

*DR*

---

RAPPORT NR. 14

---



---

GUDENÅUNDERSØGELSEN  
Sundersøgelser

---

# G U D E N A U N D E R S Ø G E L S E N

1973 - 1975

## SØUNDERSØGELSER

VANDKVALITETSINSTITUTTET, ATV  
Agern Allé 11, 2970 Hørsholm

Sagsnr.: 25.4.049  
1977-09-26 - WWT-MK.

### MEDARBEJDERE:

ing. Ivar Warrer-Hansen  
civ.ing. Svend Dige Pedersen

### SAGSBEHANDLERE:

cand.scient. Ebbe Lastein  
civ.ing. Poul B. Heise

	side
INDHOLDSFORTEGNELSE	0.1
1. INDLEDNING	1.1
2. FORMAL	2.1
3. INFORMATION OM OMRÅDET	3.1
<u>3.1    UNDERSØGTE LOKALITETER</u>	3.1
<u>3.2    OMRÅDETS OPRINDELSE</u>	3.3
4. VKI'S SØUNDERSØGELSER 1974 - 1975	4.1
<u>4.1    EMNEOMFANG</u>	4.1
<u>4.2    OMFANGET AF AKTIVITETER</u>	4.2
5. UNDERSØGELSENS PRAKTISKE GENNEMFØRELSE	5.1
<u>5.1    FELTMETODER</u>	5.1
<u>5.2    LABORATORIEMETODER</u>	5.2
6. SØKEMI	6.1
<u>6.1    FORMÅL</u>	6.1
<u>6.2    BAGGRUND</u>	6.1
<u>6.3    OMFANG</u>	6.2
<u>6.4    UDVALGTE RESULTATER, BEREGNINGER             OG VURDERINGER</u>	6.4
6.4.1 De undersøgte søers opblandingsforhold	6.4
6.4.2 Primærproduktion i relation til de kemiske variable	6.8
6.4.3 Sammenhænge mellem partikulære fraktioner	6.11

6.5	<u>BESKRIVELSE AF DE UNDERSØGTE SØER</u>	6.15
6.5.1	Generelt om søerne i Gudenåsystemet	6.15
6.5.2	Almind sø	6.19
6.5.3	Brassø	6.21
6.5.4	Hald sø	6.24
6.5.5	Hinge sø	6.27
6.5.6	Viborgsøerne - Nørresø og Søndersø	6.31
6.5.7	Salten Langsø	6.35
6.5.8	Silkeborg Langsø	6.37
6.5.9	Slåen sø	6.43
6.5.10	Tange sø	6.44
6.5.11	Thorsø	6.47
6.5.12	Vedsø	6.48
6.5.13	Vessø	6.51
6.5.14	Ørnsø	6.53
7.	<u>PRIMÆRPRODUKTION</u>	7.1
7.1	<u>FORMÅL</u>	7.1
7.2	<u>BAGGRUND</u>	7.1
7.3	<u>RESULTATER</u>	7.2
7.4.	<u>VURDERINGER</u>	7.6
7.4.1	Årsproduktion	7.6
7.4.2	Phytoplanktonets lysadaptation	7.6
7.4.3	Minimumsfaktorer	7.8
7.4.4	Algesuccession/Si-begrænsning	7.9
7.4.5	Sammenligning mellem forskellige produktionsmålinger	7.13
7.4.6	Sigtedybde/chlorofyl	7.17
7.4.7	Biomassemålinger	7.20
7.4.8	Måling af kvælstoffixering	7.22
7.5.	<u>SAMMENFATNING</u>	7.24
8.	<u>SEDIMENTUNDERSØGELSER</u>	8.1
8.1	<u>FORMÅL</u>	8.1
8.2	<u>BAGGRUND</u>	8.2
8.3	<u>UDFØRELSE</u>	8.3

<u>8.4.</u>	<u>SEDIMENTBESKRIVELSE</u>	8.4
8.4.1	Prøveudtagning	8.4
8.4.2	Visuel beskrivelse og analysering	8.4
8.4.3	Resultater og kommentarer	8.7
<u>8.5.</u>	<u>UDVEKSLINGSFORSØG</u>	8.18
8.5.1	Forsøgsmetodik - kvælstof/fosforudveksling	8.18
8.5.2	Forsøgsmetodik - sedimentrespiration	8.21
8.5.3	Kvælstof- og fosforudvekslings- forsøg - resultater og kommentarer	8.22
8.5.4	Sedimentrespiration - resultater og kommentarer	8.35
<u>8.6</u>	<u>SEDIMENTATIONS- OG RESUSPENSIONSFORHOLD</u>	8.40
8.6.1	Forsøgsmetodik	8.40
8.6.2	Resultater og kommentarer	8.41
<u>8.7</u>	<u>RECENT SEDIMENTATION</u>	8.49
<u>8.8</u>	<u>TUNGMETALLER I SØSEDIMENTER</u>	8.53
8.8.1	Resultater og kommentarer	8.53
9.	<u>FAUNA- OG FLORAUNDERSØGELSE</u>	9.1
<u>9.1</u>	<u>FORMÅL</u>	9.1
<u>9.2</u>	<u>BAGGRUND</u>	9.1
<u>9.3</u>	<u>RESULTATER AF FAUNAUNDERSØGELSEN</u>	9.2
<u>9.4.</u>	<u>VURDERINGER AF RESULTATERNE FRA FAUNAUNDERSØGELSEN</u>	9.3
<u>9.5</u>	<u>PROFUNDALFAUNAENS BETYDNING FOR OMSÆTNINGEN</u>	9.6
<u>9.6</u>	<u>RESULTATER AF UNDERSØGELSEN AF PHYTOPLANKTON I SØAFLØB</u>	9.6
9.6.1	Vurdering af phytoplankton- undersøgelsen i søafløb	9.8
<u>9.7</u>	<u>SAMMENFATNING</u>	9.8
9.7.1	Søernes profundalfauna	9.8
9.7.2	Afløb Tange sø, phytoplankton og fauna	9.9
10.	<u>REFERENCER</u>	10.1

## 1. INDLEDNING

I forbindelse med Gudenåundersøgelsen 1973-75 har undersøgelser af Gudenåsystemets søer haft høj prioritet.

Disse søundersøgelser omfatter en kvalitetsbeskrivelse per 1974, idet søerne er vurderet på grundlag af de fysisk-kemiske og biologiske undersøgelser, der er gennemført på vand- såvel som sedimentprøver.

Botanisk Institut, Århus Universitet (BI) og Vandkvalitetsinstituttet (VKI) har gennemført søundersøgelserprogrammet, således at

Knudsø  
Mossø  
Ravnsø  
og Skanderborgsøerne

samt en række udvalgte søer er undersøgt af BI, og

Almindsø  
Brassø (Himmelbjergsøerne)  
Hald sø  
Hinge sø  
Salten Langsø  
Silkeborg Langsø  
Slåen sø  
Tange sø  
Thorsø  
Vedsø  
Vessø  
Viborgsøerne  
og Ørn sø

er undersøgt af VKI.

Geografisk Institut, Århus Universitet (GI) har gennemført en undersøgelse af Søbygård sø med henblik på at give en fysisk beskrivelse af sedimentforholdene her.

I nærværende rapport redegøres for de af VKI gennemførte søundersøgelser og disses resultater.

## 2. FORMÅL

Formålet med søundersøgelserne har været:

- 1) at statusbeskrive vandkvaliteten i en række af Gudenåsystemets søer, bedømt efter:
  1. Vandmassens kemiske sammensætning
  2. Planteplanktonets primærproduktion
  3. Sedimentkarakteristika
  4. Bundfaunaens sammensætning
  
- 2) at vurdere omsætningen af organisk stof og næringssalte med henblik på søernes eutrofieringsproblematik.
  
- 3) at fremskaffe materiale til brug ved opstilling af massebalancer for søerne.

Det herved fremkomne materiale kan danne grundlag for den fremtidige kontrol af vandkvaliteten i søerne og kan benyttes ved den fysiske planlægning vedrørende søernes fremtidige anvendelse og naturforvaltning.

### 3. INFORMATION OM OMRÅDET

#### 3.1 UNDERSØGTE LOKALITETER

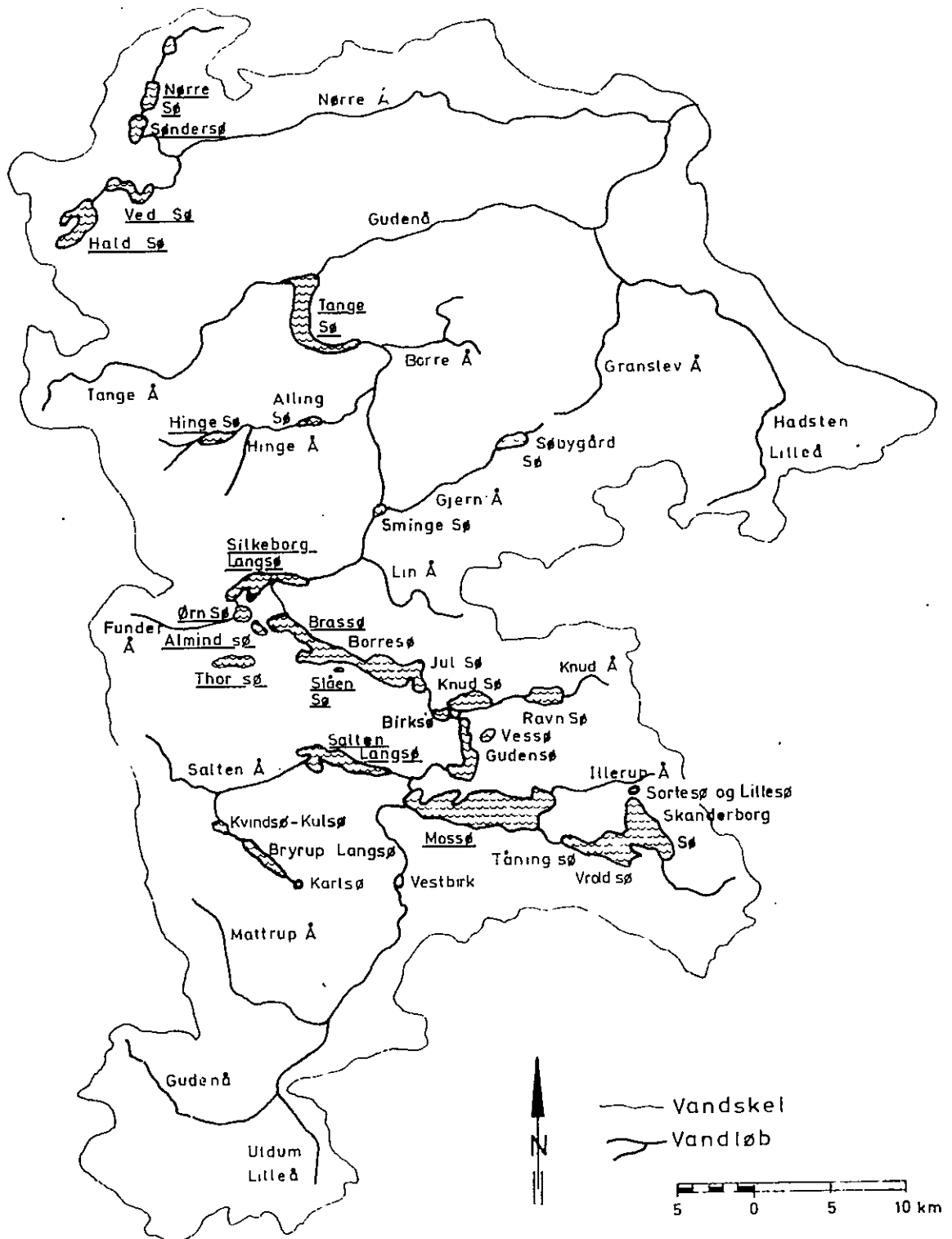
I tabel 3.1 bringes en liste over de lokaliteter, som har været omfattet af søundersøgelserne. Visse søer har været regelmæssigt undersøgt, og i andre har der kun været gennemført orienterende undersøgelser. Undersøgelsesaktiviteterne fremgår af tabel 4.1.

SØNAVN	SØNAVN
Alling sø	Ry Mølle sø
Almind sø	Salten langsø
Birk sø	Silkeborg langsø
Brassø	Skanderborgsøerne
Bryrupsøerne	Slåen sø
Borre sø	(Sminge sø)
Guden sø	Søbygård sø
Hald sø	Sønder sø
Hinge sø	Tange sø
Jul sø	Thor sø
Knud sø	Vedsø
Lillesø-Ry	(Vestbirksøerne)
Mossø	Vessø
Nørresø	Ørn sø
Ravn sø	

Tabel 3.1 Undersøgte søer i Gudenåundersøgelsen. (Undersøgelsesintensiteten har ikke været lige stor i de angivne søer).

Figur 3.1 viser beliggenheden af de undersøgte søer i Gudenåsystemet.





Figur 3.1. Kort over Gudenåsystemets søer. De intensivt undersøgte søer er afmærket ved understregning.

## 3.2 OMRÅDETS OPRINDELSE

I det følgende gives en beskrivelse af dannelseshistorien for søerne i Gudenåsystemet.

Gudenåsystemets søer er beliggende i to områder. Det midtjyske søområde og Viborgområdet.

Fælles for søerne er, at de er dannet i forbindelse med sidste istid. Israndslinien forløb i nord-sydgående retning midt gennem Jylland. Ved Viborg tog den retning mod vest. Mens isen endnu dækkede østjylland ophobedes langs israndslinien aflejringer af det materiale, smelte- vandet førte med sig. Smelte- vandet løb under isen nogenlunde vinkelret på israndslinien og op over denne. Herved dannedes de såkaldte tunneldale. Da isen smeltede bort lå den midtjyske højderyg tilbage som et levn af israndslinien. Ned fra denne med retning mod øst gik en række tunneldale. I de fleste af disse tunneldale fandtes dødishuller, hvori der dannedes søer ved dødisens forsvinden, for eksempel Salten langsø.

Efter at isen var begyndt at trække sig tilbage fra den østjyske højderyg, og mens den endnu dækkede den østlige del af Jylland og Kattegat, opstod en del af Gudenådalene. Smelte- vandet kunne ikke efter landskabets fri- læggelse passere højderyggen og måtte derfor løbe paral- lelt med denne og foran den "øjeblikkelige" israndslinie. Faldet var størst mod nord, så resultatet blev, at der øst for den østjyske højderyg, parallelt med denne og i retning mod nord, dannedes en bred smelte- vandsflod. Denne fulgte stort set den nuværende Gudenådal, men havde ikke som nu udløb ved Randers, da isen blokerede denne vej. I stedet løb smelte- vandsfloden op ad Nørre å-dalen ud i Limfjorden og videre vestpå.

Den nuværende Gudenå løber i bunden af den efterladte dal og er af langt mindre størrelse end smeltevandsfloden, hvis brinker visse steder, f.eks. efter Silkeborg langsø, lader sig ane som terrasser i landskabet.

Under isens tilbagetrækning fandt en stilstand sted lidt øst for Skanderborg. Det herved aflejrede materiale bevirkede, at først smeltevandet og senere søerne fandt afløb mod vest til Mossø og herfra til Gudenåen. Landskabet omfattende Skanderborgsøerne, Mossø, Salten langsø og Salten å-dalen udgør således een tunneldal. En anden tunneldal udgøres af landskabet omkring søerne: Ravn sø, Knud sø, Birk sø, Jul sø, Borre sø og Brassø.

Søerne ved Viborg antyder ligeledes forløbet af en tunneldal begyndende nord for Loldrup sø og fortsættende i Nørre sø, Søndersø, Vedsø og Hald sø. Ved Hald sø presses vandet under isens tilstedeværelse op ad den vestlige skrænt og fortsatte videre mod vest ud over hedesletten. Da isen trak sig tilbage, dannedes de nævnte søer i de tilbageblevne dødishuller.

Vestbirksøerne og Tange sø følger ikke samme dannelseshistorie som de ovenfor nævnte søer, idet Tange sø og Vestbirksøerne er kunstige søer, dannet ved opstemninger i forbindelse med kraftværksetableringer i Gudenåens hovedløb omkring 1920.

### 3.3 MORFOMETRISKE DATA

De vigtigste morfometriske data for hver sø er angivet i tabel 3.2.

