

NORSK INSTITUTT FOR VANNFORSKNING

Blindern

O-69091

MJØSPROSJEKTET

Undersøkelser av næringssalter i sedimenter

Delrapport nr. 8

Blindern 22. mai 1980

Saksbehandler; Siv.ing. Morten Laake

Instituttetsjef: Kjell Baalsrud

# NIVA – RAPPORT

Norsk institutt for vannforskning



NIVA

Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Forskningsråd

Postadresse:  
Postboks 333, Blindern  
Oslo 3

Brekke 23 52 80  
Gaustadalleen 46 69 60  
Kjeller 71 47 59

Rapportnummer: 0-69091
Undernummer: XXII
Løpenummer: 1205
Begrenset distribusjon:

Rapportens tittel:  MJØSPROSJEKTET  Undersøkelser av næringsalter i sedimenter  Delrapport nr. 8	Dato: 22. mai 1980
	Prosjektnummer: 0-69091
Forfatter(e):  Siv.ing. Morten Laake	Faggruppe:
	Geografisk område: Hedmark/Oppland
	Antall sider (inkl. bilag): 46

Oppdragsgiver: Det kongelige Miljøverndepartement Akershus fylke Hedmark fylke Oppland fylke	Oppdragsg. ref. (evt. NTNf-nr.):
---	----------------------------------

Ekstrakt:

I 1977 ble overflatesedimentene i Mjøsas grunnere områder undersøkt med hensyn på innhold av mobiliserbare næringsalter, utveksling av fosfor, mineralisering av organisk stoff og graden av organisk sedimentasjon. Som Hovedkonklusjon på undersøkelsen er at sedimentene i området 10-40 m dyp tar aktivt del i stoffomsetningen i innsjøen og dette kan særlig på sensommeren og høsten ha betydning for algeutviklingen i Mjøsa. Det vil imidlertid være av stor interesse at utbredelsen av organiske sedimenter i innsjøen blir bedre kartlagt.

4 emneord, norske:
1. Mjøsa
2. Eutrofiering
3. Sedimenter
4. Stoffomsetning
næringsalt

4 emneord, engelske:
1. Lake Mjøsa
2. Eutrophication
3. Sediments
4. Circulation of organic material
Nutrients

Prosjektleders sign.:

Seksjonsleders sign.:

Instituttetsjefs sign.:

ISBN 82-577-0292-7

FORORD

Denne undersøkelsen ble forberedt i januar-februar 1977, prøvetaking i felten gjennomført i mars, og forsøk og analyser fullført i løpet av april-mai samme år. Bearbeiding og rapportering har dessverre tatt lang tid, da undertegnede sluttet ved NIVA i september, og har måttet prioritere andre oppgaver.

Assistent ved feltarbeidet var Jon Arne Tomter, mens ingeniør Åse Kristine Gudmundsson har assistert på en utmerket måte ved forsøk og analyser. Mikroskopering av overflateprøver ble utført av cand.mag. Eli-Anne Lindstrøm. En takk rettes også til fil.kand. Gösta Kjellberg og cand.real. Hans Holtan for inspirerende diskusjoner og praktisk hjelp med gjennomføringen.

Oslo 20. september 1979

Morten Laake

INNHALDSFORTEGNELSE

	Side:
1. INNLEDNING	6
2. UNDERSØKELSESPROGRAM	8
2.1 Opplegg og gjennomføring	8
2.2 Analysemetoder	8
2.3 Forsøksmetoder	12
3. SEDIMENTANALYSER	13
3.1 Kjemiske data for bunnvann	13
3.2 Kjemiske data for pōrevann i sedimenter	15
3.3 Vanninnhold, organisk tørrstoff, klorofyll og ATP	15
3.4 Mikroskopiske undersøkelser	29
4. STOFFUTVEKSLING OG OKSYGENFORBRUK	29
4.1 Kjemiske analysedata	29
4.2 Surhetsgrad	30
4.3 Ionestyrke	30
4.4 Nitrogen	30
4.5 Organisk stoff	31
4.6 Fosfor	31
4.7 Oksygenforbruk	34
5. DISKUSJON	38
5.1 Målsetting og begrensninger ved undersøkelsen	38
5.2 Utbredelse av næringsrike sedimenter	39
5.3 Fosforregenerering i sedimentene	40
5.4 Sedimentutveksling vurdert mot primær- produksjon og fosforbudsjett	42
6. SAMMENDRAG OG KONKLUSJON	43
7. ENGLISH SUMMARY	45
8. LITTERATURHENVISNINGER	46

TABELLFORTEGNELSE

	Side:
1. Oversikt over prøvepunkter med angivelse av prøvedato, dyp, fysikalske data for bunnvannet, og en makroskopisk beskrivelse av sedimentene	9-10
2. Kjemiske analysedata (middelverdier av 3 analyser) for sterilfiltrert Mjøsa-vann. Vannet ble benyttet til utskifting av bunnvann over sedimentene ved utvekslings- og respirasjonsmålinger	11
3. Kjemiske analysedata for bunnvann på prøvestasjonene, Mjøsa mars 1977 (blandprøver av 3 vannsøyler 10-30 cm over sedimentet)	14
4. Vanninnhold, organisk stoff (glødetap), klorofyll <u>a</u> og ATP i sedimentet, samt kjemiske analysedata for porevann	17-18
5. Mittelverdier for vanninnhold, organisk tørrstoff og klorofyll i 1-5 cm sjiktet og ATP-biomasse i toppsjiktet (0-1 cm) i sedimentet	19
6. Gjennomstrømningshastighet (flow) og konsentrasjonsforløp for kjemiske komponenter under utvekslingsforsøket, samt konsentrasjonene i bunnvann ved prøvetaking (PT)	21-28
7. Beregnede verdier for fosforutveksling (TOT P) over sedimentoverflaten som funksjon av forsøketiden. Enheten er $\mu\text{g P/m}^2 \cdot \text{time}$	36
8. Beregnede verdier for kjemisk og biologisk oksygenforbruk ( $\text{mg O}_2/\text{m}^2 \cdot \text{time}$ ) på sedimentoverflaten	37

FIGURFORTEGNELSE

1. Kart over prøvetakingslokaliteter, med angivelse av dybde og hydrologiske data for Mjøsa	7
2. Forsøksoppstilling for måling av oksygenforbruk og utveksling av kjemiske komponenter over sediment/vann-interfasen	11
3. Modell over lagre og prosesser som deltar i sediment/vannutvekslingen av fosfor (etter Kamp-Nielsen 1977)	16
4. Korrelasjonsdiagram for oppløst totalfosfor i porevann og organisk stoff i sedimentet (profil D utelatt)	20
5. Forløpet av fosforutveksling, ioneutveksling, oksygenkonsentrasjon, surhetsgrad og oksygenforbruk på sediment fra Furnesfjorden (stasjon A 3, 33 m)	32
6. Beregnede middelverdier (med standardavvik) for sekundærbelastning av fosfor (TOT P) fra sedimentene i prøveområdene. (Målinger ved ca. 80% metning, $10^{\circ}\text{C}$ , steady state verdier)	33

(Figurfortengelse fortsatt)

Side:

7. Frigjøringshastigheter for totalfosfor som funksjon av fallende oksygenkonsentrasjon på et utvalg stasjoner 35
8. Glødetap (1-5 cm) i relasjon til vanndybden. Profil D er utelatt 39

## 1. INNLEDNING

Basert på årstransporten av fosfor og nitrogen i tilførselselver, i avrenning og i utløpet ved Vorma (Holtan 1977) kan det anslås at anslagsvis 70% av tilført fosfat og 8% av tilført nitrogen lagres i Mjøsa. Budsjettberegninger for de samme komponenter i epilimnion i sommerperioden viser på den annen side at opptil 56% av fosfor- og 7% av nitrogentilførselen til epilimnion må stamme fra hypolimnion og sedimenter i kontakt med epilimnion. Det kan med andre ord postuleres en betydelig regenerering av næringssalter ved mineralisering i hypolimnioniske vannmasser og i sedimenter, og som delvis tilbakeføres epilimnion i produksjonsperioden på grunn av strømforhold, indre bølger og "upwelling"-fenomener. Epilimnion strekker seg ned til 20-25 meters dyp maksimalt, men helt ned til 40-50 meter kan det spores konsentrasjonsendringer som tyder på at også i disse mellomliggende vannmasser reduseres innholdet av næringssalter i vekstsesongen.

For nærmere å kunne vurdere holdbarheten i slike relativt grove beregninger, og spesielt for å tallfeste sedimentenes "mobiliseringslager" og regenereringshastighet for fosfor og nitrogen, ble det på vårvinteren 1977 iverksatt en nærmere undersøkelse av sedimentene på et utvalg av profiler fra land ned til ca. 50 meters dybde.

Det foreligger ingen eller kun få data fra tidligere undersøkelser i Mjøsa som kan være av verdi i denne sammenheng. En mineralogisk sedimentundersøkelse fra 1972-74 omfatter hverken innhold av organisk stoff, fosfor eller nitrogen (Aagaard og Jørgensen 1978). Overflatesedimentene består overveiende av leirig silt/siltig leire, både i hovedbassenget og i de to fjordarmene. Undersøkelser over fossile diatoméer i sedimentene er vesentlig av utviklingshistorisk interesse (Berge 1976).

På denne bakgrunn ble det i februar 1977 formulert et program for en begrenset undersøkelse av Mjøsas sedimenter med hensyn på:

- a) lager av mobiliserbart fosfor, nitrogen og andre komponenter i sedimentenes øverste 10 cm
- b) utvekslingen av fosfor og nitrogen mellom sediment og bunnvann
- c) mineraliseringsaktivitet i sedimentet målt som oksygenopptak og mikrobiell biomasse
- d) graden av organisk sedimentasjon målt som akkumulert organisk stoff og klorofyll i sedimentet.

## 2. UNDERSØKELSESPROGRAM

### 2.1 Opplegg og gjennomføring

Det ble valgt ut 8 profiler med fra 3 til 6 prøvepunkter pr. profil i områder med høy lokal belastning fra vassdrag eller bebyggelse (figur 1), ialt 37 prøvestasjoner. Tabell 1 gir en oversikt over stasjonene med måledata for prøvedyp, temperatur, pH og oksygen i bunnvannet avsifonert fra sedimentkjernene.

For hvert prøvepunkt ble det tatt 4 kjerneprøver med en modifisert Kajak prøvetager (Limnologiska Institutionen, Upsala) med utskiftbare rør av indre diameter 57 mm og lengde 50 cm. Prøvene besto av 20-25 cm uforstyrret sediment dekket av 600-800 ml bunnvann. En kjerne ble straks forseglet og bragt til laboratoriet i isolert trekasse for utvekslingsforsøk (kapittel 4), mens 3 kjerner til kjemiske og mikrobiologiske analyser (kapittel 3) ble opparbeidet på stedet. Temperatur og pH i bunnvannet ble målt umiddelbart og prøver tatt for oksygenbestemmelse etter Winkler-metoden (tabell 1).

Alle prøver ble tatt fra fast is og posisjonen bestemt ved krysspeiling med peilekompass. Det var ofte store avvik mellom målt dybde og dybdekartets angivelse på lokaliteten, men de fleste prøvepunkter havnet likevel innen intervallet 10-50 meters dyp som forutsatt. Ved dyp mindre enn 10 meter var sedimentene oftest mer minerogene i sin karakter og tydelig påvirket av erosjonsmateriale fra littoralsonen.

### 2.2 Analysemetoder

Normalt 3 kjerner pr. stasjon ble opparbeidet for analyser. Bunnvannet mellom 10 og 30 cm over sedimentoverflaten ble sifonert av til kjemiske analyser. Sedimentet ble snittet til 4 blandprøver av 3 parallelle kjerner og analysert etter følgende skjema:

0 - 1 cm: ATP-biomasse, mikroskopi

1 - 5 cm: Tetthet, tørrstoff, gløderest

fast sediment: TOT N, TOT P, ORT P, Fe, Mn, Ca, klorofyll

porevann: pH, KONN, TOT N, TOT P, ORT P, Fe, Mn, Ca

5 - 6 cm: som for 0 - 1 cm

6 -10 cm: som for 1 - 5 cm



Tabell 1. Oversikt over prøvepunkter med angivelse av prøvedato, dyp, fysikalske data for bunnvannet, og en makroskopisk beskrivelse av sedimentene

Profil Nr.	Dato mars	Dyp <sup>x</sup> m	Temp <sup>xx</sup> °C	pH <sup>xxx</sup>	Oksygen <sup>xxxx</sup> mg O <sub>2</sub> /l	Kommentarer:
A. Furnesfjorden ved Brumunda: Fra N mot S langs dyprennen						
2	01	17,0	1,5	7,46	-	O <sub>2</sub> -prøver tapt
1	01	34,5	2,2	7,10	-	" "
3	01	39,0	2,4	6,92	1,15	
4	10	39,2	2,7	6,81	10,0	Fe(III)utfelling v/6 cm
B. Furnesfjorden ved Martodden: Fra Ø mot V						
1	11	8,2	1,7	7,46	11,4	Leire, Fe(III)utfelling
2	11	22,4	2,3	7,26	10,4	Skiktet, leiret, utf. 15 cm
3	11	35,0	2,8	7,15	10,15	Leirig silt, utf. 20 cm
C. Hamarområdet: Mot SV fra Akersvika						
1	11	1,8	-	-	-	} Grov sand 0,5-1 mm 10 cm org.silt over leire Organisk silt, utf. 10 cm 6 cm org. silt, utf. over leire
2	11	27,3	2,6	7,31	6,70	
3	11	42,3	2,7	7,45	10,8	
4	11	63,0	3,0	7,59	10,6	
Hamarområdet: Fra jernbaneodden VSV mot Nessund krk.						
5	11	62,5	2,9	7,69	10,5	10 cm rødbr.org.silt, leire
6	11	18,5	1,6	7,60	10,3	Homogen organisk silt
D. Gjøvikområdet: Mot Ø fra trelastbruket						
1	22	59	3,2	7,30	10,25	Trefiber, lukter H <sub>2</sub> S
2	22	52	3,2	7,31	10,45	Trefiber, gass, H <sub>2</sub> S
Lagdelte; alternerende trefiber og grønt detritus hver 2. cm.						
E. Gjøvikområdet: Mot Ø fra viken syd for Vikodden						
1	22	10,0	1,7	7,30	11,4	5 cm homogen org.silt
2	22	26,5	-	-	-	Leirig silt, skrå bunn
3	22	62,0	2,3	7,43	11,20	Leirig silt over leire

Tabell 1 (forts.)

