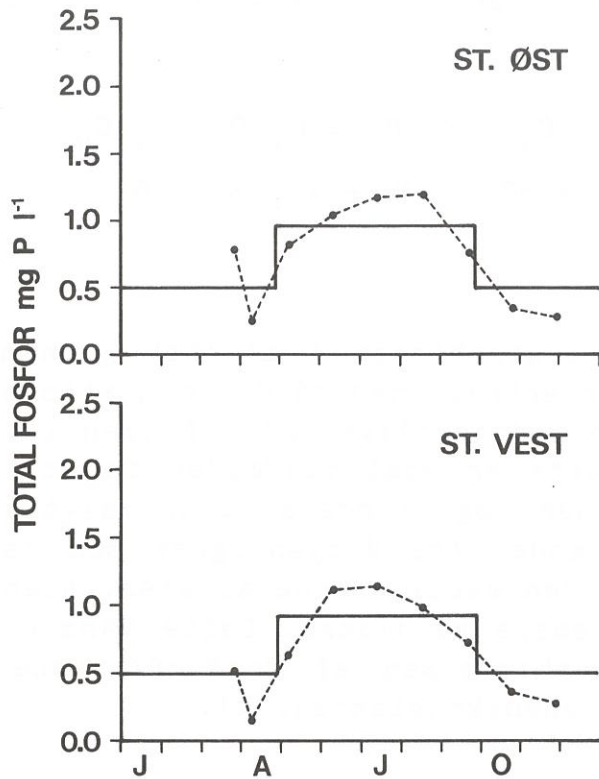
Da der som følge af de to korrektioner på måleresultaterne imidlertid er stor usikkerhed på niveauet af fosforfrigivelsen, er der i appendix 3 foretaget alternative beregninger med en højere startværdi, på 115 mg P/m²/d og den oprindelige fastlagte linie (figur 13 og afsnit 4). Det fremgår heraf, at en sådan ændring ikke påvirker responsforløbet væsentligt.

Massebalancen for sommeren 1984 (1/5-1/10) ser nu således ud (jvf. tabel 6):

Tilførsel fra eksterne kilder	116 mg P/m ² /d
transport ud af søen	<u>108 -</u>
tilbageholdelse i søen	8 -
frigivelse fra bunden	<u>80 -</u>
bruttotilførsel til vandfasen	88 mg P/m ² /d

Denne bruttotilførsel svarer til en koncentrationsforøgelse på 103 mg P/m³ dagligt, hvorfor koncentrationen i søen uden sedimentation vil kunne hæves fra et vinterniveau på 500 mg P/m³ til 1000 mg P/m³ (tabel 5 og 6) på bare 5-6 dage. Det er derfor også logisk at der må være en endog overordentlig stor sedimentation af fosfor for at koncentrationen i søen kan holdes på gennemsnitlig 1000 mg P/m³ i sommerperioden.

Til bestemmelse af sedimentationshastighedens størrelse er koncentrationsforløbet i søen forenklet til en rektangulær fordeling, med en momentan stigning til sommer gennemsnitskoncentration d. 1/5 og et fald til vintergennemsnittet d. 1/10 (figur 17).



Figur 17 Sæsonvariationen i totalfosforkoncentrationen i den vestlige og midt/østlige del af søen sammenholdt med rektangulære beskrivelse der benyttes i simuleringsmodellen.

Denne antagelse er rimelig, fordi fluksene af fosfor er store i forhold til puljen i vandfasen, hvorfor en ligevægt hurtigt vil indstille sig. Der er da også rimelig god overensstemmelse mellem den rektangulære fordeling og måleresultaterne (figur 17). Forskellen mellem måleresultaterne og model kan i vid udstrækning forklares ved en variation i koncentrationen af fosfor i tilløbet til søen og i vandudskiftningstiden.

Under antagelse af ligevægt skal tilførslen til vandfasen være lig med fraførslen. Der kan derfor

opstilles følgende massebalance ved en sommervanddybde på 0,85 m:

$$\Sigma Q_i C_i + K_2 M_S = C_V Q + K_1 C_V$$
$$116 + 80 = 108 + x \Rightarrow x = 88$$

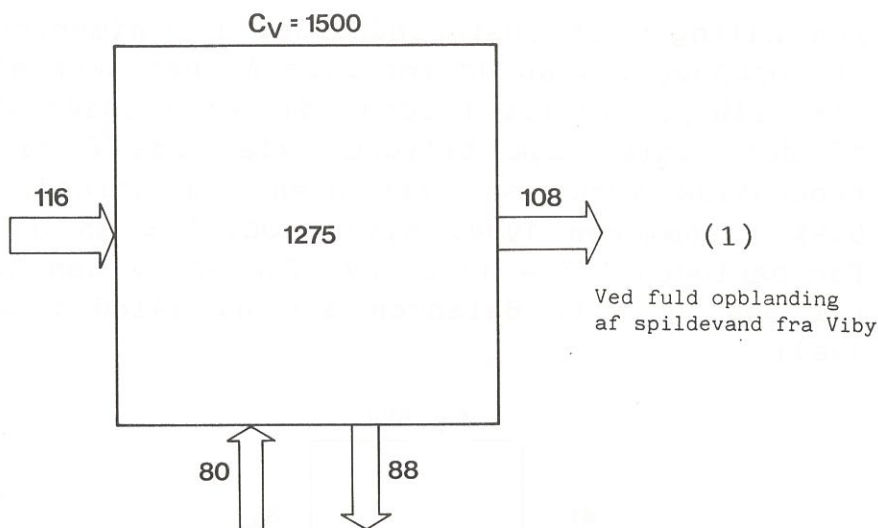
Imidlertid var koncentrationen i afløbet gennemgående højere end koncentrationen på de to stationer i vestenden og i den midt-østlige ende af søen (figur 17 og tabel 7). Dette er også tilfældet for orthofosfat, fotosyntesen og vandets gennemsigtighed (tabel 7). Spildevandet fra Vibyanlægget som ledes ud gennem Døde Å i den østlige ende af søen, blandes altså ikke i hele søens vandmasse. Dette vanskeliggør i høj grad bestemmelsen af fosforfluksene og sedimentationshastighedskonstanten, k_1 .

Tabel 7 Gennemsnitsværdier for sigtddybde, fosforindhold, klorofyl og fotosyntese i Brabrand Sø i perioden 1/5-1/10 1984. (Årgennemsnitsværdier for total P er angivet i parentes). Efter /ref. 2/.

	Sigtddybde m	Total P mg P/l	Ortho P mg P/l	Klorofyl mg/l	Fotosyntese gC/m ³ /h
Vestbassin	0,40	0,92 (0,65)	0,36	0,33	0,83
Østbassin	0,46	0,90 (0,73)	0,37	0,49	0,72
Afløb fra søen	0,38	1,49 (0,98)	0,72	0,49	1,02

Hvis der nemlig havde været fuld opblanding i vandmassen skulle koncentrationen i søen være identisk med koncentrationen i afløbet og balancen ville se

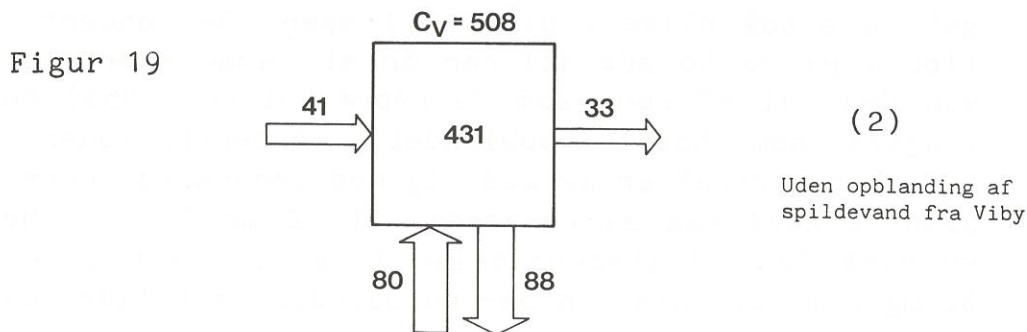
således ud for 1 m² søflade ved en sommerdybde på 0,85 m (figur 18):



Figur 18 Massebalance for fosfor for 1 m² søoverflade. C_v er totalfosforkoncentrationen i søen (µg P/l). Kassen angiver den samlede pulje i søvandet (mg P/m²). De vandrette pile angiver hhv. transporten ind og ud af søen (mg P/m²/d). Og de lodrette linier transporten til og fra sedimentet (mg P/m²/d.) (om betingelserne- se nærmere i teksten).

Dette er indlysende ikke rigtigt, da gennemsnitskoncentrationen af fosfor på de to søstationer var hhv. 0,92 (vest) og 0,90 (øst) mg P/l og ingen værdier nåede op på gennemsnitsværdien i afløbet.

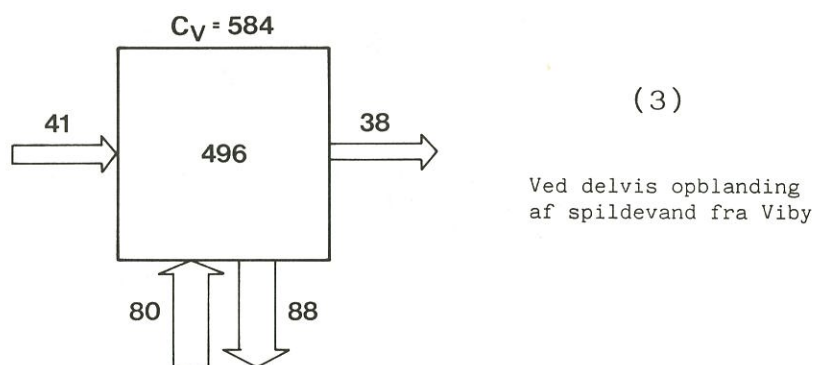
Hvis vi i stedet antager, at al spildevand fra Viby (75 mg P/m²/d /ref. 22/) løber direkte i afløbet, uden at det sedimenteres eller uden at det opblandes i søvandet, ser ligevægtssituationen i sommerperioden således ud (figur 19):



Figur 19 Massebalance for fosfor for 1 m² søoverflade. C_v er totalfosforkoncentrationen i søen (µg P/l). Kassen angiver den samlede pulje i søvandet (mg P/m²). De vandrette pile angiver hhv. transporten ind og ud af søen (mg P/m²/d). Og de lodrette linier transporten til og fra sedimentet (mg P/m²/d) (Om betingelserne- se nærmere i teksten).

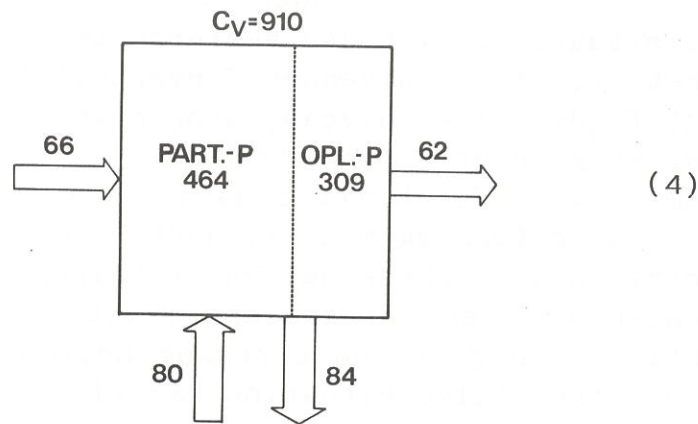
ud fra $Q C_v/A = 33 \text{ mg P/m}^2/\text{d}$ kan koncentrationen i søen, C_v beregnes til $508 \text{ } \mu\text{g P/l}$, idet Q/A i gennemsnit for sommeren 1984 var $0,065 \text{ m/d}$.

Men målinger af fosforindholdet i sedimentet viste et forhøjet niveau ud for Døde Å. Der sker altså en vis tilbageholdelse i søen. Sættes tilbageholdelsen af det fosfor som tilføres via Døde Å til samme procentisk værdi som for søen som helhed, nemlig 6,9% i sommeren 1984, bliver $Q C_v/A = 38 \text{ mg P/m}^2/\text{d}$ for perioden 1/5 - 1/10, hvorfor at C_v kan beregnes til $584 \text{ } \mu\text{g P/l}$. Balancen ser nu således ud (figur 19a):



Figur 19 a Massebalance for fosfor for 1 m^2 søoverflade. C_v er totalfosforkoncentrationen i søen ($\mu\text{g P/l}$). Kassen angiver den samlede pulje i søvandet (mg P/m^2). De vandrette pile angiver hhv. transporten ind og ud af søen ($\text{mg P/m}^2/\text{d}$). Og de lodrette linier transporten til og fra sedimentet ($\text{mg P/m}^2/\text{d}$) (Om betingelserne - se nærmere i teksten).

Gennemsnitskoncentrationen i både situation (2) og (3) ligger væsentlig under den målte værdi på de to søstationer. En del af spildevandet fra Viby-anlægget må altså blive opblandet i søen. Da koncentrationen på de to søstationer er af samme størrelse, kan den del af søen som de repræsenterer (95%) betragtes som totalt opblandet. Koncentrationen i "afløbet herfra" er dermed lig med koncentrationen i søen. $Q C_v/A$ kan så beregnes til $62 \text{ mg P/m}^2/\text{d}$. Med en 6,9% fosfortilbageholdelse i søen, fås $Q C_i/A = 66 \text{ mg P/m}^2/\text{d}$. Balancen ser nu således ud: (figur 20)



Figur 20 Massebalance for fosfor for 1 m^2 søoverflade. C_v er totalfosfor-koncentrationen i søen ($\mu\text{g P/l}$). Kassen angiver den samlede pulje i søvandet (mg P/m^2). De vandrette pile angiver hhv. transporten ind og ud af søen ($\text{mg P/m}^2/\text{d}$). Og de lodrette linier transporten til og fra sedimentet ($\text{mg P/m}^2/\text{d}$). (Om betingelserne - se nærmere i teksten).

Af de $66 \text{ mg P/m}^2/\text{d}$ stammer $41 \text{ mg P/m}^2/\text{d}$ fra Århus Å, opstrøms søen og de diffuse kilder, medens de resterende $25 \text{ mg P/m}^2/\text{d}$ må komme fra Viby-anlægget. Dvs. at kun $1/3$ af spildevandet fra Viby opblandes i søvandet hvis de opstillede antagelser holder stik.

Sedimentationen af fosfor kan i situation (4) beregnes til $84/773 = 11\%$ af den samlede pulje af fosfor pr. dag og hvis kun den partikulære del af fosforet sedimenteres (fortrinsvis alger), så sedimenteres der dagligt 18% af puljen. Sedimentationen er normalt tilnærmet proportional med puljen og disse størrelser svarer til sedimentationshastigheder (k_1) på $0,09-0,15 \text{ m pr. dag}$ eller $33-56 \text{ m pr. år}$. Disse hastigheder er overordentlig store i forhold til værdier fra de dybere søer, hvor hastighederne typisk ligger på $10-15 \text{ m pr. år}$ /ref. 9/., men de er af samme størrelse som konstateret i en meget intensiv undersøgelse i den næringssaltbelastede og ligeledes lavvandede Søbygård sø /ref. 10/.

Undersøgelserne i Søbygård sø har sandsynliggjort, at det først og fremmest er det partikulære fosfor

der returnerer til bunden /ref. 10/. I den fremtidige situation, hvor den eksterne belastning er reduceret, vil fosforniveauet forventeligt relativt hurtigt falde til et niveau, hvor algernes vækst bliver fosforbegrænset i en stor del af foråret og evt. sommeren. Fosforet vil i såfald overvejende være på partikulær form og man vil derfor forvente, at sedimentationshastighederne for totalfosfor nærmer sig værdien for den partikulære fraktion. Da der imidlertid er en glidende overgang mellem den nuværende og den fremtidige situation har vi foretaget simuleringer med begge hastighedskonstanter fra det tidspunkt (1990), hvor der sker en radikal reduktion i fosfortilførslen.

Ved beregningerne af konsekvenserne af forskellige indgreb vil situation (4) blive anvendt, men da denne bygger på forskellige antagelser er der i appendiks 3 også foretaget en gennemregning på grundlag af situation (1), hvor det er antaget, at Viby-anlæggets spildevand opblandes i hele søens vandmasse.

Med de planlagte rensningsforanstaltninger forventes fosfortilførslen pr. år nedbragt til 14 tons P i 1990. Heraf vil Viby-anlægget være ansvarlig for 2,5 tons P (95% P-fjernelse). Hvis man som beskrevet ovenfor antager, at 2/3 af spildevandet fra Viby-anlægget løber i Århus å uden at påvirke søen, bliver den samlede fremtidige belastning i stedet 12 tons P pr. år eller 8 g P/m²/år. I /ref. 27/ har man vurderet, at en årlig belastning på 12 tons P vil medføre en sommerbelastning på 14 kg P/d eller 9 mg P/m²/d. I beregningerne af den fremtidige tilstand i søen vil denne værdi derfor blive benyttet for sommerbelastningen efter 1990.

b) Vintersituationen

Det er vanskeligt at vurdere, hvordan fosforudvekslingsforholdene vil være i vintersituationen, idet det ikke inden for projektets ramme har været muligt at foretage målinger i denne periode. Vurderingen må

derfor alene baseres på resultater fra andre undersøgelser.

Den fremtidige belastningsudvikling og fosfordynamik i søen vil nok mest minde om forholdene i den ligeledes meget lavvandede Søbygård sø /ref.11/. I denne sø løber der nu, efter en markant ekstern fosforbelastningsreduktion, meget mere fosfor ud af søen end der løber til søen. Årsagen er en stor fosforfrigivelse fra bunden, der især er stor om sommeren. I vinterhalvåret optræder der perioder, hvor fosforet tilbageholdes i søen. Sættes sommerhalvåret til 200 dage og vinterhalvåret til de resterende 165 dage har der i de sidste år været tale om en balance mellem frigivelse og tilbageholdelse af fosfor i vinterhalvåret.

Da Brabrand sø ligner Søbygård sø meget både mht. morfometri, vandudskiftningstid, udvekselig fosforpulje i sedimentet (figur 7) og belastningshistorie vil vi antage, at de samme udvekslingsforhold er gældende for de to søer i vinterhalvåret, altså en nettotilbageholdelse på 0 i de første år efter en belastningsreduktion.

Senere i udviklingsforløbet eller i forbindelse med opgravning af sediment vil der blive et skift til en nettotilbageholdelse i vinterperioden. Anvendes de beregnede fosfortilbageholdelse på 29% (tabel 6) fås en nettosedimentation efter en belastningsreduktion på $0.4 \text{ g udvekseligt P/m}^2/\text{år}$.

Denne størrelse er lille i forhold til den nuværende udvekselige pulje på 73 g P/m^2 og relativt lille i forhold til de beregnede puljer efter en sedimentfjernelse ($11-23 \text{ g P/m}^2$, afsnit 3) og der er derfor ved beregningerne af responsforløbet af de forskellige indgreb set bort herfra.

Disse beregninger viser også, at en sedimentfjernelse godt kan påbegyndes nogle år for fosforbelastningen af søen er reduceret. Fosforpuljen i sedimentet vil kun ændres lidt herved.

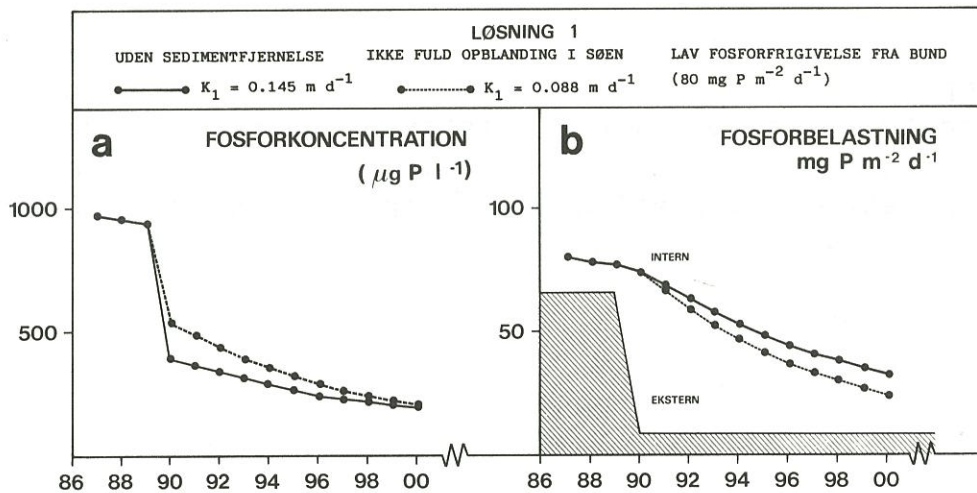
5.4 Ændringerne i fosforniveauet i søen om sommeren ved forskellige indgreb

På baggrund af sedimentkarakteristikken, fosforudvekslingsforsøgene og ovennævnte betragtninger over belastningsudviklingen er vi kommet frem til følgende mulige løsningsforslag:

LØSNING 1

Fosfortilførslen til søen reduceres fra de nuværende 80-90 t P pr. år til 14 t P/år i 1990 og der foretages ingen sedimentfjernelse

I figur 21a har vi afbildet resultaterne af en simulering af den fremtidige udvikling i sommerfosforkoncentrationen i søen efter en reduktion i den eksterne tilførsel fra de nuværende $66 \text{ mg P/m}^2/\text{d}$ til $9 \text{ mg P/m}^2/\text{d}$ i 1990 (jvf. afsnit 4.1). Figur 21b viser ændringen i den eksterne belastning og i fosfortilførslen fra bunden (den interne belastning).