## MORFOMETRISKE DATA FOR DE UNDERSØGTE SØER I GUDENASYSTEMET

SØNAVN	Kortlagt år	Vand- spejls- kote	Overfla- deareal	Volumen	Maximum dybde	Middelt dybde	Gen. op- holdstid	Tværsakse	Længde- akse	Opland direkte	Opland til afløb	Kortlagt af
	19'	m over D. normal 0	$\cdot 10^6 \text{ m}^2$	$\cdot 10^6 \text{ m}^3$	m	m	døgn	km	km	$\text{km}^2$	$\text{km}^2$	
ALLING	75	22,7	0,40	0,62	2,2	1,6	5,3	0,35	1,4	7	133	VIT
ALMIND	31	21,0	0,53	5,45	20,5	10,4	-	0,25	2,1	~ 1	~ 1	GI
BRAS	54	20,7	1,14	3,26	14,1	4,6	5,2	0,5	2,4	25	992	GI
BIRK	75	21,0	0,65	1,16	2,4	1,8	1,5	0,6	1,1	ca. 2	905	AT
BORRE	54	20,7	1,95	9,47	15,0	4,9	9,6	0,7	3,0	23	965	GI
GUDEN	75	22,3	1,33	3,25	4,3	2,4	4,3	0,4	3,3	3	811	AT
HALD	34	8,9	3,33	48,6	35	14,6	536	0,8	4,0	13,6	41	GI
HINGE	34	26,2	1,08	2,49	5	2,3	54	0,4	2,5	-	55	GI
HYLKE	34	23,5	3,15	22,30	16,3	7,1	(234)	1,3	2,9	-	-	GI
JUL	31	20,7	5,65	43,05	17,5	7,8	46	1,1	4,8	35	940	GI
KNUD	34	20,9	1,91	25,80	29,0	13,5	470	0,7	2,7	7,1	77	GI
MOSSØ	29	22,3	16,88	151,10	22,0	8,6	265	2,0	10,0	46	624	GI
LILLE, RY	75	21,0	0,10	0,20	5,2	1,9	-	0,2	0,45	-	-	AT
LILLE, SKANDERB.	34	23,5	0,23	0,44	3,8	1,9	-	0,3	0,8	-	-	-
NØRRE	34	11,2	1,22	8,60	12,2	7,0	274	0,6	2,1	6	37	GI
RAVN	34	21,8	1,87	27,1	33	15,3	808	0,6	2,2	17,2	56	GI
RINGKLOSTER	34	23,5	1,14	7,83	17	6,9	-	0,6	1,6	-	-	GI
RY MØLLE	75	22,3	0,41	0,73	4,8	1,8	1	0,2	1,8	8	826	AT
SALTEN L.	34	22,6	3,00	13,47	12,1	4,5	76	0,5	6,4	38	165	GI
SALTEN L., Ø	34	22,6	0,64	1,68	3,5	2,6	10	0,4	1,6	-	-	GI
SALTEN L., M	34	22,6	1,51	9,88	12,1	6,5	55	0,6	2,6	-	-	GI
SALTEN L., V	34	22,6	0,85	1,91	5,5	2,2	11	0,4	2,2	-	-	GI
SILKEBORG L., V	34	17,8	0,46	0,9	3,5	2,0	9,3	0,3	1,7	12	71	GI
SILKEBORG L., M	34	17,8	0,85	2,3	4,5	2,8	24	0,5	1,7	6	78	GI
SILKEBORG L., Ø	34	17,8	0,93	2,4	4,9	2,6	2,1	0,4	2,6	12,9	1082	GI
SKANDERBORG SØSYSTEM	34	23,5	8,62	59,9	18,8	7,6	740	-	-	-	120	GI
SLÅEN	54	20,7	0,19	1,4	11,5	7,3	-	0,2	1,0	~ 1	~ 1	GI
SMINGE	34	17,7	0,22	0,1	6,5	0,6	0,1	0,3	0,8	-	1276	GI
STORE, SKANDERB.	34	23,5	3,17	26,9	18,8	8,5	-	1,0	3,0	-	-	GI
SØBYGÅRD	72/74	34,0	0,39	0,11	2,1	1,1	9	0,12	0,3	-	-	VKI/GIAU
SØNDER	34	11,2	1,44	5,2	7,0	3,6	146	0,7	2,1	5,8	45	GI
TANGE, SYD	75	13,7	1,24	2,1	5,6	1,7	1,6	0,3	7,2	15	1570	VKI/VIT
TANGE, NORD	75	13,7	4,51	12,3	-	ca. 3	9,4	0,6	8,0	24	1707	VKI/VIT
THOR	64	22,6	0,7	2,9	7,8	4,2	-	0,2	2,0	-	12	HM/T. Høj
TÅNING	34	23,5	0,46	1,1	6,5	2,3	11,2	0,4	1,4	3	120	GI
VEDSØ	34	-	1,47	6,7	-	4,6	29	-	-	11,5	73	GI
VESSØ	-	~ 22,7	0,60	1,2	-	ca. 2	180	0,4	1,5	-	7,6	-
<b>VESTBIRK-SØERNE:</b>												
VESTBIRK	75	42,3	0,37	1,2	5,0	3,2	3,1	0,4	0,9	-	-	VT
BREDVAD	75	42,3	0,18	0,18	2,8	1,0	0,5	0,2	1,2	-	340	VT
NALDAL	75	42,3	0,68	1,3	6,1	1,9	3,4	0,2	0,8	-	-	VT
VROLD	34	23,5	0,38	1,4	7,3	3,8	15,1	0,6	0,6	-	-	GI
ØRN	34	17,8	0,42	1,7	10,5	4,1	18,3	0,5	1,1	~ 2	54	GI

FORKORTELSER: GI : GEODETISK INSTITUT, HM : HANS MATHIESEN, VKI : VANDKVALITETSINSTITUTTET, VI : VEJLE AMTSRÅD OG THORKILD HØJ, AI : ÅRHUS AMTSRÅD OG THORKILD HØJ, VII : VIBORG AMTSRÅD OG THORKILD HØJ,

GIAU : GEOGRAFISK INSTITUT, ÅRHUS UNIVERSITET.

Ø: ØSTLIGE BASSIN, M: MIDTERBASSIN, V: VESTLIGE BASSIN.

Tabel 3.2 Opstilling af de vigtigste morfometriske data for de undersøgte søer. Der er anvendt eksisterende angivelser, opmåling på kortmateriale, beregninger og i visse tilfælde skøn. Sammenhængen mellem oplandsangivelserne er følgende:

SUMMEN AF OPLANDE TIL SØINDLØB + OPLAND DIREKTE TIL SØ + SØOVERFLADE = OPLAND TIL AFLØB

## 4. VKI's SØUNDERSØGELSER 1974 - 1975

### 4.1 EMNEOMFANG

Søundersøgelsen kan emnemæssigt opdeles i delundersøgelser, omfattende:

SØKEMI (beskrevet i afsn. 6): Vertikale serier af vandprøver, oftest 2-5 pr. prøvetagningstogt, er udtaget på hver station. Desuden er der udtaget vandprøver fra visse søafløb.

PHYTOPLANKTON (beskrevet i afsn. 7): Der er udført målinger af phytoplanktonets produktion med henblik på at angive primærproduktionen på årsbasis. I forbindelse med et enkelt togt er blågrønalgernes kvælstoffixering målt. Klorofyl-a-indholdet i overfladen er målt samtidig med primærproduktionen.

SEDIMENT (beskrevet i afsn. 8): Fra alle de undersøgte søer er udtaget uforstyrrede sedimentkerneprøver. Fra 6 søer er udtaget prøver 3 gange, fra de øvrige 1 gang. Prøverne er underopdelt, og analyseresultaterne er benyttet til karakterisering af sedimentet.

Prøverne fra 6 af søerne har været underkastet iltforbrugsmålinger og udvekslingsforsøg, udført som laboratorieeksperimenter.

Sedimentfælder til opfangning af sedimenterende materiale i søerne har været opstillet i 4 perioder i visse af søerne.

SØFAUNA (beskrevet i afsn. 9): Fra de dybeste steder i søerne er optaget sedimentprøver, som er benyttet til undersøgelse af faunaens artssammensætning og en vurdering af mængden.

PHYTOPLANKTON I SØAFLØB (beskrevet i afsn. 9): I Gudensåen fra Tange sø til Fladbro er med mellemrum udtaget vandprøver, hvori planteplanktonets artssammensætning er undersøgt.

## 4.2 OMFANGET AF AKTIVITETER

De udvalgte lokaliteter fremgår af tabel 4.1, som oversigtsmæssigt angiver aktiviteterne på hver station.

	Antal st.	Sediment-udveksling	Sediment-karakterisering	Søkemi fuldt omfang	Søkemi begræns. omfang	Kemi på søafløb	Måling af PP fuldt omfang	Fauna udtaget	Sediment-målinger
Alling sø	1				X				
Almind sø	1	X	X	X			X	X	
Brassø	1	X	X	X			X	X	
Gudensø	1				X				
Hald sø	1	X	X	X			X	X	X
Hinge sø	1		X	X			X	X	X
Jul sø	1				X				
Mossø	2	X	X		X				
Nørre sø	1		X	X			X	X	
Salten langsø	3		X	X			X	X	X
Silkeborg langsø	3	X	X	X		X	X	X	X
Skanderborg-søerne	1	X	X			X			
Slåen sø	1		X	X			X	X	
Sninge sø	1				X				
Søbygård sø	1				X				
Sønder sø	1	X	X	X		X	X	X	X
Tange sø	2	X	X	X		X	X	X	X
Thor sø	1		X	X			X	X	
Vedsø	1		X	X		X	X	X	
Vessø	1	X	X	X			X	X	X
Ørn sø	1		X	X			X	X	

Tabel 4.1. Lokalitets- og aktivitetstabel, der oversigtsmæssigt angiver omfanget af søundersøgelsen.

Stationerne er placeret, hvor søerne er dybest og så nær midten som muligt. I de fleste af søerne vil 1 station være repræsentativ. I 3 af søerne er det dog fundet nødvendigt at placere mere end 1 station.

Søundersøgelsen er gennemført i togter, hver af en uges varighed. Ved prøvetagningen har deltaget 2 medarbejdere. I hvert togt besøgte 4-5 stationer pr. dag.

Prøverne transporteredes til laboratoriet, og analyseringen påbegyndtes senest 5 timer efter 1. prøvetagning.

På togterne er der udtaget vand- og sedimentprøver (herunder faunaprøver) samt foretaget vertikale målinger i vandsøjlen af lys, temperatur og ilt.

Der er udført prøvetagningstogter i følgende uger:

1973 : Uge 37 og 38

1974 : Uge 9, 13, 17, 20, 24, 28, 31, 34, 37,  
39 og 42

1975 : Uge 12 (sedimentprøvetagning)

På vandprøverne er udført kemiske analyser og måling af phytoplanktonets produktion. I forbindelse med et enkelt togt er der udført måling af blågrønalgenes kvælstoffixerende evne.

Af sedimentprøverne er nogle anvendt til undersøgelse af sedimentets evne til at udveksle kvælstof og fosfor med den ovenliggende vandmasse. Andre prøver er opdelt, og indholdet er analyseret til karakterisering af sedimentet.

## 5. UNDERSØGELSENS PRAKTISKE GENNEMFØRELSE

### 5.1 FELTMETODER

TEMPERATUR- OG ILTMÅLINGER er foretaget i felten med iltmåler af typen YSI-4. Kalibrering er foretaget ved 1-2 gange pr. dag på udtagne vandprøver at måle iltindholdet ved titrering efter Winklermetoden.

VANDPRØVER er udtaget med en 2,5 liter Rüttner-vandhenter. Prøvetagningsdybderne er udvalgt i forhold til forekomsten af eventuelt springlag i søerne, indikeret ved ilt- og temperaturmålingerne. Der er altid udtaget en prøve i overfladen og en ved bunden. Findes et springlag, er der desuden udtaget prøver lige over og lige under dette.

LYSMÅLINGER er foretaget med et udstyr bestående af:

1 undervandsfotometer i et vandtæt hus beregnet til nedsenkning (på fotocellen kan placeres diverse optiske filtre)

1 referencefotometer placeret i båden

2 måleinstrumenter.

Lysmålingen foregår ved på undervandsfotometret at påsætte et grønfilter samt en opalskive. Der måles i % af overfladebelysningen. Den dybde (i meter), hvori 10 % af overfladebelysningen resterer, betegnes SY. Parallelt med lysmålingerne foretages en måling af sigtedybden med en hvid skive med en diameter på 30 cm (VI).



SEDIMENTPRØVER. Sedimentprøveudtagningen er udført med en "Kajak"-bundhenter. Et ca. 80 cm langt plexiglasrør (diameter 5 cm) skrues i et mundstykke påmonteret blyvægte. Plexiglasrøret trænger et stykke ned i sedimentet bestemt af vægten af blyvægtene. Når bundhenteren trækkes op, lukker en ventil (plexiglasrøret foroven), og den udskårne sedimentprøve bliver siddende i røret. Efter optagningen forsynes røret med prop i begge ender. Prøven regnes for at være uforstyrret, og en eventuel lagdeling vil derfor direkte kunne observeres.

SEDIMENTATION. Sedimentationsfælder har været udsat i 6 af søerne. Sedimentationsfælderne er opbygget, som vist på figur 8.6.1.

## 5.2 LABORATORIEMETODER

På de indsamlede vandprøver udførtes straks efter hjembringelsen til laboratoriet kemiske vandanalyser og målinger.

PLANTEPLANKTONETS PRIMÆRPRODUKTION (PP). Til målinger af planteplanktonets primærproduktion er benyttet en inkubator, som i princippet er et termostateret akvarium med mulighed for en konstant belysning af indholdet. Målingerne udføres under laboratorieforhold. Det er derfor nødvendigt at omregne de fundne produktionsværdier til naturlige forhold. Dette gøres ved anvendelse af EDB. Målingerne af planteplanktonets produktion er udførligt omtalt i reference / 1/. Målemetoden er internationalt benyttet og har gentagne gange været interkalibreret med andre metoder, hvori der anvendes  $^{14}\text{C}$ . Dette gælder specielt in-situ-metoden, hvor exponeringen foretages på prøvetagningsstedet i et halvt soldøgn. Inter-

kalibreringen er foretaget både i fersk- og saltvand. Der er ikke konstateret nævneværdige forskelle.

KVÆLSTOFFIXERING. Det er en forudsætning for pålideligheden, at målingerne foretages mindre end 1,5 time efter prøveudtagningen. Ved målingen anvendes acetylenreduktionsmetoden, / 2/. Metoden blev før anvendelse i Gudenåundersøgelsen afprøvet på vand fra Lyngby sø, hvor en fixering blev påvist. Metoden har ligeledes været benyttet ved undersøgelse af fynske søer, / 3/. Fremgangsmåden ved målingerne er beskrevet i bilag nr. 2. Detektionsgrænsen er  $3 \times 10^{-3} \text{ gN}_2/\text{m}^3 \cdot \text{døgn}$ .

UDVEKSLINGSFORSØG. Der blev benyttet et system, hvori en vandmængde ved hjælp af en pumpe blev cirkuleret hen over en sedimentoverflade. Der blev udført 2 slags forsøg, aerobe og anaerobe. Forsøgsopstillingen henstod i mørke ved en temperatur på 12-14 °C. I Danmark har metoden været benyttet ved undersøgelser blandt andet i Lillesø ved Skanderborg og i Esrom sø, / 4/ og / 5/. Der har været udført målinger af sedimentets iltforbrug ved kontinuert at registrere iltkoncentrationen i et lukket, langsomt cirkuleret system.

SEDIMENTKARAKTERISERING. Der er fra undersøgelseslokaliteterne udtaget sedimentsøjler 1-3 gange, som er blevet opdelt i horisontale skiver. Fra hver skive er materiale udtaget til analysering. I sedimentkarakteriseringen indgår også en vurdering af sedimentets horisontale ensartethed omkring prøvetagningsstedet og en vurdering af den anvendte analysenøjagtighed.

KEMISKE ANALYSER. De vandkemiske analyser, herunder klorofyl-a, er udført i henhold til VKI's standardanalyseforskrifter, beskrevet i / 6/ og / 7/. Ved analyseringen har der været anvendt en Technicon-autoanalyser til måling af:

N-salte og totalindhold

P-salte og totalindhold

Si

Hvor der er anført filtrering af prøver, er dette udført ved brug af GF/C-filtre: glasfiberfiltre.

FAUNAPRØVER. Prøverne er i laboratoriet udsorteret ved anvendelse af en sukkervandsopløsning.

## 6. SØKEMI

### 6.1. FORMÅL

Formålet med de vandkemiske målinger er dels at statusbeskrive vandkvaliteten i en række af Gudenåsystemets søer udfra vandmassens kemiske sammensætning, og dels at fremskaffe materiale til brug ved opstilling af massebalancer for udvalgte søer.

Endelig er det formålet at fremskaffe data, der kan benyttes ved en vurdering af produktion og omsætning af organisk stof i de undersøgte søer.

### 6.2. BAGGRUND

De tilførte næringsstofmængder og fordelingen af disse danner grundlag for fastlæggelse af en sø's trofigrad, idet næringsrigdom og algevækst afspejles gennem vandets koncentrationer af næringsstoffer. Sammenholdes en sø's hydrauliske forhold med den årstidsmæssige variation og vertikalfordeling af næringsstoffer fås et grundlag til vurdering af omsætningsforløbet af organisk stof i en sø.

Det er således muligt ved at sammenholde vandkemi med algernes primærproduktion at vurdere om næringsstoffer, især fosfor eller kvælstof er begrænsende for algevæksten. På dette grundlag vil forskellige stofkilders betydning for eutrofieringstilstanden i en sø kunne vurderes.

## 6.3. OMFANG

Undersøgelsens praktiske gennemførelse herunder prøve-  
tagningstidspunkter er beskrevet i afsnit 4.2. I for-  
bindelse med søundersøgelserne er følgende variable og  
processer målt:

Kvælstoffraktioner: (mg/l)

UN: summen af opløste kvælstofsalte ( $\text{NH}_3 + \text{NO}_2 + \text{NO}_3 - \text{N}$ )

TN: total kvælstof

part N: Partikulært kvælstof

Fosforfraktioner: (mg/l)

PO:  $\text{PO}_4 - \text{P}$

TP: total fosfor

part P: partikulært fosfor

COD: (mg/l)

part O: partikulært kulstof angivet ved COD-perm.

CH: (mg/l)

klorofylindhold

OO: (mg/l)

opløst ilt

SI: ( $\mu\text{g/l}$ )

Siliciumkonc.

TF:

temperatur ( °C )

G-24-MAX:

Værdien for et døgn bruttoproduktion i den  
dybde, hvor den største bruttoproduktion  
pr.  $\text{m}^3$  søvand findes i det pågældende  
observationsdøgn -  $\text{mg C/m}^3/\text{dg}$ .

VI:

sigtedybde i meter

SY:

den dybde, hvori 10% af overfladebelysningen  
(det grønne lys) resterer.

PP:

algernes primærproduktion pr. m<sup>2</sup> søoverflade  
pr. dag - g kulstof/m<sup>2</sup>/dg.

Ovennævnte måleresultater foreligger i kurveform i bilag 1  
for følgende søer:

Almind sø:	ALM	
Brassø:	BRA	
Hald sø:	HAL	
Hinge sø:	HNG	
Nørre sø:	NRS	
Salten langsø:	SAL	(2 st)
Silkeborg langsø:	SIL	(3 st)
Slåen sø:	SLÅ	
Søndersø:	SØN	
Tange sø:	TAN	(2 st)
Thorsø:	THO	
Vedsø:	VED	
Vessø:	VES	
Ørnsø:	ØRN	

I Salten langsø, Silkeborg langsø og Tange sø har der været benyttet henholdsvis 2, 3 og 2 målestationer (svarende til den naturlige bassininddeling).

## 6.4. UDVALGTE RESULTATER, BEREGNINGER OG VURDERINGER

### 6.4.1. DE UNDERSØGTE SØERS OPBLANDINGSFORHOLD

Af de undersøgte søer er der ved undersøgelserne 1974 fundet temperaturspringlag og deraf følgende iltspringlag i følgende søer:

Almind sø

Hald sø

Nørre sø

Slåen sø.

(I Ørnsø er der tidligere registreret springlag /11/).

Årsvariationen i temperatur ved overflade og bund er vist i fig. 6.1. Ved at betragte figuren ses, at temperaturdifferencen ved overflade og bund kan være op til ca. 13°C.