Profil Nr.	Dato mars	Dyp <sup>x</sup> m	Temp <sup>xx</sup> °C	pH <sup>xxx</sup>	Oksygen <sup>xxxx</sup> mg O <sub>2</sub> /l	Kommentarer
F. Totenvika: Mot ØNØ fra Panengen brygge						
1	23	24,0	2,6	7,12	11,55	Fe(III)utfelling på org.silt (10 cm), flislag v/9 cm leirig silt til 25 cm. Mye zooplankton
2	23	23,5	2,8	7,24	11,8	
3	23	35,7	2,9	7,49	11,5	
Totenvika: Fra Panengen VNV mot Balke krk.						
4	23	34,0	2,6	7,52	11,7	Utseende som for F 1-3
5	23	0,5	0,6	7,59	13,25	Svart org. sand. Mye <u>Tubificidae</u>
6	23	28,5	2,6	7,65	11,45	Utseende som for F 1-3
G. Moelvområdet: Fra Steinsvika rett V mot Biri bruk, snitt						
1	30	17,5	1,9	-	11,4	3 cm org.silt på leire/sand
2	30	26,2	3,2	-	11,3	3 cm org.silt på løs leire
3	30	82,6	4,1	-	7,05	5 cm org.silt på leire, løs grågrønn, 2 mm sorte utf. nedover i leiren
4	30	54,7	3,4	-	-	
5	30	41,5	3,4	-	10,85	
Moelvområdet: S og N for G 2, mot munningen av Moelv						
6	30	54,5	3,2	-	10,5	5 cm org.silt på blåleire
2	30	26,2	3,2	-	11,3	3 cm org.silt på bløt leire
7	30	19,4	2,1	-	11,3	Fe(III)utf. i overfl.,org. silt med flis til 13 cm
H. Lillehammer: Rett mot S fra Vingsnes gamle mølle, ialt 5,5 km						
1	31	27,3	2,9	-	9,05	Homogen org.silt/leire
2	31	17,8	2,6	-	10,35	Fe(III)utf. på overflaten
3	31	59,5	3,3	-	1,2	Detritus 1 cm, org.silt 10 cm
4	31	22,5	2,7	-	9,8	Org.silt til 8 cm, mye zoopl. og svært turbid bunnvann
5	31	41,0	3,0	-	8,15	
6	31	37,5	-	-	8,7	Org.silt til 5 cm, leire

<sup>x</sup> Dyp målt med meterhjul på vinsj fra vannoverflaten

<sup>xx</sup> Temperatur målt med termometer i bunnvannet umiddelbart etter prøvetaking

<sup>xxx</sup> pH målt på stedet med felt-pH-meter (Radiometer pH 29)

<sup>xxxx</sup> Oksygen analysert ved Winkler-titrering

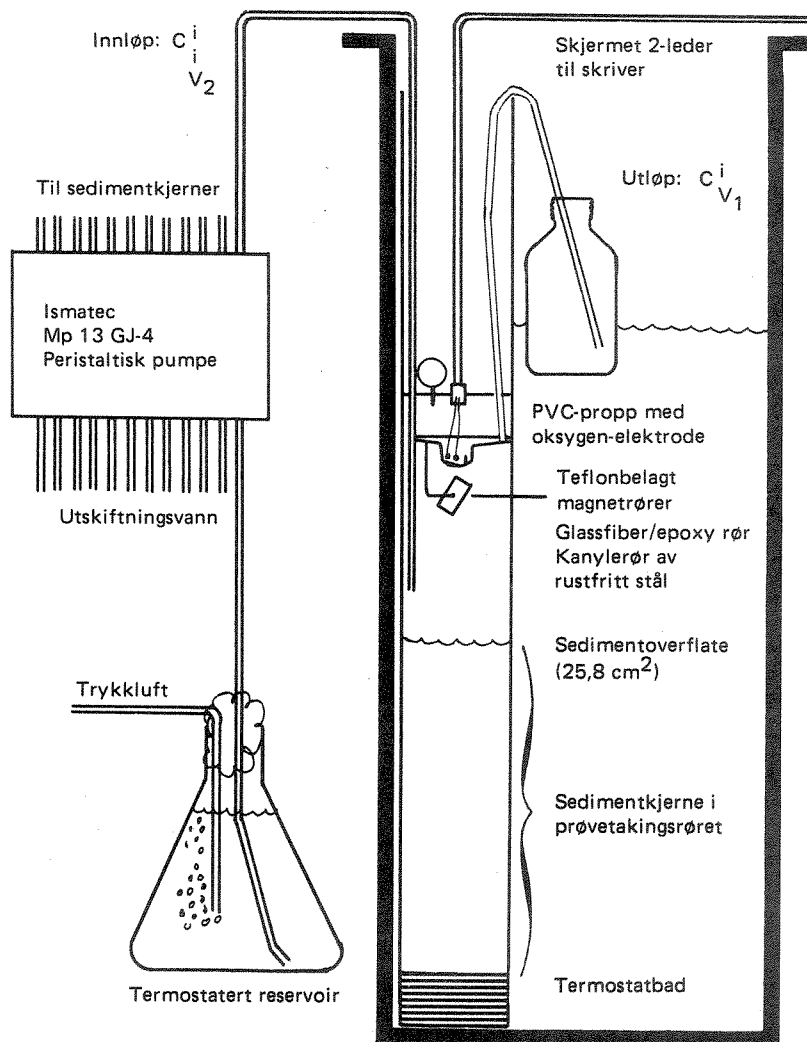


Fig. 2. Forsøksoppstilling for måling av oksygenforbruk og utveksling av kjemiske komponenter over sediment/vann-interfasen.

Tabell 2. Kjemiske analysedata (middelverdi av 3 analyser) for sterilfiltrert Mjøsvann. Vannet ble benyttet til utskifting av bunnvann over sedimentene ved utvekslings- og respirasjonsmålinger.

Forsøk nr.	Stasjonsprofil	pH	KOND μS/cm	TOT N μg N/l	TOT P μg P/l	KOF-PE μg O/l
1	A, B, C	7,05	42,2	450	11,0	16,8
2	D, E, F	7,21	42,3	390	7,0	9,5
3	G, H	7,22	44,0	340	8,5	13,7

Fraksjonene 1 - 5 og 6 - 10 cm ble lagret ved frysing i inntil 2 uker før analyse, og etter tining ble porevannet presset ut anaerobt og uten gjennomblåsing ved trykkfiltrering over GF/C glassfiberfilter (Reeburg 1967). Porevannet ble straks fordelt og konserverert for kjemiske analyser etter standardiserte prosedyrer ved NIVAs rutinelaboratorium.

Fast sedimentfraksjon er foreløpig ikke analysert kjemisk av budsjettmessige hensyn, men oppbevares frosset. En fraksjon (ca. 1 gram) ble innveid og ekstrahert med 90% aceton for fluorometrisk analyse av klorofyll a (Holm-Hansen et al. 1965).

### 2.3 Forsøksmetoder

Forsøkskjernene ble forseglet og bragt til laboratoriet stående i isolerte trekasser, og ble så åpnet og satt til temperaturstabilisering i termostaterte vannbad ved  $10 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$  i 3 døgn før målingene startet. En prinsipp-skisse av apparaturen er vist i figur 2. Vann hentet fra 10 meters dyp 1 km rett vest av Akersvika, Hamar, ble sterilfiltrert ved membranfiltrering, termostatert til  $10^{\circ}\text{C}$ , mettet med oksygen og pumpet kontinuerlig inn over sedimentet. Kjemiske data for utskiftningsvannet er gjengitt i tabell 2. Som vist ved tidligere forsøk (Laake og Bauck 1976) skjer det en kontinuerlig og homogen innblanding av tilført vann. Fortrengt bunnvann ble samlet opp for kjemiske analyser, som vist på figuren. Bunnvannet hadde en teoretisk oppholdstid over sedimentet på 48 timer ved den valgte pumpehastigheten.

Antas all kjemisk og biologisk aktivitet å være knyttet til sedimentoverflaten, kan transporten av én komponent (X) over sediment/vann-interfasen beregnes som:

$$TV_x = \frac{C_x^{\text{ut}} - C_x^{\text{inn}}}{A} \times F \quad (\mu\text{g X/ m}^2 \text{ time})$$

hvor  $TV_x$  = massetransport av X (transfer velocity)

F = pumpevolum pr. tid (flow)

A = sedimentets overflateareal (area)

Etter minst 3 døgns temperaturstabilisering ble kjernene forseglet med et PVC-stempel med 2 kanylerør, og vannutskiftningen startet. Prøver for kjemiske analyser og oksygen ble tatt hvert 2. døgn over ialt 12 døgn. Etter 7 døgn ble utskiftningsvannet strippet for oksygen med nitrogengass, og bunnvannet ble da gradvis anaerobt. Følgende kjemiske parametre ble analysert: pH, KOND, TOT P, TOT N og KOF-PE.

Metodikken var tilfredsstillende for alle analyserte komponenter bortsett fra TOT N og pH. Dette skyldtes trolig luftstripping av  $\text{NH}_4^+$  fra utskiftningsvannet, med derav følgende forandring i pH. Transportverdiene for nitrogen og hydroniumioner vil derfor bli usikre og er ikke beregnet.

Det er en viktig fordel ved dette opplegget at målingene blir utført på et tilnærmet uforstyrret sediment og med naturlige konsentrasjonsnivåer av kjemiske komponenter over sedimentet, altså under såkalt "steady state" betingelser. Oppholdstiden for bunnvannet (2 døgn i sjiktet 0 - 12 cm) antas å være realistisk sett i relasjon til naturlige forhold, men burde vært valgt noe større av eksperimentelle hensyn.

### 3. SEDIMENTANALYSER

#### 3.1 Kjemiske data for bunnvann

Kjemiske analysedata for bunnvann mellom 10 og 30 cm over sedimentoverflaten er gjengitt i tabell 3. Som illustrasjon er også middelkonsentrasjonen for prøveområdene beregnet, men disse kan ikke tillegges vesentlig betydning på grunn av skjevheter i prøvematerialet, spesielt med hensyn på dyp. Tallene illustrerer imidlertid klart nok endel forhold som skal omtales nærmere.

På etpar stasjoner er oksygenkonsentrasjonen så lav som 1 mg/l, tilsvarende 7 - 8% metning, samtidig som verdiene for TOT N, TOT P, Fe og Mn er høye (Furnesfjorden). Dette viser at det i forsenkninger i bunnen kan dannes lommer med anoksiske forhold i sedimentoverflaten selv ved såvidt lave temperaturer som 2 - 3°C. En må anta at utbredelsen av anoksiske sedimentoverflater er større under stratifiserte forhold med høye temperaturer i sommerhalvåret.

Tabell 3. Kjemiske analysedata for bunnvann på prøvestasjonene i Mjøsa mars 1977.  
(blandprøver av 3 vannsøyler 10-30 cm over sedimentet) (\* pH målt etter frakt til laboratoriet).

Stasjon profil/nr.	DYP m	OKSYGEN mg O <sub>2</sub> /l	pH <sup>*</sup>	KOND µS/cm	TOT N µg N/l	TOT P µg P/l	ORT P µg P/l	KOF-PE mg O/l	Fe µg/l	Mn µg/l	Ca mg/l	
A	1	34,5	-	6,58	40,6	490	32	23	2,42	230	70	5,5
	2	17,0	-	6,72	41,1	490	18	18	2,50	120	32	6,1
	3	39,0	1,15	6,45	49,9	1000	350	300	4,45	4000	475	6,4
	4	39,2	10,0	6,79	37,2	480	19	8	2,50	90	45	5,5
Midde l	-	-	6,62	42,2	615	102	87	3,0	1100	156	5,9	
B	1	8,2	11,4	7,02	39,2	490	76	59	2,50	520	55	6,1
	2	22,4	10,4	6,81	37,2	500	25	12	2,34	140	110	5,5
	3	35,0	10,2	6,82	37,2	480	24	12	2,50	130	120	5,5
Midde l	-	-	6,87	37,9	490	42	28	2,5	260	95	5,7	
C	2	27,3	6,7	8,51	49,9	560	25	14	2,57	140	110	5,5
	3	42,3	10,8	6,95	33,8	490	31	14	2,89	180	120	5,5
	4	63,0	10,6	6,88	33,8	460	21	8	2,62	70	60	5,2
	5	62,5	10,5	6,88	35,2	520	34	19	2,65	220	55	5,2
	6	18,5	10,3	6,84	41,6	690	41	22	2,96	390	145	6,1
	Midde l	-	-	6,98	39	540	30	15	2,7	200	100	5,5
D	1	59	10,3	6,84	37,9	920	140	69	4,5	290	26,5	5,5
	2	52	10,5	6,77	36,8	490	24	3	3,6	110	13,8	5,2
Midde l	-	-	6,75	37	710	82	36	4,1	200	20	5,4	
E	1	10,0	11,4	6,68	31,7	400	39	18	3,2	460	60	4,2
	3	62	11,2	6,73	35,8	460	64	37	4,8	1100	60	5,1
Midde l	-	-	6,70	34	430	52	28	4,0	780	60	4,7	
F	1	24,0	11,6	6,94	52,7	900	94	77	4,0	780	180	8,1
	2	23,5	11,8	7,03	46,0	770	32	21	3,2	420	240	7,0
	3	35,7	11,5	6,96	34,8	380	13	9	2,8	90	70	5,0
	4	34,0	11,7	6,95	47,1	390	34	25	3,5	580	180	5,0
	5	0,5	13,3	7,32	179	7200	49	30	3,9	140	38,5	30,2
	6	28,5	11,5	7,09	39,9	500	36	21	2,8	390	80	5,9
Midde l	-	-	7,03	67	1690	43	31	3,4	400	130	10	
G	1	17,5	11,4	6,90	39,4	420	25	18	1,5	450	185	5,7
	2	26,2	11,3	6,88	33,2	370	19	13	1,6	180	95	4,6
	3	82,6	7,1	6,44	36,6	410	29	20	2,4	90	430	5,0
	4	54,7	-	6,83	33,7	340	12	7	1,0	90	130	4,5
	5	41,5	10,9	6,83	32,1	420	31	21	1,6	550	200	4,3
	6	54,5	10,5	6,67	34,6	400	18	12	1,6	130	70	4,6
	7	19,4	11,3	6,87	35,2	410	12	8	2,6	150	35	4,8
Midde l	-	-	6,74	35	400	21	14	1,8	230	160	4,8	
H	1	27,3	9,1	6,63	31,9	360	21	11	1,6	360	80	4,3
	2	17,8	10,4	6,66	30,8	320	13	7	1,8	250	41	4,0
	3	59,5	1,2	6,47	40,7	710	85	63	2,5	1800	580	5,1
	4	22,5	9,8	6,67	30,1	320	28	19	2,3	930	45	4,1
	5	41,0	8,2	6,58	31,0	320	17	14	1,5	380	95	4,0
	6	37,5	8,7	6,71	20,8	320	10	8	1,8	260	95	4,1
Midde l	-	-	6,61	33	390	29	20	1,9	660	160	4,3	

Konsentrasjonene av TOT P og ORT P er generelt 2 - 5 ganger over hva en finner lenger oppe i hypolimnion (Holtan 1977), mens utslaget for TOT N er lite. Verdiene for Fe er 5 - 10 ganger høyere. Det er vel kjent at det skjer en anrikning av fosfor og jern i bunnvann og sedimenter gjennom kjemiske utfellingsmekanismer og redoksreaksjoner (se f.eks. Wetzel 1975); sedimentene virker sett på årsbasis som feller for disse og endel andre viktige elementer.

pH målt på vannprøver bragt til laboratoriet gav generelt 0,2 - 0,3 pH-enheter lavere verdier enn feltmålingene (tabell 1). Årsaken er trolig konsentrasjonsforskyvninger i karbonatsystemet ved lagring og oppvarming til værelsestemperatur.