Figur 21a Den simulerede udvikling i totalfosforkoncentrationen i Brabrand sø efter en reduktion i den eksterne belastning fra $66 \text{ mg P/m}^2/\text{d}$ til $9 \text{ mg P/m}^2/\text{d}$ (1990), men uden sedimentfjernelse. Både resultaterne af beregninger med en høj og lav sedimentationskonstant er vist på figuren.

Figur 21b Den simulerede udvikling i den eksterne og interne fosforbelastning under betingelserne nævnt under 21a.

Ved simuleringen er der anvendt to forskellige konstanter for sedimentationshastigheden hhv. 32 og 53 m pr. år (figur 21a,b), idet det som nævnt i afsnit 5.3 er usikkert om sedimentationen skal relateres til den partikulære pulje af fosfor i vandfasen eller til totalfosfor.

I det første år efter reduktionen i den eksterne belastning sker der en markant reduktion i fosforkoncentrationen (figur 21a) fra godt 900 $\mu\text{g/l}$ til 400-550 $\mu\text{g P/l}$. Koncentrationen vil dog fortsat være høj som følge af en høj intern belastning (figur 21b). I de efterfølgende år aftager koncentrationen langsomt i takt med udtømmningen af den udvekselige fosforpulje i bunden og den dermed aftagende interne belastning.

Beregningerne viser, at der i år 2000 fortsat vil være tale om en stor intern belastning og derfor et forhøjet fosforniveau (200 $\mu\text{g P/l}$). Søen er ifølge beregningerne således endnu ikke kommet i ligevægt med den nye eksterne belastning. Når denne ligevægt nås vil sommerkoncentrationen være faldet til 100-140 $\mu\text{g P/l}$ og den interne sommerbelastning til 10-15 $\text{mg P/m}^2/\text{d}$.

Valget af sedimentationskonstant har kun væsentligt indflydelse på koncentrationsniveauet så længe koncentrationen er høj, altså i de første år efter aflastningen.

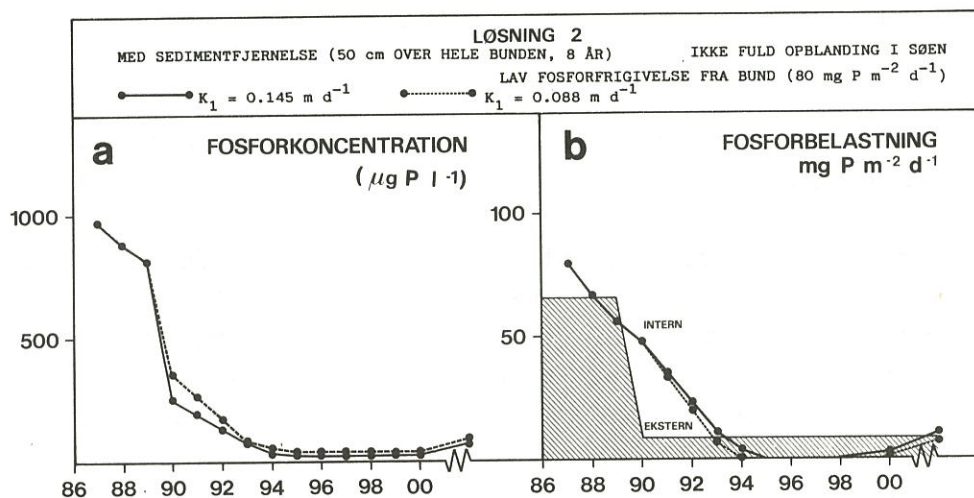
LØSNING 2

Som 1, men der foretages overalt i søen en sedimentfjernelse til 50 cm's dybde over 8 år

Ved bortgravning af de øverste 50 cm af sedimentet over hele søen eller ialt 765.000 m^3 vil den udvekselige fosforpulje i de øverste 15 cm reduceres fra 73 til 11 g P/m^2 . Ifølge /ref. 19/ vil der med den påtænkte oppumpningsmetode og med en arbejdsindsats på 1000 timer pr. år kunne fjernes 90.000 m^3 sedi-

ment pr. år. En fjernelse af de øverste 50 cm vil således skulle løbe over 8-9 år.

Ved beregningerne er der valgt en oppumpningsperiode på 8 år og det er antaget, at der oppumpes lige meget udvekseligt fosfor hvert år altså $7,75 \text{ g P/m}^2/\text{år}$. Det er endvidere antaget, at oppumpningen i-værksættes i 1987 altså et par år før den eksterne fosfortilførsel bliver reduceret.



Figur 22a Den simulerede udvikling i totalfosforkoncentrationen om sommeren i Brabrand sø efter en reduktion i den eksterne belastning fra $66 \text{ mg P/m}^2/\text{d}$ til $9 \text{ mg P/m}^2/\text{d}$ (1990), men med fjernelse af de øverste 50 cm af sedimentet over hele søen over 8 år (ialt 760.000 m^3). Både resultaterne af beregninger med en høj og lav sedimentationskonstant er vist på figuren.

Figur 22b Den simulerede udvikling i den eksterne og interne fosforbelastning under betingelserne nævnt under 22a.

Resultaterne af simuleringerne med hhv. høj og lav sedimentationskonstant (se løsning 1 og afsnit 5.3) er afbildet i figur 22a og b. I det første år falder fosforkoncentrationen knap $200 \mu\text{g P/l}$. Derefter sker der et markant fald i 1990, hvor den eksterne belastning reduceres fra $66 \text{ mg P/m}^2/\text{d}$ til $9 \text{ mg P/m}^2/\text{d}$ (figur 22b). Koncentrationen bliver ifølge beregningerne her $250\text{-}350 \mu\text{g P/l}$ mod $400\text{-}550$ uden sedimentfjernelse. I 1994 vil koncentrationen ligge på $50\text{-}60 \mu\text{g P/l}$ mod $290\text{-}360 \mu\text{g P/l}$ uden sedimentfjer-

nelse. Herefter stiger koncentrationen igen til knap 100 $\mu\text{g P/l}$ (tilnærmet ligevægt), fordi koncentrationen af udvekseligt P i det materiale som sedimenterer på den blotlagte sedimentoverflade er større end koncentrationerne i det blotlagte sediment.

LØSNING 3

Som 1, men der fjernes sediment til den dybde, hvor fosforkoncentrationen i sedimentet bliver $<1 \text{ mg P/g}$ tv. Fjernelsen sker over 6 år.

Ved denne oppumpningsløsning vil den udvekselige fosforpulje falde fra de nuværende 73 mg P/m^2 til 0-23 g P/m^2 og der skal oppumpes ca. 400.000 m^3 sediment (afsnit 3). Vi har ikke gennemregnet konsekvenserne af denne løsning for fosforniveauet, fordi vi anser den for vanskeligt at gennemføre i praksis.

Resultaterne af sedimentkarakteristikken har nemlig vist, at fosforet er heterogent fordelt i søen, både vertikalt og horisontalt, og der kan være store forskelle inden for selv små afstande. Det vil derfor ikke være muligt at grave til fast koncentration.

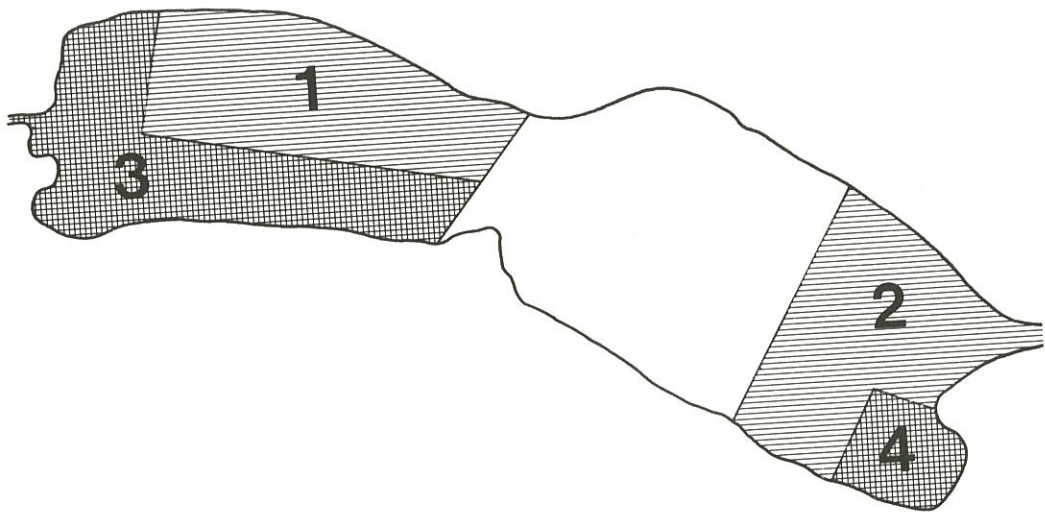
LØSNING 4

Som 1, men der foretages en opgravning af sediment i de områder, hvor fosforindholdet er særligt stort. der fjernes ialt 420.000 m^3 over 6 år.

Ved dette løsningsforslag er der lagt vægt på kun at fjerne sediment fra de områder og til de dybder, hvor fosforindholdet er særligt stort (jvf. afsnit 3). Der er endvidere taget hensyn til, at den oppumpningsmaskine, som påtænkes anvendt, kun kan pumpe et 30 cm tykt lag ad gangen /ref. 19/.

Først oppumpes de øverste 30 cm i et 60 ha stort område i vestenden af søen (180.000 m^3), hvor fosforindholdet er særligt stort og går til stor dybde

(figur 23). Denne aktivitet er berammet til 2,5 år. Herefter fjernes de øverste 30 cm fra et 40 ha stort område i østenden af søen (120.000 m^3). Fjernelsen sker over 2 år. Endelig fjernes der yderligere 30 cm fra de mest belastede områder i vestenden og ud for Døde Å. Fjernelsen sker over 1,5 år. Ialt fjernes der således 420.000 m^3 sediment over en 6-årig periode og den udvekselige fosforpulje i de øverste 15 cm af sedimentet nedbringes fra 73 g P/m^2 til 18 g P/m^2 . Som det fremgår af figur 23 vil et 50 ha stort område i den midt-østlige del af søen ikke blive berørt af oppumpningen. Det er et af de områder, hvor fugletætheden er særlig stor /ref. 22/, og hvor det karakteristiske og relativt sjældent forekommende floraelement, polderne også optræder i stort tal.

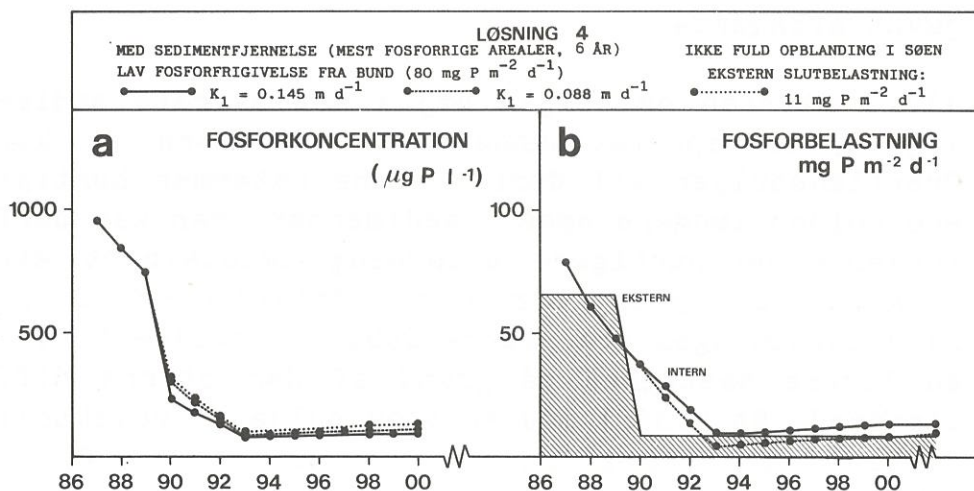


Figur 23 Områder hvor der ifølge løsning 4 skal oppumpes sediment. Oppumpningen foretages fra område 1+3 (60 ha) i år 0-2,5, område 2+4 (40 ha) fra 2,5-4,5 og område 3+4 (40 ha) fra år 4,5-6.

Af flere grunde vil det være hensigtsmæssigt at starte oppumpningen i vestenden. For det første er pumpeafstanden til det formodede deponeringsareal relativ kort, hvilket vil lette indkøringsfasen. For det andet vil man i de første oppumpningsår få et

godt billede af slammets egenskaber og hvordan det skal håndteres. Herved kan man få et beslutningsgrundlag for deponeringen af slam fra østenden af søen: Kan det aflejres på et af de alternative depoter i østenden af søen uden, at der skal lægges en membran i bunden, eller skal det i modsat fald pumpes til depotet i vestenden af søen.

Resultaterne af simuleringen af udviklingen i fosforkoncentrationen ved dette alternativ er afbildet i figur 24a,b. De adskiller sig ikke væsentligt fra resultaterne for løsning 2 (50 cm fjernelse over hele søen over 8 år), men da fjernelse af den udvekselige pulje ikke er helt så effektiv, vil der med løsning 4 være tale om et lidt højere fosforniveau og en højere intern belastning i år 2000. Ligevægtskoncentrationen er beregnet til hhv. 80-100 $\mu\text{g P l}^{-1}$ ved løsning 2 og til 100-120 $\mu\text{g l}^{-1}$ ved løsning 4, men der nok ikke i praksis tale om et forskelligt niveau, når først den udvekselige pulje, som stammer fra den nuværende periode med høj belastning er udtømt.



Figur 24a Den simulerede udvikling i totalfosforkoncentrationen om sommeren i Brabrand sø efter en reduktion i den eksterne belastning fra $66 \text{ mg P/m}^2/\text{d}$ til $9 \text{ mg P/m}^2/\text{d}$ (1990), men med fjernelse af de mest fosforholdige sedimentlag over 6 år (ialt 420.000 m^3 , se figur 23). Både resultaterne af beregninger med en høj og lav sedimentationskonstant er vist på figuren.

Figur 24b Den simulerede udvikling i den eksterne og interne fosforbelastning under betingelserne nævnt under 24a.

Hvor realistiske er nu simuleringseresultaterne ? Som nævnt i indledningen til dette afsnit er der kun et beskedent datamateriale, som kan belyse dette spørgsmål, når der er tale om lavvandede søer.

I /ref. 24/ er der foretaget en vurdering af lavvandede, hurtigt gennemstrømmende søers respons på en reduceret belastning, på grundlag af data fra fire danske søer. Glumsø og Søbygård sø repræsenterer yderpunkterne i disse søers reaktion. I Glumsø blev byens spildevand afskåret i 1981, hvorved belastningen reduceredes fra 14-16 mg P/m²/d til 4-5 mg P/m²/d. Fosforindholdet faldt markant i de første 1,5 år efter aflastningen, hvorefter ændringen har været mindre og jævnt aftagende /ref. 18/. Dette responsmønster minder meget om det simulerede forløb ved løsning 1, når man tager forskellen i opholdstid i betragtning. Den udvekselige pulje, der er relativ lav i Glumsø (ca 12 g P/m² i 1982), aftog i begyndelsen tilsyneladende hurtigere end man skulle forvente ud fra relationerne i figur 13.

Der er flere grunde til at fosforfrigivelse ikke vil være proportional med puljen, som beskrevet i modellen, men i stedet være høj i starten og herefter jævnt aftagende:

1). I starten er puljen høj i det øverste sediment lag og transportafstanden til vandfasen er kort. Overfladepuljen vil derfor kunne udtømmes hurtigere end puljen længere nede i sedimentet. Man kan derfor forvente en hurtigere udtømmning umiddelbart efter aflastningen og så, når overfladepuljen er aftaget, sker udtømmningen fra større dybder i sedimentet, med en lavere hastighed på grund af den større diffusionsvej. Et profil med en stor pulje af udvekseligt fosfor i et dybere lag kan man således nu finde i Søbygård Sø /ref. 4 og 11/.

2). Resuspension af det øvre lag vil også kunne medføre en hurtigere udtømmning af fosforet i dette lag, med samme resultat til følge.

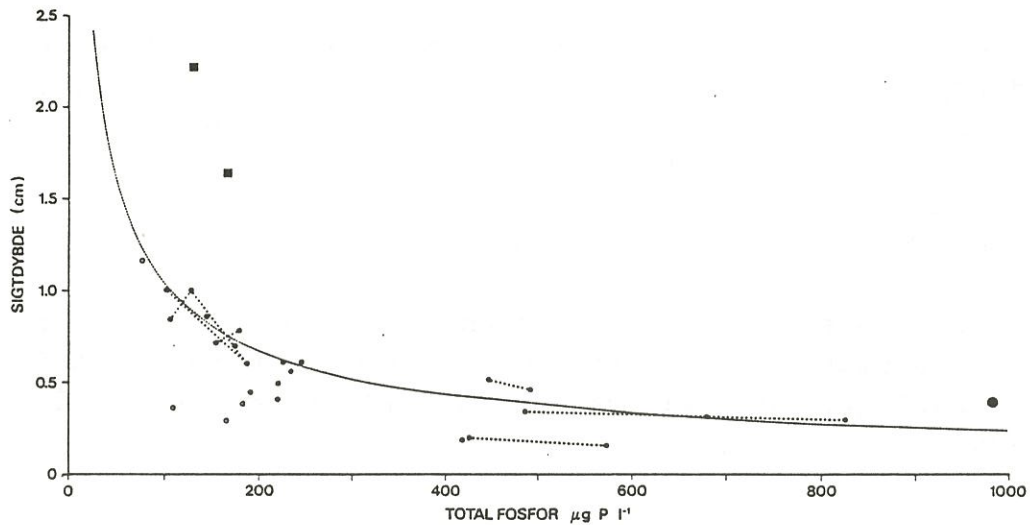
Søbygård sø har reageret meget anderledes på belastningsreduktionen fra (ca 30 g P/m²/år til ca 5 g P/m²/år i 1982) end Glumsø, og det simulerede responsforløb ved løsning 1, hvilket formentlig hænger sammen med markante ændringer i den biologiske struktur /ref. 11, 24 og 27/. Fosforniveauet i søvandet er ikke faldet væsentligt siden aflastningen og i de seneste 3 år er sommerniveauet tværtimod steget. Der er i de sidste år kommet meget mere dyreplankton i søen, hvilket har medført et større græsningstryk på algerne, så sedimentationen især i 1986 er faldet markant. Da frigivelsen fra bunden kun er reduceret langsomt i takt med udtømmningen af den udvekselige pulje (indirekte bestemt, se også figur 13) og væsentlig mindre end sedimentationen er fosforkoncentrationen i søen steget. Dermed er transporten ud af søen øget. Puljen udtømmes altså nu hurtigere end man skulle forvente udfra de simple modelbetragtninger.

Forholdene i Søbygård sø er ekstreme (bl.a. pH 10-11), men resultaterne viser, at ændringer i den biologiske struktur kan føre til ændringer i hastighedskonstanterne i modellerne, hvilket igen påvirker de simulerede udviklingsforløb. Og ændringer i den biologiske struktur vil finde sted ved et så radikalt indgreb som påtænkes iværksat i Brabrand Sø. Langtidsprognoserne er derfor usikre og bør vurderes herefter!

5.6 Vurdering af effekten på eutrofieringstilstanden

Reduktionen i den eksterne fosfortilførsel fra de nuværende 80-90 tons P pr. år. til ca. 14 tons P pr. år i 1990 vil som skitseret i figur 21a medføre en markant reduktion i søens fosforindhold. Fosfor er dog i øjeblikket ikke begrænsende for væksten af planktonalger. Det forekommer i overskud hele året, men fosfor vil blive begrænsende i perioder af året fra 1990, hvis udviklingen i den eksterne belastning forløber som planlagt og simuleringerne af fosfor-

indholdet ellers afspejler de fremtidige forhold. Fra det tidspunkt hvor fosfor bliver begrænsende for algernes vækst vil den økologiske tilstand i søen gradvis forbedres.



Figur 25 Empirisk bestemt sammenhæng mellem fosforniveauet i søvandet (årgennemsnit) og vandets gennemsigtighed (sigtddyben) (gennemsnit for juli-august), samt måleresultater fra en række lavvandede danske søer med middeldybde mindre end 2 m, og et søareal større end 15 ha. De empiriske sammenhæng er baseret på 41 danske søer /ref. 9/:

$$\frac{1}{\text{sigtddyben}} = 0,093 (\text{klorofyl})^{0,622}$$

Da der har været problemer med bestemmelserne af klorofyl i flere af de medtagne søer, har vi her i stedet anvendt totalfosfor og følgende relation /ref. 23/:

$$\text{klorofyl a} = 0,43 \text{ tot-P}$$

Punkterne fra de danske søer stammer fra de amtskommunale tilsyn og er hentet fra Miljøstyrelsens Ferskvandslaboratoriums sødatabase. For at lette sammenligningen med dataene fra Brabrand sø er der her i stedet regnet med gennemsnitsværdier for perioden 1/5 - 1/10, både for fosfor og sigtddybe.