I tabel 6.1. er årsvariationen i temperatur ved overflade og bund vist for samtlige undersøgte søer. Det ses, at i de søer, hvor der intet temperaturspringlag dannes, er differencen fra bund til overflade sjældent over 1%, hvilket tyder på, at den vertikale opblanding er god i disse søer. En følge af et temperaturspringlag er dannelsen af et iltspringlag. I tabel 6.2. er årsvariationen i opløst ilt ved overflade og bund angivet. Ved at betragte tabellen ses, at i søer med temperaturspringlag er iltmætningen i perioder meget lav, enten 0 eller få procent. I de fleste søer er der i overfladen iltindhold på omkring 100% eller overmætning. I Tange sø er der i ugerne 28, 31, 34 og 37 imidlertid et lavt iltindhold i både overflade og bund. Dette forhold skyldes, at Gudenåens iltindhold og indhold af organisk stof har direkte indflydelse på iltforholdene i selve Tange sø.

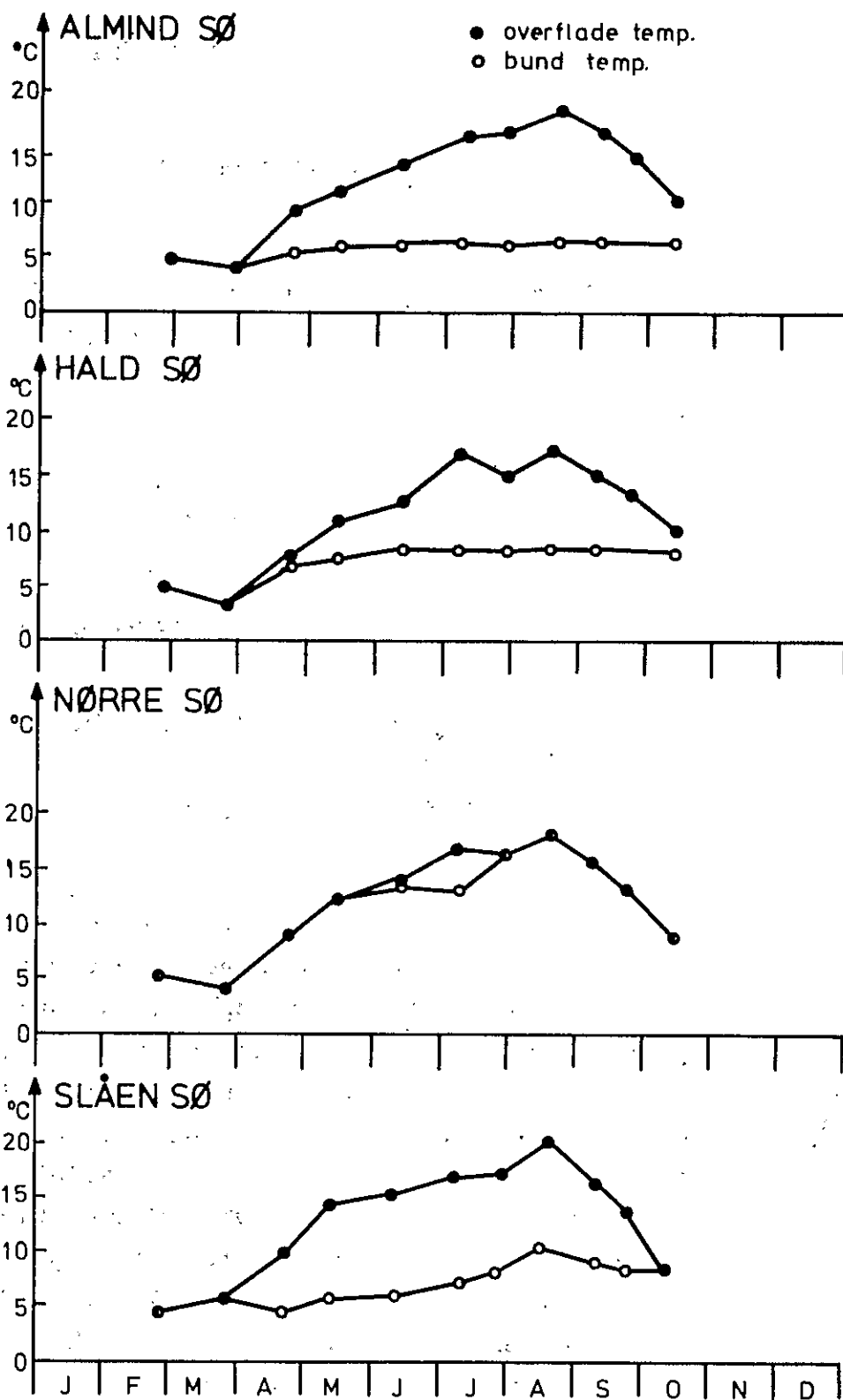


Fig. 6.1.

Figuren viser temperaturforløbet i 4 søer i overfladen og bunden.



UGE	9		13		17		21		24		28		31		34		37		39		42	
SØ																						
Almind	4,2	4,6	3,7	3,5	9,2	5,0	11,0	5,2	13,5	5,5	16,1	6,2	16,5	6,0	18,6	6,6	16,5	6,0	14,2	6,0	10,1	5,8
Bras	4,3	4,6	4,0	4,0	10,3	9,6	12,0	9,9	13,8	13,3	16,2	16,2	16,5	16,3	18,6	17,5	16,5	16,0	14,0	13,6	14,0	8,8
Hald	4,9	4,6	3,2	3,2	7,7	6,0	11,0	7,1	12,5	8,0	17,0	10,0	15,0	8,0	17,5	8,0	15,0	8,0	13,5	8,0	10,0	8,0
Hinge	4,6	5,3	5,5	5,5	10,1	10,1	12,0	12,0	13,8	13,5	16,5	16,5	15,1	15,1	18,0	18,0	13,8	13,8	11,7	11,5	6,1	5,8
Nørre	5,1	4,8	4,0	4,0	8,8	8,1	12,2	10,0	14,0	13,4	17,0	13,0	16,5	16,5	18,1	17,1	15,5	15,5	13,5	13,2	8,8	8,6
Salt 1. I	5,2	4,7	4,5	4,2	9,8	9,8	11,7	11,4	13,2	13,8	16,6	16,6	16,8	15,8	17,4	15,9	15,0	15,0	13,8	13,6	7,2	7,2
Salt 1. II	5,3	5,3	5,0	5,0	10,0	10,0	12,3	12,0	13,3	13,0	16,8	16,8	16,5	16,5	17,3	16,7	14,5	14,5	12,8	12,8	7,5	7,5
Sil 1. I	6,4	5,5	5,7	5,5	12,0	11,5	13,0	13,0	14,0	13,2	16,5	16,0	17,0	16,5	16,9	16,9	14,1	14,1	12,0	12,0	7,0	7,0
Sil 1. II	6,7	5,4	5,1	5,1	11,5	11,0	12,2	12,2	13,0	13,0	16,2	15,3	17,0	16,3	17,6	17,6	15,0	15,0	13,0	13,0	8,3	8,3
Sil 1. III	5,7	5,2	5,2	5,1	10,8	10,8	12,2	12,2	13,8	13,5	16,3	16,1	17,0	16,0	17,5	17,5	15,1	15,0	13,0	13,0	8,5	8,5
Silken	4,3	4,7	4,6	4,1	9,9	5,5	13,1	5,8	15,0	7,0	16,8	8,0	16,5	8,1	18,9	10,6	16,0	9,0	13,6	8,8	9,2	9,1
Søn	5,5	5,3	4,8	4,8	11,0	11,0	13,0	12,2	15,0	14,8	17,2	16,7	16,5	16,5	18,0	17,8	15,0	14,9	12,5	12,3	8,0	7,2
Tange I	5,1	4,7	4,9	4,9	10,0	10,0	12,0	12,0	14,0	13,6	16,2	16,2	15,3	15,1	17,9	17,2	14,0	14,0	12,0	12,0	6,8	6,8
Tange II	5,0	5,6	5,2	5,2	10,3	10,3	12,0	12,0	14,2	14,2	16,4	16,4	16,0	15,8	18,8	18,8	14,0	14,0	12,1	9,1	6,5	6,5
Thor	5,2	5,1	5,0	5,0	10,2	9,0	13,8	12,2	13,8	13,3	16,2	16,0	17,0	17,0	18,2	17,5	16,0	15,5	13,5	13,2	8,0	8,0
Ved	5,2	5,2	4,3	4,3	10,9	10,9	13,0	11,5	14,5	14,5	18,0	16,5	16,8	16,5	18,4	17,4	15,5	15,5	13,0	13,0	8,0	8,0
Ves	4,4	4,7	4,8	4,8	-	-	12,9	11,7	15,5	14,5	16,9	16,9	17,0	16,2	18,4	17,5	16,0	15,5	12,9	12,9	8,0	8,0
Ørn	5,7	5,6	6,0	5,2	10,2	8,5	13,6	12,8	12,5	12,0	15,8	15,8	15,8	15,8	16,9	15,1	14,0	13,2	12,0	11,5	6,6	6,5

Tabel 6.1.

Overflade- og bundtemperaturen i de nævnte søer i undersøgelsesperioden. Overflade-temperaturen er anført til venstre og bundtemperaturen til højre i hver rubrik.

UGE \ SØ	9		13		17		20		24		28		31		34		37		39		42	
Almind	81	79	101	100	100	78	109	68	100	35	100	13	94	6	103	0	101	0	100	1	100	9
Bras	97	98	125	121	100	85	110	42	100	83	100	91	94	80	101	65	101	85	100	82	97	97
Hald	87	86	100	100	116	94	113	79	104	-	145	2	103	0	106	0	100	0	100	0	100	5
Hinge	97	95	114	114	103	103	110	110	95	100	113	-	104	-	128	-	103	-	100	97	107	90
Nørre	97	98	106	108	103	91	90	63	100	87	103	1	118	114	82	85	100	96	100	90	90	89
Sal. 1. I	97	99	114	107	100	97	100	95	100	94	115	111	106	66	96	63	100	94	100	87	100	99
Sal. 1. II	100	100	103	103	100	100	103	102	100	83	109	109	100	96	108	86	100	89	100	98	100	98
Sil. 1. I	100	98	109	103	100	97	138	138	100	80	164	142	145	127	120	120	100	100	100	99	100	99
Sil. 1. II	107	107	107	107	100	92	111	111	100	83	144	108	114	102	65	65	100	100	100	96	100	100
Sil. 1. III	117	113	113	107	105	105	106	106	100	97	164	142	123	97	85	85	163	77	100	91	94	118
Slåen	104	105	98	97	100	52	118	12	100	7	99	7	101	5	104	1	93	7	100	4	100	102
Sønder	90	87	106	105	94	94	82	81	100	98	144	115	101	99	100	92	100	94	100	81	100	90
Tange I	82	80	101	101	100	98	137	137	143	98	-	-	44	49	59	31	48	48	100	64	100	100
Tange II	93	71	126	124	100	100	139	139	147	147	33	33	91	86	123	85	80	80	100	94	68	65
Thor	98	97	105	105	125	103	124	108	100	86	99	77	96	96	107	53	89	85	100	95	86	84
Ved	119	-	118	118	97	91	102	93	105	105	100	61	101	96	112	96	100	-	100	-	83	78
Ves	107	99	104	104	-	-	116	101	119	103	94	94	108	80	136	72	89	74	100	100	100	86
Ørn	85	79	109	105	138	96	172	159	102	82	100	100	103	99	100	25	100	64	100	82	100	99

Tabel 6.2.

Arsvariation af iltmætning i overflade og ved bunden af de nævnte søer. Overfladeiltindholdet (%) er i hver rubrik anført til venstre, og iltindholdet (%) ved bunden til højre.

## 6.4.2. PRIMÆRPRODUKTION I RELATION TIL DE KEMISKE VARIABLE

Søers trofigrad kan angives på basis af phytoplanktonets produktion på årsbasis (PP). En inddeling af Gudenå-søerne efter PP er foretaget i afsnit 7. I dette afsnit vurderes muligheden for at foretage en tilsvarende inddeling på grundlag af kemiske parametre, angivet som årsgennemsnit for hver sø.

Til vurdering af en eventuel korrelation mellem kemiske parametre og primærproduktion er der udført lineære regressionsanalyser. De anvendte parametre og tilstandsvariable er:

- PP: primærproduktion på årsbasis ( $\text{gC}/\text{m}^2/\text{år}$ )  
 CH: klorofyl-a, årsgennemsnit ( $\mu\text{g}/\text{l}$ )  
 TN: total kvælstof, årsgennemsnit ( $\text{mgN}/\text{l}$ )  
 TP: total fosfor, årsgennemsnit ( $\text{mgP}/\text{l}$ )  
 PE: kemisk iltforbrug med permanganat, årsgennemsnit ( $\text{mgO}_2/\text{l}$ )

Benyttes samtlige data (sæt af 18 værdier. Hver værdi er et gennemsnit af 11 målinger fordelt over et år), findes følgende sammenhænge:

---

 KORRELATIONSANALYSE - SAMTLIGE DATA
 

---

CH = 0,29	PP + 27,72		$r^2 = 0,92$
TN = 0,004	PP + 0,029	PP = 158 TN + 33	$r^2 = 0,64$
TP = 0,0006	PP + 0,022	PP = 799 TP + 93	$r^2 = 0,50$
PE = 0,014	PP + 2,25	PP = 38 PE + 17	$r^2 = 0,53$
TP = 0,137	TN - 0,003	TN = 4,5 TP + 0,46	$r^2 = 0,62$
PE = 3,07	TN + 1,65	TN = 0,219 PE + 0,024	$r^2 = 0,67$
PE = 6,05	TP + 2,72	TP = 0,035 PE - 0,025	$r^2 = 0,56$

---

Ovenstående viser de beregnede regressionsligninger. Først er der udført en regression af den ene af 2 tilstandsvariable i relation til den anden, og dernæst er en regression udført, hvor tilstandsvariableerne er ombyttet. Korrelationskoefficienten

$r^2$  er desuden anført. Det ses, at der er en god korrelation mellem CH og PP, hvorimod de øvrige korrelationskoefficienter, når alle søer betragtes, er ret små.

Det viser sig, at et mindre antal værdier er årsag til, at korrelationskoefficienterne får lave værdier. De søer, der er repræsenteret ved de ekstreme værdier og derfor af en eller anden årsag skiller sig ud fra "gennemsnitssøer", udgør en mindre del af alle de undersøgte søer. De 7 regressionsanalyser gennemføres på ny efter en frasortering af "atypiske" søer. Atypisk er en sø, hvis den i 3 eller flere af de 7 regressionsanalyser optræder med værdier der ligger langt fra gennemsnittet. Disse søer er: Hald sø, Hinge sø, Søndersø, Vedsø og Vessø.

På data fra de resterende søer udførtes herefter fornyede regressionsanalyser, og følgende resultater fandtes:

KORRELATIONSANALYSE - UDVALGTE DATA			
CH = 0,29	PP + 27,72		$r^2 = 0,92$
TN = 0,004	PP + 0,27	PP = 200 TN - 4	$r^2 = 0,77$
TP = 0,0005	PP + 0,03	PP = 1520 TP + 4	$r^2 = 0,80$
PE = 0,013	PP + 2,02	PP = 64 PE - 89	$r^2 = 0,81$
TP = 0,13	TN - 0,004	TN = 7,3 TP + 0,09	$r^2 = 0,94$
PE = 2,9	TN - 1,6	TN = 0,3 PE - 0,2	$r^2 = 0,80$
TP = 0,04	PE - 0,04	PE = 21,4 TP + 1,8	$r^2 = 0,81$

Alle regressioner ses nu at være karakteriseret ved værdier af  $r^2$  større end 0,77. Dette er en tilfredsstillende koefficient, der sikrer, at der er korrelation, og at denne ligger nær ved de anførte ligninger.

Med det antal datasæt, 13, der benyttes ved ovenstående analyser (nemlig 18 ÷ frasorterede sødata ~ 5), kan der beregnes konfidensintervaller for  $r^2$ , når det er givet, at en korrelation eksisterer. Disse grænser er opstillet i tabel 6.3. Grænserne er angivet på 95% signifikansniveau.

$r^2$	$r^2$ forventet		TILSTANDSVARIABLER
	NEDRE GRÆNSE	ØVRE GRÆNSE	
0,77	0,38	0,92	TN/PP
0,80	0,45	0,93	TP/PP
0,81	0,48	0,94	PR/PP
0,94	0,94	> 0,98	TP/TN
0,80	0,45	0,93	PE/TN
0,81	0,48	0,94	PE/TP

Tabel 6.3.

Signifikansgrænser på 95% niveau.

Antal data pr variabel: 13.

Det skal bemærkes, at intervallerne for  $r^2$  ville blive indsnævret hvis der for hver variable ikke havde været benyttet 13, men 13 x 11 data (svarende til samtlige målinger). Samtidig ville korrelationerne dog formindskes.

Det ses således, at der er nøje sammenhæng mellem klorofyl-a indholdet og primærproduktionen på årsbasis for alle de undersøgte søer, og at der med visse undtagelser også er god sammenhæng mellem indholdet af total fosfor og total kvælstof. Mellem primærproduktionsværdierne på årsbasis og totalindholdet (årgennemsnit) af fosfor og kvælstof, er der rimelig lineær korrelation for et begrænset antal søer.

### 6.4.3. SAMMENHÆNGE MELLEM PARTIKULÆRE FRAKTIONER

Vandanalyser er udført dels på ufiltreret, og dels på filtreret prøve. Det er således muligt at beregne de partikulære fraktioner af oxiderbart stof (part.O), fosfor (part.P), kvælstof (part.N) og klorofyl-a (CH).

Partikulært stof bestående af alger, vil være inkluderet i disse fraktioner, der således vil være et biomasse-mål.

Til vurdering af en eventuel korrelation mellem disse parametre er der udført lineære regressionsanalyser. De anvendte parametre er årsgennemsnit for overfladevandet af de undersøgte søer. Der findes følgende sammenhæng (part.O, -N og -P er mg/l, CH er µg/l):

---

#### KORRELATIONSANALYSE - "SAMTLIGE" DATA

---

Part.N = Part.P · 4,7 - 0,006	Part.P = Part.N 0,18 + 0,01	$r^2 = 0,86$
Part.P = CH · 0,001 + 0,002	CH = Part.P 622 + 7,7	$r^2 = 0,84$
CH = Part.N · 117 + 14	Part.N = CH 0,007 - 0,009	$r^2 = 0,76$
Part.O = CH 0,004 + 0,045	CH = Part.O 24 + 6	$r^2 = 0,88$
Part.P = Part.P · 0,04 + 0,004	Part.O = Part.P 24,6 + 0,18	$r^2 = 0,87$
Part.N = Part.O · 0,18 - 0,02	Part.O = Part.N · 4,9 + 0,3	$r^2 = 0,87$

---

I Slåen sø er det partikulære indhold så lavt, at de fundne værdier er behæftet med stor usikkerhed, hvorfor data fra Slåen sø er udeladt.