### 3.2 Kjemiske data for porevann i sedimentet

Porevann ble presset ut av sedimentet ved trykkfiltrering over et glassfiberfilter uten gjennomblåsning av luft eller annen gass (Reeburgh 1967). Porevannskonsentrasjonene kan tas som et uttrykk for sedimentets lager av mobiliserbare næringssalter; det kan antas å være proporsjonalitet mellom porevannskonsentrasjonene og de mengder som frigjøres til overliggende vannmasser under bestemte redoks, pH og temperaturforhold (Kamp-Nielsen 1977). Sedimentet ned til en dybde på ca. 5 cm antas vanligvis å delta i utvekslingsprosesser mellom vann og sedimenter. En forenklet modell for fosforomsetningen i vann-sediment-interfasen er gjengitt i figur 3 (etter Kamp-Nielsen 1977).

Tabell 4 gjengir analysedata for porevannet i sjiktet 1-5 cm og 6-10 cm i sedimentet. Tallene taler forsåvidt for seg selv, da konsentrasjonene av nitrogen og fosfor og særlig jern og mangan ligger vesentlig over hva en finner i de frie vannmasser i hypolimnion. Under ugunstige betingelser, som høy temperatur, anoksiske forhold i overflaten og/eller turbulente strømmer langs bunnen vil dette lageret raskt kunne tømmes til overliggende vannmasser ved desorpsjon, diffusjon og resuspensjon.

### 3.3 Vanninnhold, organisk tørrstoff, klorofyll og ATP

Data for vanninnhold, organisk tørrstoff, klorofyll og ATP er medtatt i tabell 4. Beregnes middelveiden for de øvre lag i sedimentet for hvert prøveområde, så viser disse endel markante forskjeller, som vist i tabell 5.

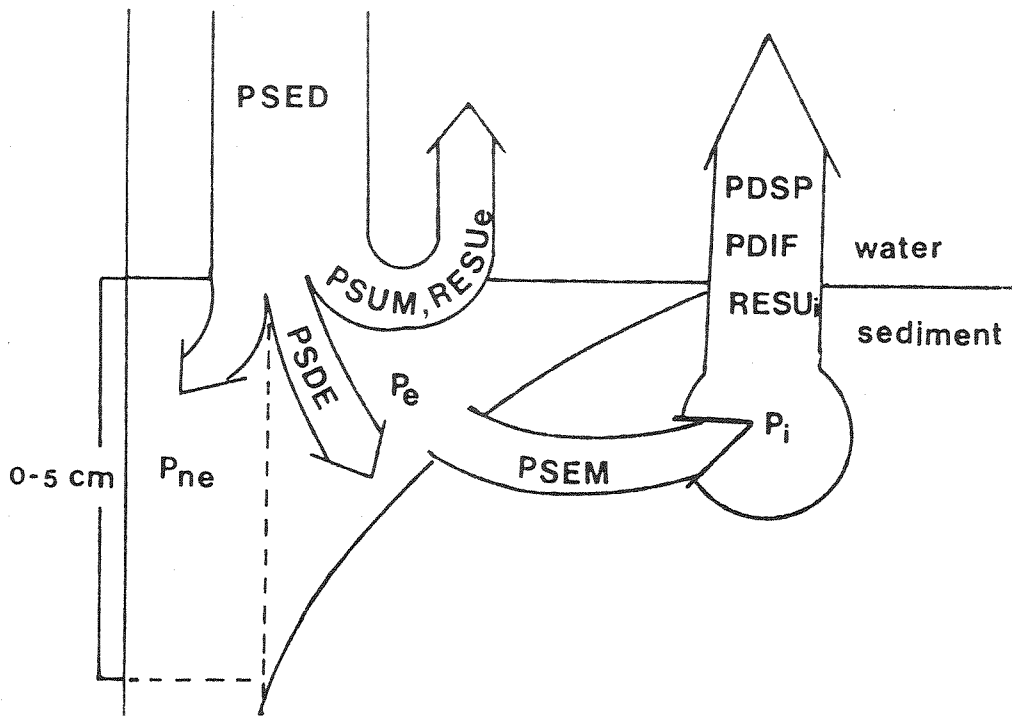


Fig. 3. Modell over lagre og prosesser involvert i sedimentvann - utvekslingen av fosfor i Esrom sø (etter Kamp-Nielsen 1977). Symbol-liste:

Lagre:

$P_e$  = utbyttbart, sedimentært P

$P_{ne}$  = ikke utbyttbart, sedimentært P

$P_i$  = P i porevann og absorbert

Hastigheter og prosesser:

PSDE = utbyttbar fraksjon av sedimenterende P

PSUM = utbyttbart P mineralisert på overflaten og fritt uten transportbegrensning til bunnvann

PSEM = utbyttbart P mineralisert innen sedimentet

RESU<sub>e</sub> = utbyttbart P fjernet ved resuspensjon

PDSP = desorpsjon av porevann-P og absorbert P

RESU<sub>i</sub> = porevanns- og absorbert P fjernet ved resuspensjon

PDIF = porevanns- og absorbert P fjernet ved diffusjon til bunnvann



Tabell 4. Vanninnhold, organisk stoff (glødetap), klorofyll a og ATP i sedimentet.  
samt kjemiske analysedata for porevann.

Stasjon prof./nr.	SNITT cm	VANN %	GLØDE- TAP %	CHL <u>a</u> µg/g tørrv.	ATP	pH	KOND µS/cm	TOT N µg N/l	TOT P µg P/l	ORT P µg P/l	Fe mg/l	Mn mg/l	Ca mg/l	
A	1	1-5	85,3	24,8	34,7	6,6	7,10	101	9200	700	270	13,0	4,5	6,0
	1	6-10	77,0	15,8	15,8	5,7	4,47	139	11000	400	180	25,0	10,1	10,0
	2	1-5	87,0	25,7	17,2	17,7	6,89	87	9000	500	330	7,6	5,3	6,0
	2	6-10	75,6	11,5	8,6	2,7	7,43	105	7400	1000	710	10,0	10,2	8,0
	3	1-5	84,4	23,4	53,3	14,0	7,10	134	12000	600	280	15,0	3,1	9,0
	3	6-10	79,7	18,5	16,5	6,1	6,79	220	15200	500	240	42,0	9,4	12,0
	4	1-5	64,8	4,6	3,0	0,81	7,35	62	620	79	34	0,8	2,7	5,5
	4	6-10	54,6	3,2	0,83	<0,01	-	76	480	140	49	2,5	5,4	8,1
B	1	1-5	55,5	2,6	0,62	<0,01	7,23	-	1800	290	230	14,0	1,2	7,2
	1	6-10	41,4	1,8	0,24	<0,01	7,42	-	1600	400	270	13,0	1,7	8,5
	2	1-5	84,8	8,9	12,4	1,6	7,40	127	2200	420	150	5,0	22,0	9,4
	2	6-10	73,9	6,2	1,8	<0,01	7,88	186	2240	72	26	1,0	30,5	14,8
	3	1-5	84,8	9,0	13,4	1,6	7,66	142	4120	460	110	3,9	27,0	9,9
C	3	6-10	72,7	5,5	1,7	<0,01	7,76	171	2140	78	21	0,5	29,5	13,5
	2	1-5	75,8	6,8	30,4	1,9	7,30	130	5600	800	350	13,0	11,2	9,7
	2	6-10	49,1	3,5	9,8	0,03	7,60	35	4040	150	55	6,2	11,5	9,5
	3	1-5	75,5	7,4	8,1	1,3	7,56	108	3280	340	130	4,1	16,8	8,2
	3	6-10	66,1	6,0	2,1	<0,01	7,68	46	3400	160	51	10,1	32,5	15,2
	4	1-5	83,2	8,6	10,4	2,2	7,33	115	3800	200	150	10,2	16,8	9,8
	4	6-10	73,1	6,0	2,0	<0,01	7,77	134	1480	79	36	1,1	20,0	11,9
	5	1-5	71,3	5,6	2,8	0,19	7,23	52	2250	61	37	0,9	1,4	4,7
	5	6-10	71,7	7,4	-	-	7,30	63	390	65	42	0,9	0,5	5,2
	6	1-5	81,9	10,5	18,0	2,9	7,38	103	3320	490	220	8,3	17,6	8,0
D	6	6-10	62,4	6,2	6,3	<0,01	7,49	110	3400	200	80	0,2	18,4	9,8
	1	1-5	97,7	50,1	23,0	6,9	4,60	296	16800	400	200	23,0	17,0	6,1
	1	6-10	92,6	52,3	8,0	-	4,62	245	13900	500	200	10,0	2,7	14,2
	2	1-5 6-10	96,0	60,9	10,4	5,6	4,45	437	4000	300	200	50,3	3,7	24,5
	2													
E	1	1-5	79,2	12,0	10,8	2,8	7,11	80	5400	200	100	6,5	6,9	6,8
	1	6-10	62,8	4,5	4,5	<0,01	7,46	107	5200	50	50	8,0	15,5	9,3
	3	1-5	67,0	8,8	20,3	2,6	6,45	81	5000	400	200	8,0	3,5	6,8
	3	6-10	59,8	4,9	6,9	<0,01	7,44	96	4400	150	100	10,1	5,0	7,9
F	1	1-5	77,2	10,7	13,3	2,3	7,07	89	6400	500	200	8,5	8,3	6,8
	1	6-10	67,2	9,1	7,2	<0,01	7,46	117	6800	300	100	11,8	13,2	10,0
	2	1-5	76,9	9,5	9,4	0,59	7,38	102	5600	500	250	7,7	14,2	8,5

Tabell 4. Fortsatt.

Stasjon prof./nr.	SNITT cm	VANN %	GLØDE- TAP %	CHL a µg/g	ATP tørrv.	pH	KOND µS/cm	TOT N µg N/l	TOT P µg P/l	ORT P µg P/l	Fe mg/l	Mn mg/l	Ca mg/l	
	2	6-10	62,4	7,3	3,4	<0,01	7,59	124	4800	290	210	10,6	16,0	11,4
	3	1-5	77,1	8,9	11,1	1,4	7,31	104	5000	500	200	5,4	17,0	7,1
	3	6-10	65,7	6,1	4,3	<0,01	-	-	5400	290	130	7,5	16,5	10,7
	4	1-5	75,5	8,7	8,1	1,2	7,69	102	5400	360	190	7,7	10,6	7,1
	4	6-10	60,9	7,0	5,0	<0,01	7,42	106	6800	300	150	11,2	11,4	9,3
	5	1-5	48,4	3,8	13,8	<0,01	7,17	160	10800	400	100	7,0	1,6	15,0
	5	6-10	37,6	3,7	8,6	<0,01	7,11	469	30000	840	390	18,0	9,0	27,0
	6	1-5	74,5	10,9	20,0	0,95	6,56	108	7800	780	340	17,5	5,2	9,6
	6	6-10	64,9	9,7	7,8	<0,01	7,16	130	7800	100	50	20,0	7,3	10,9
G	1	1-5	82,0	8,9	21,5	17,5	7,32	104	5200	300	100	2,8	17,0	6,1
	1	6-10	69,9	5,8	7,0	<0,01	-	-	7200	240	110	4,4	17,8	8,6
	2	1-5	81,6	6,7	10,7	<0,01	7,55	128	6600	270	110	1,9	22,0	8,0
	2	6-10	64,1	4,0	5,2	<0,01	-	-	6000	180	80	5,0	20,0	10,3
	3	1-5	87,2	9,0	26,3	2,4	6,90	136	6800	300	200	7,0	22,0	7,1
	3	6-10	69,3	5,9	8,0	<0,01	6,85	127	5400	260	120	10,0	17,0	8,2
	4	1-5	79,2	6,2	16,7	0,51	6,91	101	6400	160	154	5,3	10,0	5,3
	4	6-10	61,4	4,6	<0,1	<0,01	7,29	98	6800	240	140	5,0	9,7	6,2
	5	1-5	82,0	8,0	17,8	0,89	7,44	100	6400	340	80	5,9	15,0	7,1
	5	6-10	64,8	5,1	7,9	<0,01	7,46	104	4800	220	150	9,7	11,2	10,1
	6	1-5	73,6	7,4	11,5	<0,01	7,36	112	4200	400	100	1,7	17,0	7,1
	6	6-10	62,9	4,6	6,2	0,01	7,65	122	5200	200	100	5,3	18,8	10,2
	7	1-5	74,5	10,4	11,9	0,49	6,98	61	6000	300	100	8,5	3,2	4,6
	7	6-10	63,0	7,8	9,4	<0,01	7,23	86	6800	180	90	10,6	4,4	6,4
H	1	1-5	71,6	9,6	22,7	<0,01	-	-	11600	300	130	27,5	5,4	19,1
	1	6-10	62,7	7,2	17,3	<0,01	6,91	138	9800	200	100	30,0	5,5	12,8
	2	1-5	76,2	11,4	22,4	1,4	6,80	81	8000	370	100	16,2	1,6	7,8
	2	6-10	62,9	8,4	15,3	0,25	7,01	98	8400	380	200	19,6	3,4	7,7
	3	1-5	68,2	9,5	31,8	<0,01	7,16	138	13000	620	150	39,0	5,4	13,1
	3	6-10	63,4	8,1	21,5	<0,01	-	145	12800	310	100	39,0	9,7	11,1
	4	1-5	75,6	9,6	25,9	7,2	6,86	80	9200	520	150	25,0	5,1	7,5
	4	6-10	62,5	5,5	13,0	<0,01	6,90	135	11600	560	230	22,5	9,8	7,9
	5	1-5	74,3	8,1	30,7	<0,01	6,98	101	8000	600	200	20,9	10,3	7,9
	5	6-10	62,2	5,4	13,6	0,01	7,57	145	8800	150	150	10,8	23,0	9,3
	6	1-5	74,7	8,6	26,4	0,38	6,62	75	8400	440	100	8,3	5,9	3,9
	6	6-10	61,4	5,1	12,2	<0,01	6,66	123	10000	360	140	12,6	11,0	6,2

Tabell 5. Middelverdier for vanninnhold, organisk tørrstoff og klorofyll i 1-5 cm sjiktet og ATP-biomasse i toppsjiktet (0-1 cm) i sedimentet.