- = Brabrand sø
- = Maribo-søerne
- = søer med udbredt undervandsvegetation

Med mindre der foretages sedimentfjernelse vil man dog nok i de første år efter 1990 næppe kunne registrere denne forbedring på vandets gennemsigtighed (sigtdybden). I figur 25 er der vist en empirisk baseret sammenhæng mellem fosforindholdet i søen (årgennemsnit) og sigtdybden (gennemsnit for juli og august). Det fremgår heraf, at man først vil kunne registrere en mærkbar forbedring i vandets gennemsigtighed, når fosforkoncentrationen bliver mindre end ca. 350 µg P/l og en mere markant forbedring når koncentrationen bliver mindre end 200 µg P/l. Ifølge simuleringerne vil dette først ske hhv. i 1993-96 og omkring år 2000, hvis der ikke foretages en sedimentfjernelse.

Den empiriske relation er baseret på 41 danske søer /ref. 9/, men spørgsmålet er om den også gælder for de meget lavvandede søer, hvor der er hyppig resuspension og derfor også forventelig en lavere "baggrundssigtdybde"? I figur 25 er der indtegnet en række punkter fra danske søer med en gennemsnitsdybde på mindre end 2 m og en størrelse på mere end 15 ha. Både fosforkoncentration og sigtdybde er her gennemsnit for perioden 1/5-1/10, for derved at lette sammenligningen med resultaterne fra Brabrand Sø.

Punkterne spreder sig meget omkring den empirisk baserede linie, men hovedparten ligger dog forholdsvis tæt op ad denne. To søer ligger meget langt over linien. Det er søer med en betydelig udbredelse af undervandsvegetation. Der er flere grunde til at undervegetationens tilstedeværelse fører til en bedre gennemsigtighed i vandet. Således stabiliserer planterne sedimentet, så det øvre bundlag ikke så hyppigt ophvirvles med fosforfrigivelse tilfølgende. Planterne er også i stand til at binde fosfor i deres væv.

Ved en given belastning bliver fosforkoncentrationen derfor mindre i søer med udbredt undervandsvegetation. Men det forklarer ikke hvorfor punkterne ved en given fosforkoncentration ligger over linien.

Årsagen hertil skal nok primært søges i en ændret biologisk struktur i vandfasen. Undervandsvegetationen medfører en række nye overflader, der kan koloniseres af fastsiddende, filtrerende organismer og den yder samtidig et skjul for dyreplankton og fisk. Dyreplankton optræder derfor i større mængde og de algeædende arter kan derfor bedre holde algevæksten nede. Dette forstærkes af at aborre og gedde trives bedre end skalle og brasen i dette miljø. Medens skalle og brasen i høj grad spiser dyreplankton lever de ældre årgang af aborre og alle gedder som rovdyr med andre fisk som hovedfødekilde. Der er derfor mere plads til dyreplankton i aborre-geddesamfundet og dermed øges græsningstrykket på algerne yderligere, med forbedring i vandets gennemsigtighed til følge.

Vender undervandsvegetationen tilbage i hele eller dele af Brabrand Sø, er der ingen tvivl om at den økologiske tilstand og vandets gennemsigtighed forbedres radikalt i forhold til de empiriske prognoser (figur 25). Det kan dog ikke udelukkes, at der i en overgangsperiode vil optræde mange trådalger i søen i stedet for de højere planter.

På figur 25 er der tre søer som ligger meget under den empirisk baserede linie. Det er tre af de fire Maribo-søer. Den fjerde, Røgbølle sø, ligger på linien. Denne sidste adskiller sig ved at have en betydelig undervandsvegetation og en anden fiskesammensætning, nemlig et aborre-geddesamfund mens de øvrige er domineret af skidtfisk /ref. 19/. Det er vanskeligt at forklare hvorfor de øvrige Maribo-søer ligger så langt under linien, men årsagen er formentlig at sedimentet i disse søer er en meget flokkuløs blanding af ler og kalk, der meget let opvirvles i blæsevejr.

I den nuværende situation ligger Brabrand Sø over den empirisk baserede linie (figur 24), hvilket dog kan skyldes at algevæksten i perioder er kvælstofbegrænset.

Sedimentet i Brabrand Sø har imidlertid et meget højt tørstofindhold i sammenligning med de fleste af de øvrige søer og en lav glødetabsprocent. Man må forvente, at sedimentet vanskeligere ophvirvles end f.eks. bundmaterialet i Maribo-søerne og Brabrand Sø derfor enten vil følge de øvrige søer nær linien eller at ligge over linien.

På dette grundlag vurderer vi, at de skitserede løsningsforslag vil få følgende konsekvenser for vandets gennemsigtighed:

Løsning 1 (ingen sedimentfjernelse):

Sigtdybden vil være lav, men svagt stigende i perioden frem til år 2000, hvor den vil være et sted i intervallet 0,4-0,8 m. Herefter forbedres sigtdybden gradvist til et niveau på 0,6-1,0 m.

Løsning 2 (sedimentfjernelse til 50 cm's dybde):

Sigtdybden vil være lav indtil 1990, altså indtil den eksterne belastning reduceres. Herefter forbedres den gradvis til 0,7-1,1 i 1993 og dette niveau vil den kunne holde i en længere årrække.

Løsning 4 (graduere sedimentfjernelse):

Vil have samme konsekvens som løsning 2, men man må forvente, at sigtdybden i år 2000 vil være ca. 0,1 m lavere. Denne forskel vil dog med tiden udlignes.

Algesammenfundet i søen er idag domineret af kiselalger og grønalger. Blågrønalger forekommer periodisk i sensommeren./ref. 27/. Men hvordan bliver forholdene efter en reduktion i fosforbelastningen og en eventuel sedimentfjernelse ? Eutrofierings-tilstanden og algemængdesammensætningen i søen vil formentlig komme til at minde om forholdene i Silkeborg Langsø's vest og midtbassin. Betragtes disse to bassiner under et har de samme sommeropholdstid som Brabrand Sø, men er dog lidt dybere (middeldybde 2,0 og 2,8 m). Vandets gennemsigtighed i de to bas-

siner er således nu på 0,8-1,1 m som gennemsnit for sommeren (1980-85, 1/5-1/10) /ref. 30/, altså af samme størrelse som i Brabrand efter 1993, hvis der foretages sedimentfjernelse, eller om 15-20 år hvis der ikke foretages sedimentfjernelse. I Silkeborg Langsø bassinerne dominerer kiselalgerne hele året /ref. 30/, mens grønalgerens betydning er ringe i sammenligning med deres nuværende betydning i Brabrand Sø. Blågrønalger optræder periodisk i sensommeren i forbindelse med stille varme perioder. Man kan altså ikke forvente at eliminere blågrønalgerne ved de forskellige indgreb i Brabrand Sø medmindre undervandsvegetationen vender tilbage i betydeligt omfang. Men varigheden af perioderne med blågrønalger, og dermed risikoen for vandblomst vil være relativt kort og den samlede algebiomasse vil generelt i hele sommerperioden være meget lavere end den er idag.

I disse prognoser forudsættes det, at der ikke indvandrer undervandsvegetation. Hvis dette sker vil den økologiske tilstand som nævnt ovenfor blive meget bedre og vandets gennemsigtighed vil øges yderligere.

5.7 Konklusion

Dette afsnit har givet anledning til følgende hovedkonklusioner:

- Det er sandsynliggjort at kun ca 1/3 af spildevandet fra Viby-anlægget opblandes i søen, mens den resterende del enten løber direkte i Århus Å eller sedimenteres udfør Døde å's udløb. Den effektive fosforbelastning af søen er således idag ikke 80-90 tons P/år, men nok snarere 45-55 tons P/år. Den fremtidige belastning fra 1990 forventes derfor at være 12 tons P og ikke 14 tons P/år, svarende til en sommerbelastning på 9 mg P/m²/d.
- Der er foretaget en række simuleringer af konsekvenserne af en belastningsreduktion i 1990 og forskellige grader af sedimentfjernelse. Til denne

simulering er der benyttet en toboksmodele inkluderende vand og sediment. Modelberegningerne viser, at der umiddelbart efter belastningsreduktionen vil ske et fald i koncentration fra 0,9 til 0,5-0,6 mg P l⁻¹, men at faldet herefter vil være meget mindre og aftagende, på grund af fosforfrigivelse fra bunden. Koncentrationen vil i år 2000 fortsat være så høj som 200 µg P/l, hvilket på basis af en analyse af en række lavvande danske søer vil medføre en sigtdybde på 0,4 til 0,8 m.

- Konsekvenserne af forskellige grader af sedimentfjernelse er forsøgt vurderet. En gradueret sedimentfjernelse hvor de mest fosforbelastede områder af sedimentet fjernes (2/3 af søens areal, 400.000 m³) vil give et tilfredsstillende resultat. Hvis oppumpningen, der måske vil strække sig over 6 år, startes i 1987 vil der i 1990, når den eksterne belastning reduceres ske en markant fald i fosfor-koncentrationen og i 1993 vil sigtdybden ligge et sted i intervallet 0,7-1,1 m om sommeren og denne tilstand vil kunne holdes over en lang årrække. Ved gradueret oppumpning, vil man kunne undgå at fjerne sediment fra et 50 ha stort område i den midt/midt-østlige del af søen, netop i det område hvor fuglebestanden er særlig tæt og polderne er talrige. Der er i afsnit 5.5 givet en mere detaljeret og begrundet plan for oppumpningsforløbet (se under løsning 4).
- En sedimentfjernelse vil kunne påbegyndes nogle år før fosforbelastningen til søen er reduceret, fordi den udvekslelige fosforpulje i søbunden er mange gange større end den årlige fosforsedimentation.
- På grundlag af en analyse af de relativt få resultater som eksisterer for lavvandede, hurtigt gennemstrømmende søers respons på reduceret fosfortilførsel kan det konkluderes:
 - 1) at langtidsprognoser med den opstillede model, eller for den sags skyld andre eksisterende

modeller, er usikre, bl.a. fordi den biologiske struktur i søen ændres ved radikale indgreb i systemet, hvilket påvirker proceshastighederne. Disse effekter er ikke medtaget. Det er derfor vanskeligt med rimelig sikkerhed at vurdere, hvor hurtigt søen vil "komme sig" efter en reduktion af fosfortilførsel. Der vil dog gå en hel del år før søen vil være i tilnærmet ligevægt med sin nye belastning. En sedimentfjernelse vil fremme forbedringen markant og samtidig give et mere stabilt sediment, hvor fosforfrigivelsen ikke er så følsom overfor pludselig skift i vejrforhold eller den biologiske struktur i søen og hvor der måske også er større mulighed for en indvandring af undervandsvegetation.

- 2) at algesammensætningen som nu også efter en belastningsreduktion og eventuelt sedimentfjernelse vil være domineret af kiselalger. Grønalgernes betydning vil aftage, men der vil stadig være perioder i sensommeren, hvor der vil kunne forekomme blågrønne vandblomst i overfladen. Generelt vil algemængden om sommeren være væsentlig lavere end tilfældet idag.
- 3) at der vil ske en meget markant yderligere forbedring i vandets gennemsigtighed og den økologiske tilstand iøvrigt, hvis der sker en væsentlig indvandring af undervandsvegetation. Der vil i så fald kunne ske et skift fra et skalle/brasen-domineret samfund til et gedde/aborre-samfund og dette vil medføre en betydelig reduktion i algemængden, nok først og fremmest fordi det algeædende dyreplankton og algeædende, filtrende hvirvelløse dyr på planternes overflade vil få bedre vilkår. Det er usikkert om undervandsvegetationen kan vende tilbage inden for en kortere årrække uden "førstehjælp" (f.eks indplantering og /eller skidtfiskebekæmpelse) og om en eventuel indvandring af planter vil kunne gå hur-

tigere efter en sedimentfjernelse end på det nuværende sediment. Igangværende eller planlagte projekter vil kunne give bedre oplysninger herom, men der er et behov for, at undersøge disse forhold specifikt i Brabrand Sø med henblik på at vurdere mulighederne for en hurtigere forbedring af søens økologiske tilstand. Der kan dog være en risiko for, at der med den øgede sigtdybde i en overgangsperiode vil optræde trådalger i søen, enten på søbunden eller periodisk flydende i overfladen.

6. REFERENCER

- /1/. Århus amtskommune, Teknisk forvaltning 1985. Betænkning vedr. Brabrand sø.
- /2/. Århus amtskommune, Århus kommune 1985. Responsum vedr. Brabrand sø.
- /3/. Botanisk Institut, Århus Universitet 1987. Brabrand sø. Sedimentets tungmetalindhold. Rapport til Århus amtskommune og Århus kommune.
- /4/. Søndergaard M. 1987. Fosfordynamikken i lavvandede søer med udgangspunkt i Søbygård sø. Rapport til Miljøstyrelsen.
- /5/. Hiltjes, A.H.M. og L. Lijklema 1980. Fractionation of Inorganic Phosphates in Calcareous Sediment. Journal of Environmental Quality 9, 3: 405-407.
- /6./ Lorenzen, M.W., Smith, D.J. og L.U. Kimmel (1976). A long-term phosphorus model for lakes: Application to Lake Washington. - In: Modeling Biochemical Processes in Aquatic Ecosystems. Ed. R.P. Canale - Am. Arbor Science Publ. Inc. Michigan 1976, s. 75-91.
- /7/. Ettrup, H. (1986). Notat vedr.: Oppumpningsfartøjets specifikationer og opgavens varighed. Århus kommune (internt notat til Teknikergruppe vedr. restaurering af Brabrand Sø.
- /8/. Sas, H. og S. Vermij (1986). Second interim report of the project eutrophication management in international perspective (first draft). Institute for Environment and System Analysis, Holland.

- /9/. Brøgger, J. og F. Heintzelmann (1979). Sørestaurering - Simple stofbalance- og eutrofieringsmodellers anvendelse i recipientplanlægningen. Miljøprojekt 16, Miljøstyrelsen.
- /10/. Kristensen, P. og P. Jensen, (1986). Sedimentation og resuspension i Søbygård sø. Specialerapport. Miljøstyrelsens Ferskvandslaboratorium og Botanisk Institut, Århus Universitet.
- /11/. Søndergård, M., Jeppesen E., Sortkjær. O., Rebsdorf Å. og J.M. Andersen (1986). Udviklingen i Søbygaard Sø efter forbedret spildevandsrensning. Vand og Miljø 5: 187-190.
- /12/. Kirkeberg, C. (1986). Næringssalt-belastning i Gentofte sø. Miljøteknikerprojekt. Teknisk skole i Slagelse.
- /13/. Jørgensen, L.A. (1977). Næringssaltdynamik i og sømodel over Gyrstinge og Haraldsted sø. Specialerapport. Ferskvands-Biologisk Laboratorium, Københavns Universitet.
- /14/. Hagebro C., Olsen, D. og H. Karup (1981). Recipientundersøgelse af Langvad åsystemet. Delrapport 3 - Stoftransport, massebalancer og stofomsætning samt vandkvalitetsmodeller. Rapport til Hovedstadsrådet (Dansk Miljøværn A.m.b.a.)
- /15/. Jørgensen, S.E., Kamp-Nielsen, L. og O.S. Jacobsen (1975). A submodel for anaerobic-mud-water exchange of phosphate -Ecol. Modelling 1:133-146.

- /16/. Norup, B. (1975). Lyngby sø 1974/75. Prognose for søens udvikling. Laboratorieundersøgelser vedrørende fosforudveksling mellem sediment og vand. Rapport til Lyngby-Tårnbæk kommune.
- /17/. Hovedstadsrådet (1982). Recipientundersøgelser af Arresø 1976-1981. Rapport udarbejdet af Vandkvalitetsinstituttet i samarbejde med COWI-consult.
- /18/. Kamp-Nielsen L. (1986). Modelling the recovery of hyperthrophic L. Glumsø (Denmark). - Hydrobiological Bulletin 20, 1-2: 245-255.
- /19/. Afdelingsleder, cand.scient. Jørgen Kirkegård, Storstrøms amt. Personlig kommunikation 1986.
- /20/. Janniche A. (1986). Notat vedr.: Rapport om fuglelivet i og ved Brabrand Sø. Århus kommune (internt notat til teknikergruppen vedr. en evt. restaurering af Brabrand Sø).
- /21/. Jacobsen, O.S. 1976. Udtømmning af mobilt phosphor fra danske sedimenter. Det 4. Nordiske sedimentsymposium, 145-159.
- /22/. Århus amtskommune (1987). Undersøgelse af forureningsforholdene i Brabrand sø 1984. Rapport udarbejdet af J.M. Andersen (under udarbejdelse)
- /24/. Jeppesen E., Kristensen P., Søndergård M. og O. Sortkjær (1987). Lavvandede hurtigt, gennemstrømmende søers reaktion på nedsat fosforbelastning. I årsrapport fra Miljøstyrelsens Ferskvandslaboratorium 1986 (under udarbejdelse).

- /25/. Dansk Miljøværn A.m.b.a. (1985). Sedimentundersøgelser i Hald sø. I: Viborg amtskommune (1985). Restaurering af Hald Sø. Muligheder. Sedimentundersøgelser. Modelopstilling. Rapport nr. 42 fra Vand- og Miljøvæsenet.
- /26/. Miljøstyrelsens Ferskvandslaboratorium og Århus amtskommune (1985). Skanderborg-søerne og deres vandløb 1980-83. Rapport udarbejdet af Å. Rebsdorf, C. Hunding og J.M. Andersen.
- /27/. Århus amtskommune (1979). Undersøgelse af forureningstilstanden i Århus å-systemet og Brabrand sø 1978. Rapport udarbejdet af J.M. Andersen, J. Jensen, K. Kristensen og Å. Kristensen.
- /28/. Jeppesen E., Sortkjær, O. og M. Søndergård (1986). Hurtige skift i planktonet kan have stor virkning på fosforfrigivelsen fra bunden af søer. I årsrapport 1985 fra Miljøstyrelsens Ferskvandslaboratorium.
- /29/. Dansk Miljøværn A.m.b.a. (1987). Undersøgelse af sedimentforholdene i og restaureringsmulighederne for Gundsømagle sø. Rapport til Hovedstadsrådet.

7. APPENDIKS

Appendiks 1

Sedimentkarakteristik

De 6 transekter på tværs af Brabrand sø blev placeret i forhold til fixpunkter markeret med pæle i kanten af bredvegetationen (placeret af Carl Bro A/S). På disse transekter (nr. 1-6) blev der på hver udvalgt 5 stationer (dog kun 3 ved transekt 4 midt i søen) som vist på figur 1. Placeringen af disse stationer blev markeret midlertidigt ved hjælp af lange elektriskerrør og udmålt i forhold til fixpunkterne ved bredden. Den præcise placering blev udregnet på basis af sejltiden mellem fixpunkterne og stationen ved konstant sejlhastighed. Udover de 6 transekter blev der lagt en station tæt ved tilløbet fra Århus Å og en tæt ved afløbet. Af hensyn til den mere nøjagtige sedimentkarakteristik blev det senere besluttet også at lægge 5 stationer på en 7. transekt beliggende mellem transekt 5 og 6 i den østlige del af søen.

Sedimentsøjlerne blev udtaget i juli-august 86 med en modificeret Kajakbundhenter og i laboratoriet opskåret i dybdeintervallerne 0-2, 2-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-50, 50-70 cm. Samme dag eller dagen efter blev tørvægt, glødetab og totalfosforindhold bestemt for hver dybdeinterval.

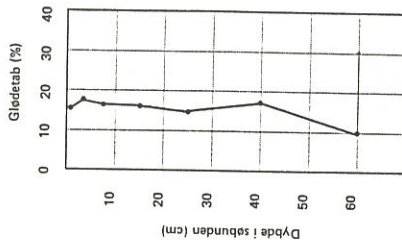
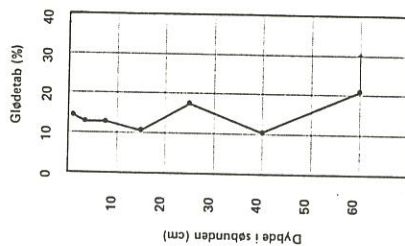
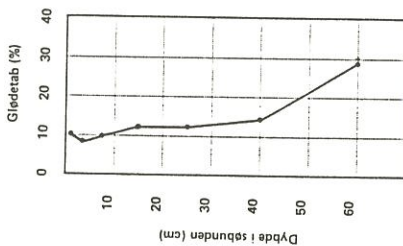
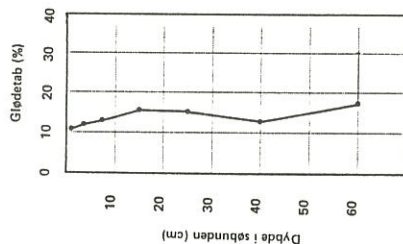
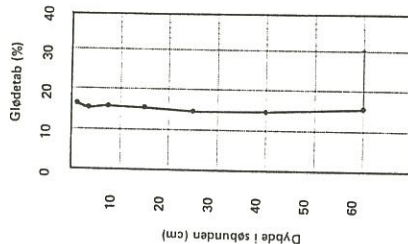
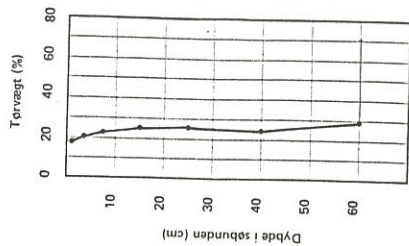
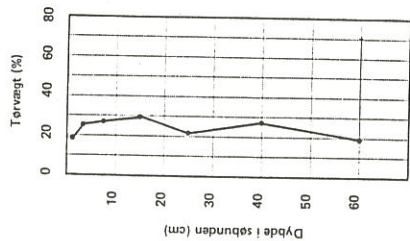
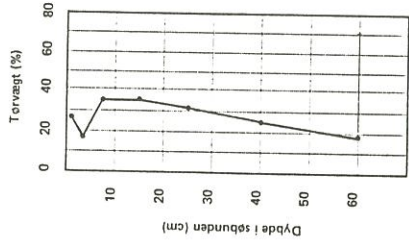
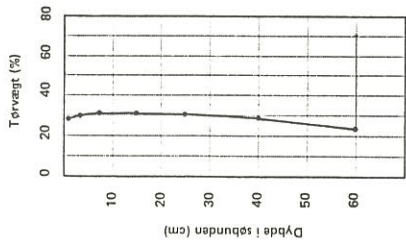
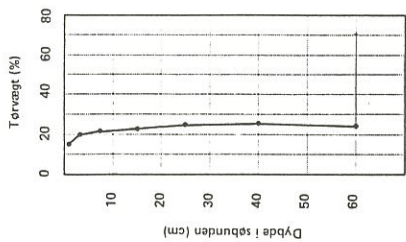
Tørvægt, tv, er bestemt ved tørring af vådsediment til konstant vægt ved 105 °C. Udtrykt i % af vådvægt.