Ovenstående statistiske beregninger er udført ved anvendelse af gennemsnitsværdier. Nogle af disse er gode, andre mindre gode mål for gennemsnitsforholdene. Der er derfor for hver enkelt søs overfladekoncentration udført korrelationsanalyser for de 11 værdier, der er resultatet af de gennemførte 11 målerunder i 1974. Et "test for uafhængighed" er gennemført for at frasortere de datasæt, hvor regressionskoefficienten  $r^2$  har en sådan størrelse, (med 95 % sandsynlighed), at der er grund til at tro, at der foreligger to datamængder, der ikke er korrelerede. Med sæt af 11 data ligger denne grænse for  $r$  ved ca. 0,5.

Alle regressionsanalyser, hvor  $r < 0,5$ , er derfor frasorteret. Tilbage bliver en datamængde, som er anført i tabel 6.4.

SØNAVN	$\frac{\text{part P}}{\text{part.N}}$	$\frac{\text{Part.O}}{\text{Part.P}}$	$\frac{\text{Part.O}}{\text{Part.N}}$	$\frac{\text{CH}}{\text{Part.O}}$	$\frac{\text{CH}}{\text{Part.P}}$	$\frac{\text{CH}}{\text{Part.N}}$
ALM	-	-	-	-	-	-
BRA	0,11	27	3,7	22	1020	140
HAL	0,15	32	5,3	30	927	158
HIN	0,12	22	2,7	16	400	-
NØR	-	15	3,9	31	467	167
SAL I	-	-	5,0	-	558	-
SAL II	-	-	-	13	-	-
SIL I	-	23	7,5	15	748	-
SIL II	0,13	17	5,0	15	439	102
SIL III	0,19	15	4,5	25	450	143
SLÅ	-	-	-	-	-	-
SØN	-	-	2,3	19	-	90
TAN I	0,17	27	5,7	36	1083	204
TAN II	0,13	38	6,2	30	1108	196
THO	-	-	-	-	-	-
VED	0,12	41	6,1	15	762	130
VES	0,09	-	4,5	23	-	131
ØRN	-	-	4,4	25	721	100
antal	9	10	14	14	12	11
$\bar{x}$	0,13	26	4,8	23	723	142

Tabel 6.4

Hældningen for regressionslinier for "de frasorterede" Gudenå-søer. Korrelationsvurderingen omfatter 11 analysesæt pr. sø.

CH er angivet i  $\mu\text{g/l}^{-1}$ . De øvrige variabler i  $\text{mg/l}^{-1}$ .

Normalt angives for indholdet i en "gennemsnitsalgepopulation" følgende forhold på vægtbasis mellem kulstof, kvælstof og fosfor:

$$C : N : P = 41 : 7 : 1$$

Af tabel 6.4 fremgår, at der for forholdet mellem kvælstof og fosfor i det partikulære materiale i gennemsnit findes følgende værdier:

$$\begin{aligned} \text{part.P} : \text{part.N} &= 0,13 \\ \text{part.N} : \text{part.P} &= 7,7 : 1 \end{aligned}$$

Altså en værdi, der ligger tæt på normalforholdet i alger. Beregning af forholdet mellem kulstof og henholdsvis kvælstof og fosfor i det partikulære materiale kræver en omregning fra iltforbrug til kulstof. Antages normalforholdene at gælde findes følgende værdier:

$$\begin{aligned} \frac{\text{part.C}}{\text{part.N}} &= \frac{41}{7} = \frac{\text{part.O}}{\text{part.N}} \cdot \frac{1}{F_1} = 4,8 \cdot \frac{1}{F_1}; & F_1 &= 0,85 \\ \frac{\text{part.C}}{\text{part.P}} &= \frac{41}{7} = \frac{\text{part.O}}{\text{part.P}} \cdot \frac{1}{F_2} = 26 \cdot \frac{1}{F_2}; & F_2 &= 0,63 \\ & & \underline{F_{\text{gsn}}} &= 0,74 \end{aligned}$$

Anvendelse af  $F_{\text{gsn}} = 0,74$  til omregning af iltforbrug til kulstof medfører følgende forhold for kulstof-klorofyl (CH):

$$\frac{\text{part.C}}{\text{CH}} = \frac{\text{part.O}}{\text{CH}} \cdot \frac{1}{0,74} = \frac{1}{23} \cdot \frac{1}{0,74} \cdot 1000 \cong 59$$

(faktoren 1000 anvendes, da CH er angivet i  $\mu\text{g/l}$ )

I / 9/ er angivet et gennemsnitsindhold for en algepopulation således:

$$C : CH = 50 : 1$$

(forholdet kan variere fra 20 - 100).



For Haderslev Dam /10/ er der ved analoge betragtninger fundet en omsætningsfaktor fra iltforbrug til kulstof på 0,90. Anvendes denne omsætningsfaktor findes følgende forhold for kulstof-klorofyl:

$$\text{part.C : CH} = 54 : 1$$

Det partikulære stof i vandet består dels af phytoplanktonalger, dels af dødt organisk stof. I modsætning til algerne indeholder dette ikke klorofyl. Er vandets indhold af dødt organisk stof stort, sammenlignet med mængden af organisk stof bundet i alger, må det forventes, at forholdet part.C : CH vil være i overkanten af intervallet 20 - 100.

Sammenfattende kan det således sluttet, at for de undersøgte søer gælder det, at det partikulære materiale i vandfasen i overvejende grad er phytoplanktonalger og kun i mindre grad dødt organisk materiale. Dette er overensstemmende med /11/ som angiver, at i ikke eutrofierede søer er det døde partikulære stof normalt oftest forekommende.

## 6.5. BESKRIVELSE AF DE UNDERSØGTE SØER

### 6.5.1 GENERELT OM SØERNE I GUDENÅSYSTEMET

Gudenåsystemets søer er for de flestes vedkommende præget af stor næringsstofftilførsel. Da vandets opholdstid i de fleste af søerne tillige er relativt kort, afspejles årstidsvarierende stoftilførsler i søvandets næringsstoffkoncentrationer. Den ringe sigtedybde, der måles i de fleste søer, betyder at algeproduktionen kun kan foregå i de øverste vandlag selv i lavvandede søer. Produktionen kan således siges at være lysbegrænset.

I tabel 6.5 er vist en samlet oversigt over belastningsforholdene, primærproduktionen, klorofylindhold, sigtedybde og næringsstoffkoncentration som gennemsnit for de enkelte søer. I bilag 1 er alle målte tilstandsvariablers årstidsvariation afbildet i kurveform.

Der optræder begrænsninger i algevæksten, såfremt blot et af de nødvendige næringsstoffer findes i underskud i forhold til de øvrige. Tre væsentlige næringsstoffer er: kvælstof, fosfor og kulstof. Det er koncentrationen de steder inde i cellerne, hvor indbygningen af de pågældende grundstoffer finder sted, der er af betydning for algevækst. Koncentrationen her er ikke nødvendigvis lig med koncentrationen i det vand, algerne som helhed befinder sig i. Som en konsekvens heraf, kan blandt andet nævnes, at selvom næringskoncentrationen i søvandet i en enkelt periode er konstateret at være meget lille, er det ikke ensbetydende med, at algevæksten i denne periode er næringsaltbegrænset. Har algecellerne nemlig i et tidsrum forud været udsat for rigelige koncentrationer, kan de have fyldt de "indre lagre" op. De har da næring nok til at opretholde optimal vækst i en efterfølgende begrænset periode med en lille ydre koncentration af næringsalte. I foregående kapitel blev det vist, at TN og TP var relative gode mål for algebiomassen.

Det er en antagelse, at kulstof ikke i perioder er begrænsende. Om der er balance i algecellernes beholdninger af kvælstof og fosfor afspejles derfor af forholdet TN/TP. Forholdet UN/UP afspejler, om der er skævheder i de beholdninger, algerne har at tage af. Kun såfremt UN eller UP-koncentrationen (eller begge) er under den grænse, hvor det pågældende næringsstof kan udnyttes, afspejler forholdet UN/UP, hvilket af de to næringsstoffer, der er, eller som med sandsynlighed vil kunne gøres begrænsende for algevæksten.

Til at belyse algevækst forholdene under varierede stoftilførsler af N og P er der anvendt en matematisk sømodel til simulering af algevæksten i en række udvalgte Gudenå søer /12/. I modellen indgår relationer mellem de extra- og intracellulære koncentrationer af nærings-salte. Modellen forudsiger vækstforløb indenfor tidsrum af størrelsesordenen 1 uge - 1 måned. Denne model er således et eksempel på en dynamisk model, da der i den indgår en dynamisk sammenhæng mellem koncentration af nærings-salte og algevæksten.

En empirisk steady state model (Dillon og Rigler) er gennemprøvet af Finn Heintzelmann /13/, og her er blandt andet benyttet data fra udvalgte Gudenå søer. Denne model bygger alene på målinger af koncentrationen umiddelbart før vækstsæsonens begyndelse, samt på kendskab til belastningen og de hydrauliske samt morfometriske forhold, især middeldybden. Modellen er oprindeligt opstillet alene for fosfor, men den er også forsøgt anvendt for kvælstof. I den oprindelige model var det en forudsætning, at algevæksten var næringsstof-(= fosfor) begrænset i vækstperioden.

SØNAVN	overflade- belastning		SIGTEDYBDE			KLOROFYL-A			PP	PM	TP	TN	PE
	g TP	g TN	MAX	MIN	MIDD	MAX	MIN	MIDD	gC <sup>-2</sup> år <sup>-1</sup>	G 24 MAX mgC <sup>-3</sup> /dg <sup>-1</sup>	GENNEMSNIIT		
	m <sup>-2</sup> år <sup>-1</sup>	m <sup>-2</sup> år <sup>-1</sup>											
			m			µgl <sup>-1</sup>					mg <sup>l</sup> <sup>-1</sup>	mg <sup>l</sup> <sup>-1</sup>	mg <sup>l</sup> <sup>-1</sup>
ALLING	11	415											
ALMIND			7,2	3,3	4,6	8,2	1,1	4,5	45	60	0,02	0,42	2,26
BORRE	27	418											
BRAS	45	706	2,0	0,6	1,2	204	12	70	240	6060	0,193	1,79	6,07
GUDEN - RY MØLLE	22	448											
HALD	1	13	5,1	1,5	3,1	91	1,1	31	200	1540	0,14	0,72	2,39
HINGE	2	66	1,3	0,3	0,6	323	33	114	270	9820	0,19	1,97	8,15
BIRK - JUL	6	143											
NØRRE	3	37	3,0	0,9	1,8	129	2,2	33	230	4710	0,19	1,55	4,66
SALTEN L., I	3	23	2,5	0,8	1,5	78	13	33	100	1780	0,075	0,61	3,61
SALTEN L., II			2,3	0,7	1,4	52	14	29	120	1020	0,078	0,60	4,30
SALTEN L., III													
SILKEBORG L., I	20	142	2,0	0,5	0,8	180	28	101	280	4690	0,152	1,24	5,83
SILKEBORG L., II	7	56	1,9	0,5	0,8	156	24	91	240	4320	0,15	1,09	5,62
SILKEBORG L., III	110	1143	1,6	0,5	0,9	209	24	78	300	6430	0,263	1,83	6,79
SLÅEN			7,5	2,5	6,0	9,3	0	3,3	30	60	0,035	0,2	1,43
SØNDER	3	35	1,8	0,5	1,1	217	10	80	280	7740	0,444	1,94	8,38
TANGE I	89	1388	2,0	0,7	1,1	212	10	81	440	8880	0,235	1,70	7,06
TANGE II	23	404	1,8	0,7	0,8	192	41	87	390	7230	0,186	1,54	7,0
THOR	1	2	3,0	1,3	1,9	146	7	15	80	500	0,066	0,47	2,92
VEDSØ	7	58	2,0	0,5	1,1	129	13	58	230	3810	0,197	0,87	7,99
VESSØ	0,2	14	2,5	0,8	1,5	66	6,6	38	150	2880	0,062	1,30	6,02
ØRNSØ	23	174	2,5	0,6	1,0	139	14	112	310	8580	0,165	1,27	4,16

Tabel 6.5

Gudenåsystemets søer. Oversigt visende belastningsforhold, primærproduktionsdata, klorofylindhold, sigtedybdde og gennemsnitsværdier af næringsstofindholdet og organisk stof.

(Talmaterialet er baseret på 11 målerunder 1974).

Flere forfattere har forsøgt - på et statistisk grundlag - at danne en korrelation mellem dels en sø's gennemsnitskoncentrationer af henholdsvis total-fosfor og uorganiske kvælstofforbindelser og trofigrad, og dels mellem overfladebelastningen i f.eks. ton fosfor og kvælstof pr. m<sup>2</sup> pr. år og trofigrad. I tabel 6.6 er vist Vollenweiders N- og P-trofigradsklassificering /14/.

Trofigrad	Alkalinitet (mval/l)	Tot.P-konc. (mg/m <sup>3</sup> )	Uorg.N-konc. (mg/m <sup>3</sup> )
Ultra-oligotrof	< 0,2	< 5	< 200
Oligo-mesotrof	0,6	5 - 10	200 - 400
Meso-eutrof	0,6 - 1,0	10 - 30	300 - 650
Eutrof-polytrof		30 - 100	500 - 1500
Polytrof	> 1,0	> 100	> 1500

Tabel 6.6

Sammenhæng mellem trofigrad og gsn.koncentration af total-P i henhold til Vollenweider.

Ved at sammenligne værdierne i tabel 6.5 og 6.6 ses, at de søer i Gudenåsystemet med de laveste gennemsnitskoncentrationer - Almind sø, Slåen sø - hører under kategorien Meso-eutrof. En overvejende del kan betegnes polytrofe bedømt ud fra næringsstofkoncentrationen.

I det følgende gennemgås hovedsagelig vandkemiske forhold for de undersøgte søer, idet enkeltheder og særligt konstaterede forhold trækkes frem. En samlet præsentation af søkemiske data er givet i bilag 1.

## 6.5.2 ALMIND SØ

Almind sø er med en dybde på 20 m en af de dybeste søer i Gudenåsystemet, og i søen optræder temperatur- og iltspringlag (jf. figur 6.1). Næringsstofkoncentrationen er blandt de laveste fundne af de undersøgte søer.

Ved at betragte tabel 6.5 ses, at årgennemsnitskoncentrationen for total fosfor og total kvælstof er henholdsvis 0,020 mg/l og 0,42 mg/l. Til sammenligning kan nævnes, at gennemsnitskoncentrationerne for Gudenåsystemets søer ligger på henholdsvis 0,158 mg/l total fosfor og 1,17 mg/l total kvælstof.

De lave næringsstofkoncentrationer i Almind sø er overensstemmende med den målte lave primærproduktion på  $45 \text{ g C/m}^2/\text{år}$ . Almind sø er et eksempel på næringsstof- og primærproduktionsniveauet for en ubelastet sø (med hensyn til spildevand og landbrugsafstrømning) i Gudenåsystemet.

Der er ikke foretaget vandskiftemålinger i Almind sø, men ved at sammenholde søens relativt store volumen ( $5,45 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ) med en middelfaststrømningsmængde svarende til  $10 \text{ l/sek/m}^2$  skønnes det, at vandets opholdstid i Almind sø er af størrelsesordenen 8 - 10 år. Den lange opholdstid tillige med forekomsten af temperaturspringlag bevirker, at Almind sø er følsom over for næringsstofftilførsel, og selv relativt små overfladebelastninger af total fosfor og total kvælstof må antages at forøge produktionen væsentligt.

I tabel 6.7 er vist årsvariationen af henholdsvis forholdet mellem total kvælstof (TN) og total fosfor (TP) samt forholdet mellem opløst uorganisk kvælstof (UN) og opløst fosfor (UP). Alle koncentrationer er blandt de laveste af de målte. For eksempel har UP i en koncentration i nærheden af detectionsgrænsen. Den store sigtedybde tyder ikke på, at lyset virker begrænsende. Da årsproduktionen er blandt de mindste af de målte, er der således tale om næringssaltbegrænset vækst. At forholdet TN/TP iflg. tabel 6.7 oftest er  $>7$  tyder på fosforbegrænsning.

N/P FORHOLD I GUDENÆENS SØER STATION=751 OMRÅDE=ALM

AP	MA	DA	UN MG/L	TN MG/L	UP MG/L	TP MG/L	UN/UP	TN/TP
73	9	11	0.010	0.160	0.016	0.030	0.6	5.3
74	2	28	0.164	0.400	0.013	0.022	12.6	18.2
74	3	28	0.140	0.515	0.010	0.013	14.0	39.6
74	4	24	0.045	*****	0.010	0.020	4.5	*****
74	5	13	0.024	0.275	0.012	*****	2.0	*****
74	6	12	0.027	0.235	0.008	0.020	3.4	11.8
74	7	11	0.062	0.250	0.004	0.010	15.5	25.0
74	7	29	0.020	0.165	0.011	0.017	1.8	9.7
74	8	22	0.039	0.175	0.009	0.016	4.3	10.9
74	9	11	0.033	0.240	0.018	0.029	1.8	8.3
74	9	26	0.041	0.200	0.008	0.012	5.1	16.7
74	10	15	0.045	0.285	0.021	0.029	2.1	9.8

Tabel 6.7

Almindsø.

N/P FORHOLD I GUDENÆENS SØER STATION=751 OMRÅDE=BRS

AP	MA	DA	UN MG/L	TN MG/L	UP MG/L	TP MG/L	UN/UP	TN/TP
73	9	11	0.064	0.750	0.021	0.090	3.0	8.3
74	2	28	2.860	3.600	0.008	0.078	357.5	46.2
74	3	28	2.288	3.050	0.008	0.049	286.0	62.2
74	4	24	1.420	2.110	0.006	0.084	236.7	25.1
74	5	13	0.967	1.800	0.008	0.104	120.9	17.3
74	6	12	1.200	1.650	0.048	0.090	25.0	18.3
74	7	11	0.170	1.550	0.022	0.175	7.7	8.9
74	7	29	0.071	0.900	0.078	0.210	0.9	4.3
74	8	22	0.075	1.850	0.175	0.390	0.4	4.7
74	9	11	0.488	1.500	0.267	0.430	1.8	3.5
74	9	26	0.470	0.875	0.210	0.288	2.2	3.0
74	10	15	0.515	1.020	0.170	0.235	3.0	4.3
75	7	30	0.960	1.900	0.100	0.250	9.6	7.6

Tabel 6.8

Brassø.