Område	Vanninnhold %	Organisk tørrstoff %	Klorofyll $\mu\text{g/g}$ organisk tørrvekt	ATP $\mu\text{g/g}$ organisk tørrvekt
A. Furnesfjorden	80,3	19,6	27,0	10,0
B. Martodden	75,0	6,8	8,8	1,8
C. Hamar	77,5	7,8	13,9	1,7
D. Gjøvik	95,1	55,5	16,7	7,2
E. Gjøvik	73,0	10,4	15,6	2,4
F. Totenvika	71,6	8,7	12,6	1,3
G. Moelv	80,0	8,1	16,6	4,3
H. Vingrom	73,4	9,4	26,7	2,9

Verdiene for organisk tørrstoff er jevnt over meget høy i forhold til hva en skulle vente for et fjordbasseng av Mjøsas type, men det organiske sjiktet er vanligvis bare 5-15 cm tykt (tabell 1). Under dominerer minerogen silt og leire (Aagaard og Jørgensen 1978). Dette kan skyldes at det har skjedd en betydelig øket sedimentering av organisk materiale i nyere tid, anslagsvis de siste 50 - 70 år. Områder med stor organisk belastning via vassdrag, som Furnesfjorden og Gjøvik, skiller seg klart ut fra de øvrige med løse, lite konsoliderte sedimenter og høye verdier for organisk stoff. Profil D er spesiell på grunn av store avsetninger med trefiber. Innholdet av oppløst totalfosfor i porevannet er korrelert til organisk stoff (fig. 4).

Klorofyllverdiene gir en viss indikasjon på i hvilke områder sedimentasjonen av fytoplankton har vært størst, og i denne sammenheng skiller Furnesfjorden og Vingrom seg ut med høye verdier.

ATP (adenosin-tri-fosfat) ekstrahert fra sedimentet er i hovedsak et mål på aktiv mikrobiell biomasse, vesentlig bakterier og protozoer (Laake 1976). Blandprøver avhenholdsvis 0-1 og 5-6 cm sjiktet fra 3 kjerner ble oppbevart i kjøleskap og ekstrahert dagen etter prøvetaking. De enkelte analyseverdiene er gjengitt i tabell 4. Basert på middelverdiene skiller Furnesfjorden, Gjøvik og Moelv seg ut med noe høyere mikrobiell aktivitet.

Tabell 6. Gjennomstrømningshastighet (flow) og konsentrasjonsforløp for kjemiske komponenter under utvekslingsforsøket, samt konsentrasjonene i bunnvann ved prøvetaking (PT).

(pH målt i l = lab og f = felt. \* strømstans i 13 timer)

Stasjon	Tid (timer)	Flow (ml/t)	pH	KOND. $\mu\text{S/cm}$	TOT-N $\mu\text{g N/l}$	TOT-P $\mu\text{g P/l}$	KOF-PERM mg O/l	Okkygen mg O <sub>2</sub> /l
A 1	Pt		felt 7,10 lab. 6,58	40,6	490	32	2,42	-
	Start	-	6,78	-	-	-	-	-
	42,5	5,20	7,04	49,0	1480	190	19,4	-
	90,8	5,39	6,95	49,1	1000	97	5,9	5,94
	142,7	5,62	6,99	42,6	380	46	9,7	4,69
	187,2	5,71	7,14	44,0	210	54	10,5	4,28
	237,5	5,80	7,24	43,5	170	140	17,4	3,23
	282,4	5,79	7,09	43,0	180	200	18,0	2,08
A 2	Pt		felt 7,46 lab. 6,72	41,1	490	18	2,50	-
	Start	-	6,80	-	-	-	-	-
	42,5	5,79	7,11	56,8	920	66	26,6	-
	90,8	5,93	6,93	45,0	490	37	5,1	10,63
	142,7	5,72	7,12	43,1	300	25	10,1	7,72
	187,2	5,84	7,14	45,0	230	16	10,9	6,88
	237,5	5,80	7,16	45,7	200	16	18,6	6,68
	282,4	5,83	7,20	45,5	100	23	19,0	7,12
A 3	Pt		felt 6,92 lab. 6,45	49,9	1000	350	4,45	1,15
	Start	-	6,70	-	-	-	-	-
	142,5	5,08	7,10	56,8	1760	250	19,7	-
	90,8	5,31	6,93	53,2	1760	90	3,9	6,46
	142,7	5,28	7,11	46,0	61,0	44	9,4	6,57
	187,2	5,39	7,12	44,5	350	35	10,1	5,84
	237,5	5,44	6,85	41,5	300	63	19,2	3,75
	282,4	4,48	7,02	41,2	310	160	19,4	2,20
A 4	Pt		felt 6,81 lab. 6,79	37,3	480	19	2,5	10,0
	Start	-	7,28	-	-	-	-	-
	42,5	4,99	7,00	52,3	520	51	22,2	-
	90,8	5,51	6,90	47,1	440	37	4,6	7,92
	142,7	5,76	7,04	44,1	300	30	9,9	7,51
	187,2	5,98	6,92	43,5	300	24	10,5	5,63
	237,5	5,98	7,11	46,0	130	17	18,2	4,68
	282,4	4,00	7,33	49,5	120	17	18,6	3,14

Tabell 6 (forts.)

Sta- sjon	Tid (timer)	Flow (ml/t)	pH	KOND. µS/cm	TOT-N µg N/l	TOT-P µg P/l	KOF-PERM mg O/l	Oksygen mg O <sub>2</sub> /l	
B 1	Pt		felt 7,46 lab. 7,02	39,2	490	76	2,5	11,4	
	Start	-	7,21	-	-	-	-	-	
	42,5	3,41	7,07	44,6	860	44	31,5	-	
	90,8	4,89	7,09	48,1	560	34	4,8	10,32	
	142,7	5,59	7,12	42,2	460	29	9,5	10,85	
	187,2	5,93	7,13	43,0	310	17	10,8	8,87	
	237,5	5,94	7,17	42,0	130	15	19,0	6,26	
	282,4	5,97	7,23	43,5	100	12	19,4	4,60	
B 2	Pt		felt 7,26 lab. 6,81	37,2	500	25	2,34	10,4	
	Start	-	7,00	-	-	-	-	-	
	42,5	5,22	7,07	39,2	560	33	18,5	-	
	90,8	5,39	6,94	39,9	480	23	4,0	9,17	
	142,7	5,43	7,01	40,2	320	18	9,9	8,55	
	187,2	5,44	7,26	40,5	260	14	10,7	6,99	
	237,5	5,52	7,23	42,5	140	15	10,9	5,11	
	282,4	5,43	7,35	47,8	130	12	18,8	4,60	
B 3	Pt		felt 7,15 lab. 6,82	37,2	480	24	2,50	10,15	
	Start	-	6,80	-	-	-	-	-	
	42,5	5,65	6,98	41,1	360	31	19,1	-	
	90,8	4,81	7,01	41,9	460	34	3,7	9,17	
	142,7	-	avbrutt grunnet lekkasje			-	-	-	-
	187,2	-	-	-	-	-	-	-	
	237,5	-	-	-	-	-	-	-	
	282,4	-	-	-	-	-	-	-	
C 2	Pt		felt 7,31 lab. 8,51	49,9	560	25	2,57	6,70	
	Start	-	6,75	-	-	-	-	-	
	42,5	5,46	7,04	46,0	500	30	14,2	-	
	90,8	5,68	6,92	43,0	400	24	3,8	6,67	
	142,7	5,78	7,09	41,2	240	23	9,4	7,20	
	187,2	5,71	7,16	42,0	230	26	10,5	6,57	
	237,5	5,60	7,24	43,0	140	28	18,8	5,63	
	282,4	5,57	7,29	46,0	90	13	19,8	4,70	

Tabell 6 (forts.)

Stasjon	Tid (timer)	Flow (ml/t)	pH	KOND. $\mu\text{S/cm}$	TOT-N $\mu\text{g N/l}$	TOT-P $\mu\text{g P/l}$	KOF-PERM mg O/l	Oksygen mg O <sub>2</sub> /l
C 3	Pt		felt 7,45 lab. 6,95	33,8	490	31	2,89	10,8
	Start	-	6,90	-	-	-	-	-
	42,5	5,08	6,96	40,1	540	34	14,2	-
	90,8	5,26	6,86	42,5	450	32	4,1	8,54
	142,7	5,43	7,01	41,2	280	22	9,4	7,72
	187,2	(3,24)	7,27	42,5	190	20	10,6	5,63
	237,5	5,28	7,10	42,5	120	27	18,2	7,93
	282,4	5,61	7,36	46,2	80	19	18,8	4,18
C 4	Pt		felt 7,59 lab. 6,88	33,8	460	21	2,62	10,6
	Start	-	7,00	-	-	-	-	-
	42,5	5,22	6,94	39,2	480	22	17,8	-
	90,8	5,64	6,89	41,9	440	20	4,4	9,59
	142,7	5,78	7,08	42,2	300	15	10,1	8,76
	187,2	5,93	7,17	42,0	290	15	10,6	7,72
	237,5	6,06	7,18	43,5	180	11	19,0	6,26
	282,4	6,21	7,16	42,0	90	33	19,0	5,02
C 5	Pt		felt 7,69 lab. 6,88	35,2	520	34	2,65	10,5
	42,5	4,75	6,92	40,1	520	23	17,6	-
	90,8	6,47	6,89	44,0	450	20	4,1	10,63
	142,7	5,34	7,08	42,2	310	29	9,8	10,33
	187,2	5,62	7,01	43,0	230	16	10,7	8,45
	237,5	5,68	7,17	42,0	150	15	17,8	6,78
	282,4	5,70	7,16	42,0	90	33	19,0	6,16
	C 6	Pt		felt 7,60 lab. 6,84	41,6	690	41	2,96
Start		-	7,03	-	-	-	-	-
42,5		5,53	6,91	45,0	510	28	19,9	-
90,8		5,68	6,93	45,0	380	20	4,4	9,27
142,7		5,05	7,15	44,1	250	22	10,1	9,80
187,2		5,44	7,13	45,5	220	19	10,8	6,99
237,5		5,29	7,25	46,0	140	16	17,6	6,57
282,4		5,30	7,26	49,5	140	15	18,6	6,16

Tabell 6. (forts.)

Sta- sjon	Tid (timer)	Flow (ml/t)	pH	KOND. µS/cm	TOT-N µg N/l	TOT-P µg P/l	KOF-PERM mg O/l	Oksygen mg O <sub>2</sub> /l
F3	Pt		felt 7,49 lab. 6,96	34,8	380	13	2,8	11,5
	Start	-						-
	19,8	9,92	6,99	35,4	300	10	17,0	-
	66,0	9,75	7,12	36,7	340	12	9,8	8,54
	116,1	9,75	7,19	39,0	280	10	8,7	6,4
	<sup>x</sup> 164,4	4,26	7,31	43,9	220	10	8,8	5,0
	211,2	6,22	7,30	51,2	220	22	9,8	2,60
	258,7	6,10	7,43	55,3	220	14	10,1	1,90
F4	Pt		felt 7,52 lab. 6,95	47,1	390	34	3,5	11,7
	Start	-						-
	19,8	6,48	6,93	36,8	370	9	16,0	-
	66,0	6,36	7,07	39,0	320	11	9,4	8,96
	116,1	4,35	7,13	41,0	280	12	9,4	7,2
	<sup>x</sup> 164,4	3,99	7,23	43,0	200	11	8,9	8,4
	211,2	5,56	7,32	53,2	230	11	9,5	4,0
	258,7	5,54	7,43	54,2	190	13	10,1	4,0
F6	Pt		felt 7,65 lab. 7,09	39,9	500	36	2,8	11,45
	Start	-						-
	19,8	5,92	-	38,6	330	15	16,4	-
	66,0	5,66	7,11	40,0	370	22	9,4	8,76
	116,1	9,95	7,15	40,0	210	11	8,7	6,2
	<sup>x</sup> 164,4	4,07	7,25	44,1	210	15	8,9	4,2
	211,2	5,97	7,41	49,0	180	20	10,1	2,0
	258,7	5,66	7,43	53,7	114	45	20,6	4,42
5	Pt		6,58	31,0	320	17	1,5	8,15
	Start	-			290	13		-
	43,5	5,94	7,13	41,2	600	21	10,5	7,05
	92,6	5,68	6,89	41,1	590	38	11,2	6,06
	140,0	5,65	7,10	44,7	350	18	10,9	4,92
	185,3	5,64	7,30	46,8	250	18	11,2	4,92
	232,6	5,58	7,34	50,4	200	12	10,61	2,06
	263,8	5,74	7,34	49,8	240	10	10,53	1,34

Tabell 6 (forts.)