Glødetabet, gt, er bestemt efter glødning af tørret sediment til konstant vægt ved 550 °C. Udtrykt i % af tørvægt.

Totalfosforindholdet, tot-P, er bestemt som ortho-fosfat efter syrekogning af glødet sediment. Udtrykt i mg P/g tv.

Fra station 13, 42 og 63 er fosforindholdet for hver dybdeinterval desuden fraktioneret i følgende fosforfraktioner: let adsorberet fosfor (ADS-P), jernbundet fosfor (Fe-P), kalций og magnesium bundet fosfor (CA-P), og organisk bundet fosfor (org-P).

Sedimentprøver til fraktioneringen er taget september 86 og fraktioneret som beskrevet af /ref.5/. Se i øvrigt også /ref. 4/.



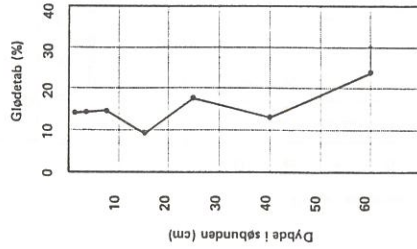
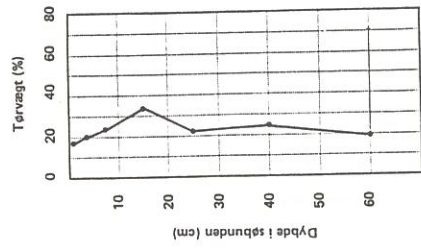
11

12

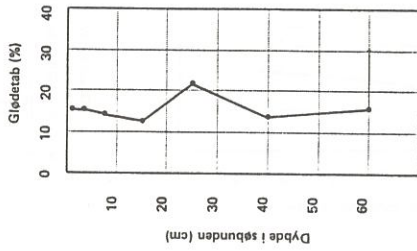
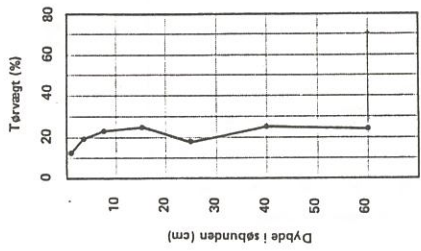
13

14

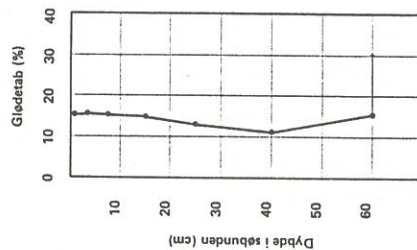
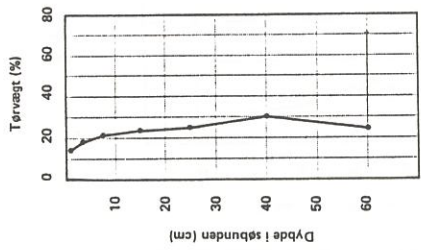
15



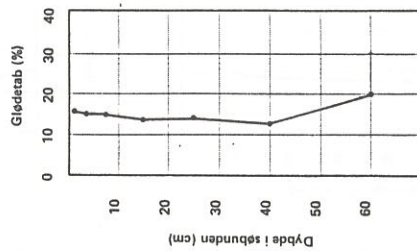
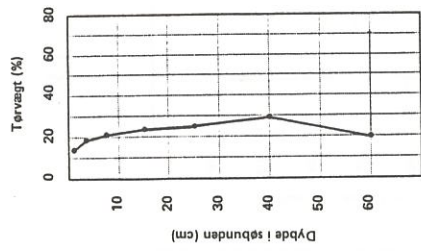
25



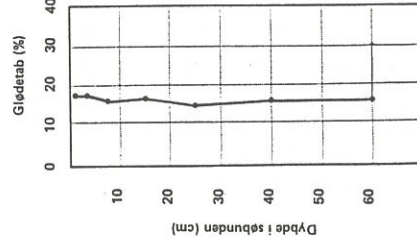
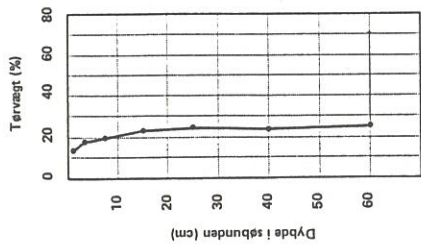
24



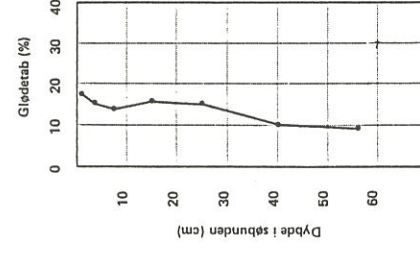
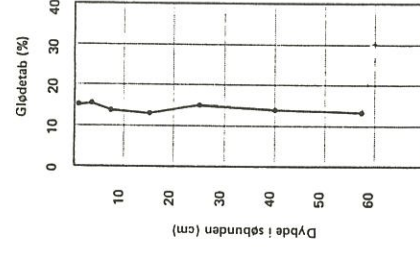
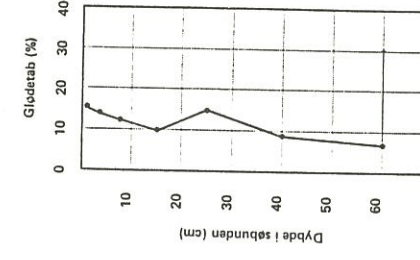
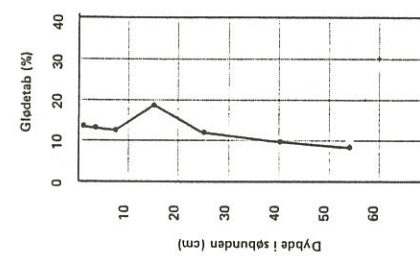
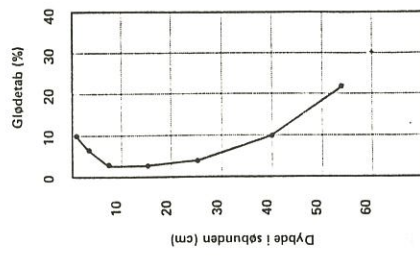
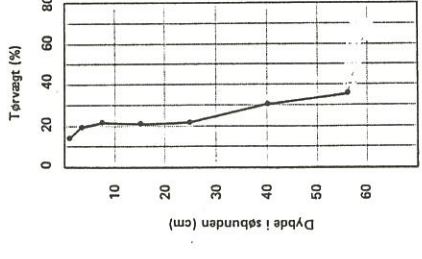
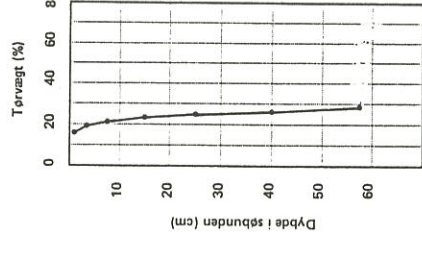
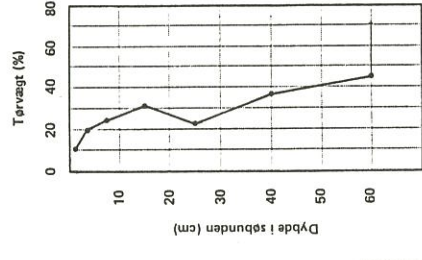
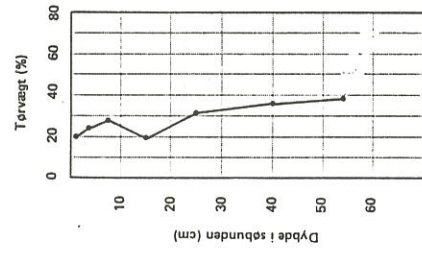
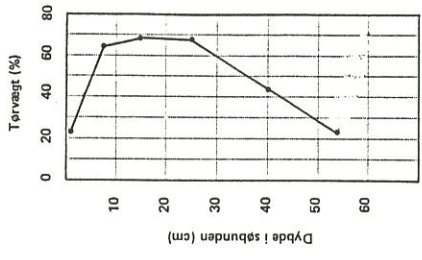
23



22



21



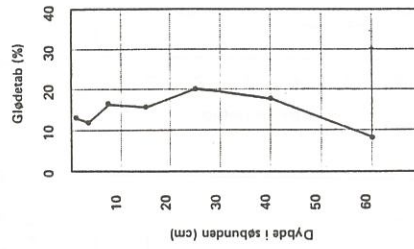
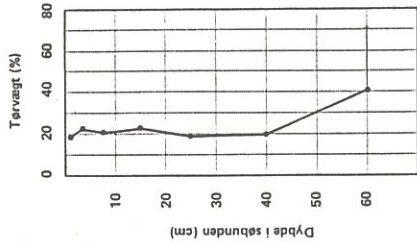
35

34

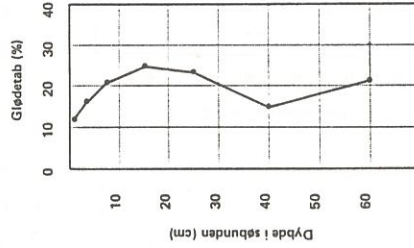
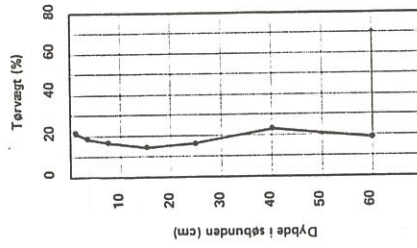
33

32

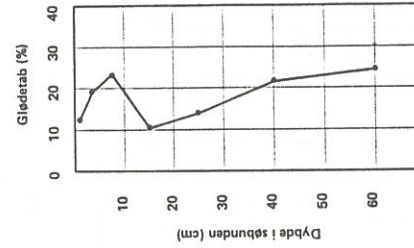
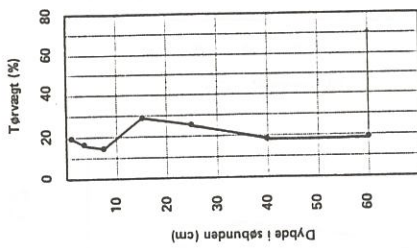
31



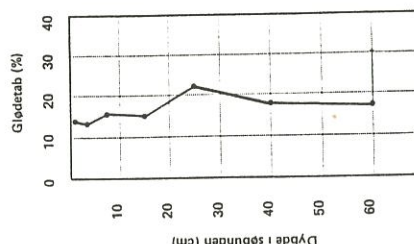
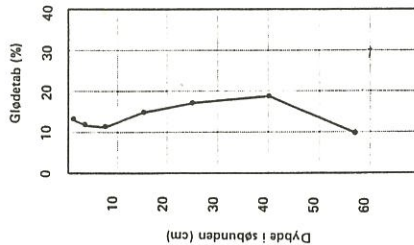
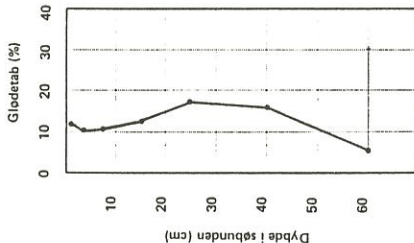
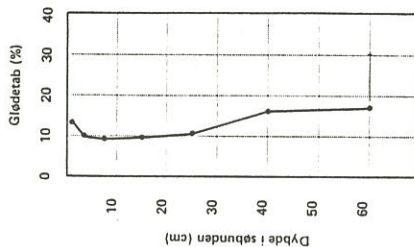
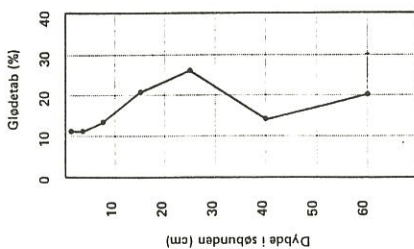
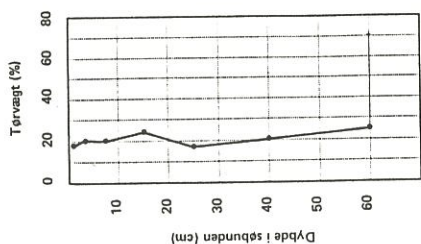
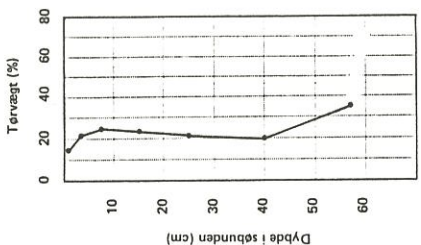
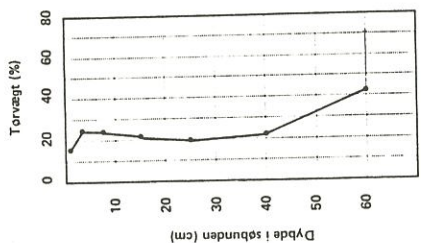
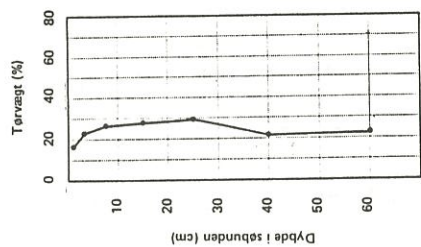
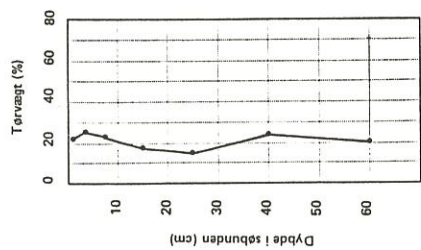
43



42



41



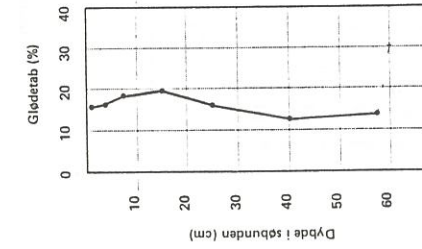
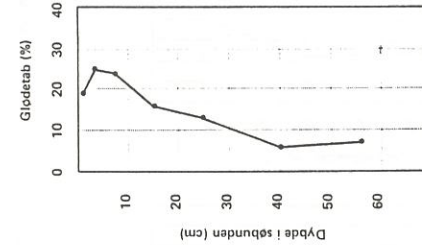
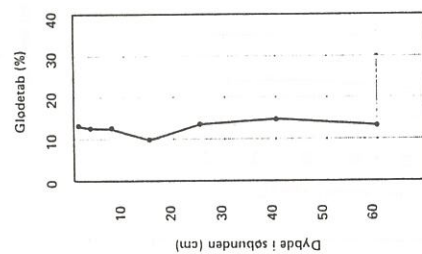
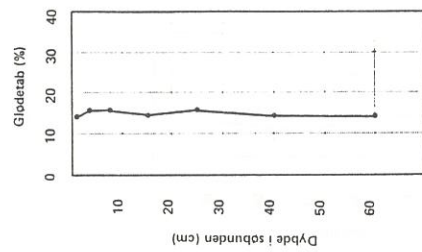
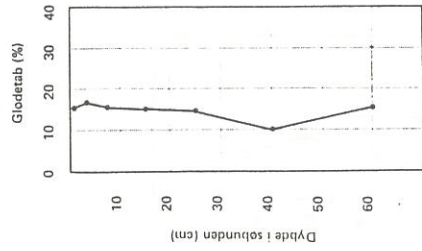
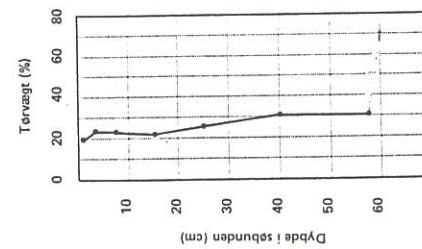
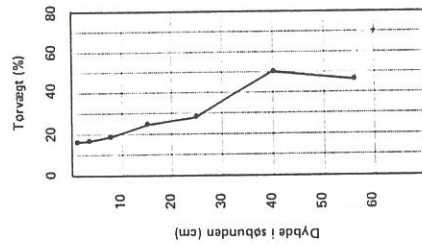
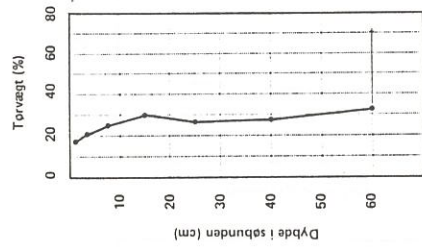
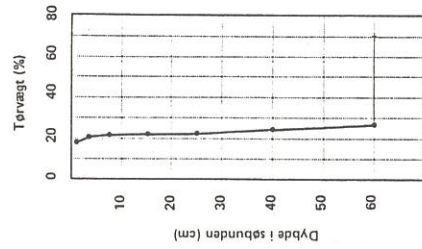
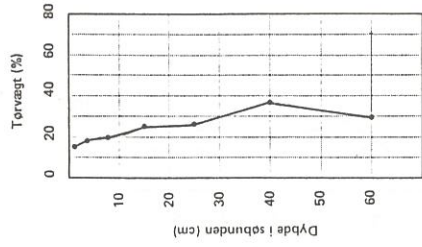
55

54

53

52

51



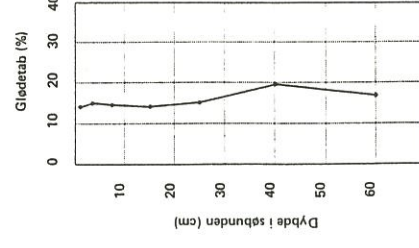
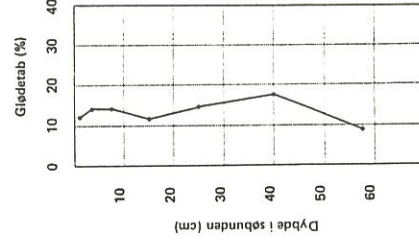
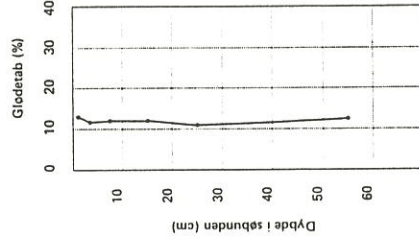
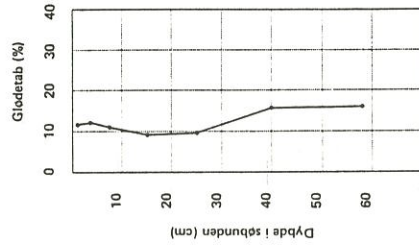
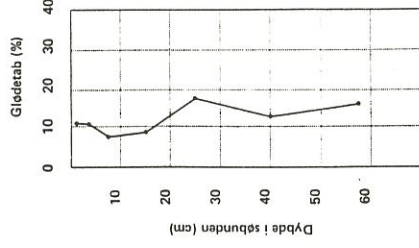
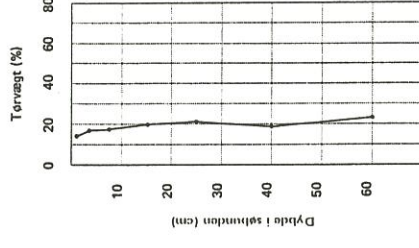
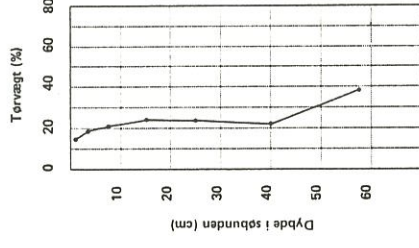
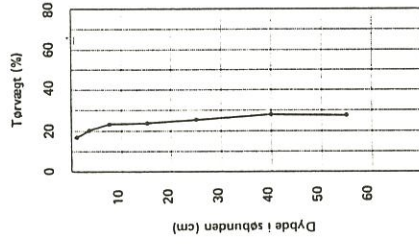
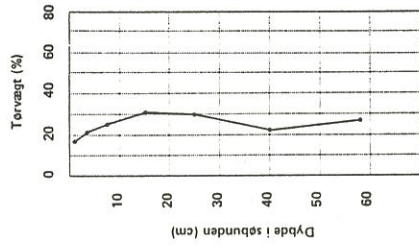
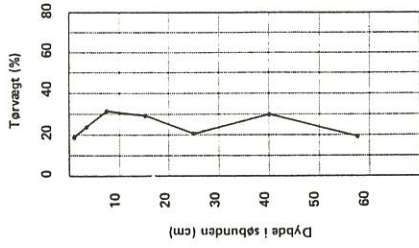
65