### 6.5.3 BRASSØ

Arstidsvariationen i koncentrationen af total-P,  $PO_4$ -P, total-N og N-salte i Brassø er vist i figur 6.2. og figur 6.3. I figurerne er tillige vist årsvariationen i vandafstrømningen fra søen.

Den eksterne belastning via Gudenåens stoftransporter er væsentlig for Brassø og for de foranliggende søer i øvrigt. I forbindelse med stoftransportundersøgelserne er der foretaget en opgørelse, der viser, at Brassø tilføres ca. 800 tons kvælstof og ca. 52 tons fosfor pr. år (1974), heraf ophobes ca. 16 tons kvælstof og ca. 1,0 ton fosfor i Brassø.

De største mængder kvælstof (ca. 670 tons) stammer fra landbrugsafstrømning og de største mængder fosfor (ca. 32 tons) fra spildevand. Det vil sige, at fosfor tilføres i forholdsvis konstante mængder, hvorimod kvælstoftilførslen vil være årstidsbestemt samt være afhængig af afstrømningen.

Ved at betragte årsvariationen i koncentrationen af kvælstoffraktionerne ses det således, at der er en sammenhæng mellem koncentrationerne og afstrømningen. Desuden ses det, at koncentrationerne er højest i vinter- og især forårs månederne.

For fosforkoncentrationerne (TP og UP) gælder, at der tilsyneladende i den første del af året er så lave mængder, at hele fosformængden kan indbygges i alger som organisk stof. I juni-juli skifter billedet. Den i denne periode ringe vandudskiftning er tilsyneladende årsag til et koncentrationsniveau af fosfor, som ikke fuldt ud kan udnyttes til opbygning af organisk stof. Koncentrationen af både TP og UP stiger derfor. Man kan forestille sig, at de mekanismer, der virker internt i søen som f. eks. dannelse af alger, sedimentation og efterfølgende nedbrydning på sedimentoverfladen i denne periode er bestemmende for omsætningen af fosfor. I september-oktober forøges vandudskiftningen og både koncentrationen af TP og UP falder.



Det må antages, at vandføringen er steget til en sådan størrelse, at udvekslingsforholdene for sedimentet i søen skifter karakter fra en nettofrigørelse til en netto-bindingsproces af fosfor. Samtidig transporteres algerne med en hastighed, der ikke tillader sedimentation.

I tabel 6.8. (p. 6.20) er vist UN, UP, UN/UP og TN/TP. Det ses, at fosforkoncentrationen er minimal i perioden februar-maj: mindre end  $10 \text{ mg l}^{-1}$ . Forholdet TN/TP er her større end 17. Dette tyder på fosforbegrænsning af algevæksten. Et lignende ræsonnement for en 3 ugers periode i august for kvælstof tyder på kvælstofbegrænsning.

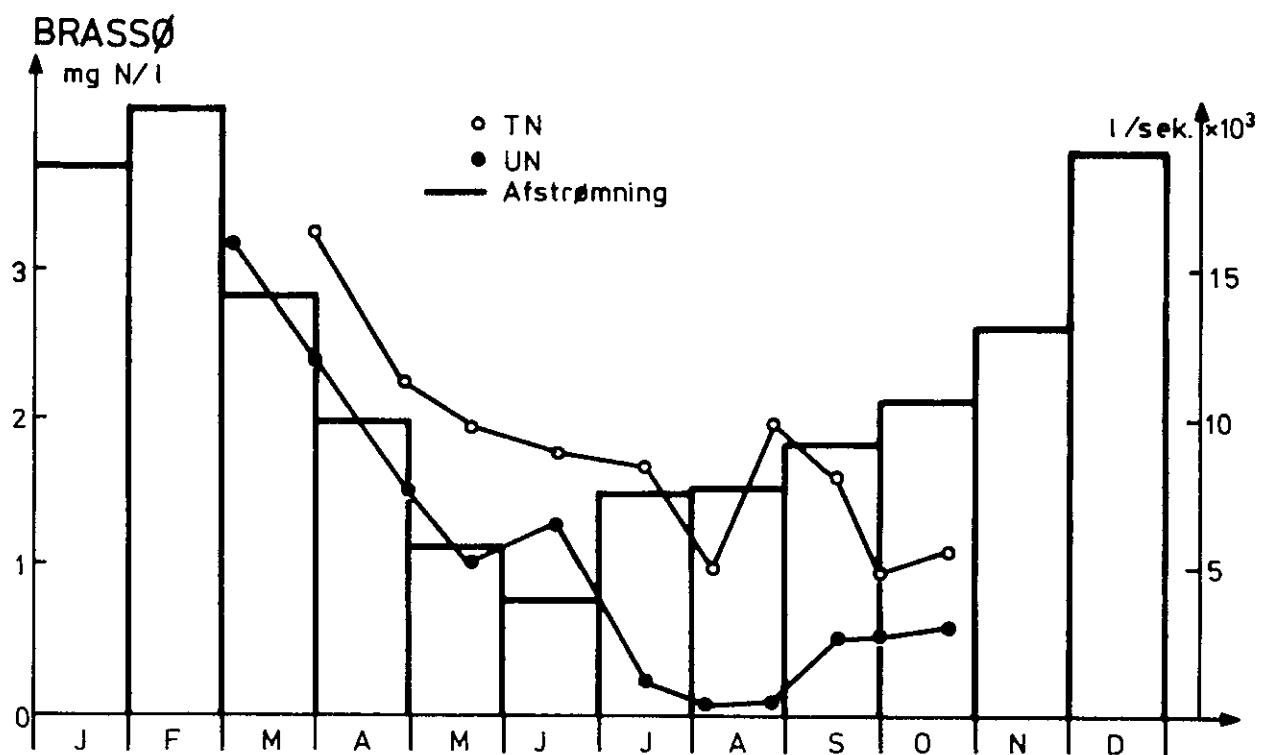


Fig. 6.2.

Koncentrationen af N i overfladen samt vandudstrømningen fra Brassø som funktion af året.

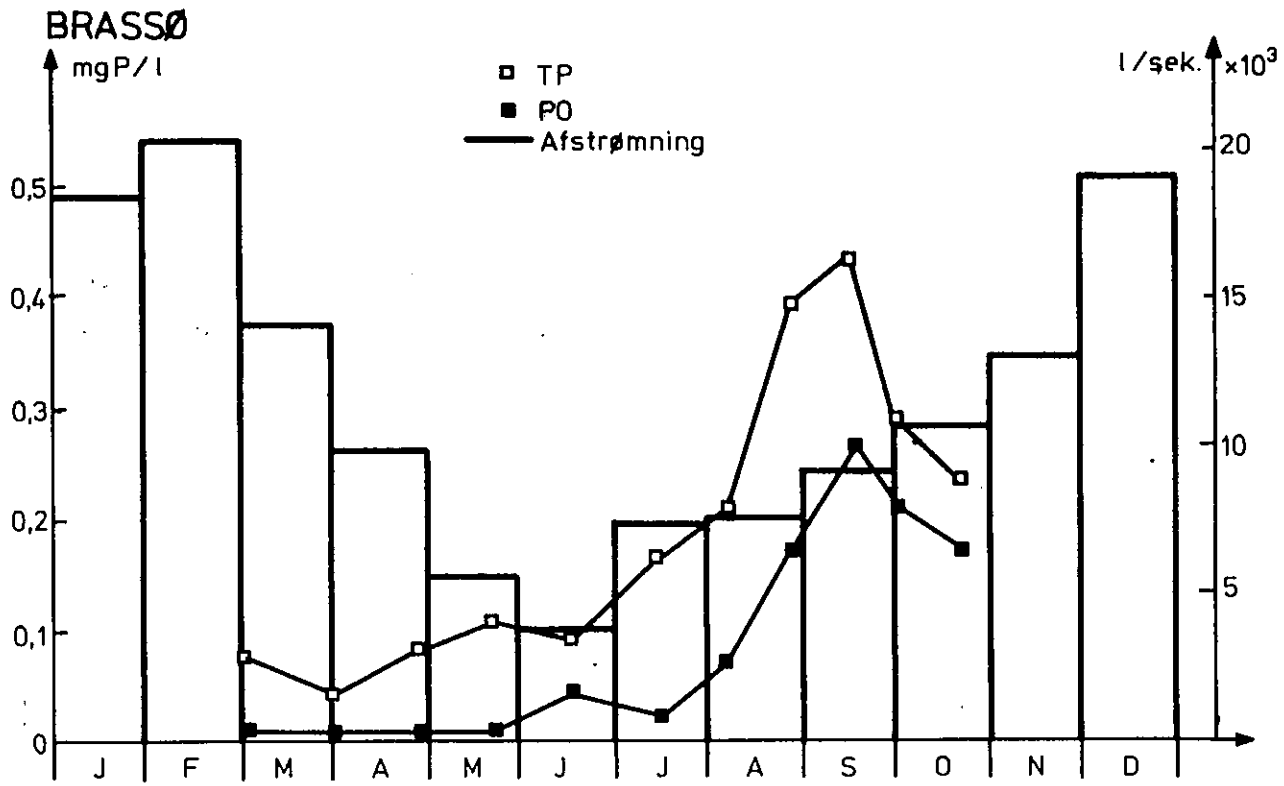


Fig. 6.3.

Koncentrationen af P i overfladen samt vandudstrømningen fra Brassø som funktion af året.

#### 6.5.4 HALD SØ

Hald sø er med en dybde på 35 m Gudenåsystemets dybeste sø, og middellopholdstiden er ca. 540 dage.

I figur 6.5 er koncentrationen af total-P (TP) og  $\text{PO}_4\text{-P}$  (PO) vist i henholdsvis overflade og bund over året. I figur 6.4 er vist det totale indhold af fosfor i hele søens vandfase over året samt overflade- og bundvandmasses temperatur.

Det ses, at koncentrationen i overfladelaget (~ over temperaturspringlaget) er faldende indtil september, og ved at betragte figur 6.5 ses desuden, at totalindholdet af fosfor i hele vandmassen stort set er svagt faldende indtil september. Dette skyldes, at sedimentationen af alger er større end den fosformængde, der frigøres fra sedimentfasen til vandfasen.

Efter september bliver produktionen og dermed henfald af algebiomasse mindre. Samtidig ses af figur 6.4, at temperaturspringlaget er ved at brydes (overflade- og bundtemperatur nærmer sig hinanden), hvilket medfører en total opblanding med tilhørende ophvirvling af sedimentet. Såvel koncentrationerne i overflade og bund som totalindhold i søen stiger markant. Fra begyndelsen af september og perioden ud betyder denne opvirvling af sedimentet en fosforfrigørelse, der medfører, at søens totale vandmasse beriges med 20 tons, svarende til søens "interne" belastning. Sammenholdes den interne belastning (20 tons fosfor) med en beregnet ekstern belastning af fosfor fra Hald søs opland på ca. 4 tons, ses det, at søens interne fosforbelastning er betydelig større end den eksterne.

Ved at betragte kurverne i bilag 1 over total-kvælstof ses et tilsvarende forløb over året. Især uorganisk kvælstof (UN) når i juli/august ned på meget lave værdier i overfladen.

Både for UN og UP gælder, at koncentrationen falder gennem vækstsæsonen. Laveste værdier opnås for UN omkring september (=  $0,07 \text{ mg l}^{-1}$ ) og for UP omkring juli (=  $0,017 \text{ mg l}^{-1}$ ). Dette kan tages som et tegn på, at det er størrelsen af puljen af næringssalte ved vækstsæsonens start, der er afgørende for produktionens størrelse. Sedimentation af alger vil til stadighed formindske indholdet af N- og P-salte i det fotiske lag. P fjernes åbenbart med størst hastighed, idet forholdet UN/UP falder fra ca. 7 til 1,1 i denne periode. Denne situation afspejles af fig. 6.5. Forholdet TN/TP falder imidlertid ikke tilsvarende, og da der ikke i længere perioder er konstateret lave koncentrationer af UN og UP, tyder intet på, at koncentrationen af N og P optræder som en væsentlig begrænsende faktor for algernes vækst.

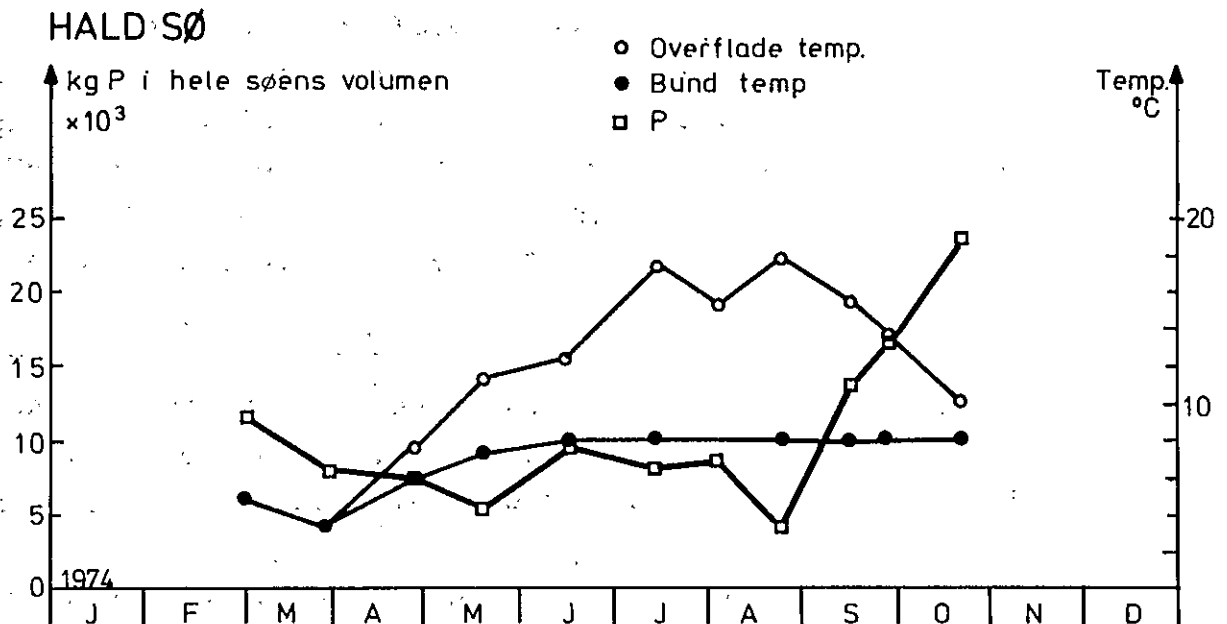


Fig. 6.4. Hald sø.

Koncentrationsforløbet af fosfor i hele voluminet af Hald sø sammenlignet med tilstedeværelsen af springlag.

N/P FORHOLD I GUDENÆNS SØER STATION=751 OMRÅDE=HLD

ÅR	MA	DA	UN MG/L	TN MG/L	UP MG/L	TP MG/L	UN/UP	TN/TP
73	9	18	0.064	0.680	0.124	0.180	0.5	3.8
74	2	26	0.868	1.160	0.178	0.210	4.9	5.5
74	3	25	0.787	1.020	0.160	0.180	4.9	5.7
74	4	23	0.505	0.700	0.072	0.124	7.0	5.6
74	5	15	0.493	0.600	0.071	0.090	6.9	6.7
74	6	13	0.392	0.650	0.061	0.110	6.4	5.9
74	7	9	0.061	0.825	0.017	0.140	3.6	5.9
74	7	30	0.101	0.620	0.034	0.090	3.0	6.9
74	8	20	0.094	0.700	0.043	0.075	2.2	9.3
74	9	9	0.069	0.550	0.050	0.120	1.1	4.6
74	9	25	0.245	0.425	0.120	0.140	2.0	3.0
74	10	16	0.615	0.650	0.190	0.225	3.2	2.9

Tabel 6.9.

Haldsø

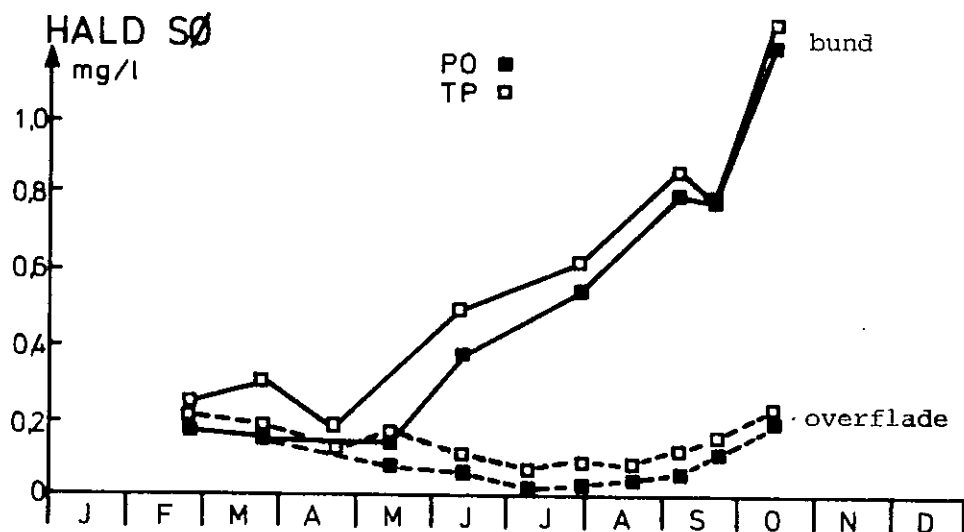


Fig. 6.5. Haldsø

Figuren viser, at næsten al fosfor er til stede som PO. Desuden viser figuren, at springlaget virker som en effektiv barriere, der afspærre de bundnære vandlag fra de ovenliggende.

### 6.5.5 HINGE SØ

Hinge sø er forholdsvis lavvandet med en gennemsnitsdybde på 2,3 m, og middelopholdstiden er kort (54 dage).

I figur 6.6 er vist koncentrationsforløbet over året for total-kvælstof (TN) og uorganisk kvælstofsalte (UN). Det ses, at UN og TN er høje om foråret på grund af den høje forårsafstrømning af kvælstof fra landbrugsområderne. Det ses, at i den produktive del af året falder de uorganiske kvælstofsalte til lave værdier, idet de tilførte mængder bliver mindre hen mod sommeren samtidig med, at det opbygges som algebiomasse, svarende til, at organisk kvælstof (TN) stiger i den produktive periode.