Sta- sjon	Tid (timer)	Flow (ml/t)	pH	KOND.	g N/l	g P/l	mg O/l	mg O <sub>2</sub> /l
6	Pt		6,71	30,8	350	10	1,8	8,7
	Start	-	-	-	280	23	-	-
	43,5	6,08	7,16	40,2	560	21	9,5	8,09
	92,6	6,03	6,92	38,7	560	18	11,2	7,90
	140,0	5,90	7,11	44,3	420	20	11,2	6,98
	185,3	6,09	7,36	46,5	280	8	11,1	6,36
	233,6	6,05	7,29	50,9	270	9	10,61	4,42
	263,8	5,75	7,33	49,7	290	8	10,53	4,54
11	Pt		6,63	31,9	360	21	1,6	9,05
	Start	-	-	-	280	13	-	-
	43,5	4,19	7,23	50,8	840	22	6,9	-
	92,6	5,34	7,07	49,7	760	21	11,0	5,96
	140,0	5,27	7,28	53,8	530	20	11,2	4,42
	185,3	5,34	7,44	56,6	390	8	11,2	4,30
	233,6	5,26	7,44	58,4	280	8	10,53	5,14
	263,8	5,16	-	-	440	(1800)	10,22	3,40
12	Pt		6,66	30,8	320	13	1,8	10,35
	Start	-	-	-	240	14	-	-
	43,9	9,75	6,64	42,2	250	20	10,2	5,08
	92,6	5,62	6,67	42,6	310	24	11,1	5,54
	140,0	5,56	6,98	46,5	270	10	11,2	4,52
	185,3	5,71	7,42	47,5	220	12	11,2	4,10
	233,6	5,60	7,12	52,9	200	13	10,53	2,58
	263,8	5,59	-	-	320	14	10,22	1,54
14	Pt		6,67	30,1	320	28	2,3	9,80
	Start	-	-	-	280	14	-	-
	43,5	5,34	7,17	39,3	580	15	9,4	9,02
	92,6	5,66	6,85	41,6	610	25	11,2	7,18
	140,0	-	-	-	-	-	-	-
	185,3	5,65	7,34	48,0	310	19	18,2	6,26
	233,6	5,84	7,37	51,0	240	16	10,61	4,00
	263,8	5,82	7,30	51,7	180	25	10,45	3,40



Tabell 6. (forts.)

Stasjon	Tid (timer)	Flow (ml/t)	pH	KOND. $\mu\text{S/cm}$	TOT-N $\mu\text{g N/l}$	TOT-P $\mu\text{g P/l}$	KOF-PERM mg O/l	Oksygen mg O <sub>2</sub> /l
5	Pt		6,83	32,1	420	31	1,6	10,85
	Start	-	-	-	270	8	-	-
	43,5	5,64	7,31	43,1	390	28	9,0	10,27
	92,6	5,18	7,08	40,4	410	16	11,0	8,20
	140,0	9,10	7,25	43,0	220	11	10,8	5,14
	189,3	5,12	7,51	50,9	210	10	10,7	4,10
	233,6	5,12	7,44	60,2	200	12	9,75	3,90
	263,8	5,12	-	-	200	10	-	4,34
6	Pt		6,67	34,6	400	18	1,6	10,5
	Start	-	-	-	290	8	-	-
	43,5	3,73	7,12	-	330	8	10,0	10,78
	92,6	4,52	7,00	39,9	390	13	11,2	9,34
	140,0	9,31	7,19	43,0	220	8	10,9	6,68
	185,3	5,47	7,48	46,5	230	8	11,1	5,44
	233,6	5,35	7,43	56,5	200	15	10,37	3,28
	263,8	5,16	-	-	220	11	9,91	2,98
7	pt		6,87	35,2	410	12	2,6	11,3
	Start	-	-	-	290	15	-	-
	43,9	6,49	7,03	37,8	310	30	9,4	11,2
	92,6	6,43	6,89	42,6	360	29	11,2	8,32
	140,0	6,50	7,13	44,8	290	12	10,8	5,96
	185,3	6,62	7,35	48,0	340	13	11,2	5,44
	233,6	6,67	7,45	57,0	280	130	10,53	2,78
	263,8	6,78	7,32	58,9	240	12	9,83	2,48

Tabell 6. (forts.)

Sta- sjon	Tid (timer)	Flow (ml/t)	pH	KOND. µS/cm	TOT-N µg N/l	TOT-P µg P/l	KOF-PERM mg O/l	Oksygen mg O <sub>2</sub> /l
1	Pt		6,90	39,4	420	25	1,5	11,4
	Start	-	-	-	450	12	-	-
	43,5	4,37	7,02	51,3	490	39	8,6	-
	92,6	5,20	6,84	38,4	350	27	10,8	6,88
	140,0	5,14	6,95	42,2	180	22	10,8	3,48
	185,3	5,40	7,48	65,6	160	20	11,2	2,06
	233,6	5,43	7,35	57,8	130	18	10,45	1,24
	263,8	5,36	-	-	200	17	9,67	1,24
2	Pt		6,88	33,2	370	19	1,6	11,3
	Start	-	-	-	340	11	-	-
	43,9	6,49	6,98	37,4	310	17	10,5	8,71
	92,6	6,48	6,81	37,9	430	12	11,2	7,70
	140,0	6,50	7,05	43,2	280	11	11,1	6,16
	185,3	6,66	7,33	44,9	250	8	17,8	4,92
	233,6	5,02	7,26	52,7	270	29	10,61	2,46
	263,8	-	-	-	-	-	-	-
3	Pt		6,44	36,6	410	29	2,4	7,05
	Start	-	-	-	300	15	-	-
	43,9	4,26	7,47	64,2	620	46	7,6	-
	92,6	5,13	7,22	36,8	600	27	9,4	8,20
	140,0	5,04	7,26	57,7	270	18	10,3	6,06
	185,3	5,12	7,36	58,5	230	22	10,8	4,72
	233,6	6,76	7,41	61,7	360	37	9,83	3,28
	263,8	5,36	-	-	280	17	8,97	3,30

Tabell 6. (forts.)

Stasjon	Tid (timer)	Flow (ml/t)	pH	KOND. $\mu\text{S/cm}$	TOT-N $\mu\text{g N/l}$	TOT-P $\mu\text{g P/l}$	KOF-PERM mg O/1	Oksygen mg O <sub>2</sub> /1
E1	Pt		felt 7,30 lab. 6,68	31,7	400	39	3,2	11,4
	Start	-						-
	19,8	5,57	6,99	33,3	450	57	16,2	-
	66,0	5,43	7,09	36,8	360	34	9,7	5,94
	116,1	5,31	7,08	41,5	220	26	8,5	4,2
	<sup>x</sup> 164,4	8,99	7,33	44,2	220	27	8,7	3,2
	211,2	5,69	7,18	47,1	570	72	10,7	3,10
	258,7	5,45	7,18	50,1	250	120	17,6	1,58
E3	Pt		felt 7,43 lab. 6,73	35,8	460	64	4,8	11,0
	Start	-						-
	19,8	6,33	6,91	34,5	460	370	23,0	-
	66,0	6,12	7,21	45,5	500	210	14,5	8,02
	116,1	6,07	7,16	39,5	350	78	12,4	7,4
	<sup>x</sup> 164,4	4,38	7,28	42,0	290	44	9,8	6,0
	211,2	6,63	7,18	43,5	250	26	10,2	3,90
	258,7	6,54	7,18	46,1	250	25	17,4	3,16
1	Pt		felt 7,12 lab. 6,94	52,7	900	94	4,0	11,55
	Start	-						-
	19,8	5,77	7,16	41,0	550	20	16,0	-
	66,0	5,41	7,14	45,0	320	20	9,7	7,08
	116,1	5,43	7,23	42,0	180	20	9,7	4,4
	<sup>x</sup> 164,4	4,01	7,31	45,0	160	18	8,9	2,4
	211,2	5,73	7,37	53,1	170	21	9,8	1,4
	258,7	5,55	7,36	58,5	170	24	17,0	3,26

Høye verdier synes å vise positiv sammenheng med høyt vanninnhold i sedimentet, og begge parametre indikerer antagelig at det organiske materialet i mindre grad er nedbrutt og stabilisert som humus. Høyere ATP-verdier viser at det er lett tilgang på næring for vekst av mikroorganismer, noe som igjen trolig skyldes høy sedimentasjon av organisk materiale produsert i innsjøen eller tilført med tilløpselvene.

#### 3.4 Mikroskopiske undersøkelser

Enkelte av prøvene fra 0-1 cm sjiktet fra stasjoner i Hamar-området og Furnesfjorden ble mikroskopert. Det karakteristiske bildet besto av algemateriale under nedbrytning og diatoméskall. Diatoméene var de samme som er karakteristiske for Mjøsa i produksjonsperioden, mens det for øvrige grupper ikke var mulig å identifisere intakte celler. Filamenter av *Oscillatoria bornetii* f. *tenuis* lot seg f.eks. ikke påvise. Av denne grunn og med tanke på de diatoméundersøkelser som alt er foretatt (Berge 1976), ble prøvene ikke bearbeidet videre.

### 4. STOFFUTVEKSLING OG OKSYGENFORBRUK

#### 4.1 Kjemiske analysedata

Kjemiske data for vann benyttet ved forsøkene er gjengitt i tabell 2. De kan sammenlignes med bunnvannets sammensetning ved prøvetaking i tabell 3. Tabellene viser at utvekslingsvannet, som ble tatt på 10 m dyp ca. 2 km SV for Hamar havn, jevnt over har hatt litt høyere men nøytral pH, 10-20% høyere total ionestyrke målt som ledningsevne, lik eller litt lavere totalnitrogen-verdi, alltid lavere og oftest mye lavere totalfosfor-verdi, og alltid vesentlig høyere innhold av oppløst organisk stoff (permanganattall). Utvekslingsvannet, som før bruk og analyse ble sterilfiltrert over membranfilter, har følgelig øket konsentrasjonsgradienten for fosfor porevann/bunnvann noe i forhold til de betingelser sedimentet var utsatt for ved prøvetidspunktet, mens gradienten for organisk stoff generelt er blitt redusert. Sedimentet er ikke blitt tilført nytt partikulært materiale under forsøket; sedimentasjonen (figur 3) er altså blokkert, og beregnede utvekslingsrater vil representere netto utskillelse av oppløste forbindelser under de rådende gradientbetingelser. For fosfor antas målingen å gi et representativt uttrykk for regenerering og frigivelse fra sedimentet.

Forholdene for nitrogenforbindelser og organisk stoff er derimot mer kompliserte, da de målte parametre er samleparametre for en rekke forskjellige kjemiske forbindelser. Totalgradienten er ikke representativ for de enkelte forbindelser. Opptak og frigivelse av disse i sedimentet er dessuten betinget av biologisk aktivitet, vesentlig bakteriell respirasjon og metabolisme. Overføringer av nitrogenforbindelser til nitrogen gass og organisk karbon til karbondioksyd umuliggjør budsjettberegninger med det analyseopplegg som sto til rådighet. Utvekslingsrater for TOT N og KOF-PE er derfor ikke beregnet, men konsentrasjonsforløpet i bunnvannet er gjengitt i tabell 6. Det samme gjelder ionestyrke (KOND) og hydroniumionkonsentrasjonen (pH).

#### 4.2 Surhetsgrad

Både i bunnvann og sedimenter ligger pH omkring nøytralpunktet, og det skjer ingen vesentlig utveksling av hydroniumioner ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ) under forsøkene. Det er imidlertid en klar tendens til økende pH fra ca. 7,0 til 7,4-7,5 idet oksygenkonsentrasjonen i bunnvannet avtar. Årsaken er trolig økende aktivitet i anaerob respirasjon ( $\text{CO}_2$  og  $\text{NO}_3^-$  respirasjon).

#### 4.3 Ionestyrke

Ledningsevnen viser liten eller ingen endring aerobt, mens det med avtagende oksygenkonsentrasjon skjer en markert frigivelse av ioner fra sedimentet. Ledningsevnen i bunnvannet øker fra ca. 40 til 55-60  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Dette kan ikke skyldes frigivelse av fosfor, men har trolig sammenheng med Fe, Mn, Ca og andre metallioner.

#### 4.4 Nitrogen

Under transporten til laboratoriet har det i bunnvannet over enkelte av prøvene (profil A) skjedd en betydelig akkumulering av nitrogenforbindelser, trolig  $\text{NH}_4^+$ . Ved aerob utveksling nærmet TOT N seg raskt normalt nivå (tabell 3), men antagelig med et visst netto opptak, som kan antas å skyldes denitrifikasjon ( $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{N}_2$  gass) i sedimentet. Med avtagende oksygenkonsentrasjon intensiveres prosessen, da nitrat kan erstatte oksygen i respirasjonen hos en rekke fakultativt anaerobe bakterier.

Ammonium som dannes ved nedbrytning av organisk stoff, oksyderes kjemisk eller mikrobielt til nitrat så lenge oksygen er lett tilgjengelig, og kan omsettes videre ved denitrifikasjon i sedimentene. Når oksygenspenningen er lav (1-3 mg O<sub>2</sub>/liter), men vannutskiftningen relativt god, kan sedimentene representere en effektiv felle for nitrat fra overliggende vannmasser (Ripl og Lindmark 1978).

#### 4.5 Organisk stoff

Det har foregått en akkumulering også av organiske forbindelser i bunnvannet under transporten til laboratoriet. Ved aerob utveksling skjer det derimot et effektivt opptak, antagelig gjennom aerob oksydasjon til CO<sub>2</sub> i sedimentets overflate. Idet oksygenspenningen avtar viser særlig de organisk rike sedimentene en netto utskillelse, antagelig lavmolekylære metabolismeprodukter fra sedimentets anaerobe sone, som ville blitt mineralisert i sedimentets toppsjikt ved bedre tilgang på oksygen.

#### 4.6 Fosfor

Tabell 7 gjengir de beregnede verdier for fosforutskillelse fra sedimentene som funksjon av forsøktiden. Tiden det tar å nå "steady state" avhenger av oksygen- og fosforkonsentrasjonen i bunnvannet ved start. For de rike, organiske sedimentene tok det opptil 180 timer eller ca. 4 ganger teoretisk oppholdstid. Sammenhengen mellom fosforutskillelse, konduktivitet, pH, oksygenkonsentrasjon og oksygenforbruk er illustrert i figur 5. Selv om det er enkelte avvik, så viser de fleste prøvene en "ideell" utvikling i konsentrasjonsforløpet mot en "steady state" situasjon. Verdiene etter 164-187 timers drift er følgelig valgt som et konservativt anslag over fosfor-regenereringen under aerobe forhold i bunnvannet og ved 10°C, som var forsøkttemperaturen. I figur 6 er det inntegnet midlere sekundærbelastning av fosfor fra sedimentene i prøveområdene, og sammenholdt med primærbelastningen via tilløpselvene (Holmen, Kolstad og Nashoug 1977) danner resultatene et interessant mønster. Områder med høy primærbelastning viser også høy sekundærbelastning.