64

63

62

61



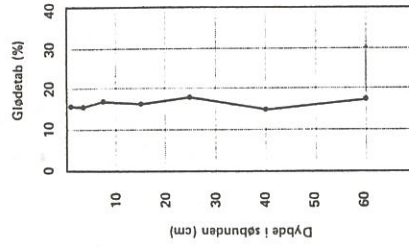
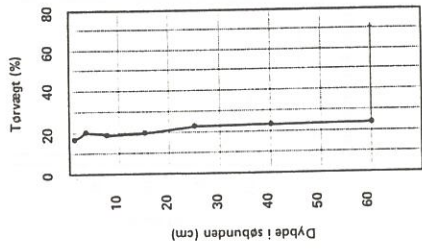
75

74

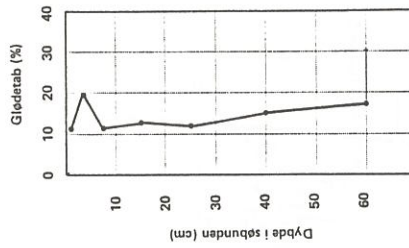
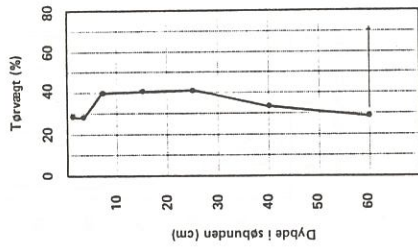
73

72

71

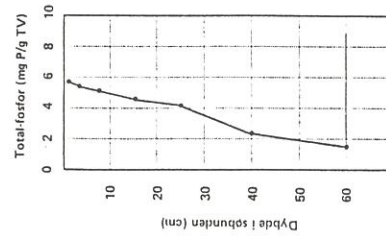
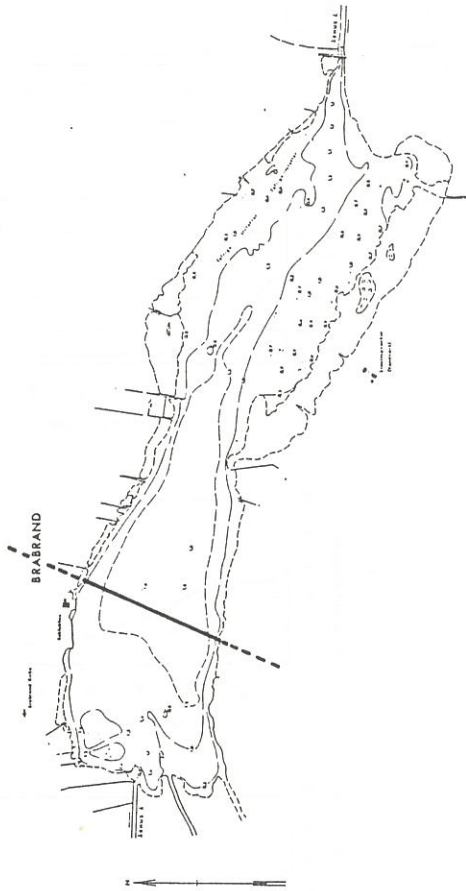


80

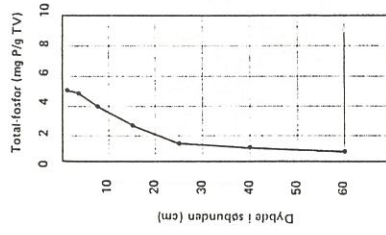


0

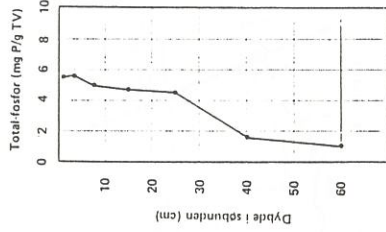
TRANSEKT 2



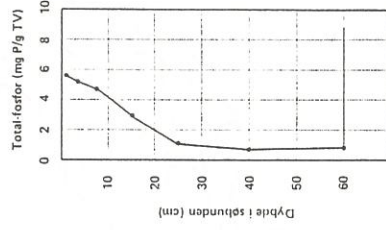
21



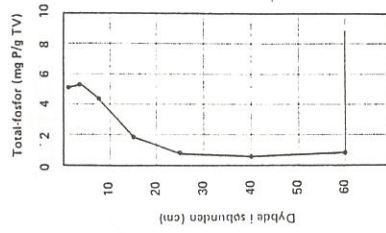
22



23

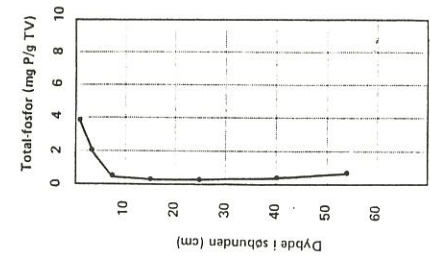
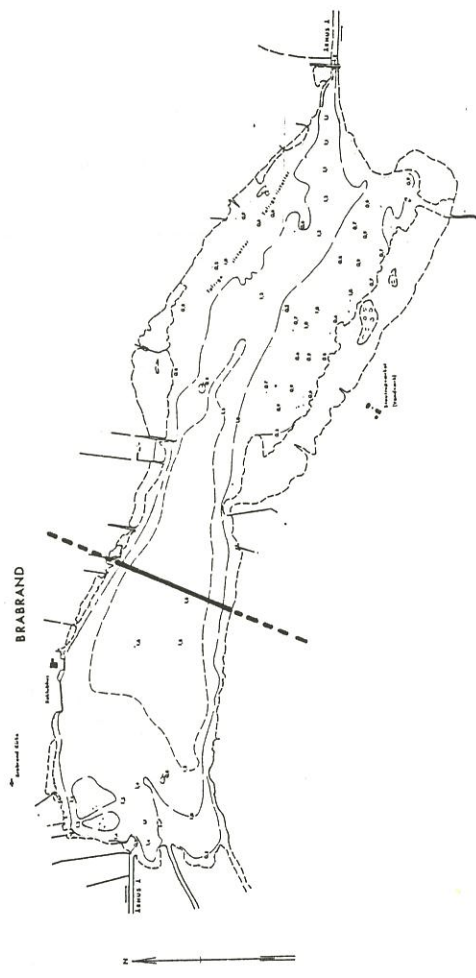


24

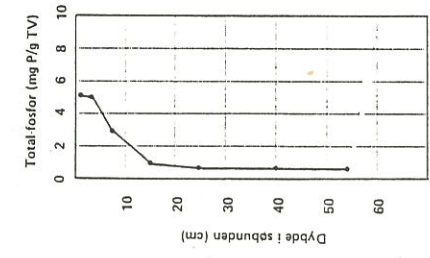


25

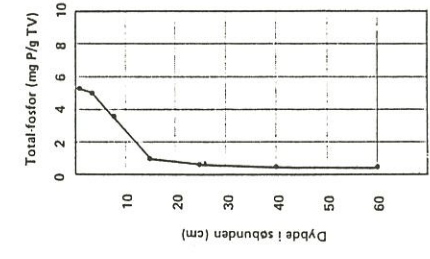
TRANSEKT 3



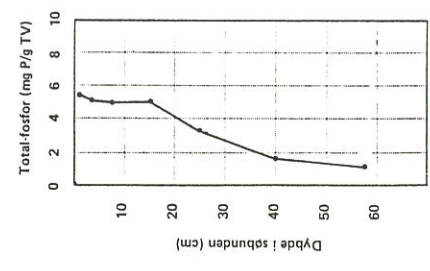
35



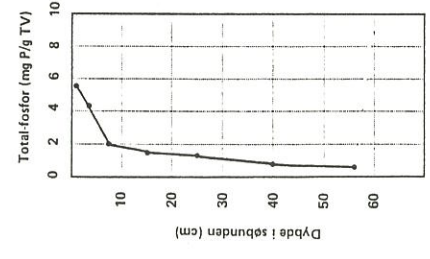
34



33

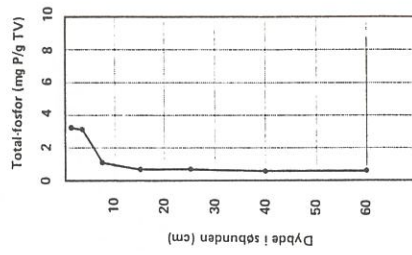
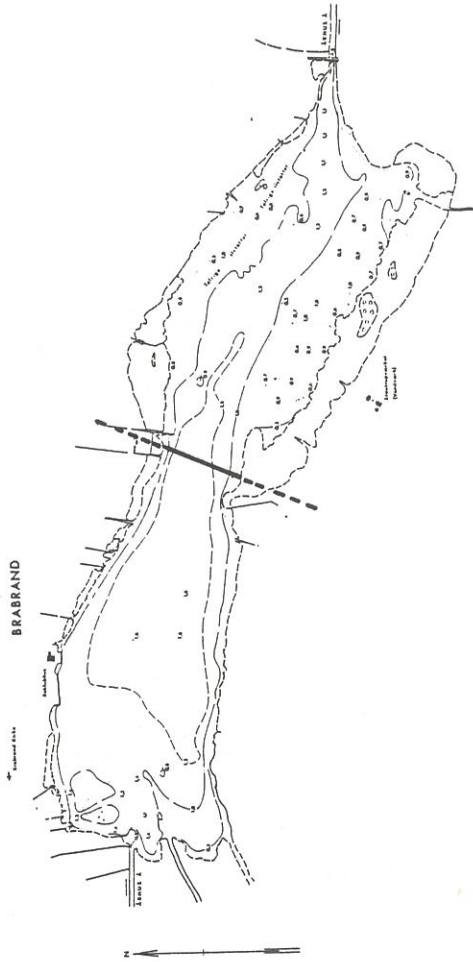


32

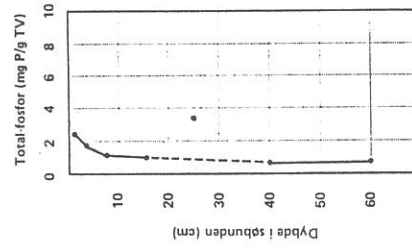


31

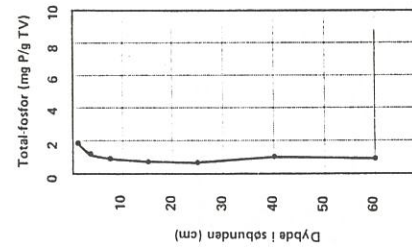
TRANSEKT 4



43

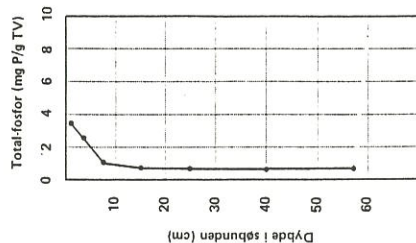
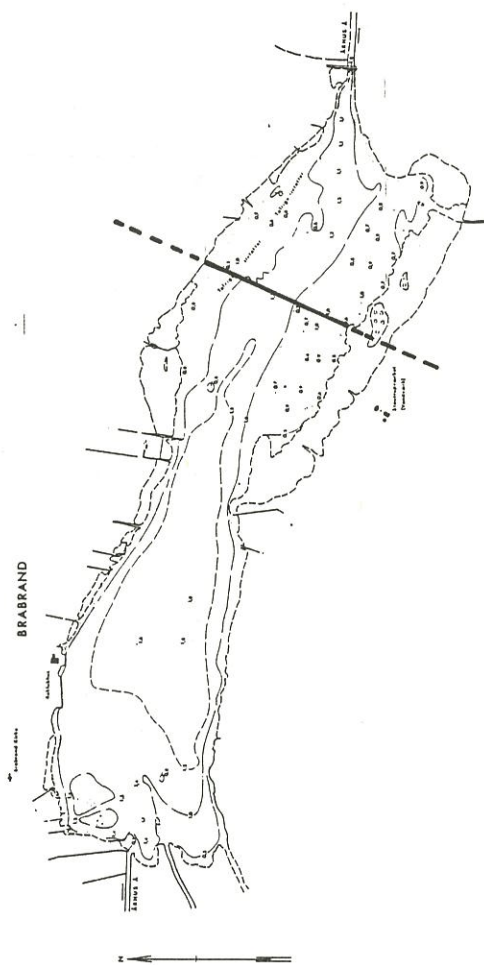


42

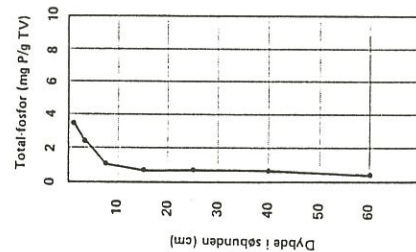


41

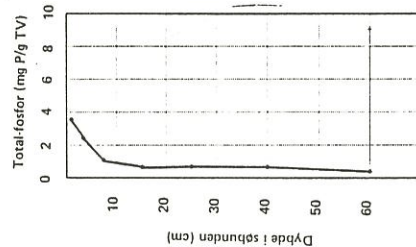
TRANSEKT 5



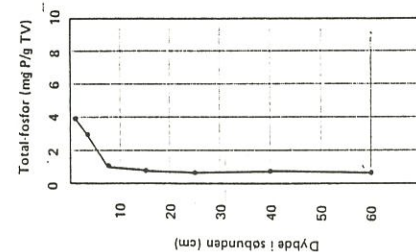
51



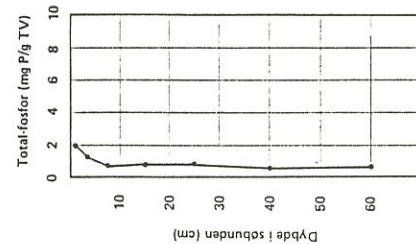
52



53

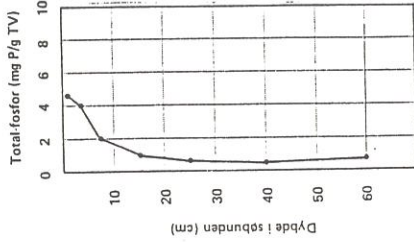
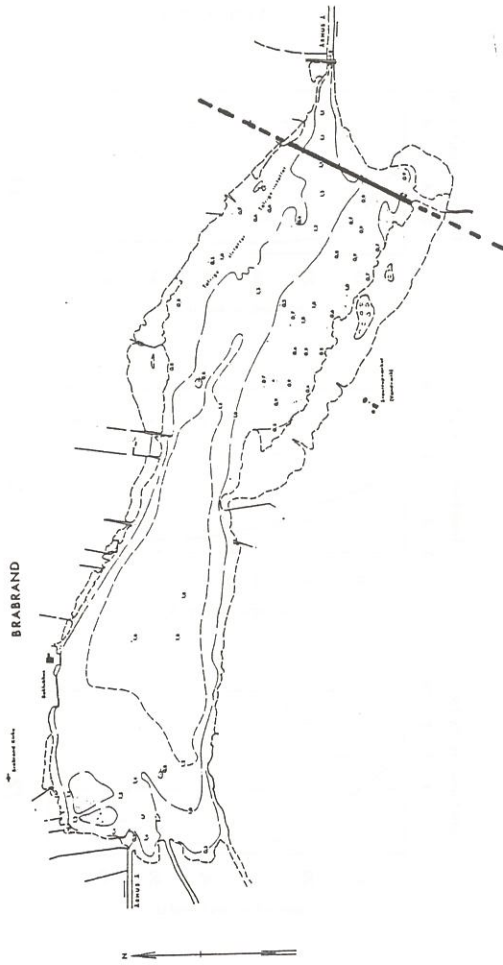


54

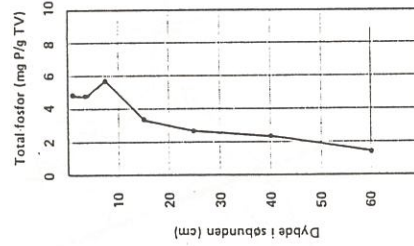


55

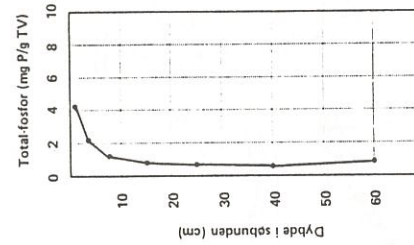
TRANSEKT 6.



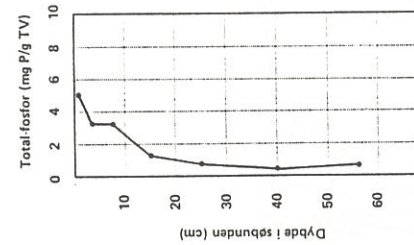
65



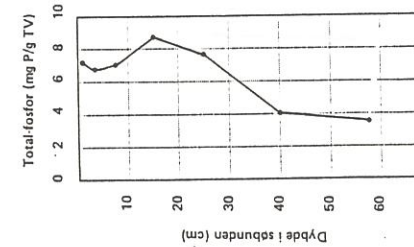
64



63

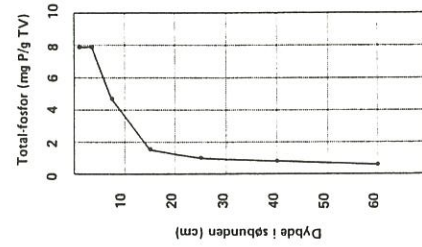
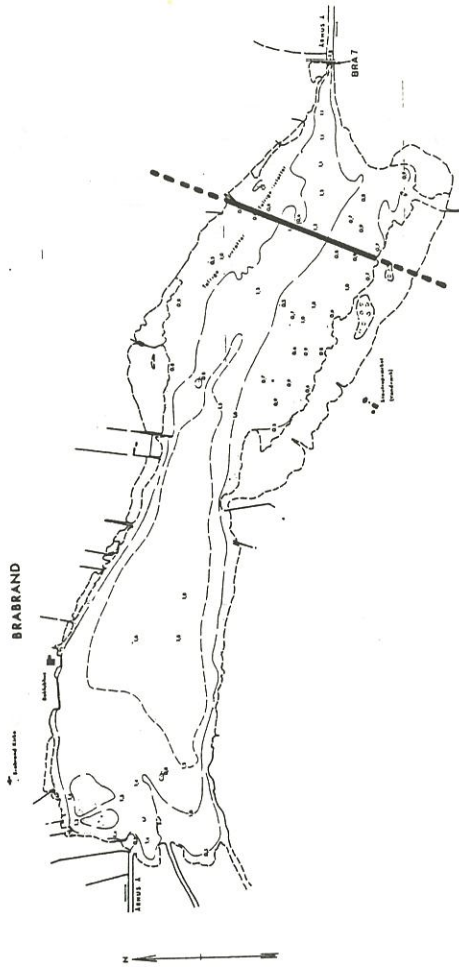


62

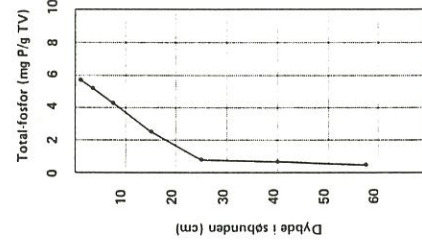


61

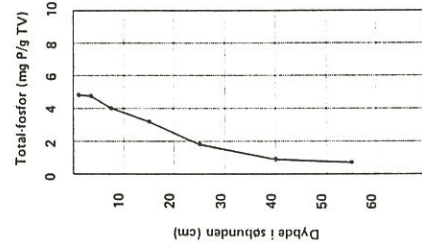
TRANSEKT 7



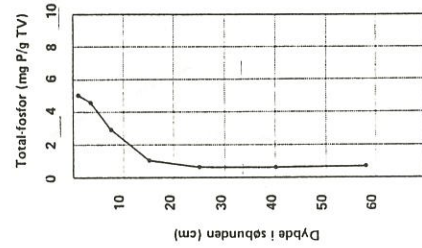
71



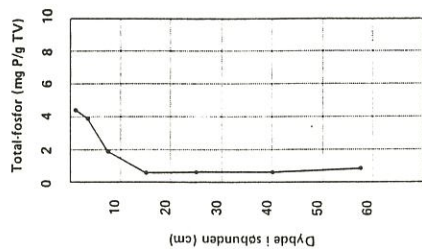
72



73



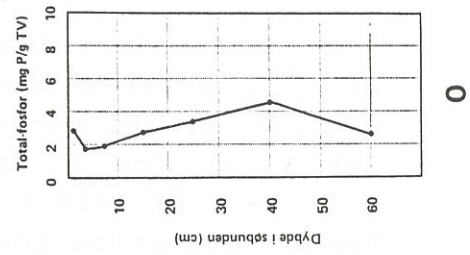
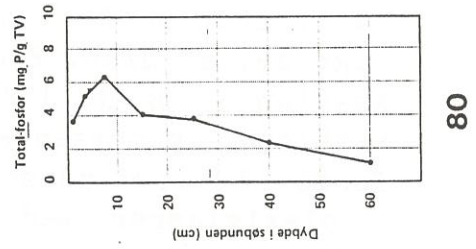
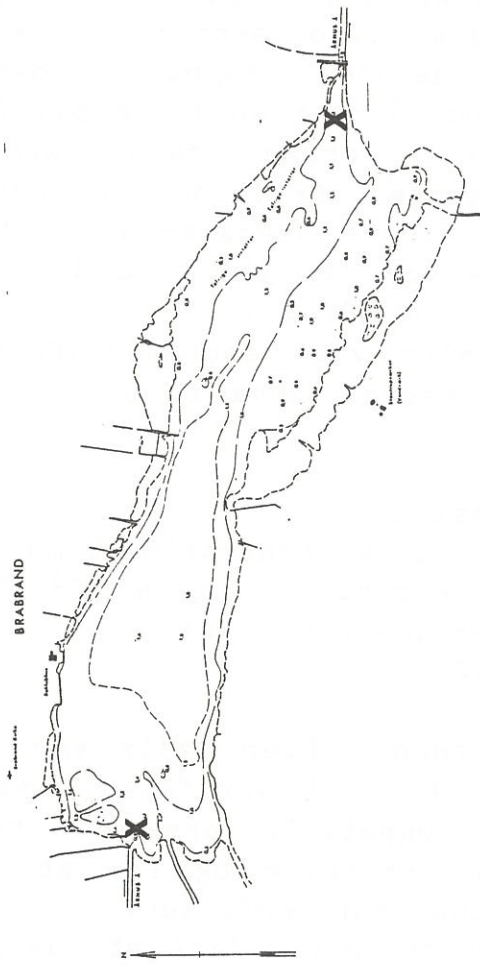
74



75

AFLØB

TILLØB



Appendiks 2

I dette appendix gives en mere detaljeret redegørelse for metoder og resultater fra fosfatudvekslingsforsøgene (afsnit 4).