I figur 6.7 og 6.8 er vist koncentrationsforløbet over året for henholdsvis orthofosfat (PO) og total-fosfor (TP). I samme figurer er vist tilsvarende forløb over året for Hald sø (øvre vandmasse) for at illustrere forskellen i de morfometrisk set forskellige to søer. Ved at betragte de to figurer ses, at PO-koncentrationen i Hinge sø er ret konstant over året, hvorimod TP stiger i den produktive periode, hvilket skyldes opbygning i algebiomassen. I Hald sø ses derimod en tendens til nedgang i både PO og TP-koncentrationen, hvilket skyldes, at omsætningsprodukter fra den sedimenterede algebiomasse ikke tilføres den produktive zone, før springlaget i Hald sø brydes (efterår og forår).

I Hinge sø nedbrydes den producerede algebiomasse dels i den fotiske zone og dels på sedimentoverfladen, men på grund af den ringe dybde og derved relativt store cirkulation (vinddrevnen) vil sedimentet til stadighed få tilført ilt. Omsætningen i sedimentet er derved god. Ved nedbrydningen frigøres nærings-salte igen og indgår i en fornyet opbygning af algebiomasse.

Karakteriserende kan det siges, at en og samme pulje af nærings-salte kan udnyttes flere gange på 1 år i Hinge sø end f.eks. i en dyb sø som Hald sø. Ved udsætning af sedimentfælde i begge

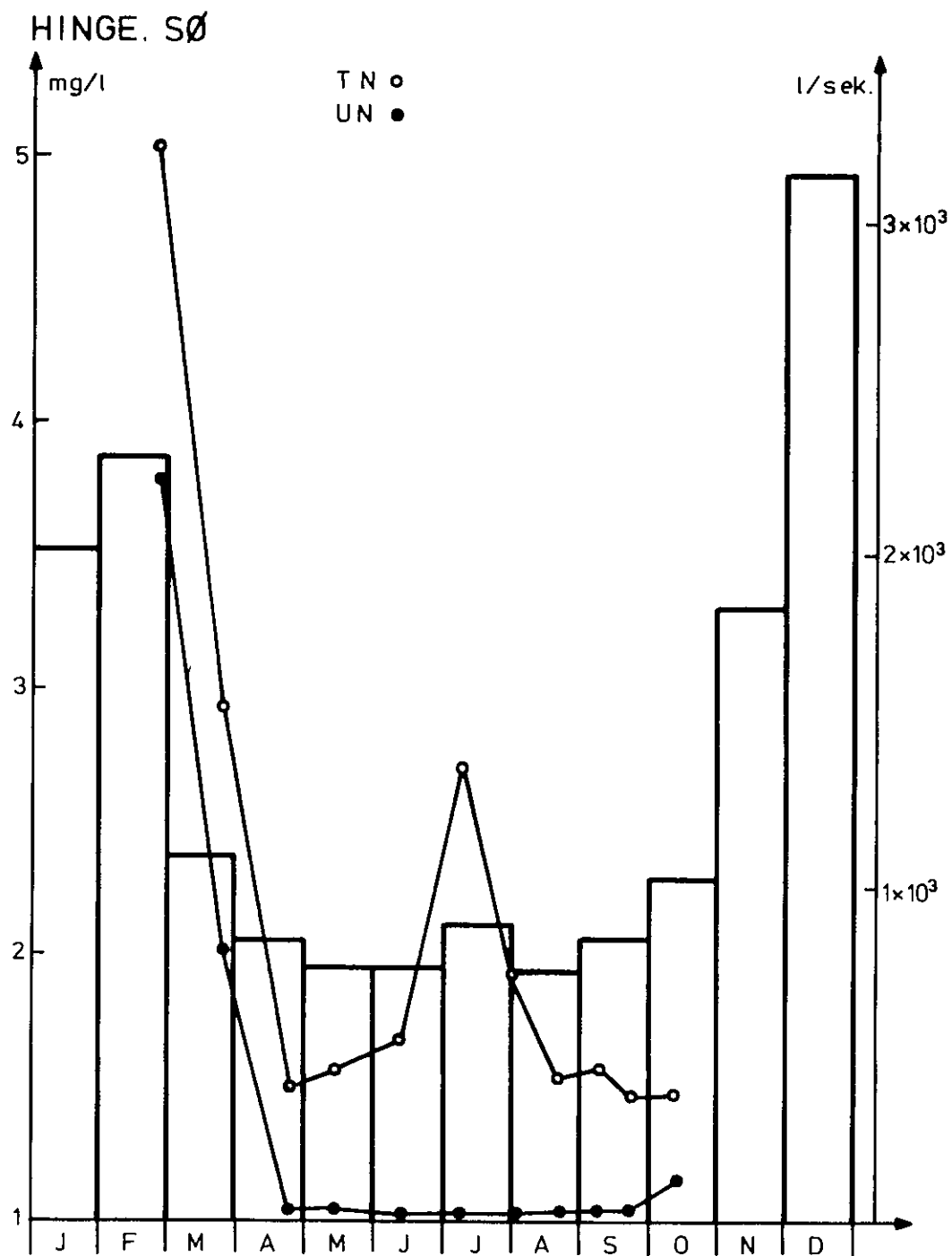


Fig. 6.6. Hinge sø.

Figuren viser koncentrationsforløbet af uorganiske kvælstofsalte (UN) og total-kvælstof (TN) i Hinge sø. Desuden er vandføringen angivet i Hinge å ved månedsmiddel som l/sek.

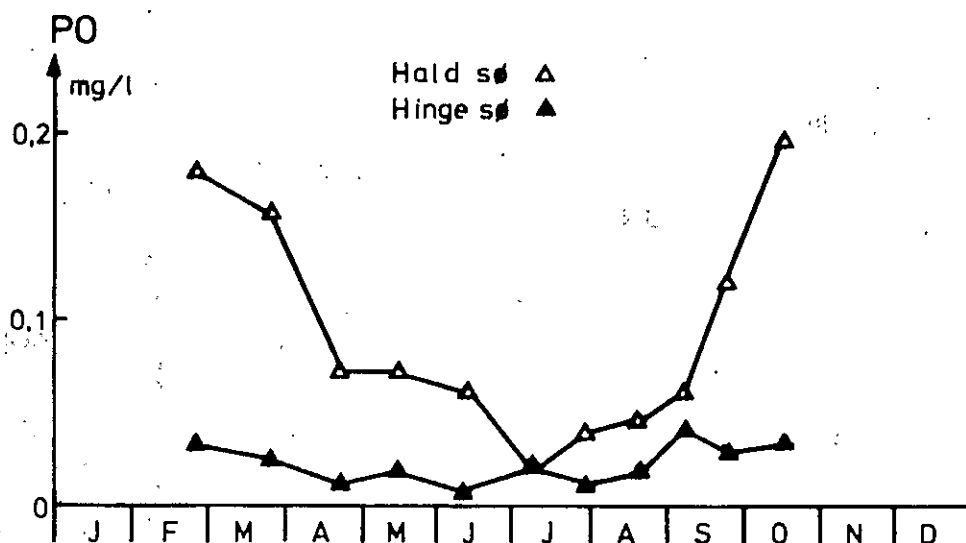


Fig. 6.7.

Koncentrationsforløbet af opløst fosfor i overfladen i søerne Hinge sø og Hald sø.

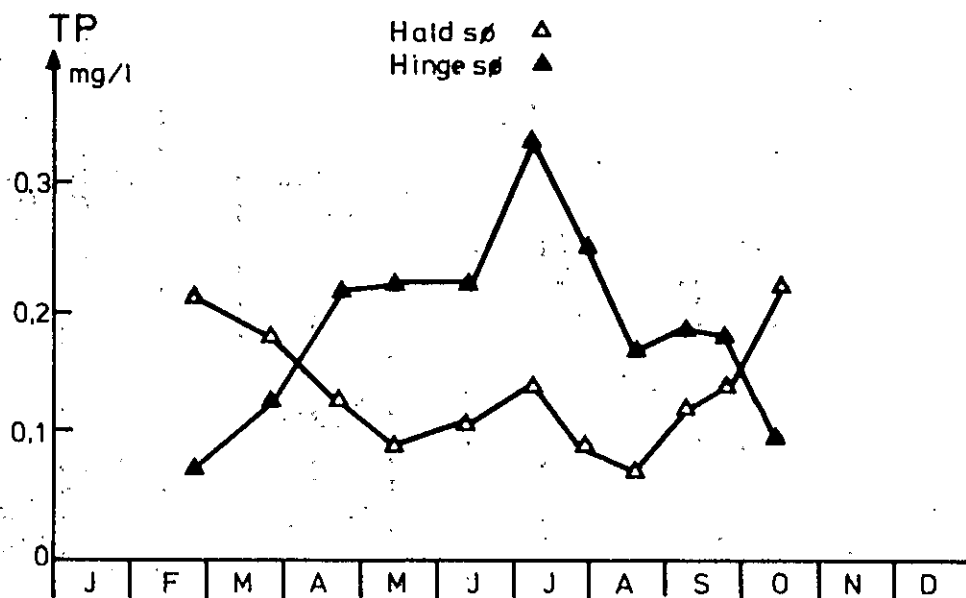


Fig. 6.8.

Koncentrationsforløbet af TP i overfladen af Hald sø og Hinge sø i undersøgelsesperioden.



søer er der i Hinge sø påvist en bruttosedimentation af TP på 37 ton/år. I Hald sø - der har et tre gange så stort areal - er sedimentationen 6 ton/år for TP. Disse forhold tyder på en meget stor resuspension af bundfældet materiale i Hinge sø.

I tabel 6.10 er forholdet mellem kvælstof og fosfor vist. Det ses, at i takt med forårsafstrømningen af kvælstof stiger N/P forholdene til meget store værdier (168:1). Allerede i maj falder UN/UP til 2,9:1, TN/TP til 5,0:1, og holder sig omkring 7:1 resten af sommeren, svarende til, at TN og TP er bundet i algebiomassen. Da UN/UP er lav, indikerer det, at fosfor frigøres hurtigere end kvælstof fra henfaldende algebiomasse. UN og UP koncentrationerne er ligeledes lave i sommerperioden, hvorfor kvælstof formentlig vil være vækstbegrænsende. Produktionen må derfor formodes at indstille sig på et niveau der i sommerperioden bestemmes af den hastighed, hvormed N frigøres fra sedimentet.

N/P FORHOLD I GUDENÅENS SØER STATION=701 OMRÅDE=HNG

ÅR	MA	DA	UN MG/L	TN MG/L	UP MG/L	TP MG/L	UN/UP	TN/TP
73	2	12	0.022	1.370	0.037	0.160	0.6	8.6
74	2	27	5.560	6.500	0.033	0.071	168.5	91.5
74	3	26	2.015	3.050	0.025	0.125	80.6	24.4
74	4	25	0.073	0.590	0.010	0.215	7.3	6.6
74	5	14	0.061	1.130	0.021	0.225	2.9	5.0
74	6	12	0.033	1.350	0.007	0.120	4.7	7.1
74	7	10	0.025	2.730	0.016	0.335	1.4	9.1
74	7	31	0.020	1.840	0.010	0.250	2.0	7.4
74	8	21	0.065	1.090	0.015	0.170	4.3	6.4
74	9	10	0.088	1.130	0.038	0.185	2.3	6.1
74	9	24	0.100	0.950	0.028	0.180	3.6	5.3
74	10	15	0.365	0.940	0.036	0.025	10.1	9.0

Tabel 6.10

Hinge sø.

## 6.5.6 VIBORGSØERNE - NØRRESØ OG SØNDERSØ

Viborgsøerne har tidligere været belastet med spildevand fra Viborg by, idet størsteparten af dette udledes i Søndersø. I 1971 blev spildevandsudledningen standset og ført til det nye rensningsanlæg i Bruunshåb, således at søerne i dag ikke direkte tilføres spildevand. Der kan dog stadig tilføres spildevand via overfaldsbygværker i tilfælde af nedbør og driftsstop på pumpestationer. Desuden tilføres der regnafstrømning fra separat kloakerede områder, og inden for det topografiske opland findes yderligere Rødding by med mejeri, der via Rødding møllebæk ledes til Nørresø.

I tabel 6.11 og 6.12 er vist TN/TP og UN/UP forhold. Det ses, at i Nørresø er UN/UP for det meste højere end 7:1 i vækstperioden. I Søndersø er UN/UP forholdet væsentligt lavere end 7:1.

N/P FORHOLD I GUDENÆNS SØER STATION=751 OMRÅDE=NRS

ÅR	MÅ	DA	UN MG/L	TN MG/L	UP MG/L	TP MG/L	UN/UP	TN/TP
73	9	18	0.306	1.080	0.172	0.234	1.8	4.6
74	2	26	1.564	2.190	0.121	0.140	13.8	15.6
74	3	25	1.519	2.120	0.082	0.120	18.5	17.7
74	4	23	0.972	1.400	0.014	0.082	69.4	17.1
74	5	15	1.230	1.450	0.062	0.105	19.8	13.8
74	6	13	1.115	1.680	0.095	0.170	11.7	9.9
74	7	9	0.740	1.580	0.075	0.280	9.9	5.6
74	7	30	0.362	1.370	0.105	0.210	3.4	6.5
74	8	20	0.550	1.230	0.155	0.191	3.5	6.4
74	9	9	0.710	1.180	0.180	0.215	3.9	5.5
74	9	25	0.945	1.550	0.195	0.260	4.8	6.0
74	10	16	1.200	1.780	0.210	0.265	5.7	6.7

Tabel 6.11

Nørresø

N/P FORHOLD I GUDENÆVNS SØER STATION=751 OMRÅDE=SP5

ÅR	MA	DA	UN MG/L	TN MG/L	UP MG/L	TP MG/L	UN/UP	TN/TP
73	9	18	1.110	2.400	0.530	0.880	2.1	2.7
74	2	26	1.735	2.690	0.147	0.222	11.8	12.1
74	3	25	1.052	1.510	0.050	0.150	21.0	10.1
74	4	23	0.392	1.240	0.080	0.270	4.9	4.6
74	5	15	1.280	1.720	0.179	0.350	7.2	4.9
74	6	13	0.545	1.750	0.185	0.380	2.5	4.6
74	7	9	0.084	2.600	0.270	0.590	0.3	4.4
74	7	30	0.267	2.170	0.285	0.480	0.9	4.5
74	8	20	0.275	1.750	0.365	0.500	0.8	3.5
74	9	9	0.046	1.700	0.355	0.500	0.1	3.4
74	9	25	0.285	1.880	0.385	0.560	0.7	3.4
74	10	16	1.005	1.850	0.350	0.445	2.6	4.2

Tabel 6.11

Søndersø.

Men i begge søer er indholdet af kvælstof- og fosforforbindelser høje i hele måleperioden, jf. bilag 1. I Nørresø er koncentrationen af PO i næsten hele perioden over 100 µg/l, og koncentrationen af UN er større end 400 µg/l. Der er således ikke umiddelbart tale om næringsstofbegrænsning i Nørresø.

I Søndersø er PO-koncentrationen højere end i Nørresø, men omvendt for UN, hvilket skyldes, at Nørresø får tilført et større kvælstofbidrag fra landbrugsafstrømning bl.a. via Rødding mølleå. I Søndersø er der ikke umiddelbart tale om næringsstofbegrænsning.

De to søer er imidlertid ret forskellige. Årsproduktionen for Nørresø er 230 g C/m<sup>2</sup>/år og for Søndersø 280 g C/m<sup>2</sup>/år. Produktionsforløbet over året er også forskelligt, idet der i Søndersø måles den maksimale produktion i begyndelsen af juli, og i Nørresø måles den maksimale produktion i begyndelsen af august.

Ved at betragte bilag 1 over årsvariationen i koncentrationen af henholdsvis UN og PO ses, at koncentrationen af fosfor i Søndersø er stigende på grund af frigørelse fra sediment til

vandfase i modsætning til Nørresø, hvor der er opstået springlag. I princippet samme forløb, der er beskrevet for henholdsvis Hald sø og Hinge sø.

Den 15. maj 1974 konstateredes for både Nørresø og Søndersø en forbigående hæmning i produktionen og deraf følgende lavt klorofylindhold (CH). Samtidig konstateres en kraftig stigning i NH-kvælstof. I henholdsvis tabel 6.13 og 6.14 er vist værdier for perioden før og efter hændelsen.

Ved at betragte tabellen ses, at ammoniakindholdet er størst i Søndersø, og da forholdene på sedimentet er aerobe, tilskrives dette, at ammoniakilden er stoftilførsler fra overfaldsbygværker.

#### NØRRESØ

Dato	PP mg m <sup>2</sup> dg <sup>-1</sup>	PM mg <sup>-3</sup> dg	CH µg l <sup>-1</sup>	OO mg l <sup>-1</sup>	pH	NH mg l <sup>-1</sup>
23/4	850	560	32	12,0	9,0	0,022
15/5	50	40	2,2	9,6	7,9	0,380
13/6	1900	1260	21	10,3	7,8	0,400

Tabel 6.13. Nørresø

Sammenligninger mellem målte størrelser for de angivne datoer. Klorofylindholdet (CH) er usædvanligt lavt den 15/5. Dette gælder også for G-24-max produktionen (PM) og kvadratmeterproduktionen (PP).

OO = opløst ilt

NH = ammoniak

## SØNDERSØ

Dato	PP	PM	CH	OO	OH	NH
23/4	760	1300	44	10,37	9,2	0,200
15/5	260	320	10	8,6	7,5	0,920
13/6	1410	2440	103	10,1	8,2	0,022

Tabel 6.14. Søndersø.

Sammenligninger mellem målte størrelser for de angivne datoer. Klorofylindholdet (CH) er usædvanligt lavt den 15/5. Dette gælder også for G-24-max produktionen (PM) og kvadratmeterproduktionen (PP).

OO = opløst ilt

NH = ammoniak

### 6.5.7 SALTEN LANGSØ

Salten Langsø er opdelt i 3 hovedbassiner, og den gennemsnitlige opholdstid er ca. 75 døgn. Undersøgellesaktiviteterne i forbindelse med Gudenaundersøgelsen er knyttet til det midterste og dybeste bassin (st. 1) og det østlige bassin ved søens afløb (st. 2).

Salten Langsø er hovedsagelig omgivet af skovarealer, og den væsentligste stoftilførsel kommer fra Salten å, hvis indløb ligger i søens vestlige ende, og som belaster søen med udlødt næringsstof stammende fra ialt 9 dambrug samt spildevand fra blandt andet Bryrup. I 1974 transporterede Salten å /15/ ca. 51 ton N og ca. 8 ton P til Salten Langsø, og den samlede overfladebelastning er for 1974 opgjort til 3 g TP/m<sup>2</sup>/år og 23 g TN/m<sup>2</sup>/år\*). Dette er en højere overfladebelastning end f.eks. Hald sø, hvis overfladebelastning er opgjort til 1 g TP/m<sup>2</sup>/år og 13 g TN/m<sup>2</sup>/år.