En gradvis nedgang i oksygenspenningen (med den her anvendte metodikk er hastigheten avhengig av forbruket på sedimentoverflaten) har deretter ledet til en ofte dramatisk økning i frigivelsen av fosfor. Forsøket ble

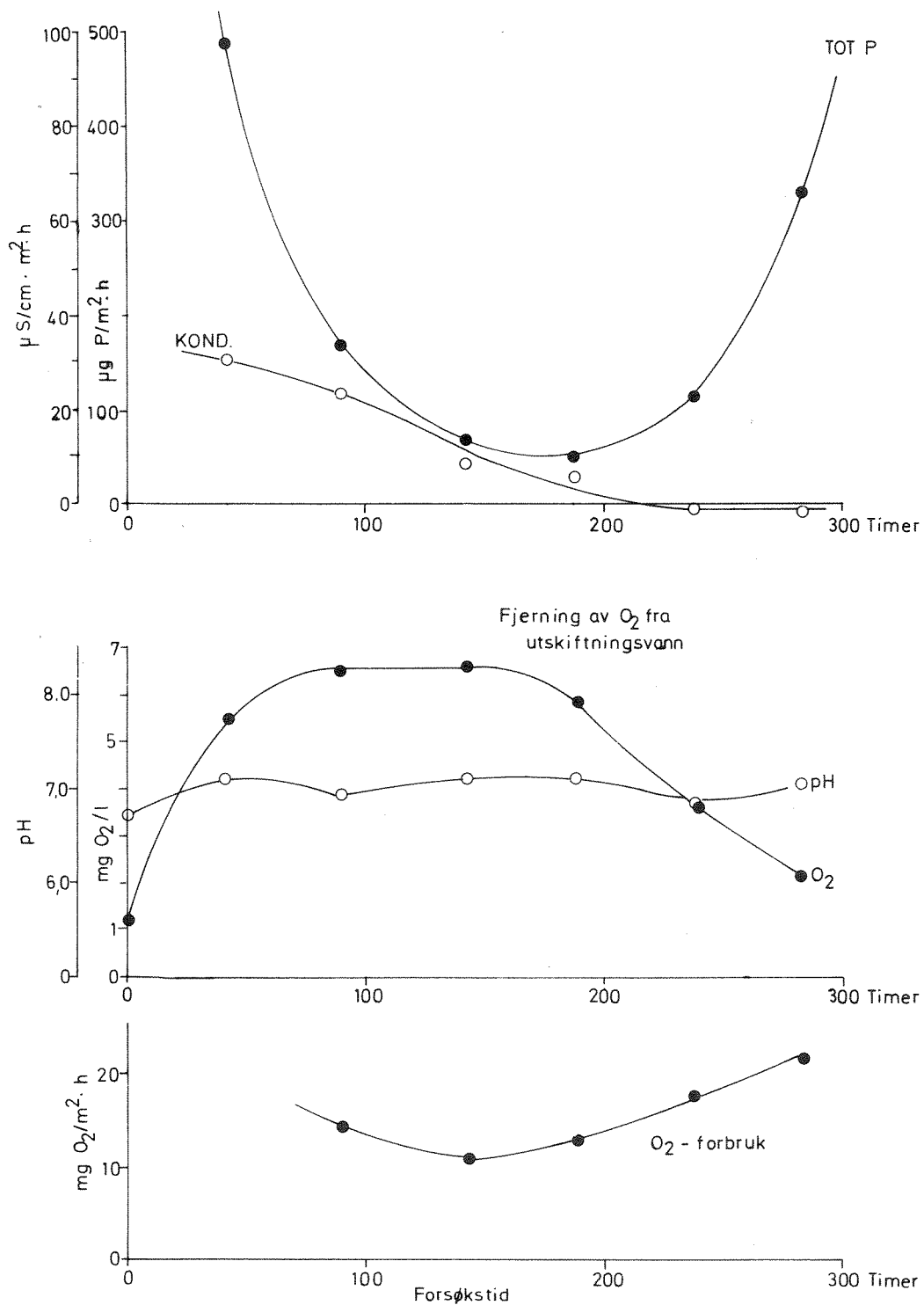


Fig. 5. Forløpet av fosforutveksling, ioneutveksling, oksygenkonsentrasjon, surhetsgrad og oksygenforbruk på sediment fra Furnessjøen (stasjon A3, 33 m).

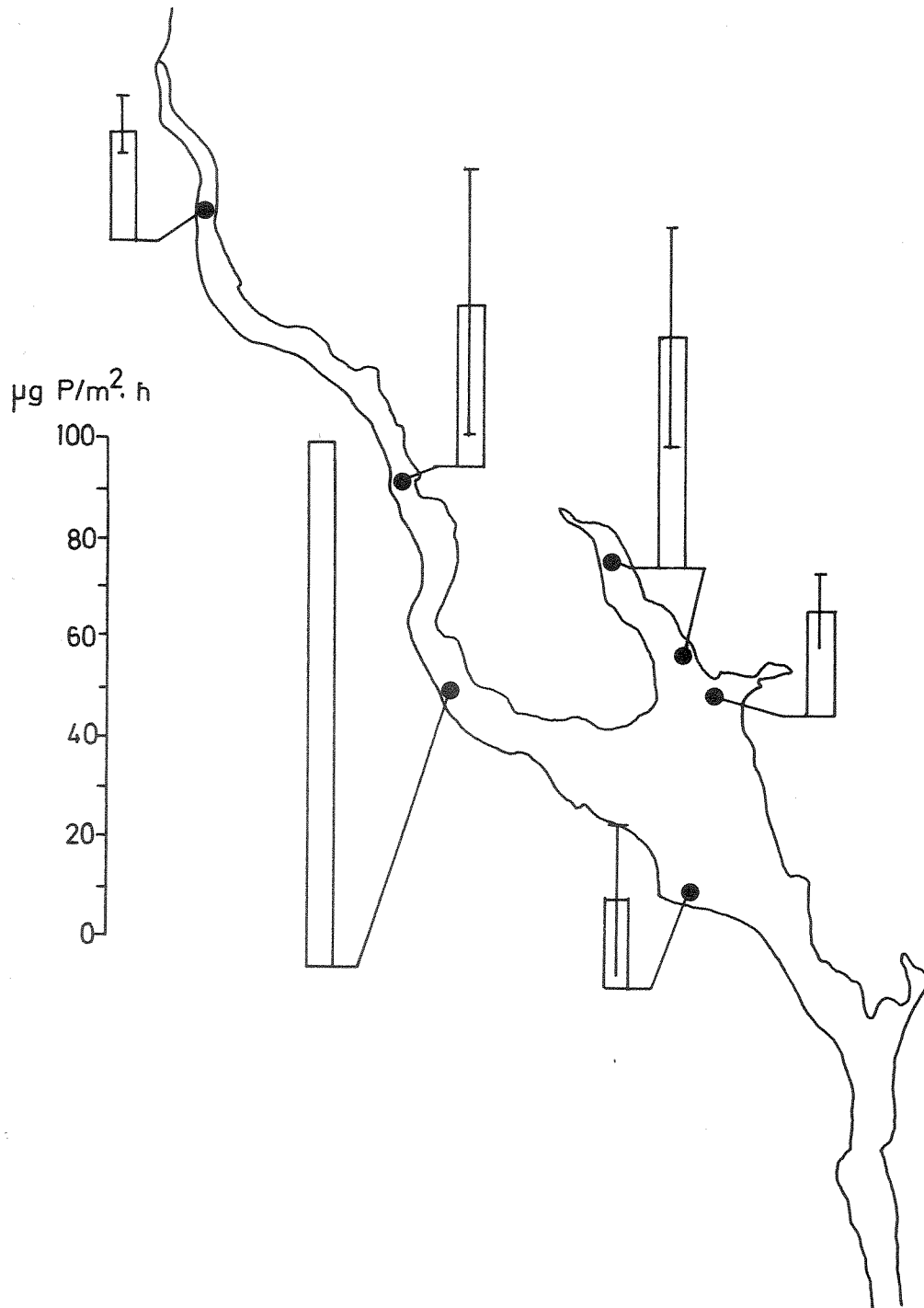


Fig. 6. Beregnede middelværdier med standardafvik for sekundærbelastning av fosfor (TOT P) fra sedimentene i prøveområdene (ca. 80 % oksygenmetning) 10 °C, steady state verdier)



imidlertid avbrutt for tidlig til at en "steady state" situasjon under anaerobe forhold er blitt etablert. En viktig observasjon er likevel at frigivelsen øker sterkt allerede ved 3-4 mg O<sub>2</sub>/liter i bunnvannet; anoksiske forhold er altså ingen betingelse. Forholdet er illustrert i figur 7. Årsaken til dette er, at da organisk rike sedimenter er sterkt oksygenforbrukende, vil det alltid eksistere en skarp redoks-gradient et lite stykke ned i sedimentet (2-5 cm). Redusert tilgang på oksygen vil løfte dette skillet mellom aerobt og anaerobt sediment til tett oppunder overflaten (2-3 mm) eller til selve overflatesjiktet. Oksyderte ferrihydroksyder, som aerobt danner en effektiv diffusjonsbarriere for fosfor, vil gradvis reduseres, frigjøre kompleksbundet fosfat og tillate en uttømming av fosfor fra porevannet (se f.eks. Wetzel 1975).

Øket temperatur fører til øket oksygenforbruk ved respirasjon, minsket oppløselighet for oksygen og øket diffusjonshastighet for fosfor. Temperaturen er ikke blitt variert under disse forsøkene, men sammenhengen illustreres godt av data fra Esrom sø (Kamp-Nielsen pers. komm.). Over en viss temperatur (ca. 13°C) øker utvekslingen raskt uten at det lenger har særlig betydning om bunnvannet er aerobt eller anaerobt. Disse forhold er det viktig å ha klart for seg når en diskuterer sedimentenes betydning som fosforkilde under algeoppblomstringer i Mjøsa.

Sammenholdt med sediment- og porevannsanalysene (kapittel 3) er det klart at det er en positiv sammenheng mellom sedimentets evne til å frigjøre fosfor og dets organiske stoffinnhold og porevannskonsentrasjon av fosfor. Fosforets kjemiske tilstandsform, binding, kompleksering og absorpsjon i et sediment er imidlertid komplisert og avhengig av en rekke fysiske, mineralogiske og kjemiske betingelser, som varierer mye inne en stor innsjø. En kan derfor ikke vente å finne enkle sammenhenger, og det er ikke grunnlag for å gå nærmere inn på dette i det eksisterende datamaterialet.

#### 4.7 Oksygenforbruk

Tabell 8 gjengir de beregnede verdier for oksygenforbruket på sedimentoverflaten. Det omfatter både kjemisk forbruk ved spontan oksydasjon av reduserte uorganiske og organiske forbindelser, og biologiske forbruk ved aerob respirasjon og nitrifikasjon. Da de reduserte forbindelsene som oksy-

	Dyp (m)	Glødetap (%)	Porevanns- konsentrasjon ( $\mu\text{g P/l}$ )
A1 Furnesfjorden	10	24,8	700
A3 Furnesfjorden	39	23,4	600
E1 Gjøvik	10	12,0	200
F6 Totenvika	24	10,9	780

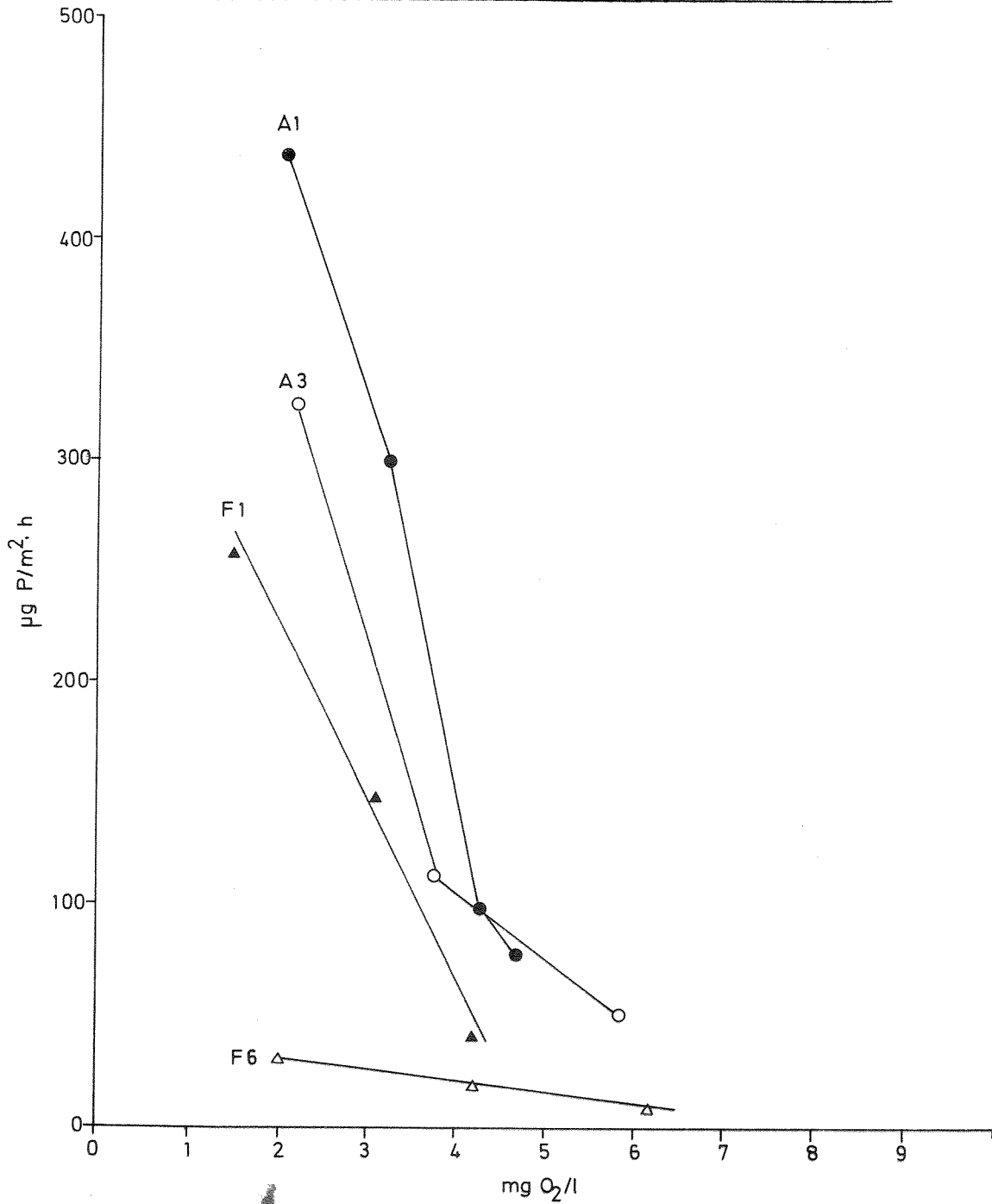


Fig. 7. Frigjøringshastigheter for totalfosfor som funksjon av fallende oksygenkonsentrasjoner på et utvalg stasjoner.