Fosfatudvekslingsforsøg A: Uforstyrrede sediment-søjler med det nuværende sediment.

Metode:

Sedimentprøverne til forsøg A blev indsamlet på tre stationer i søen: Station 13 - den vestlige ende af søen udfør tilløbet fra Århus Å; station 33 - midt i søen; station 51 - mellem sivpolderne i den sydøstlige del af søen. Prøverne blev udtaget d. 7/8-86 på station 33 og d. 14/8-86 på station 13 og 51. Disse stationer repræsenterer 3 forskellige niveauer af fosfor i overfladesedimentet. Prøverne blev udtaget i plexiglasrør med en indre diameter på 5,2 cm. Sedimentsøjlernes højde var ca. 30 cm og det ovenstående vandvolumen var 300-600 ml.

Vandfasen i søjlerne blev ved laboratorieforsøget gennemstrømmet med "kunstigt søvand" af følgende sammensætning:

Ionbyttet vand tilsat salte:

Natriumhydrogenkarbonat til koncentration 2 mM

Natriumnitrat til koncentration 1 mg N l⁻¹ (i de første 14 dage. Derefter ingen nitrat).

pH blev justeret til 9,0

Gennemstrømningshastigheden i hver søjle var 25-65 ml t⁻¹, hvilket svarer til, at vandfasen blev udskiftet ca. to gange i døgnet. Søjlerne blev beluftet svagt for at skabe omrøring og for at skabe velilteede forhold ved sedimentoverfladen.

Denne inkubationsteknik gør det muligt at fastholde pH, nitrat- og fosfatkoncentrationen i det sedimentovenstående vand og dermed opnå en "steady state" situation for udvekslingen over sedimentoverfladen. Fosfatfluxen (J) over sedimentoverfladen blev beregnet udfra følgende formel:

$$j = \frac{((C_1 - C_2) * V - (F - E) * (C_2 - C_1) / 2 + (C_1 - C_0) * P - C_0 * F) * 24}{A * t}$$
, hvor

J udtrykker fosfatfluxen i $\text{mg P m}^2 \text{ dg}^{-1}$ (positiv når sedimentet afgiver fosfat).

t er tiden (i timer) mellem to prøvetagninger i søjlerne.

C1 er fosfatkoncentrationen i det ovenstående vand ved den 1. af 2 prøvetagninger (mg P l^{-1}).

C2 er fosfatkoncentrationen ved 2. prøvetagning.

C0 er fosfatkoncentrationen i det tilledte vand.

V er vandvolumenet i det pågældende rør (liter).

F er den pumpede vandmængde i perioden t (liter).

E er den fordampede vandmængde i samme periode.

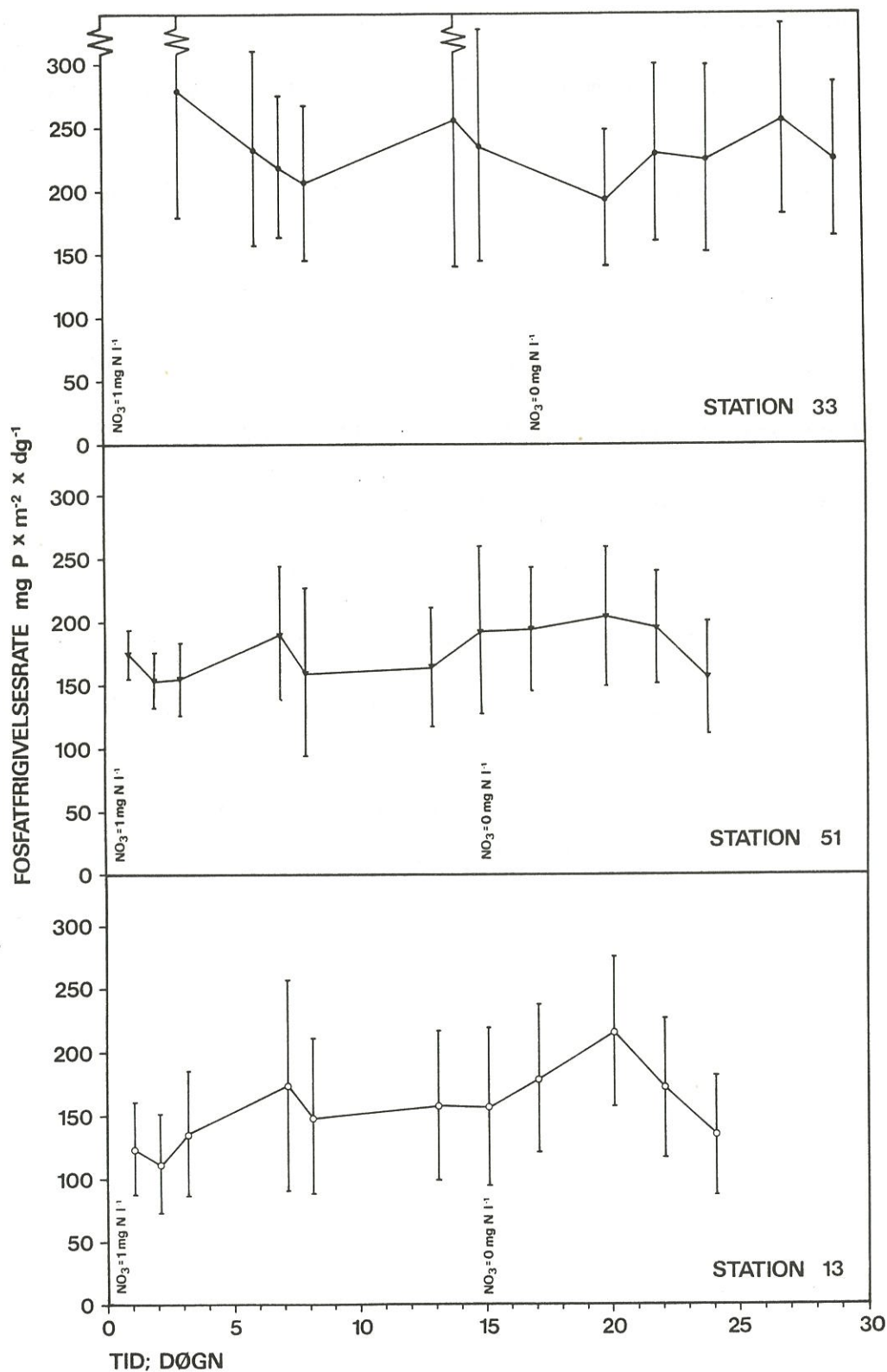
P er det udtagne prøvevolumen (liter).

A er overfladearealet af sedimentet i søjlen (m^2).

Vandfordampningen (E) blev målt et par gange under forsøgene og var som gennemsnit $0,8 \text{ ml t}^{-1}$.

Resultater:

Rådata fra forsøg A er samlet i tabel A1 og de gennemsnitlige fosfatudvekslingsrater for hver station på de enkelte måledage er indtegnet på figur A3 (gennemsnittet er beregnet udfra 5 sedimentsøjler fra hver station).



Figur A3 Udvekslingsforsøg med uforstyrrede sedimentssøjler, A: Sedimentets fosfatfrigivelsesrate for hver gruppe af søjler fra 3 stationer i Brabrand sø. De indtegnede værdier og lodrette linier repræsenterer henholdsvis gennemsnit og standardafvigelse for 5 søjler på de enkelte måledage.

Metode- og resultatdiskussion:

Det var ikke muligt med de peristaltiske pumper og beluftningen at skabe nøjagtig de samme forhold mht. vandskifte og omrøring i hver søjle (figur 11). En del af variationen mellem de målte fosfatfrigivelsesrater fra de enkelte søjler (tabel A1 og figur A3) kan skyldes dette forhold. Dog antages sedimentets heterogenitet at spille den største rolle som diskuteret i afsnit 4. Vandskiftet i søjlerne var for langsomt til at fastholde pH på værdien 9,0; pH var i vandfasen over sedimentet ofte omkring 8,5. Dette skyldes sedimentets respirationsprocesser, der skaber mere surt miljø. Ligeledes var det vanskeligt at fastholde en lav fosfatkoncentration i vandfasen. Den steg i nogle tilfælde til over $600 \mu\text{g P l}^{-1}$ (tabel A1).

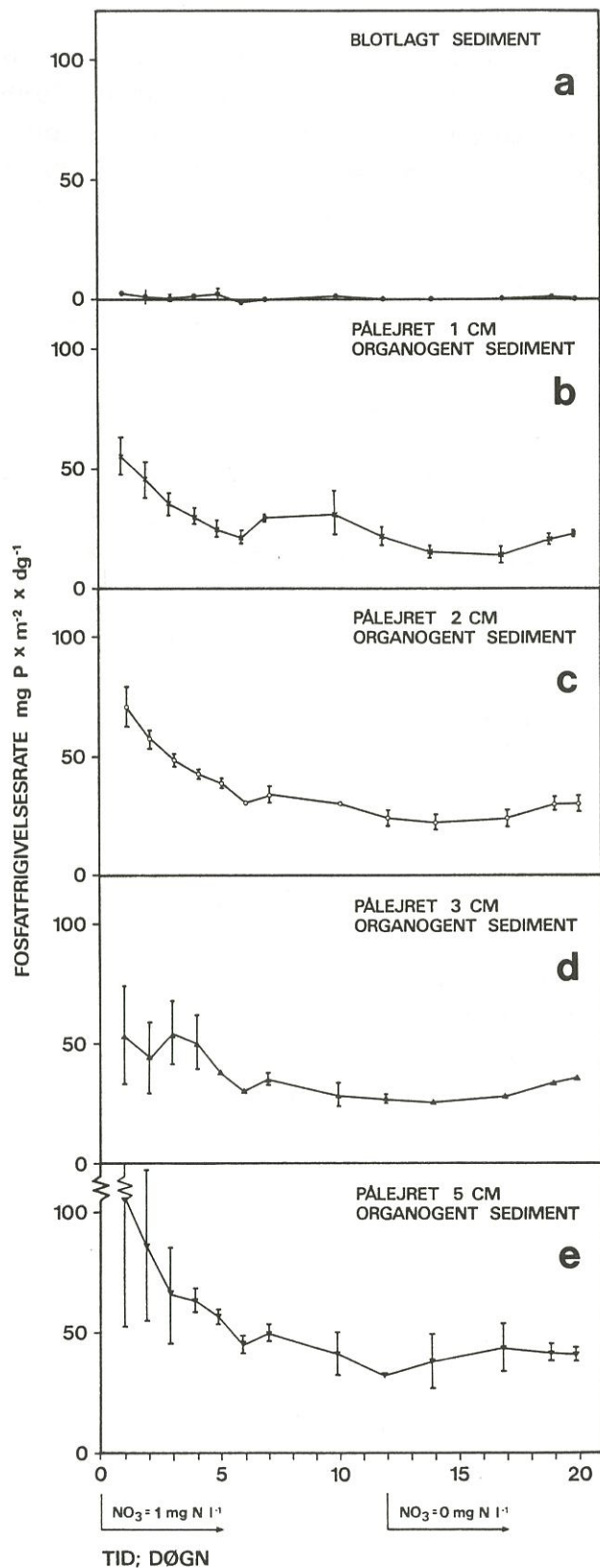
Fosfatudvekslingsforsøg B: "Blotlagt" sediment med pålejret organisk overfladesediment

Metode:

Sedimentsøjlerne til dette forsøg blev indsamlet d. 26/6 1986 på station 33 (midt i søen). Det "friske" overfladesediment, som blev pålejret det blotlagte sediment blev indsamlet d. 7/8 på samme station. Efter en kortvarig opblanding med vand med et fosfatindhold på $100 \mu\text{g P l}^{-1}$ havde det pålejlrede sediment et total-P indhold på $3,03 \text{ mg P (g tv)}^{-1}$. Inkubation af søjlerne og måling af fosfatudvekslingen foregik nøjagtigt som ved forsøg A.

Resultater:

Rådata fra forsøg B er samlet i tabel A2 og de gennemsnitlige fosfatfrigivelsesrater for hver forsøgs-serie er indtegnet på figur A4. (Der var 3 sediment-søjler i hver serie).



Figur A4

Udvekslingsforsøg med uforstyrrede sediment øjler, B:
 Det blotlagte sediments fosfatfrigivelsesrate ved pålejning af
 varierende lagtykkelse af friskt organisk sediment : a): 0 cm;
 b): 1 cm; c): 2 cm; d): 3 cm; e): 5 cm pålejet sediment. De
 indtegnede værdier og lodrette linier repræsenterer henholdsvis
 gennemsnit og standardafvigelse for 3 søjler på de enkelte
 måledage.

Metode- og resultatdiskussion:

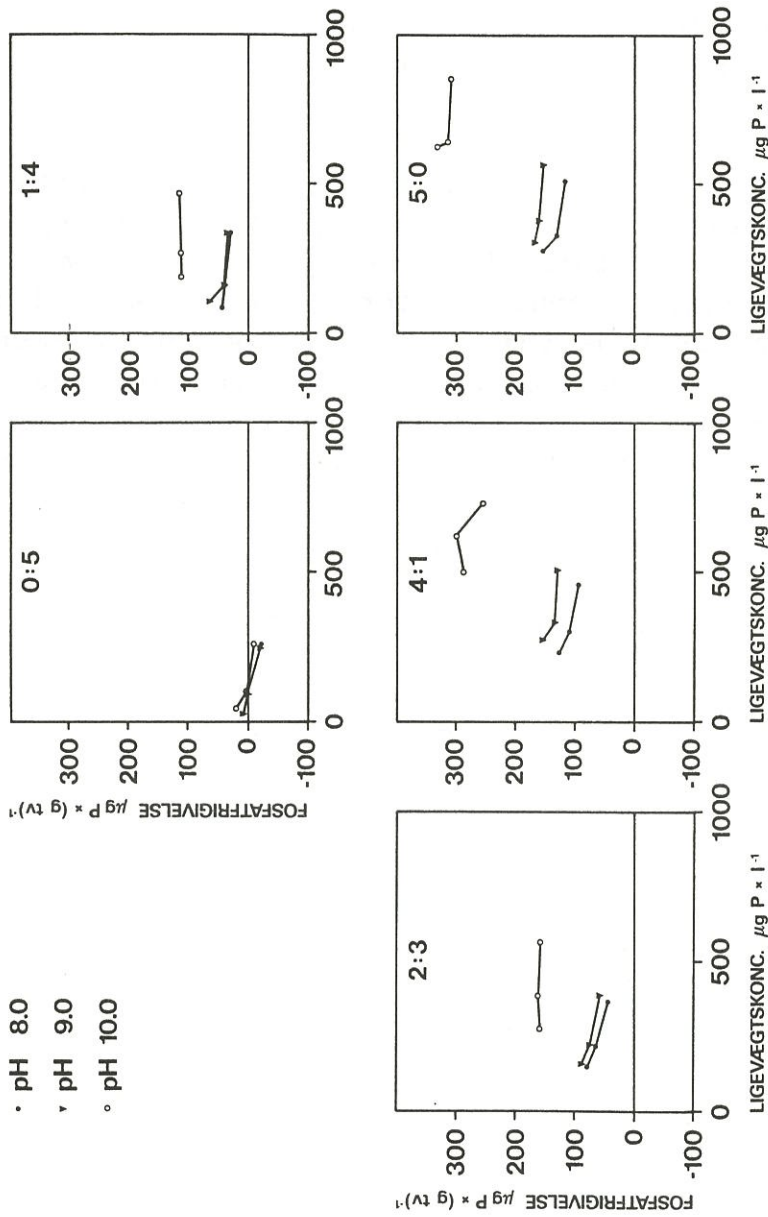
Metodekritikken, der er nævnt under forsøg A, er også gældende ved forsøg B. Da det pålejrrede sediment i dette forsøg var opblandet (homogeniseret) inden pålejringen var søjlerne i hver forsøgsserie dog mere ensartede end søjlerne i forsøg A. Dette afspejles også af den mindre variation mellem resultaterne fra hvert rør (figur A4). Variationen i dette forsøg skyldes måske i højere grad usikkerhed ved selve metoden end forskelle på de enkelte søjler.

I figur 12 (afsnit 4) er de gennemsnitlige fosfatfrigivelsesrater for hele forsøgsperioden indtegnet mod indholdet af total-P i de øverste to cm, af sedimentet. Resultaterne fra forsøgsserierne c, d og e er derfor afsat på samme sted på figurens x-akse. Det er imidlertid diskutabelt at antage, at udvekslingen af fosfat mellem sediment og vand "kun" skulle berøre de øverste to cm af sedimentet. I lavvandede søer er den "aktive" zone i sedimentet ofte betydeligt tykkere. Ved undersøgelser af fosfatdynamikken i Søbygaard Sø /ref.4/ er det således fundet, at fosfatudvekslingen over sedimentoverfladen berørte zonen fra 0 til ca. 10 cm's dybde.

Fosfatudvekslingsforsøg C: Totalopblandet sediment.

Metode:

De 9 forskellige fosfat/pH-opløsninger blev lavet i ionbyttet vand tilsat natriumklorid (0,1 M) og natriumhydrogenkarbonat (2 mM). Natriumklorid tilsættes for at mindske fosfatadsorption på glasset og natriumhydrogenkarbonat tilsættes som buffer. Flaskerne blev inkuberet i 24 timer ved stuetemperatur. Det sediment, som anvendtes til blandingerne havde et total-P indhold på: 0,67 mg P (g tv)⁻¹ for sediment fra 50-70 cm's dybde og 5,20 mg P (g tv)⁻¹ for sediment fra 0-2 cm's dybde. Udfra blandingsforholdene, som er angivet i afsnit 4 er de total-P værdier beregnet, som ligger til grund for figur 14.



Figur A5 Forsøg med totalopblandet sediment, C:
 Sedimentets fosfatfrigivelse ved 5 forskellige blandingsforhold
 af "blotlagt" sediment og overfladesediment og ved varierende
 pH og slutkoncentration af fosfat i flaskerne.

Resultater:

Rådata fra forsøg C findes i tabel A3 og i figur A5. For hver pH-værdi er afsat de beregnede fosfatfrigivelsesrater for de fem sedimentblandinger ved de tre forskellige slutkoncentrationer af fosfat i flaskerne.

Metode- og resultatdiskussion:

Udvekslingen af fosfat mellem partikler og vand foregår med forskellig hastighed afhængig af hvor "hårdt" fosfaten er adsorberet til en given overflade. Normalt er udvekslingen af adsorberet fosfat en hurtig proces i forhold til inkubationstiden i dette forsøg. De fastere bundne fosforpuljer (jern-P og Ca-P) står dog også i ligevægt med fosfatkoncentrationen i det omgivende vand. Forsøg med forskellige inkubationstider for totalopblandet sediment /ref. 4/ har vist, at fosfatkoncentrationen i flaskerne kun ændre sig langsomt efter en inkubationstid på 12 timer. Den observerede ændring efter denne tid kan skyldes frigivelse af fosfat fra den organisk bundne P-pulje. Endelig kan man bemærke, at inkubationstiden på 24 timer er realistisk når det drejer sig om at simulere resuspension af sediment i søen.