Der er ved nærværende undersøgelse ikke konstateret markant forskel i tilstandsvariablerne i de to bassiner (st. 1 og 2).

I tabel 6.15 er vist årsvariationen af UN, UP, UN/UP og TN/TP. Det ses, at både kvælstof og fosfor kan være begrænsende for algevæksten, men med fosfor som den dominerende vækstbegrænsende faktor.

- \*) I /8/ har Jens Møller Andersen opstillet et stofbudget for 1972 og 1973. Overfladebelastningsværdierne kan opgøres til:

1973	~ 3 g TP/m <sup>2</sup>	~ 24 g TN/m <sup>2</sup>
1972	~ 4 g TP/m <sup>2</sup>	~ 27 g TN/m <sup>2</sup>

Der er således tale om en stort set ensartet årlig belastning i perioden 1972 - 1974.

N/P FORHOLD I GUDENAENS SØER STATION=751 OMRÅDE=SAL

ÅR	MA	DA	UN MG/L	TN MG/L	UP MG/L	TP MG/L	UN/UP	TN/TP
73	9	13	0.047	0.530	0.040	0.100	1.2	5.3
74	2	27	1.108	1.430	0.033	0.049	33.6	29.2
74	3	26	0.698	1.150	0.025	0.072	27.9	16.0
74	4	25	0.066	0.270	0.006	0.034	11.0	3.2
74	5	14	0.016	0.430	0.011	0.100	1.5	4.3
74	6	11	0.300	0.600	0.029	0.055	10.3	10.9
74	7	10	0.019	0.475	0.008	0.115	2.4	4.1
74	8	1	0.082	0.290	0.018	0.057	4.6	5.1
74	8	21	0.087	0.475	0.015	0.057	5.8	8.3
74	9	11	0.058	0.420	0.018	0.066	5.4	6.4
74	9	23	0.262	0.450	0.024	0.078	10.9	5.8
74	10	14	0.275	0.770	0.040	0.070	6.9	11.0

Tabel 6.15.

Salten langsø (st. 1)

N/P FORHOLD I GUDENAENS SØER STATION=752 OMRÅDE=SAL

ÅR	MA	DA	UN MG/L	TN MG/L	UP MG/L	TP MG/L	UN/UP	TN/TP
73	9	13	0.025	0.650	0.030	0.105	0.8	6.2
74	2	27	1.040	1.450	0.028	0.037	37.1	14.6
74	3	26	0.600	1.050	0.018	0.061	33.3	17.2
74	4	25	0.026	0.340	0.022	0.074	1.2	4.6
74	5	14	0.039	0.500	0.025	0.100	1.5	5.0
74	6	11	0.027	0.500	0.013	0.055	2.1	9.1
74	7	10	0.025	0.450	0.006	0.115	4.2	3.9
74	8	1	0.025	0.350	0.007	0.057	3.6	6.1
74	8	21	0.045	0.400	0.009	0.057	5.0	7.0
74	9	11	0.033	0.565	0.011	0.066	3.0	8.6
74	9	23	0.034	0.300	0.008	0.060	4.2	5.0
74	10	14	0.170	0.610	0.030	0.082	5.7	7.4

Tabel 6.15

Salten langsø (st. 2)

### 6.5.8 SILKEBORG LANGSØ

Silkeborg Langsø er funktionelt opdelt i 3 bassiner. I det vestlige bassin med afløb fra Ørn sø er målestationen SIL I beliggende.

I det midterste bassin er målestationen SIL II placeret. I det østlige bassin og med tilløb af Gudena fra Brassø via Remstrup å samt med tilløb fra Søholt rensningsanlæg er SIL III beliggende.

Vandkvaliteten i det østlige bassin, SIL III, hvor stationen er placeret før udløbet fra Søholt rensningsanlæg, vil i det væsentligste være afhængig af vandkvaliteten i Brassø. Dette ses af figurerne 6.9 og 6.10.

Figur 6.9 viser, at vandkvaliteten, hvad angår kvælstof, i SIL III væsentligst er bestemt af koncentrationer i Brassø, hvilket fremgår af, at koncentrationer af uorganiske, opløste kvælstofsalte (UN) varierer synkront og er i det væsentligste ens.

Figur 6.10 viser, at vandkvaliteten i SIL III, hvad angår fosfor, væsentligst er bestemt af koncentrationer i Brassø, hvilket fremgår af, at koncentrationer af uorganisk, opløst fosfor (PO) varierer synkront og i det væsentligste er ens (undtagen i perioden uge 20 - uge 24).

I figur 6.11 er vist koncentrationsforløbet af total-fosfor i overfladen af SIL I og Ørn sø. Det ses, at forløbet stort set er synkront.

I figurerne 6.12 og 6.13 er henholdsvis vist forløbet for total-N og total-P, og for de opløste næringsstoffer UN og PO i SIL I.

Figur 6.13 viser koncentrationsforløbet af total-fosfor (TP) og opløst fosfor (PO) i Silkeborg Langsø, vestlige del.



Ved at betragte de opløste næringsstoffer UN og PO ses, at disse når ned på meget lave værdier. Men da SIL I er meget lavvandet, vil omsætningen af organisk stof ske hurtigt, og ved resuspension vil næringsstofferne hurtigt tilgå vandfasen.

Med hensyn til SIL II, det midterste bassin, skulle man forvente samme parallelle forløb med SIL I og denne som for SIL I og Ørn sø. Men dette bassin er af en hel anden beskaffenhed end SIL I og SIL III. Til trods for, at opholdstiden i alle 3 langsøer er kort, er opholdstiden relativt længere i SIL II, jf. tabel 3.2. SIL II påvirkes heller ikke vindeksponentielt (ophvirvling) på samme måde som SIL I.

Disse forhold kan muligvis forklare de lavere koncentrationer i SIL II såvel som den lidt lavere primærproduktion, der er fundet her.

I tabellerne 6.16, 6.17 og 6.18 er TN/TP samt UN/UP vist. Det ses, at både fosfor og kvælstof kan være begrænsende for algevæksten, men generelt må fosfor betegnes som mest begrænsende. I SIL III er det kun få gange, næringsstofkoncentrationerne er så lave, at de kan være begrænsende for algevæksten.

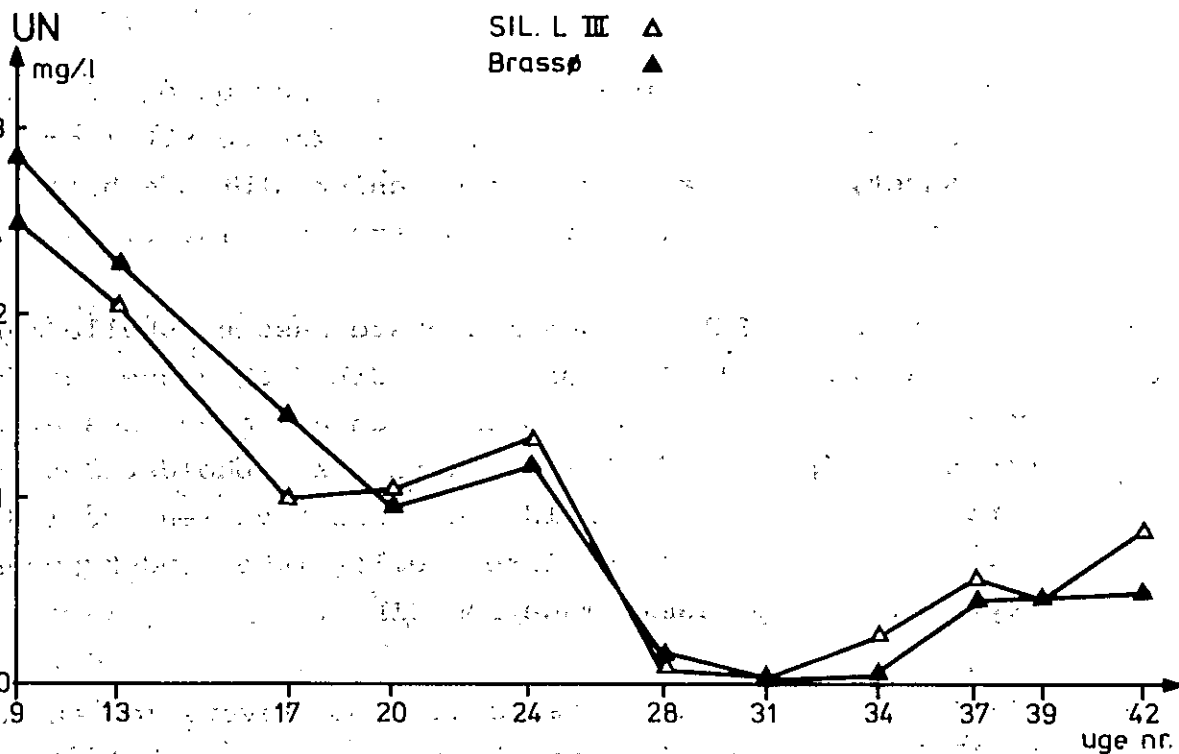


Fig. 6.9.

Sammenligning af opløste kvælstofforbindelser i Brassø og SIL III.

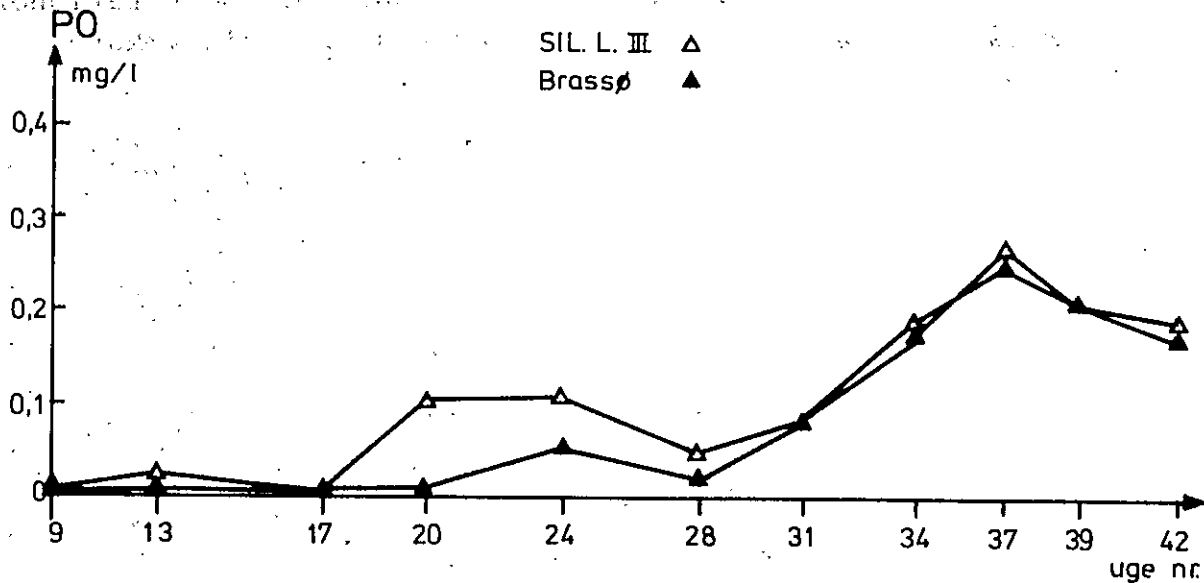


Fig. 6.10.

Sammenligning af koncentrationen af opløst fosfor i Brassø og SIL III.

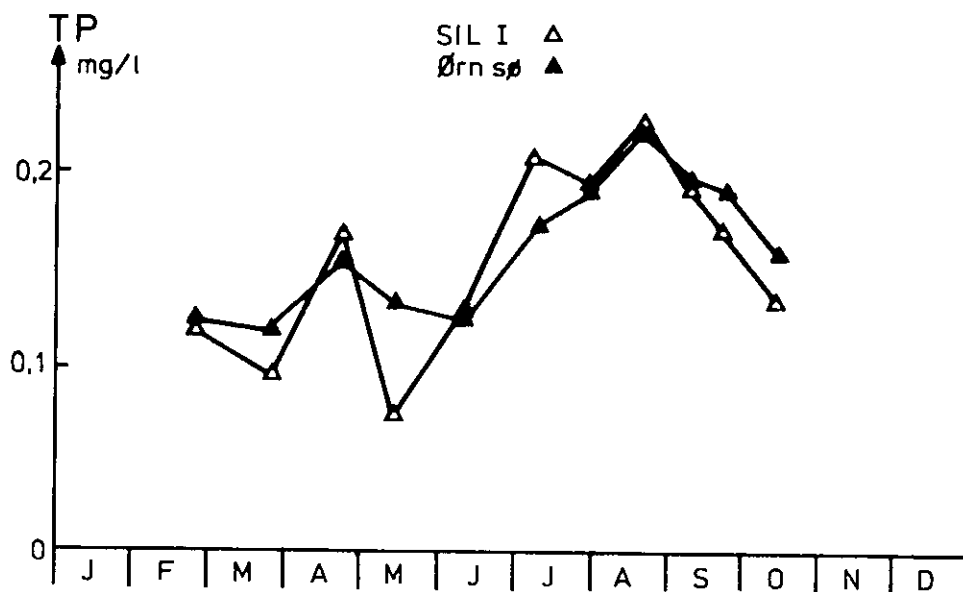


Fig. 6.11.

Koncentrationsforløbet af total-fosfor i overfladen af SIL I og Ørn sø.

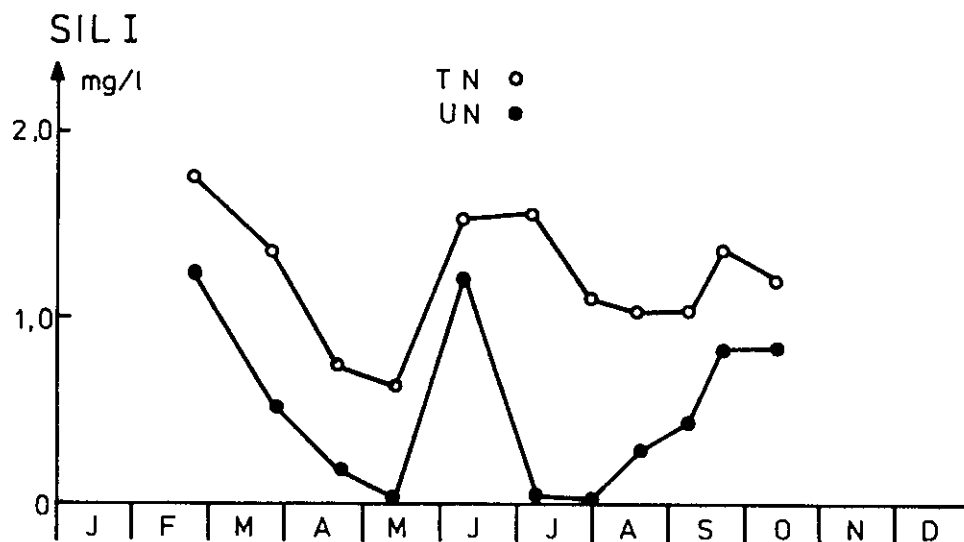


Fig. 6.12.

Koncentrationsforløbet af total-kvælstof (TN) og opløste kvælstofsalte (UN) i Silkeborg Langsø, vestlige del.

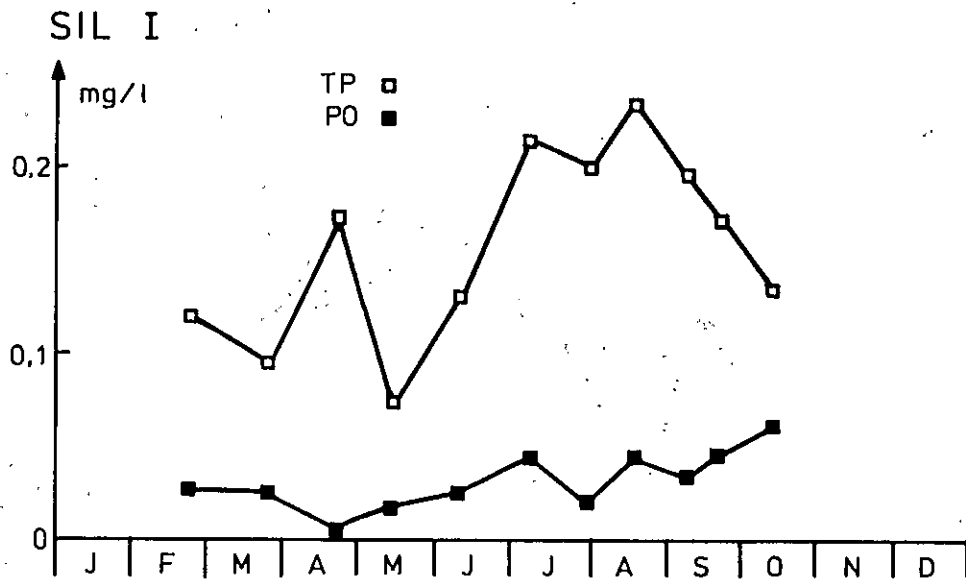


Fig. 6.13.

Koncentrationsforløbet af total-fosfor (TP) og opløst fosfor (PO) i Silkeborg Langsø, vestlige del.