Tabell 7. Beregende verdier for fosforutveksling (TOT P) over sediment-  
overflaten som funksjon av forsøks tiden. Enheten er  $\mu\text{g P/m}^2 \cdot \text{time}$ .

Forsøks- tid (timer)		Aerobt vann inn			Gradvis mindre oksygen			Slutt- verdi $\mu\text{g O}_2/\text{l}$			
		42,5	90,8	142,7	187,2 *)	237,5	437,7				
Stasjon profil/nr.											
A	1	372,3	185,4	78,7	98,2	299,3	437,7	2,1			
	2	127,4	61,7	32,0	11,7	11,6	28,0	7,1			
	3	485,6	167,8	69,7	51,7	113,2	326,6	2,2			
	4	79,8	57,3	43,8	31,1	14,4	> 9,6	3,1			
B	1	45,0	45,0	40,2	14,2	1,5	2,4	4,6			
	2	45,9	25,9	15,2	6,5	8,8	5,2	4,6			
	3	45,2	44,3	-	-	-	-	-			
C	2	41,5	21,5	27,7	34,3	38,8	4,5	4,7			
	3	46,7	44,2	23,9	11,7	33,4	18,0	4,2			
	4	23,0	20,3	9,2	9,5	0,0	54,6	5,0			
	5	22,8	23,3	38,4	11,2	9,1	50,2	6,2			
	6	37,6	20,4	22,2	17,4	10,6	8,5	6,2			
Forsøks- tid (timer)		19,8			66,0			116,1	164,4	211,2	258,7
Stasjon profil/nr.											
E	1	111,4	58,6	40,4	43,9	147,9	246,3	1,6			
	3	919,1	496,9	172,4	180,1	50,4	47,1	3,2			
F	1	30,0	28,1	28,2	24,7	32,1	37,7	3,3			
	3	7,1	11,5	6,9	7,1	37,3	17,1	1,9			
	4	5,2	10,2	8,7	9,1	8,9	11,1	4,0			
	6	18,9	34,0	8,9	18,4	31,0	86,0	4,4			
Forsøks- tid (timer)		43,5			92,6			140,0	185,3	233,6	263,8
Stasjon profil/nr.											
G	1	55,9	41,6	30,8	28,1	23,9	21,4	1,2			
	2	26,0	13,0	10,4	2,7	44,2	-	<2,5			
	3	66,5	41,0	22,2	30,7	81,1	21,4	3,3			
	5	47,4	18,6	8,2	6,1	10,2	6,1	4,3			
	6	1,5	9,0	2,1	2,2	17,1	8,3	3,0			
	7	59,7	56,6	13,0	15,9	(328,2)	13,6	2,5			
	H	1	25,1	29,9	27,4	2,1	2,1	-	3,4		
2		29,9	38,2	6,7	11,4	13,4	15,7	1,5			
4		17,1	40,8	-	27,1	21,0	41,9	3,4			
5		33,3	70,4	24,9	25,0	11,2	6,9	1,3			
6		34,0	26,5	30,7	2,4	4,8	2,3	4,5			

\* Verdier valgt som konservativt anslag (steady state, aerobt, 10°C) over fosforregenereringen i sedimentet.

Tabell 8. Berenede verdier for kjemisk og biologisk oksygenforbruk  
( $\text{mg O}_2/\text{m}^2 \cdot \text{time}$ ) på sedimentoverflaten.

Forsøksstid* (timer)		Aerobt vann inn			Gradvis mindre oksygen			Middel
		42,5	90,8	142,7	187,2	237,5	282,4	
Stasjon profil/nr.								
A	1	-	16,0	15,7	17,1	19,7	23,0	18,3
	2	-	6,4	9,1	11,4	11,9	11,9	10,0
	3	-	14,2	10,8	12,7	17,5	21,5	15,3
	4	-	12,0	9,6	14,6	17,0	14,2	13,5
B	1	-	5,9	1,9	6,8	13,1	17,7	9,1
	2	-	9,0	6,8	10,4	14,8	16,1	11,4
	3	-	8,0	-	-	-	-	8,0
C	2	-	15,2	10,4	11,4	13,8	16,3	13,4
	3	-	10,1	8,6	-	8,2	17,6	11,1
	4	-	8,5	6,8	9,6	13,4	17,3	11,1
	5	-	7,0	2,9	7,4	11,4	13,3	8,4
	6	-	9,2	3,8	10,4	11,1	12,4	9,4
Forsøksstid (timer)		19,8	66,0	116,1	164,4	211,2	258,7	Middel
Stasjon profil/nr.								
E	1	-	14,3	14,4	12,1	5,7	12,6	11,8
	3	-	11,0	8,7	8,4	4,5	11,0	6,7
F	1	-	11,7	14,3	13,5	9,6	9,1	11,7
	3	-	9,1	10,6	9,9	7,5	13,3	10,1
	4	-	9,0	6,6	3,8	3,6	8,8	6,4
	6	-	8,9	10,7	10,7	8,6	10,0	9,7
Forsøksstid (timer)		43,5	92,6	140,0	185,3	233,6	263,8	Middel
Stasjon profil/nr.								
G	1	-	10,0	16,2	12,0	12,7	12,6	12,7
	2	8,1	10,4	13,6	7,1	9,3	-	9,7
	3	-	7,2	10,7	5,9	10,3	8,2	8,5
	5	3,5	7,3	12,7	7,2	6,6	5,7	7,1
	6	1,6	4,3	10,0	5,9	8,2	8,9	6,4
	7	1,6	8,7	14,1	5,7	11,5	12,6	9,0
	H	1	-	12,3	14,7	7,1	4,1	7,7
2		15,5	13,9	15,3	8,0	10,1	12,5	12,5
4		6,0	10,2	-	3,0	7,2	8,7	7,0
5		11,3	12,8	14,6	6,1	11,3	13,4	11,6
6		9,1	9,2	10,4	3,0	0,5	5,9	7,3

\* Målingen ble gjort i 2 uavhengige forsøksserier. Forsøksstiden og tiden mellom hver analyse varierer derfor mellom seriene som vist.

deres spontant er metabolismeprodukter fra anaerob respirasjon og fermentering, vil også dette forbruket være et uttrykk for biologisk aktivitet. Når oksygenspenningen gradvis reduseres, vil imidlertid endel av dette forbruket kunne skyldes oksydasjon av akkumulerte forbindelser, som nå frigjøres fra porevannet i større grad. Forholdet mellom oksygenforbruk og oksygenmetning er diskutert av Edberg (1976).

Forbruket varierer relativt lite, men med en viss tendens til minimum etter 143-187 timers vannutskifting, som det også fremgår av figur 5. En har imidlertid valgt å beregne middelveier og anta at disse er ganske representative ved forskjellig grad av oksygenmetning ved den valgte temperatur.

Som før nevnt øker respiratorisk forbruk med temperaturen, og en antar vanligvis økning med en faktor 1,13 - 1,04 pr. grad i temperaturområdet 5 - 25° (Edberg og Hofsten 1973). Det vil si at en ved temperaturer på 3-4°C vinterstid må anta verdier på ca. 40% av de som her er målt, mens de ved sommertemperaturer på 15-16° vil nå opp i 140%.

Med utgangspunkt i bruttoligningen for aerob respirasjon kan en anta at et forbruk på 10 mg O<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>.time tilsvarer en omsetning av 3,75 mg C/m<sup>2</sup>.time til CO<sub>2</sub> og H<sub>2</sub>O, dersom en ser bort fra oksydasjonen av redusert nitrogen og svovel i det organiske stoffet. Oksygenforbruket målt på sedimenter hentet i mars-april og inkubert ved 10° kan antas å representere et konservativt estimat av gjennomsnittet på årsbasis, da respirasjonen må antas å øke med økende sedimentering under og etter algeveksts sesongen. Omregnet til karbonenheter kan målingene gi grunnlag for et estimat av hvor stor del av årsproduksjonen i grunne områder (10-50 m) som omsettes på sedimentoverflaten.

## 5. DISKUSJON

### 5.1 Målsetning og begrensninger ved undersøkelsen

Målsetningen har primært vært å fremskaffe et dataunderlag for en vurdering av sedimentenes funksjon i innsjøens stoff- og energiomsetning, og av sedimentene som sekundær kilde for næringsalter for algevekst. For å kunne besvare dette tilfredsstillende må en sammenholde og drøfte resultatene

mot supplerende data fra undersøkelser over andre aspekter; som primærproduksjon, fiskeproduksjon og fiske, kjemiske budsjetter over tilførsler og avrenning, strøm og vannutskiftning med mere. Det har bare i begrenset grad vært mulig å gjøre dette innen rammen for denne rapporten. De vurderinger og konklusjoner som fremkommer, må derfor betraktes i lys av dette.

## 5.2 Utbredelse av næringsrike sedimenter

Undersøkelser av Hargrave og Kamp-Nielsen (1977) tyder på at erosjon og resuspensjon av sedimenter i grunnområder, på grunn av strøm og bølgeaktivitet på den ene side, og mineralisering i dype vannsøyler på den annen side, gir en sone for maksimum organisk akkumulasjon i innsjøer på mellom 15 og 40 m dyp avhengig av bassengets morfometri. Data fra denne undersøkelsen gjengitt i figur 8, viser at en i Mjøsa trolig finner et tilsvarende bilde, med en sone for maksimum akkumulering ved 15-30 m dyp. Stasjon B 1 på 8 m var tydelig erosjonspåvirket, og gav bare 2,6% glødetap i 1-5 cm sjiktet, og profilen viser forøvrig et markert maksimum ved 20-35 m dyp.

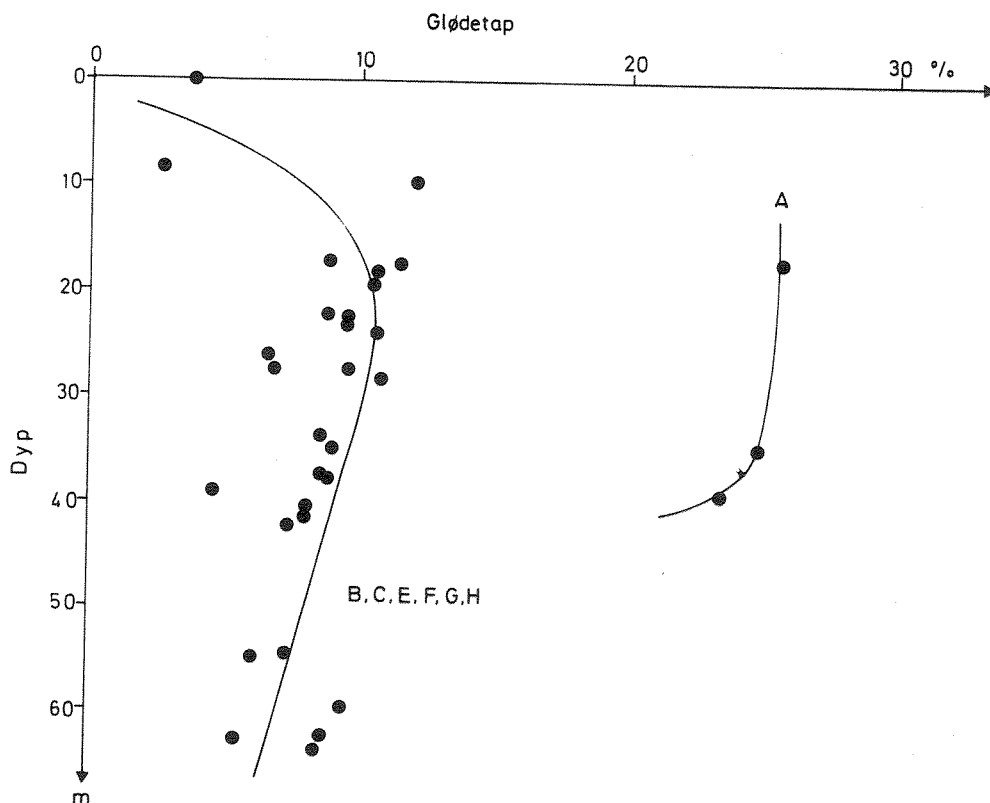


Fig. 8. Glødetap (1-5 cm sjiktet) i relasjon til vanddybden. Profil D er utelatt.

I akkumuleringssonen må lokale forskjeller antas å avspeile graden av organisk sedimentasjon fra alloktone og autoktone kilder. Sedimenter som er relativt rike på organisk stoff (8-12%) må antas å være vidt utbredt i dybdeintervallet 10-40 m i Mjøsa. Dybdesonen utgjør ca. 23% av innsjøens areal, og er svært viktig, da bunnen her står i direkte kontakt med produktive vannmasser. I den samme sonen er innholdet av fosfor og nitrogen i porevannet ca. 10 ganger høyere enn i bunnvannet over, som for fosfors vedkommende igjen har vesentlig høyere konsentrasjoner enn de fri vannmasser. Totalinnholdet av næringssalter i sedimentene har en dessverre ikke data for. Det er sterkt ønskelig å få et bedre kjennskap til utbredelse og sammensetning av organiske overflatesedimenter i Mjøsa.

### 5.3 Fosfor-regenerering i sedimentene

På årsbasis fungerer sedimentene som fosforfelle, men i sedimentet skjer det en kontinuerlig mineralisering og omvandling. Fosforet avleires i 2 hovedfraksjoner (figur 3):

- a) ikke utbyttbart, refraktilt og mineralsk fosfor
- b) utbyttbart, løst bundet og adsorbent fosfor.