Appendiks 3

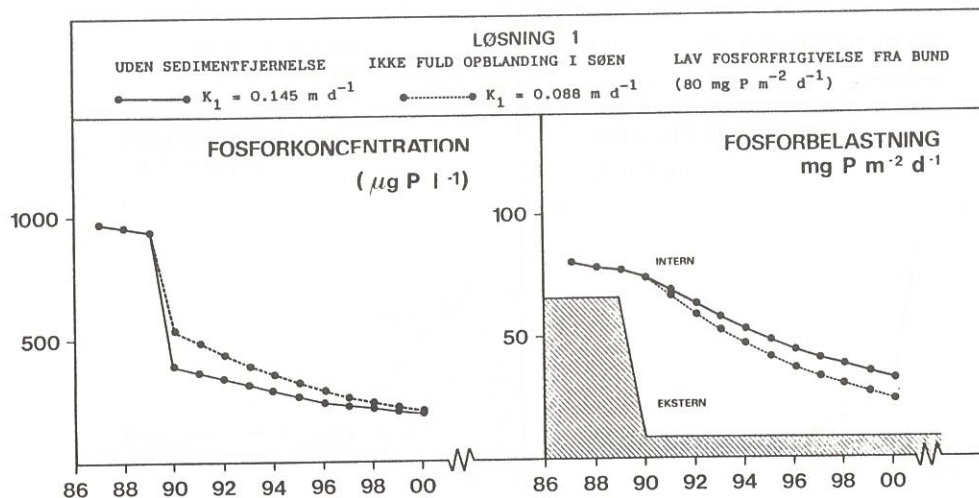
I afsnit 5 er der ved nøjere analyse af fosformassebalancen for 1984 konstateret, at formentlig kun ca. 1/3 af spildevandet fra Viby-anlægget opblandes i søen, medens den resterende del løber direkte i Århus Å eller sedimenterer ud for Døde Å's udløb.

Da disse beregninger er behæftet med en del usikkerhed, er der her foretaget en række alternative beregninger ved den for søen værst tænkelige situation, nemlig en fuld opblanding af Viby-spildevandet i søen. Ved fuld opblanding bliver den nuværende fosforbelastning om sommeren i så fald 116 mg P/m²/d og ikke 66 mg P/m²/d og den fremtidige belastning (efter 1990) bliver 11 mg P/m²/d og ikke 9 mg P/m²/d. Resultaterne af udviklingen i fosforkoncentrationen og belastningen i de to situationer er sammenlignet i figur A6 (uden sedimentfjernelse) og A7-A8 (med sedimentfjernelse).

Den generelle tendens i responsforløbet i de to situationer er den samme. Ved fuld opblanding er koncentrationen dog højere og faldet mere markant i 1990, som følge af henholdsvis den højere nuværende belastning og en større procentisk reduktion på det tidspunkt, hvor belastningen nedbringes.

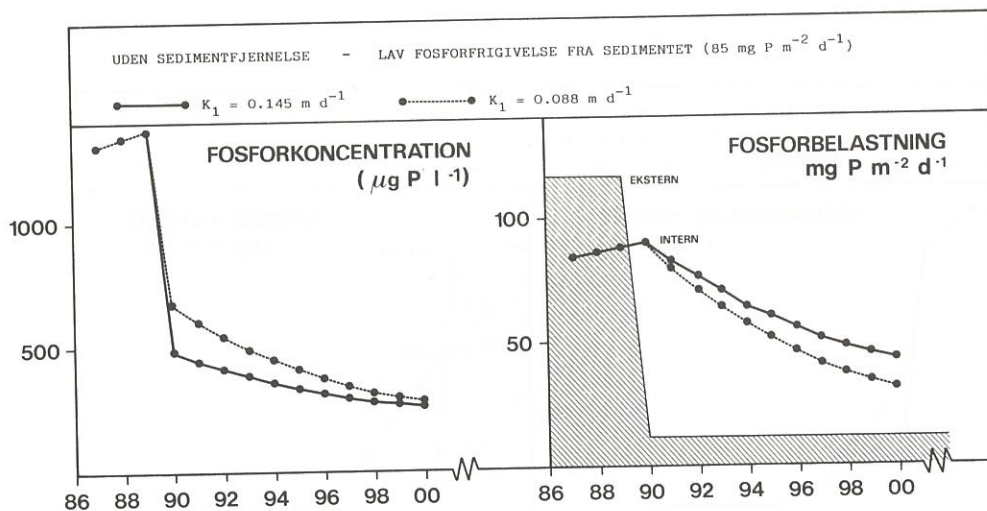
Uden sedimentfjernelse er koncentrationen ved fuld opblanding større (50-100 µg P l-1) i år 2000. Når den tilnærmede ligevægt opnås vil forskellen være 25-50 µg P l-1, på grund af forskellen i den eksterne belastning i de to stationer.

Tilsvarende forhold gør sig gældende for de to situationer med sedimentfjernelse. Fosforkoncentrationen er generelt højere med fuld opblanding. Da sedimentationen følger fosforkoncentrationen, bliver udvekselige fosforpulje i sedimentet større ved fuld opblanding og dermed får man også en større intern belastning.

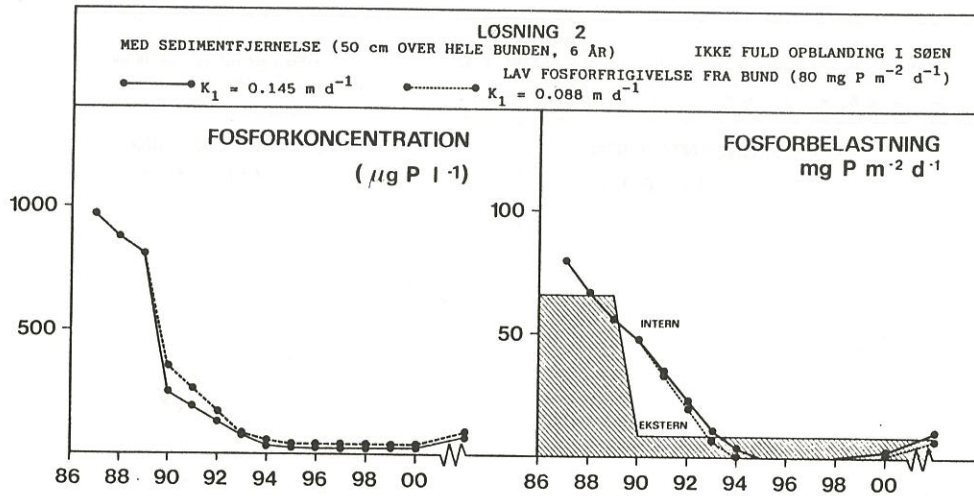


A6 A Den simulerede udvikling i totalfosforkoncentrationen i Brabrand Sø efter en reduktion i den eksterne belastning fra 66 mg P/m²/d. (1990), men uden sedimentfjernelse. Både resultaterne af kørsler med en høj og lav sedimentationskonstant er vist på figuren.

Den simulerede udvikling i den eksterne og interne fosforbelastning under betingelserne nævnt under 21a.

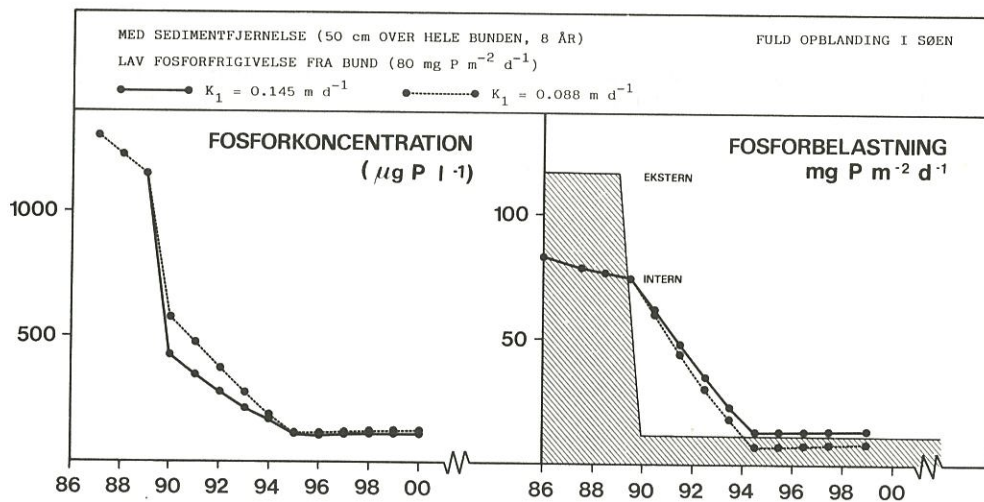


A6 B Samme men med fuld opblanding af spildevandet fra Viby, dvs. 116 mg P/m²/d i 1984 og 11 mg P/m²/d efter 1990.

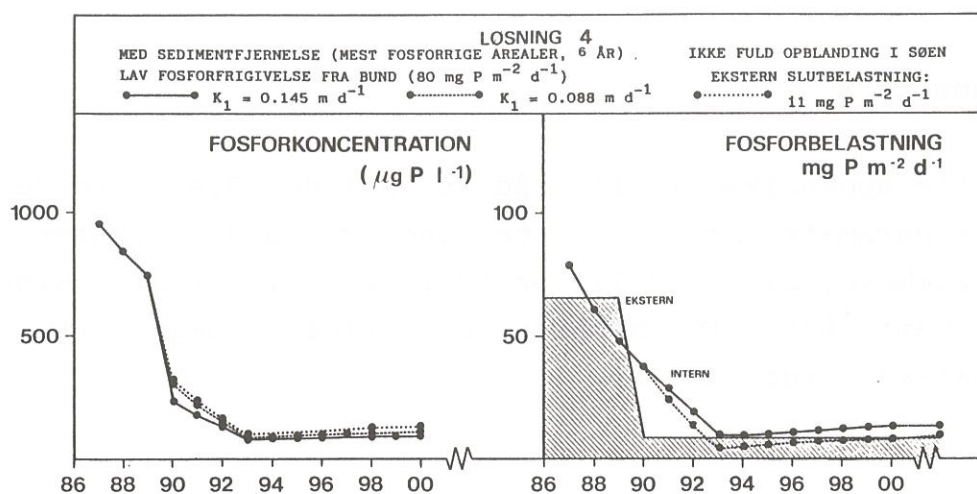


A7 A De simulerede udvikling i totalfosforkoncentrationen i Brabrand sø efter en reduktion i den eksterne belastning fra $66 \text{ mg P/m}^2/\text{d}$ til $9 \text{ mg P/m}^2/\text{d}$ (1990), men med fjernelse af de øverste 50 cm af sedimentet over hele søen over 8 år. (Ialt 760.000 m^3). Både resultaterne af kørsler med en høj og lav sedimentationskonstant er vist på figuren.

Den simulerede udvikling i den eksterne og interne fosforbelastning under betingelserne nævnt under 22a.

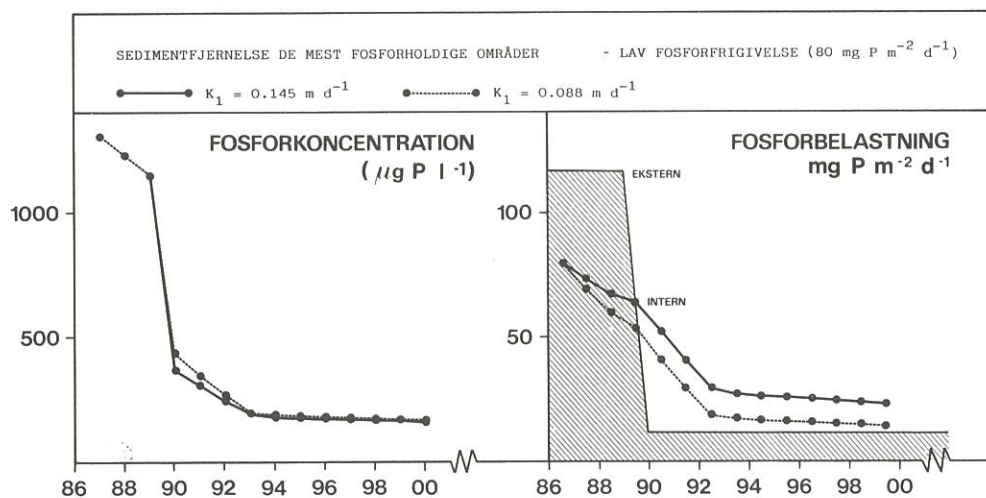


A7 B Samme men med fuld opblanding af spildevandet fra Viby, dvs. $116 \text{ mg P/m}^2/\text{d}$ i 1984 og $11 \text{ mg P/m}^2/\text{d}$ efter 1990.



A8 A De simulerede udvikling i totalfosforkoncentrationen i Brabrand sø efter en reduktion i den eksterne belastning fra $66 \text{ mg P/m}^2/\text{d}$ til $9 \text{ mg P/m}^2/\text{d}$ (1990), men med fjernelse af de mest fosforholdige sedimentlag over 6 år (Ialt 420.000 m^3) se figur 23. Både resultaterne af kørsler med en høj og lav sedimentationskonstant er vist på figuren.

Den simulerede udvikling i den eksterne og interne fosforbelastning under betingelserne nævnt under 24a.



A8 B Samme men med fuld opblanding af spildevandet fra Viby, dvs. $116 \text{ mg P/m}^2/\text{d}$ i 1984 og $11 \text{ mg P/m}^2/\text{d}$ efter 1990.

Appendiks 4

I dette appendiks er alle rådata samlede. Dvs. alle de målte parametre fra de 35 stationer ved sedimentkarakteristikken, side 107-112 og fosforfraktioneringen side 113. Samt rådata fra sedimentudvekslingsforsøgene (tabel A1-A3) side 114-121.

STATION	cm	VAEGT	TOR-%	GLODE-TAB	TOTAL-FOSFOR
STATION	cm	VAEGT	TOR-%	GLODE-TAB	TOTAL-FOSFOR
113	0-2	26.2g	26.2%	20.4g	2.76g
	2-5	26.1g	26.1%	17.5g	2.38g
	5-10	35.5g	35.5%	20.4g	3.23g
	10-20	33.7g	33.7%	24.9g	2.50g
	20-30	35.0g	35.0%	22.9g	0.81g
	30-50	24.1g	24.1%	31.2g	0.60g
	50-(70)	20.8g	20.8%	44.0g	0.62g
114	0-2	18.2g	18.2%	14.2g	4.32g
	2-5	25.3g	25.3%	12.8g	4.47g
	5-10	26.7g	26.7%	12.7g	5.15g
	10-20	29.5g	29.5%	10.5g	1.13g
	20-30	21.5g	21.5%	17.4g	0.61g
	30-50	27.3g	27.3%	10.3g	0.53g
	50-(70)	18.9g	18.9%	20.8g	0.69g
115	0-2	17.5g	17.5%	15.4g	4.72g
	2-5	20.6g	20.6%	17.5g	5.88g
	5-10	22.8g	22.8%	16.4g	5.94g
	10-20	25.1g	25.1%	16.1g	5.66g
	20-30	25.9g	25.9%	14.8g	3.71g
	30-50	24.1g	24.1%	17.1g	0.94g
	50-(70)	28.7g	28.7%	9.6g	0.47g
111	0-2	14.9g	14.9%	16.3g	5.12g
	2-5	19.8g	19.8%	15.2g	5.36g
	5-10	21.4g	21.4%	15.8g	5.80g
	10-20	22.7g	22.7%	15.3g	4.88g
	20-30	24.8g	24.8%	14.5g	4.68g
	30-50	25.6g	25.6%	14.5g	3.15g
	50-(70)	24.3g	24.3%	15.5g	2.13g
112	0-2	28.1g	28.1%	10.8g	2.93g
	2-5	29.9g	29.9%	11.9g	3.90g
	5-10	31.1g	31.1%	12.8g	3.71g
	10-20	30.9g	30.9%	15.5g	1.59g
	20-30	30.5g	30.5%	15.2g	1.61g
	30-50	28.5g	28.5%	12.7g	0.52g
	50-(70)	23.4g	23.4%	17.3g	0.79g

STATION	BYDBDE	cm	TOR-VAEGT %	GLODE-TAB %	TOTAL-FOSFOR mg P/g tv
21	0-2	13.4	17.0	5.65	
	2-5	17.9	17.1	5.33	
	5-10	19.8	15.3	5.07	
	10-20	23.0	15.9	4.54	
	20-30	24.2	14.2	4.15	
	30-50	24.1	15.2	2.28	
	50-(70)	25.2	15.3	1.47	
22	0-2	13.5	15.7	5.04	
	2-5	18.2	15.0	4.82	
	5-10	21.0	15.0	3.97	
	10-20	23.7	13.6	2.72	
	20-30	25.0	14.0	1.38	
	30-50	29.2	12.7	1.01	
	50-(70)	19.4	19.8	0.74	
23	0-2	14.2	15.1	5.52	
	2-5	17.9	15.4	5.58	
	5-10	21.3	15.2	4.94	
	10-20	23.5	14.8	4.68	
	20-30	24.6	12.8	4.49	
	30-50	30.0	10.9	1.56	
	50-(70)	24.3	15.4	0.98	
24	0-2	12.4	15.3	5.54	
	2-5	19.4	15.3	5.15	
	5-10	23.1	14.1	4.72	
	10-20	25.0	12.5	2.91	
	20-30	17.9	21.5	1.03	
	30-50	25.4	13.6	0.69	
	50-(70)	24.2	15.7	0.76	
25	0-2	16.9	14.1	5.08	
	2-5	20.2	14.3	5.29	
	5-10	23.6	14.5	4.31	
	10-20	33.7	9.1	1.80	
	20-30	22.4	17.6	0.75	
	30-50	24.4	12.9	0.56	
	50-(70)	19.0	23.5	0.80	
31	0-2	14.0	17.5	5.48	
	2-5	19.7	15.3	4.30	
	5-10	21.7	14.0	1.94	
	10-20	20.8	15.8	1.46	
	20-30	21.8	15.1	1.25	
	30-50	30.5	10.2	0.71	
	50-(70)	35.1	9.1	0.54	

STATION	DEPTH	cm	TOR-VAEGT %	GLODE-TAB %	TOTAL-P/9 tv	STATION	DEPTH	cm	TOR-VAEGT %	GLODE-TAB %	TOTAL-P/9 tv
32	0-2		15.7	15.2	5.41	35	0-2		23.0	10.0	3.82
	2-5		19.3	15.5	5.10		2-5		40.0	6.4	1.97
	5-10		21.2	13.8	4.93		5-10		64.1	2.5	0.41
	10-20		23.4	12.9	4.97		10-20		68.0	2.6	0.23
	20-30		24.6	15.2	3.27		20-30		67.4	3.8	0.24
	30-50		26.0	13.9	1.60		30-50		43.6	9.9	0.35
	50-(70)		28.3	13.4	1.08		50-(70)		22.7	21.6	0.59
33	0-2		10.0	15.3	5.19	41	0-2		19.4	12.1	1.79
	2-5		19.4	13.8	4.98		2-5		16.2	19.0	1.13
	5-10		24.4	12.2	3.55		5-10		14.4	23.2	0.84
	10-20		31.4	9.7	0.91		10-20		29.0	10.5	0.65
	20-30		22.5	14.7	0.57		20-30		25.6	14.0	0.64
	30-50		36.6	8.7	0.39		30-50		18.3	21.5	0.95
	50-(70)		44.7	6.8	0.41		50-(70)		18.4	24.3	0.85
34	0-2		19.7	13.3	5.08	42	0-2		20.0	25.3	2.36
	2-5		23.7	13.0	4.94		2-5		23.6	26.3	1.71
	5-10		27.7	12.5	2.88		5-10		19.5	35.8	1.15
	10-20		19.1	18.8	0.89		10-20		14.9	46.4	0.94
	20-30		31.4	11.8	0.60		20-30		15.5	47.3	0.80
	30-50		35.8	9.5	0.59		30-50		22.4	31.3	0.64
	50-(70)		38.2	8.4	0.58		50-(70)		20.8	37.4	0.69

STATION	DYBDE	cm	TOR-VAEGT %	GLODE-TAB %	TOTAL-FOSFOR mg P/g tv
53	0-2		15.3	12.0	3.48
	2-5		24.3	10.3	2.36
	5-10		24.0	10.6	1.02
	10-20		21.5	12.7	0.62
	20-30		19.2	17.0	0.66
	30-50		22.0	15.9	0.62
	50-(70)		42.8	5.6	0.35
	0-2		16.3	13.4	3.86
	2-5		23.1	9.8	2.94
	5-10		26.5	9.1	1.04
54	0-2		29.4	10.4	0.60
	2-5		21.6	16.2	0.71
	5-10		22.3	17.1	0.63
	10-20		22.1	11.2	1.96
	20-30		25.5	11.1	1.24
	30-50		23.2	13.1	0.65
	50-(70)		17.2	20.7	0.76
	0-2		14.6	26.0	0.81
	2-5		24.0	13.9	0.54
	5-10		20.6	20.4	0.64
55	0-2		18.5	13.0	2.97
	2-5		22.5	11.8	1.63
	5-10		20.6	16.2	0.96
	10-20		22.9	15.7	0.67
	20-30		18.6	20.0	0.77
	30-50		19.9	17.8	0.72
	50-(70)		40.9	8.1	0.81
	0-2		17.6	13.8	3.29
	2-5		20.3	13.1	3.07
	5-10		20.2	15.7	1.05
51	0-2		24.3	15.0	0.62
	2-5		17.1	22.1	0.67
	5-10		20.3	17.8	0.57
	10-20		24.9	17.2	0.58
	20-30		14.4	13.0	3.44
	30-50		21.8	11.7	2.55
	50-(70)		24.4	11.2	1.02
	0-2		23.4	14.9	0.68
	2-5		21.3	17.1	0.67
	5-10		19.7	18.8	0.60
52	0-2		35.0	9.8	0.70