Den siste fraksjonen er relativt stor og viktig i organogene sedimenter, og kan under før omtalte betingelser igjen frisettes til overliggende vann med høy hastighet.

I Mjøsa finner en særlig på sensommeren og høsten disse betingelsene tilstede helt ned mot 50 m dyp (Holtan 1977, Thendrup 1978):

- høy primærproduksjon gir mye nysedimentert organisk materiale i sedimentoverflaten, og som forbruker oksygen.
- relativt høye temperaturer (8-15°C) i det aktuelle dybdeintervallet.
- fremherskende sørlige og vestlige vinder, som setter opp svingninger i termoklinen og leder til store strømhastigheter i aktuelle dyp med mulighet for resuspensjon av sedimenter i randsonen.
- gunstige diffusjonsbetingelser over termoklinen, miksing av epilimnion og oppstrømninger av hypolimnisk vann.

Det er under forhold som disse næringstilførsel fra sedimentene kan tenkes å spille en avgjørende rolle for algeproduksjonens intensitet, varighet og artssammensetning. Det primært produksjonsbegrensende næringsstoff er etter all sannsynlighet fosfor, og en har derfor valgt å konsentrere undersøkelsen om dette, men spesielt silisium, jern og organiske nitrogenforbindelser må antas å være viktige arts- og gruppeselekerende faktorer.

Et regne-eksempel med data fra Furnesfjorden kan illustrere hvilken størrelsesorden fosfortilførselen fra sedimentene har i relasjon til andre mulige kilder. Fra Brumundas nedslagsfelt tilføres det, teoretisk beregnet, på årsbasis (Holmen, Kolstad og Nashoug 1977):

Befolkning	6,5 tonn TOT P/år
Overflateavrenning	0,4 " "
Industri	16 " "
Jord og skogbruk	1,3 " "
<hr/>	
Sum	= 24,2 tonn TOT P/år
	= 66,3 kg TOT P/døgn
<hr/>	

Sedimentene på 0-40 m dyp utgjør 60% av bunnarealet ut til Martodden, eller ca. 12 km<sup>2</sup>. Under forskjellige forutsetninger kan en ut fra utvekslingsmålingene (tabell 7, profil A) anslå følgende tilførsel fra sedimentene i dette dybdeintervallet:

80% oksygenmetning: maksimum	80 µg P/m <sup>2</sup> h	→	23 kg TOT P/døgn
	middel 46 " "	→	13 " " "
20% oksygenmetning: maksimum	440 " "	→	127 " " "

Sedkundærbelastningen fra sedimentene kan altså utgjøre fra 20% til maksimum 200 % av primærbelastningen fra Brumundas nedslagsfelt.

Direkte tilførsler kan heller ikke dekke fosfatbehovet under intense produksjonsperioder. Eksempelvis vil produksjonen på 2140 mg C/m<sup>2</sup>.døgn i Furnesfjorden den 21. juli 1976 teoretisk få dekket bare 20% av sitt fosfatbehov ved tilførsler fra land og via elver. Når konsentrasjonen av oppløst fosfor i vannet samtidig er lav og nærmest konstant, og det skjer en sterk oppbygging av biomasse som utelukker regenerering ved beiting og nedbrytning i vannsøylen i særlig grad, så må fosfatbehovet nødvendigvis dekkes ved tilførsler fra hypolimnion og sedimenter.



Gunstige betingelser for fosfortransport fra sedimenter og hypolimnion (oppstrømning av hypolimnisk vann, resuspensjon av sedimenter og høy temperatur) kan være viktige utløsende faktorer når blågrønnalgeblomstringer oppstår på sensommeren. En slik sammenheng kan muligens påvises direkte ved intensivstudier i felten.

#### 5.4 Sedimentutveksling vurdert mot primærproduksjon og fosforbudsjett

Det er vanskelig å vurdere med sikkerhet hvor representative målinger av oksygenforbruk og stoffutveksling på små sedimentkjerner er for de virkelige forhold ved innsjøens bunn. De metoder som er benyttet for prøvetaking, transport til laboratoriet og målinger, er imidlertid etter egen erfaring, de som best bevarer realistiske forsøksbetingelser. Særlig viktig er kontinuerlig vannutskiftning, slik at det kan etableres likevekt mellom sediment og overliggende vann før fosforutvekslingen måles. Ved beregninger basert på primærproduksjon og fosforbudsjett for innsjøen lar det seg gjøre å få en uavhengig vurdering av de målte verdiers representativitet. Med utgangspunkt i data fra Furnesfjorden kan en samtidig illustrere sedimentenes relative betydning i systemets stoffkretsløp.

Eksempelvis Furnesfjorden har en årsproduksjon (1976) på  $97 \text{ g C/m}^2$ , eller 1940 tonn C/år innenfor det  $20 \text{ km}^2$  store området. Antas et midlere oksygenforbruk i sedimentet over året på  $10 \text{ mg O}_2/\text{m}^2 \cdot \text{time}$ , så tilsvarer dette 657 tonn C/år nedbrutt til  $\text{CO}_2$  og  $\text{H}_2\text{O}$ , eller 34% av primærproduksjonen. Tilsvarende tall kan beregnes også for andre deler av Mjøsa. Endel av dette vil være alloktont tilført materiale, så det reelle prosenttall er trolig noe lavere, antatt ca. 20%.

Dersom disse 20% når sedimentet i form av algebiomasse, tilsvarer det rundt regnet 4 tonn P/år. Tallet tilsvarer omtrent den beregnede fosforregenerering på 4,9 tonn P/år fra 0-40 m, basert på at middelverdien under "steady state" areobe betingelser er representativ for årsgjennomsnittet. Fra nedslagsfeltet tilføres ca. 24 tonn P/år. Resirkulert fosfor utgjør følgelig vel 20% av årlig tilførsel i Furnesfjorden; i tillegg kommer resirkulering i vannsøylen. Det som resirkuleres og på årsbasis ikke akkumulerer i sedimentet eller vannmassene, må eksporteres.

Da det ikke skjer noen akkumulering i vannmassen, må resirkuleringen være av samme størrelsesorden som eksporten. Som nevnt innledningsvis, kan denne eksporten for Mjøsa som helhet anslås til ca. 30% av tilførselen. Tallene harmonerer med andre ord meget bra, og det gir en grunn til å konkludere med at måleresultatene for oksygenforbruk og sedimentutveksling er representative for de reelle verdier på årsbasis.

## 6. SAMMENDRAG OG KONKLUSJON

I perioden mars-april 1977 er overflatesedimentene i Mjøsas grunne områder blitt undersøkt med hensyn på lager av mobiliserbare næringssalter, utveksling av fosfor, mineralisering av organisk stoff og graden av organisk sedimentasjon. Det ble tatt prøver fra ialt 37 stasjoner i 8 utvalgte områder, og som dels ble analysert kjemisk og biologisk, dels bragt til laboratoriet for utvekslingsforsøk under kontrollerte betingelser.

Innholdet av organisk stoff i 1-5 cm sjiktet varierte fra 2,6 til 25,7% glødetap (i områder med fibersedimentasjon 50-60%), 8-10% er vanlige middelverdier i prøveområdene. Materialet består i stor grad av alger under nedbrytning, noe som reflekteres i høye tall for klorofyll og (mikrobiell) biomasse.

Analyseverdier for oppløst fosfat i bunnvann (10-30 cm over) og porevann i sedimentet viser markert høyere verdier enn for hypolimnion. Stasjon A3 i Furnesfjorden viser eksempelvis 600  $\mu\text{g}$  TOT P/1 i porevann og 350  $\mu\text{g}$  TOT P/1 i bunnvannet. Det eksisterer følgelig en positiv diffusjonsgradient ut fra sedimentet, som i perioder med lav oksygenmetning eller høy temperatur når diffusjonsbarrieren av jernhydroksyder i sedimentets overflate nedbrytes, kan lede til en massiv uttømmning av fosfor. Under forhold med høy oksygenmetning er prosessen langsom.

Frigjøringen av mineralisert fosfor fra sedimentet er forsøkt bestemt ved utvekslingsforsøk i laboratoriet. Middelerdiene for "steady state" og ca. 80% oksygenmetning varierer fra ca. 20-100  $\mu\text{g P/m}^2 \cdot \text{time}$ , og kan ved lav oksygenmetning (ca. 20%) i bunnvannet øke med en faktor på 5-10.

I Mjøsa er det særlig på sensommeren og høsten meget gunstige betingelser for fosforfrigjøring og transport til produktive vannmasser i visse områder, særlig kan nevnes Furnesfjorden-Hamar-Helgøya-området. Dette kan være en viktig utløsende faktor for blågrønnalgeblomstringer.

Fosforutveksling og mineralisering av organisk stoff i sedimentet er vurdert mot tall for primærproduksjon og fosforbudsjett. I Furnesfjorden kan sedimentet ned til 40 m dyp mineralisere rundt 20% av årlig primærproduksjon. Av fosfortilførselen på ca. 24 tonn P/år resirkuleres ca. 20% fra sedimentene. Tall av tilsvarende størrelsesorden kan beregnes for andre deler av Mjøsa.

En hovedkonklusjon må derfor bli at sedimentet i 10-40 m dybdeintervallet tar aktivt del i innsjøens metabolisme, og kan særlig på sensommeren og høsten, ha en meget direkte innvirkning på planktonproduksjonen, primært gjennom frigjøring av fosfor. Hva andre elementer som jern, mangan, silisium og nitrogen kan bety i denne sammenheng, har en imidlertid enda en for dårlig forståelse av.

Det er ønskelig at dette arbeidet kan bli fulgt opp av en bedre kartlegging av utbredelsen av organiske sedimenter i innsjøen, en detaljert studie av deres kjemiske sammensetning (porevann og fast stoff), intensive utvekslingsstudier under gode utvekslingsbetingelser i felten, og forsøk for å bestemme utvekslingen av andre elementer enn fosfor. Fri-  
gjøringen av jern og silisium, samt omsetninger og transformasjoner innen nitrogensyklus er spesielt viktig i denne forbindelse. Bedre kunnskap om strømforholdene i bunnære vannmasser trenges også for å kunne bruke utvekslingsmålingene på en mer kvantitativ måte, altså for beregning av stofftransport til hypo- og epilimnion under forskjellige fysisk-kjemiske betingelser.

## 7. ENGLISH SUMMARY

Lake Mjøsa is located in southern Norway; it has a total length of 117 km, area 362 km<sup>2</sup> and a maximum depth of 449 m. Although it receives heavy pollution from industries, farming and urbanization, the nutrient levels are generally very low. However, heavy algal blooms (diatoms and blue-greens) develop during summer and early spring.

Sediments in contact with epilimnion extends down to 40-50 m during summer, and underlies approx. 23% of lake surface area. This study shows that these sediments are rich in organic matter (8-27% dryweight) and nutrients (P, N) in the interstitial water. Phosphorous recycling is in the range 20-100 µg P/m<sup>2</sup>hr (80% O<sub>2</sub>, 10<sup>0</sup>), and may during periods of low oxygen (20% saturation) increase 5-10 fold. Oxygen uptake is in the range 6-18 mg O<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>hr, and sediments may be calculated to decompose 20-30% of the primary production in overlying waters. Data are also given for Fe, Mn, Ca, pH, chlorophyll a and ATP in the sediments.

In spite of the lakes overall large depth and predominating minerogenic sediments, it is concluded that the shallow water organogenic sediments may play an important role in the phosphorous and carbon cycle on a yearly basis, and particularly in the dynamics of bluegreen alga blooms in early autumn. The conditions are then good for sediment resuspension, desorption of phosphorous and transport to productive layers. Budget calculations and recent hydrodynamic investigations support this view.

## 8. LITTERATURHENVISNINGER

- Aagaard, P. og P. Jørgensen. 1976: Mjøsprosjektet. Sedimentologiske undersøkelser 1972-1974. Resultater og kommentarer. NIVA 0-91/69, delrapport 7, Oslo.
- Berge, F. 1976: Mjøsprosjektet. Paleolimnologiske undersøkelser i Mjøsa 1972-1976. NIVA 0-91/76, delrapport 5, Oslo.
- Edberg, N. og B.v. Hofsten 1973: Oxygen uptake of bottom sediments studied in situ and in the laboratory. Water Res. I: 1285-1294.
- Edberg, N. 1976: Oxygen consumption of sediment and water in certain selected lakes. Vatten 1 : 2-12.
- Hargrave, B. og L. Kamp-Nielsen. 1977: Accumulation of sedimentary organic matter at the base of steep bottom gradients, in H. Golterman (ed.); Interactions between sediments and fresh water. Proc.Int.Sediment Symp., Amsterdam, pp. 168-173.
- Holmen-Hansen, O., C.J. Lorenzen, R.W. Holmes og J.D.H. Strickland 1965: Fluorometric determination of chlorophyll. J.Cons.perm.int.Explor.Mer., 30 (1) : 3-15.
- Holmen, S.A., S. Kolstad og O. Nashoug. 1977: Teoretisk beregning av forurensningstilførsler til Mjøsa og Vormå. NIVA 0-91/69, delrapport 6, Oslo.
- Holtan, H. 1977: Mjøsprosjektet. Undersøkelser i 1976. NIVA 0-91/69, fremdriftsrapport nr. 7, Oslo.
- Kamp-Nielsen, L. 1977: Modelling the temporal variation in sedimentary phosphorous fractions; in H. Golterman op. cit.
- Laake, M. 1976: Sammenheng mellom vannkvalitet og mikrobielle prosesser i bunnsedimenter. II. Determination of ATP in aquatic sediments. NIVA D2-26, Oslo.

- Laake, M. og S. Bauck. 1976: Sammenheng mellom vannkvalitet og mikrobielle prosesser i bunnsedimenter. I. Forsøk med bunnsedimenter i et semikontinuerlig system. NIVA D2-26, Oslo.
- Reeburg, W.S. 1967: An improved interstitial water sampler. *Limnol. Oceanogr.* 12 : 163-165.
- Ripl, W. og G. Lindmark. 1978: Ecosystem control by nitrogen metabolism in sediment. *Vatten* 2 : 135-144.
- Thendrup, A. 1978: Hvilke endringer i Mjøsas temperatur- og strømforhold kan ventes som følge av en utbygging i Jotunheimen? *Vann* 4 : 325-339.
- Wetzel, R.G. 1975: *Limnology*. W.B. Saunders Comp., Philadelphia.