STATION	DYBDE	cm	VAEGT	TOR	GLODE-TAB	FOSFOR	TOTAL
			%	%	mg P/g	tv	
664	0-2		18.1	14.2	4.78		
	2-5		20.5	15.5	4.74		
	5-10		21.8	15.8	5.69		
	10-20		22.1	14.3	3.31		
	20-30		22.4	15.5	2.64		
	30-50		24.6	14.2	2.33		
	50-(70)		26.8	14.0	1.39		
665	0-2		14.9	15.7	4.58		
	2-5		18.0	16.7	3.97		
	5-10		19.4	15.6	1.96		
	10-20		24.7	15.0	0.93		
	20-30		25.9	14.5	0.56		
	30-50		36.7	9.8	0.42		
	50-(70)		29.2	15.6	0.67		
671	0-2		13.9	13.9	7.82		
	2-5		16.4	14.9	7.83		
	5-10		17.1	14.4	4.64		
	10-20		19.1	13.9	1.51		
	20-30		20.6	15.0	0.99		
	30-50		18.5	19.6	0.79		
	50-(70)		22.9	16.8	0.56		
661	0-2		19.5	15.5	7.18		
	2-5		23.4	16.1	6.69		
	5-10		23.2	18.2	7.02		
	10-20		21.8	19.3	8.69		
	20-30		25.3	16.0	7.66		
	30-50		30.8	12.6	4.04		
	50-(70)		30.7	13.7	3.51		
662	0-2		16.2	18.8	5.10		
	2-5		16.4	24.7	3.23		
	5-10		18.8	23.4	3.23		
	10-20		24.6	15.7	1.22		
	20-30		28.3	12.8	0.66		
	30-50		50.6	5.9	0.41		
	50-(70)		46.5	7.1	0.61		
663	0-2		16.1	27.3	4.20		
	2-5		19.5	26.9	2.14		
	5-10		23.3	24.6	1.14		
	10-20		27.1	23.0	0.77		
	20-30		23.1	35.6	0.64		
	30-50		26.0	33.6	0.55		
	50-(70)		29.9	27.0	0.69		

STATION	DYBDE	cm	TOR-VAEGT %	GLODE-TAB %	TOTAL-P/9 tv
75	0-2		18.4	10.5	4.36
	2-5		23.3	10.4	3.82
	5-10		31.3	7.3	1.84
	10-20		28.7	8.6	0.54
	20-30		20.2	18.0	0.61
	30-50		29.3	12.1	0.57
	50-(70)		19.0	16.5	0.84
80	0-2		16.8	15.5	3.64
	2-5		20.2	15.6	5.14
	5-10		18.9	16.8	6.32
	10-20		19.6	16.1	4.04
	20-30		22.8	17.8	3.76
	30-50		23.4	14.8	2.34
	50-(70)		23.7	17.2	1.13

STATION	DYBDE	cm	TOR-VAEGT %	GLODE-TAB %	TOTAL-P/9 tv
72	0-2		14.3	12.0	5.69
	2-5		18.4	13.9	5.13
	5-10		20.9	14.1	4.24
	10-20		24.1	11.4	2.48
	20-30		23.5	14.4	0.78
	30-50		21.8	17.4	0.62
	50-(70)		37.9	8.8	0.45
73	0-2		16.5	12.8	4.77
	2-5		20.1	11.5	4.70
	5-10		22.8	12.0	3.94
	10-20		23.4	11.9	3.13
	20-30		25.3	10.7	1.77
	30-50		27.8	11.5	0.90
	50-(70)		27.6	12.3	0.70
74	0-2		16.8	11.4	4.96
	2-5		21.0	12.0	4.53
	5-10		24.7	10.9	2.88
	10-20		30.6	8.9	0.98
	20-30		29.6	9.5	0.61
	30-50		21.9	15.6	0.60
	50-(70)		26.7	15.8	0.62

STATION	DYBDE	cm	TOR-VAEGT %	GLIDE-TAB %	TOTAL-FOFOR	ADS-P tv	FE-P tv	Ca-P tv	DRS.-P tv
#13	#0 - 2	25.6g	10.3g	4.22g	0.13g	2.86g	0.64g	0.26g	
	#2 - 5	35.1g	9.0g	3.65g	0.03g	2.41g	0.46g	0.19g	
	#5 - 10	36.0g	10.6g	3.58g	0.00g	2.45g	0.37g	0.18g	
	#10 - 20	32.2g	12.9g	3.54g	0.00g	2.71g	0.44g	0.21g	
	#20 - 30	38.3g	10.8g	1.29g	0.00g	0.43g	0.28g	0.14g	
	#30 - 50	23.0g	17.2g	0.77g	0.00g	0.19g	0.23g	0.21g	
	#50 - (70)	23.7g	15.4g	0.62g	0.00g	0.17g	0.21g	0.18g	
#42	#0 - 2	18.7g	13.5g	4.22g	0.22g	2.44g	0.81g	0.29g	
	#2 - 5	28.6g	10.3g	3.66g	0.18g	1.75g	0.97g	0.24g	
	#5 - 10	22.0g	15.0g	2.47g	0.05g	1.34g	0.62g	0.27g	
	#10 - 20	15.5g	21.7g	0.98g	0.00g	0.27g	0.24g	0.29g	
	#20 - 30	14.8g	24.0g	0.80g	0.00g	0.24g	0.21g	0.28g	
	#30 - 50	21.5g	16.4g	0.93g	0.00g	0.16g	0.30g	0.18g	
	#50 - (70)	22.9g	16.1g	0.76g	0.02g	0.15g	0.43g	0.16g	
#63	#0 - 2	15.1g	14.3g	8.24g	1.13g	4.80g	0.87g	0.35g	
	#2 - 5	18.5g	14.4g	7.93g	0.92g	4.37g	0.85g	0.33g	
	#5 - 10	21.8g	12.2g	4.44g	0.19g	2.81g	0.68g	0.27g	
	#10 - 20	24.2g	13.3g	1.11g	0.00g	0.32g	0.33g	0.16g	
	#20 - 30	19.8g	22.1g	0.82g	0.00g	0.16g	0.21g	0.19g	
	#30 - 50	24.2g	18.7g	0.73g	0.00g	0.11g	0.21g	0.21g	
	#50 - (70)	27.5g	13.9g	0.69g	0.04g	0.09g	0.37g	0.15g	

TABEL A1 : Rådata fra forsøg A; fosfatudveksling i uforstyrrede sedimentsøjler med det nuværende sediment. Kolonne A: Søjlenr., kolonne B: pH i vandfasen, kolonne C: fosfatkoncentration i vandfasen (ug P/l), kolonne D: målt fosfatfrigivelsesrate (mg P/m²/d). Søjlenr. 16-20: Station 33. Søjlenr. 21-25: Station 51. Søjlenr. 26-30: Station 13.

FORSØGSDAG NR. 3

A	B	C	D
16	8.41	179	197
17	8.24	433	443
18	8.46	167	223
19	8.3	298	309
20	8.24	329	228

FORSØGSDAG NR. 6

A	B	C	D
16	8.01	163	152
17	8.02	356	352
18	8.2	183	180
19	8.08	289	255
20	8.19	334	231

FORSØGSDAG NR. 7

A	B	C	D
16	8.2	159	146
17	8.05	233	241
18	8.09	259	248
19	8.05	329	285
20	8.1	237	176

FORSØGSDAG NR. 8

A	B	C	D
16	8.69	202	175
17	8.67	228	209
18	8.81	111	149
19	8.44	363	314
20	8.59	272	188

FORSØGSDAG NR. 14

A	B	C	D
16		126	176
17		116	165
18		106	172
19		202	416
20		173	363

FORSØGSDAG NR. 15

A	B	C	D
16	7.94	139	177
17	7.99	177	166
18	8.04	110	163
19	7.92	216	350
20	8.08	208	325

FORSØGSDAG NR. 20

A	B	C	D
16		227	142
17		277	184
18		247	139
19		462	257
20		439	246

FORSØGSDAG NR. 22

A	B	C	D
16	8.3	245	167
17	8.25	312	216
18	8.26	224	161
19	8.28	439	311
20	8.3	377	303

FORSØGSDAG NR. 24

A	B	C	D
16	8.65	243	170
17	8.59	265	202
18	8.64	202	145
19	8.55	420	297
20	8.62	420	310

FORSØGSDAG NR. 27

A	B	C	D
16	8.66	303	195
17	8.58	373	238
18	8.54	290	179
19	8.61	484	320
20	8.6	488	353

FORSØGSDAG NR. 29

A	B	C	D
16	8.49	175	150
17	8.46	302	233
18	8.46	231	173
19	8.5	371	283
20	8.56	317	284

TABEL A1 : Rådata fra forsøg A; fosfatudveksling i uforstyrrede sedimentsøjler med det nuværende sediment. Kolonne A: Søjlenr., kolonne B: pH i vandfasen, kolonne C: fosfatkoncentration i vandfasen (ug P/l), kolonne D: målt fosfatfrigivelsesrate (mg P/m²/d). Søjlenr. 16-20: Station 33. Søjlenr. 21-25: Station 51. Søjlenr. 26-30: Station 13.

FORSØGSDAG NR. 1

A	B	C	D
21	8.56	194	180
22	8.38	224	174
23	8.63	190	148
24	8.88	157	171
25	8.37	175	201
26	8.7	158	121
27	8.56	210	169
28	8.19	228	128
29	8.41	109	68.6
30	8.55	111	130

FORSØGSDAG NR. 2

A	B	C	D
21	8.17	125	157
22	8.21	188	159
23	8.23	135	127
24	8.52	154	135
25	8.2	183	185
26	8.26	160	129
27	8.09	206	163
28	8.05	190	117
29	8.42	83	57.1
30	8.28	138	92.2

FORSØGSDAG NR. 3

A	B	C	D
21	8.29	204	198
22	8.13	191	156
23	8.02	148	124
24	8.13	152	135
25	8.12	160	164
26	8.17	191	152
27	8.05	257	199
28	8.03	251	155
29	8.03	113	75.8
30	8	136	94.3

FORSØGSDAG NR. 7

A	B	C	D
21		122	146
22		137	174
23		114	134
24		249	245
25		196	252
26		218	195
27		253	205
28		218	288
29		108	98.4
30		110	83.5

FORSØGSDAG NR. 8

A	B	C	D
21	8.1	131	134
22	7.95	153	147
23	7.96	106	106
24	7.72	263	276
25	7.83	104	127
26	7.75	231	197
27	7.81	239	192
28	7.74	196	186
29	7.86	88	76.8
30	7.86	100	84.7

FORSØGSDAG NR. 13

A	B	C	D
21		306	196
22		318	173
23		263	140
24		366	214
25		126	94
26		324	188
27		356	197
28		377	210
29		103	67
30		166	124

TABEL A1: Rådata fra forsøg A; fosfatudveksling i uforstyrrede sedimentsøjler med det nuværende sediment. Kolonne A: Søjlenr., kolonne B: pH i vandfasen, kolonne C: fosfatkoncentration i vandfasen (ug P/l), kolonne D: målt fosfatfrigivelsesrate (mg P/m²/d). Søjlenr. 16-20: Station 33. Søjlenr. 21-25: Station 51. Søjlenr. 26-30: Station 13.

FORSØGSDAG NR. 15

A	B	C	D
21	8.38	275	192
22	8.4	384	244
23	8.45	220	169
24	8.3	357	267
25	8.35	139	94
26	8.4	212	165
27	8.42	292	202
28	8.45	320	227
29	8.52	104	72
30	8.45	157	115

FORSØGSDAG NR. 17

A	B	C	D
21	8.66	318	205
22	8.67	320	230
23	8.72	235	165
24	8.62	322	248
25	8.66	169	121
26	8.6	331	200
27	8.64	435	257
28	8.64	335	223
29	8.73	167	103
30	8.67	253	161

FORSØGSDAG NR. 20

A	B	C	D
21	8.62	366	234
22	8.64	320	215
23	8.59	253	176
24	8.62	402	274
25	8.65	196	129
26	8.62	324	220
27	8.64	486	304
28	8.51	363	237
29	8.54	233	145
30	8.69	243	177

FORSØGSDAG NR. 22

A	B	C	D
21	8.52	279	207
22	8.46	369	238
23	8.42	246	178
24	8.46	258	228
25	8.52	173	126
26	8.56	227	172
27	8.51	312	235
28	8.63	312	219
29	8.58	118	106
30	8.59	146	126

FORSØGSDAG NR. 24

A	B	C	D
21	8.3	249	174
22	8.26	294	214
23	8.1	165	139
24	8.15	192	159
25	8.26	104	88
26	8.19	206	143
27	8.2	277	187
28	8.29	233	172
29	8.26	106	76
30	8.19	122	93

TABEL A2 : Rådata fra forsøg B; fosfatudveksling i uforstyrrede sediment søjler med blotlagt sediment. Kolonne A: Søjlenr., kolonne B: pH i vandfasen, kolonne C: fosfatkoncentration i vandfasen (ug P/l), kolonne D: målt fosfatfrigivelsesrate (mg P/m²/d). Søjlenr. 1-3: serie a, søjlenr. 4-6: serie b, søjlenr. 7-9: serie c, søjlenr. 10-12: serie d, søjlenr. 13-15: serie e.

FORSØGSDAG NR. 1

A	B	C	D
1		18	3.5
2		14	1.8
3		16	1.8
4		204	56
5		178	60
6		152	46
7		254	80
8		240	67
9		222	63
10		112	30
11		230	71
12		218	60
13		270	110
14		406	155
15		144	50

FORSØGSDAG NR. 2

A	B	C	D
1		20	4.4
2		12	0.8
3		8	-1.3
4		168	45
5		178	53
6		130	37
7		230	62
8		204	55
9		198	53
10		96	26
11		184	53
12		186	53
13		188	81
14		322	120
15		168	57

FORSØGSDAG NR. 3

A	B	C	D
1		10	-0.3
2		10	-0.1
3		12	1.2
4		134	35
5		144	39
6		108	29
7		186	47
8		172	46
9		186	50
10		510	178
11		210	64
12		160	45
13		140	57
14		240	87
15		156	51

FORSØGSDAG NR. 4

A	B	C	D
1	7.07	22	1.9
2	7.1	20	2
3	7.24	18	1.2
4	7.2	106	27
5	7.15	122	33
6	7.1	100	28
7	7.12	165	43
8	7.15	157	42
9	7.16	153	40
10	7.12	217	64
11	7.15	159	46
12	7.15	149	42
13	7.09	151	57
14	7.23	181	66
15	7.24	191	65

TABEL A2 : Rådata fra forsøg B; fosfatudveksling i uforstyrrede sedimentsøjler med blotlagt sediment. Kolonne A: Søjlenr., kolonne B: pH i vandfasen, kolonne C: fosfatkoncentration i vandfasen (ug P/l), kolonne D: målt fosfatfrigivelsesrate (mg P/m²/d). Søjlenr. 1-3: serie a, søjlenr. 4-6: serie b, søjlenr. 7-9: serie c, søjlenr. 10-12: serie d, søjlenr. 13-15: serie e.

FORSØGSDAG NR. 5

A	B	C	D
1	7.92	27	3.4
2	8.16	27	3.6
3	8.05	19	0.1
4	7.83	103	20
5	7.87	123	27
6	7.88	117	26
7	7.81	177	39
8	7.86	167	36
9	8.01	163	40
10	7.91	158	39
11	7.81	165	39
12	7.92	156	37
13	8.14	169	53
14	7.85	187	57
15	8.04	165	58

FORSØGSDAG NR. 6

A	B	C	D
1	8.15	17	-0.3
2	8.31	15	-1.3
3	8.17	13	-1.9
4	8.06	81	18
5	8.08	111	22
6	8.07	105	21
7	8.07	150	30
8	8.09	150	31
9	8.13	147	30
10	8.12	130	31
11	8.07	141	31
12	8.19	124	29
13	8.23	152	49
14	8.09	152	44
15	8.15	126	42

FORSØGSDAG NR. 7

A	B	C	D
1	8.19	8	0.1
2	8.38	8	0.1
3	8.44	2	
4	8.22	181	
5	8.12	113	30
6	8.01	106	28
7	8.2	146	36
8	8.31	125	30
9	8.3	129	35
10	8.27	117	33
11	8.19	131	37
12	8.15	129	36
13	8.27	138	51
14	8.24	133	45
15	8.28	127	51

FORSØGSDAG NR. 10

A	B	C	D
1	8.12	8	1
2	8.33	12	1.8
3	8.28	8	
4	8.03	464	
5	7.93	122	37
6	8.1	88	24
7	8.02	112	29
8	8.1	112	28
9	8.2	102	30
10	8.07	67	22
11	7.96	106	30
12	7.95	110	32
13	7.9	100	42
14	8.07	110	40
15	8.07	90	41

TABEL A2: Rådata fra forsøg B; fosfatudveksling i uforstyrrede sediment søjler med blotlagt sediment. Kolonne A: Søjlenr., kolonne B: pH i vandfasen, kolonne C: fosfatkoncentration i vandfasen (ug P/l), kolonne D: målt fosfatfrigivelsesrate (mg P/m²/d). Søjlenr. 1-3: serie a, søjlenr. 4-6: serie b, søjlenr. 7-9: serie c, søjlenr. 10-12: serie d, søjlenr. 13-15: serie e.

FORSØGSDAG NR. 12

A	B	C	D
1	8.32	2	0
2	8.21	6	0.2
3	8.2	6	0.3
4	8.25	48	
5	8.31	64	18
6	8.23	91	24
7	8.26	81	20
8	8.16	95	24
9	8.38	89	26
10	8.25	111	29
11	8.26	97	26
12	8.29	87	25
13	8.48	81	32
14	8.24	85	31
15	8.32	73	31

FORSØGSDAG NR. 14

A	B	C	D
1	8.01	2	0
2	8.18	2	0
3	8.11	2	0
4	7.96	39	12
5	8.01	56	15
6	7.92	60	17
7	7.92	74	18
8	8.03	88	25
9	8.07	76	22
10	7.91	88	27
11	8	93	25
12	7.94	91	25
13	7.88	80	29
14	7.94	274	
15	8.07	123	46

FORSØGSDAG NR. 17

A	B	C	D
1	7.79	2	0
2	7.88	0	0
3	7.91	0	0
4	7.72	26	10
5	7.89	53	15
6	8.05	59	16
7	7.99	77	19
8	8.1	107	25
9	7.96	99	26
10	7.99	95	28
11	8.04	105	28
12	7.89	105	29
13	7.99	89	32
14	7.97	87	51
15	8	105	47

FORSØGSDAG NR. 19

A	B	C	D
1	8.4	6	1.8
2	8.53	4	1.1
3	8.47	2	0.5
4	8.47	69	18
5	8.33	73	22
6	8.16	71	19
7	8.12	106	26
8	8.06	124	30
9	8.37	116	32
10	8.05	118	34
11	8	126	34
12	8.1	126	34
13	8.31	124	42
14	8.26	110	37
15	8.27	104	44

TABEL A2 : Rådata fra forsøg B; fosfatudveksling i uforstyrrede sedimentsøjler med blotlagt sediment. Kolonne A: Søjlenr., kolonne B: pH i vandfasen, kolonne C: fosfatkoncentration i vandfasen (ug P/l), kolonne D: målt fosfatfrigivelsesrate (mg P/m²/d). Søjlenr. 1-3: serie a, søjlenr. 4-6: serie b, søjlenr. 7-9: serie c, søjlenr. 10-12: serie d, søjlenr. 13-15: serie e.

FORSØGSDAG NR. 20

A	B	C	D
1		4	0.3
2		4	0.4
3		4	0.5
4		75	23
5		78	23
6		78	21
7		104	26
8		131	33
9		120	30
10		120	35
11		131	36
12		131	37
13		116	44
14		108	38
15		100	41

TABEL A3 : Rådata fra forsøg C; udvekslingsforsøg med totalopblandet sediment. Kolonne A: Blandingsforhold af overfladesediment og sediment fra 50-70 cm's dybde. Kolonne B: pH i opløsningen. Kolonne C: Begyndelseskonc. af fosfat (ug P/l). Kolonne D: Slutkonc. af fosfat efter 21 timer (ug P/l). Kolonne E: Sedimentets frigivelse af fosfat (ug P/g sediment tørvægt) under forsøget.

A	B	C	D	E
0:5	8	0	29	11
	8	100	103	0
	8	300	258	-20
	9	0	25	8
	9	100	92	-3
	9	300	250	-19
	10	0	46	19
	10	100	99	3
	10	300	263	-11
	1:4	8	0	84
8		100	170	41
8		300	342	30
9		0	111	66
9		100	162	40
9		300	342	36
10		0	191	115
10		100	267	115
10		300	471	118
2:3		8	0	149
	8	100	218	66
	8	300	370	45
	9	0	160	90
	9	100	223	74
	9	300	391	61
	10	0	275	162
	10	100	384	165
	10	300	565	158
	4:1	8	0	227
8		100	298	110
8		300	460	96
9		0	273	155
9		100	334	136
9		300	511	130
10		0	506	292
10		100	626	302
10		300	735	254
5:0		8	0	277
	8	100	332	130
	8	300	513	117
	9	0	305	170
	9	100	380	163
	9	300	569	154
	10	0	624	334
	10	100	639	315
	10	300	853	309