N/P FORHOLD I GUDENÆNS SØER STATION=751 OMRÅDE=SIL

ÅR	MA	DA	UN MG/L	TN MG/L	UP MG/L	TP MG/L	UN/UP	TN/TP
73	9	17	0.239	1.530	0.001	0.085	239.0	18.0
74	2	25	1.230	1.750	0.027	0.118	45.6	14.8
74	3	27	0.510	1.350	0.026	0.097	19.6	13.0
74	4	22	0.176	0.760	0.008	0.170	22.0	4.5
74	5	13	0.033	0.650	0.014	0.072	2.4	9.0
74	6	10	1.185	1.530	0.025	0.130	47.4	11.8
74	7	8	0.033	1.550	0.045	0.215	0.7	7.2
74	7	31	0.020	1.130	0.021	0.200	1.0	5.7
74	8	19	0.272	1.050	0.042	0.234	6.5	4.5
74	9	10	0.440	1.020	0.030	0.125	14.7	5.2
74	9	23	0.825	1.350	0.046	0.170	17.9	7.9
74	10	14	0.820	1.210	0.060	0.135	13.7	9.0

Tabel 6.16

Silkeborg langsø I (bassin 1)

N/P FORHOLD I GUDENÆNS SØER STATION=752 OMRÅDE=SIL

ÅR	MA	DA	UN MG/L	TN MG/L	UP MG/L	TP MG/L	UN/UP	TN/TP
73	9	17	0.064	0.820	0.001	0.088	64.0	10.0
74	2	25	1.067	1.730	0.013	0.090	82.1	19.2
74	3	27	0.508	1.250	0.015	0.093	33.9	15.1
74	4	22	0.071	0.620	0.004	0.124	17.7	5.0
74	5	13	0.031	0.725	0.010	0.105	3.1	6.9
74	6	10	0.430	1.500	0.020	0.160	21.5	9.4
74	7	8	0.010	1.450	0.034	0.225	0.3	6.4
74	7	31	0.010	0.950	0.014	0.220	0.7	4.3
74	8	19	0.710	1.230	0.118	0.276	6.0	4.5
74	9	10	0.268	0.960	0.040	0.170	6.7	5.6
74	9	23	0.229	0.950	0.028	0.130	8.2	7.3
74	10	14	0.350	0.890	0.030	0.105	12.0	8.5

Tabel 6.17

Silkeborg langsø II (bassin 2)

N/P FORHOLD I GUDENÆNS SØER STATION=753 OMRÅDE=SIL

ÅR	MA	DA	UN MG/L	TN MG/L	UP MG/L	TP MG/L	UN/UP	TN/TP
73	9	17	0.319	1.050	0.037	0.159	8.6	6.6
73	9	17	0.406	1.360	0.031	0.200	13.1	6.8
74	2	25	2.475	3.460	0.006	0.044	412.5	78.5
74	3	27	2.035	2.950	0.022	0.106	92.5	27.8
74	4	22	0.992	1.690	0.004	0.120	248.0	14.1
74	5	13	1.020	2.100	0.105	0.270	9.7	7.8
74	6	10	1.325	2.180	0.105	0.295	12.6	7.4
74	7	8	0.064	1.830	0.044	0.335	1.5	5.5
74	7	31	0.055	1.360	0.090	0.420	0.6	3.2
74	8	19	0.281	1.530	0.188	0.372	1.5	4.1
74	9	10	0.555	1.260	0.245	0.355	2.3	3.5
74	9	23	0.495	1.080	0.210	0.360	2.4	3.0
74	10	14	0.850	1.440	0.180	0.325	4.7	4.4

Tabel 6.18

Silkeborg langsø III (bassin 3).

## 6.5.9 SLÅEN SØ

Slåen sø er medtaget i nærværende del af Gudenåundersøgelsen, da den kan betegnes som en referencelokalitet af høj rekreativ og naturvidenskabelig værdi. Slåen sø modtager kun afstrømning fra skovområder og kan således såvel belastnings- og beliggenhedsmæssigt sammenlignes med Almind sø.

Af tabel 6.5 samt bilag 1 ses, at de målte næringsstofkoncentrationer er lave. Gennemsnitskoncentrationen for totalfosfor og total-kvælstof ligger på henholdsvis 0,035 mg/l og 0,20 mg/l, eller på samme lave niveau som Almind sø.

Den målte primærproduktion på 30 g C/m<sup>2</sup>/år er den lavest målte i forbindelse med Gudenåundersøgelsen. Til sammenligning kan nævnes, at den gennemsnitlige primærproduktion for Gudenåsystemets søer er ca. 220 g C/m<sup>2</sup>/år.

Af tabel 6.19 ses, at i de to produktionsmaxima er kvælstof begrænsende for algevæksten.

N/P FORHOLD I GUDENÅENS SØER STATION=751 OMRÅDE=SLÅEN

ÅR	MA	DA	UN MG/L	TN MG/L	UP MG/L	TP MG/L	UN/UP	TN/TP
73	9	13	*****	*****	0.031	0.037	*****	*****
74	2	28	0.058	0.230	0.020	0.030	2.9	7.7
74	3	28	0.014	0.170	0.018	0.020	0.8	8.5
74	4	24	0.026	0.085	0.020	0.029	1.3	2.9
74	5	16	0.042	0.100	0.088	0.110	0.5	0.9
74	6	14	0.019	0.275	0.023	0.033	0.8	8.3
74	7	11	0.016	0.400	0.004	0.016	4.0	25.0
74	8	1	0.053	0.220	0.031	0.031	1.7	7.1
74	8	22	0.026	0.175	0.018	0.022	1.4	8.0
74	9	12	0.060	0.180	0.029	0.030	2.1	6.0
74	9	26	0.041	0.150	0.024	0.024	1.7	6.2
74	10	17	0.081	0.215	0.036	0.042	2.2	5.1

Tabel 6.19

Slåensø

### 6.5.10 TANGE SØ

Tange sø er af en vejdamning opdelt i to bassiner, og middellopholdstiden er ca. 11 døgn. Tange sø er en af Gudenåsystemets hårdest belastede søer, jf. tabel 6.5, idet afstrømningen fra det 1500 km<sup>2</sup> store opland beliggende opstrøms passerer gennem den kunstigt dannede sø. Stofbelastningen er ifølge /16/ opgjort til ca. 1720 tons N og ca. 110 tons P pr. år (1974), svarende til 1388 g N/m<sup>2</sup>/år og 89 g P/m<sup>2</sup>/år for bassin I. I overensstemmelse med den store stofbelastning er årsproduktionen i Tange sø den højst målte i Gudenåsystemet. I figur 6.14 er for bassin I vist produktionsforløbet over året, og desuden er indholdet af opløst ilt angivet. Ved at betragte figuren ses, at den højeste produktion er målt i uge 24.

I figur 6.15 er biomassen af klorofyl (CH) vist. Det ses, at den maksimale værdi findes i uge 28.

Af figur 6.14 og figur 6.15 ses, at efter juli falder både primærproduktionen (PP) og klorofylindholdet (CH) til væsentligt mindre værdier. Det ses ligeledes, at iltmætningen falder betragteligt - til 50 % i hele august. Dette skyldes formentligt et pludseligt henfald af organisk materiale dels af den oprindeligt dannede phytoplanktonbiomasse, dels af nedrevet grøde fra grødeslåningen i Gudenåen mellem Silkeborg Langsø og Tange sø i august måned. Omsætningen af organisk stof viser sig tydeligt i de forringede iltkoncentrationsværdier i grødeslåningsperioden.

I tabel 6.20 er vist UN, UP, TN/TP og UN/UP værdier for Tange sø. Det ses, at både fosfor og kvælstof kan være begrænsende for algevæksten. I Tange sø, bassin I, er fosfor det hyppigst vækstbegrænsende næringsstof.

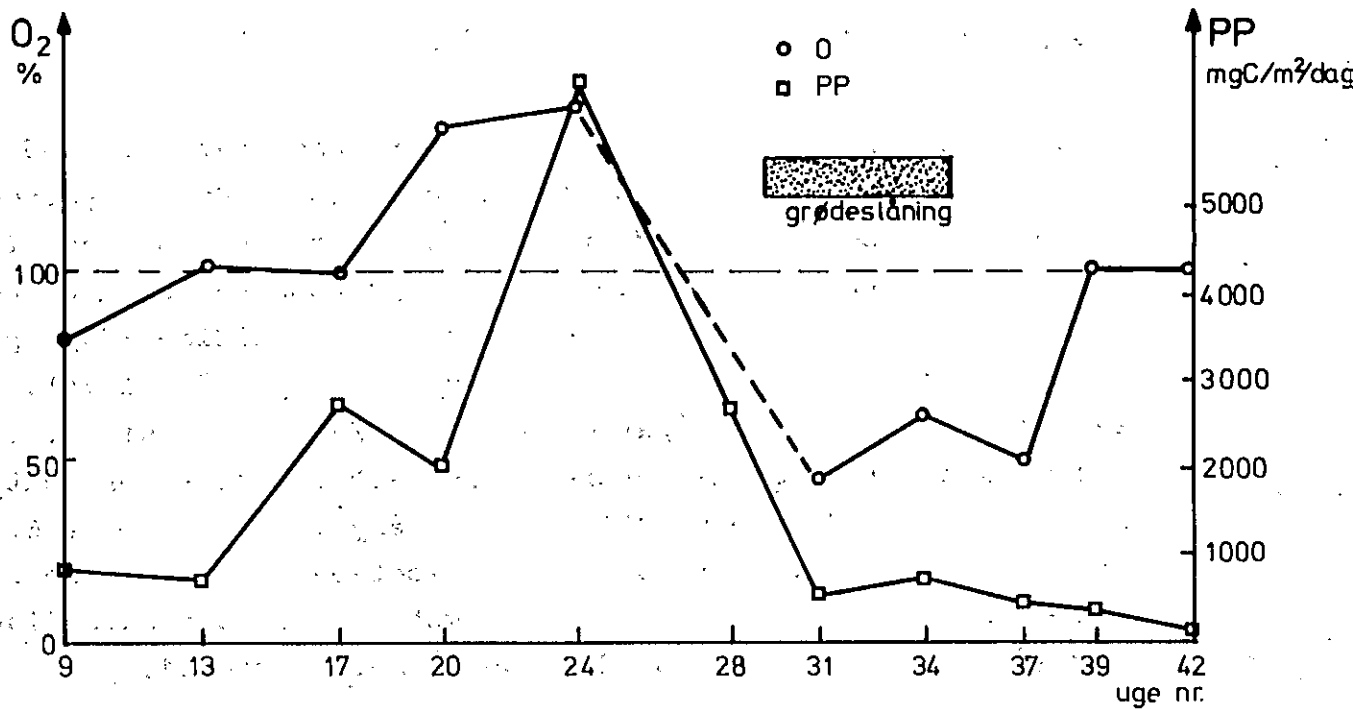


Fig. 6.14.

TANGE SØ I

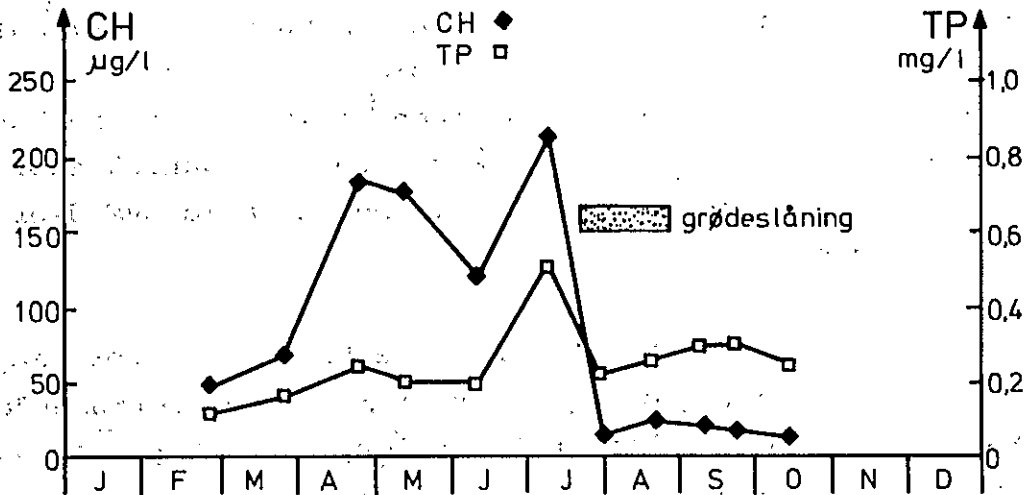


Fig. 6.15.



## N/P FORHOLD I GUDENÆENS SØER STATION=751 OMRÅDE=TAN

ÅR	MA	DA	UN MG/L	TN MG/L	UP MG/L	TP MG/L	UN/UP	TN/TP
73	9	12	0.368	0.860	0.110	0.165	3.3	5.2
74	2	27	3.064	3.750	0.025	0.110	122.6	34.1
74	3	26	2.565	3.500	0.037	0.155	69.3	22.6
74	4	25	0.719	1.490	0.009	0.240	79.9	6.2
74	5	14	0.153	1.340	0.009	0.190	17.0	7.1
74	6	12	0.546	1.700	0.012	0.200	45.5	8.5
74	7	10	0.022	2.080	0.033	0.495	0.7	4.2
74	7	31	0.710	1.160	0.135	0.210	5.3	5.5
74	8	21	0.445	1.000	0.160	0.245	2.8	4.1
74	9	10	0.760	1.280	0.200	0.280	3.8	4.6
74	9	24	0.775	1.180	0.175	0.290	4.4	4.1
74	10	15	1.060	1.440	0.170	0.240	6.2	6.0

Tabel 6.20

Tangesø I (bassin 1)

## N/P FORHOLD I GUDENÆENS SØER STATION=752 OMRÅDE=TAN

ÅR	MA	DA	UN MG/L	TN MG/L	UP MG/L	TP MG/L	UN/UP	TN/TP
73	9	12	0.015	0.970	0.110	0.250	0.1	3.9
74	2	27	3.528	4.380	0.012	0.099	294.0	44.2
74	3	26	2.094	3.260	0.011	0.155	190.4	21.0
74	4	25	0.677	1.480	0.012	0.196	56.4	7.5
74	5	14	0.452	1.520	0.012	0.205	37.7	7.4
74	6	12	0.030	1.330	0.007	0.150	4.3	8.9
74	7	10	0.038	0.875	0.160	0.290	0.2	3.0
74	7	31	0.062	0.920	0.082	0.190	0.8	5.1
74	8	21	0.067	0.775	0.068	0.150	1.0	5.2
74	9	10	0.273	0.975	0.090	0.175	3.0	5.6
74	9	24	0.421	0.975	0.100	0.220	4.2	4.4
74	10	15	0.535	0.980	0.100	0.160	5.3	6.1

Tabel 6.20

Tangesø II (bassin 2)

## 6.5.11 THORSØ

Thorsø er beliggende i et skovbrugsområde og modtager spildevand fra Gjessø. De tilførte næringsstofmængder er opgjort til 0,5 tons fosfor og 1,2 tons kvælstof pr. år, svarende til en overfladebelastning på henholdsvis 1 g TP/m<sup>2</sup>/år og 2 g TN/m<sup>2</sup>/år.

Ved at sammenligne denne belastning med de andre Gudenåer, jf. tabel 6.5, ses, at Thorsø er en af de søer, der tilføres mindst spildevand.

Denne relativt lave belastning bevirker dog et højere næringsstofniveau end i helt upåvirkede søer (d.v.s. uden landbrugsafstrømning og spildevand) som Slåen sø og Almind sø. Primærproduktionen i Thorsø (80 g C/m<sup>2</sup>/år) er ca. dobbelt så stor som i førnævnte.

Thorsø illustrerer, hvor små mængder næringsstoffer der skal til for at få en registrerbar ændring i en "upåvirket" søs eutrofieringstilstand.

I tabel 6.21 er vist TN/TP samt UN/UP forhold i Thorsø.

N/P FORHOLD I GUDENÅENS SØER STATION=751 OMRÅDE=T

ÅR	MA	DA	UN MG/L	TN MG/L	UP MG/L	TP MG/L	UN/UP	TN/TP
73	2	11	0.007	0.380	0.022	0.083	0.3	4.6
74	2	25	0.301	1.130	0.009	0.060	100.1	18.8
74	3	27	0.569	1.000	0.018	0.036	31.6	27.8
74	4	22	0.187	0.480	0.022	0.116	8.5	4.1
74	5	16	0.048	0.430	0.047	0.050	1.0	8.6
74	6	11	0.031	0.390	0.005	0.045	6.2	8.7
74	7	8	0.034	0.250	0.006	0.058	5.7	4.3
74	7	29	0.040	0.410	0.026	0.057	1.5	7.2
74	8	19	0.126	0.275	0.036	0.090	3.5	3.1
74	9	11	0.046	0.375	0.027	0.065	1.7	5.8
74	9	26	0.021	0.250	0.024	0.065	0.9	3.8
74	10	17	0.028	0.320	0.024	0.066	1.2	4.8

Tabel 6.21

Thorsø.

## 6.5.12 VEDSØ

Vedsø er funktionelt opdelt i to bassiner. Den benyttede målestation er placeret i bassinet nærmest Rindsholm. Det er ikke undersøgt, om den udvalgte station repræsenterer begge bassiner lige godt.

Vedsø er beliggende umiddelbart nedstrøms Hald sø. Vandkvaliteten i Vedsø er derfor hovedsagelig bestemt af vandkvaliteten i Hald sø. Vedsø modtager desuden afstrømning fra landbrugsområder og fra dambrug. Vedsø er en lavvandet sø, og stofomsætningen i Vedsø sker derfor anderledes end i Hald sø. Det er således karakteristisk, at sigtedybden og klorofylindholdet er forskellig i de to søer. Dette er illustreret i nedenstående tabel 6.22.

	SIGTEDYBDE (m)			KLOROFYL ( $\mu\text{g l}^{-1}$ )			PP	Største værdi af G-24-max
	max.	min.	middel	max.	min.	middel	$\text{g Cm}^{-2}\text{år}^{-1}$	$\text{g Cm}^{-3}\text{dg}^{-1}$
HALD SØ	5,1	1,5	3,1	91	1,1	31	200	1540 (juli)
VEDSØ	2,0	0,5	1,1	129	13	58	230	3810 (juli)

Tabel 6.22.

Sammenligning mellem produktionsforhold m.m. i Hald sø og Vedsø.

Alle angivelser i tabel 6.22 peger i retning af en bedre vandkvalitet i Hald sø end i Vedsø. Forskellen i omsætningsmåden i to søer fremgår af figur 6.16 og figur 6.17, der viser koncentrationsforløbet af N og P i de to søer.

I Hald sø sker en sedimentering af partikulært stof, hvorfor koncentrationen i overfladen falder indtil det tidspunkt, hvor springlaget begynder at nedbrydes. Forårsafstrømningen bevirker en gennemskylning af Vedsø. Vandets partikulære organiske

indhold er væsentligst dødt stof. Om sommeren er lys- og temperaturforholdene optimale for dannelsen af en stor biomasse af phytoplanktonalger. Den lille vanddybde i Vedsø bevirker, at den reelle sedimentation er lille, hvorimod fosfor frigjort fra sedimentet til stadighed tilføres vandmassen, hvor en opbygning af nyt organisk stof finder sted. Hvor koncentrationskurverne i Hald sø falder, er der derfor en tendens til en stigning i kurverne fra Vedsø i sommerperioden.

I tabel 6.23 er vist TN/TP samt UN/UP for Vedsø. Det ses, at på nær i forsommeren er kvælstof vækstbegrænsende næringsstof.

N/P FORHOLD I GUDENÆNS SØER STATION=751 OMRÅDE=VED

ÅR	MA	DA	UN MG/L	TN MG/L	UP MG/L	TP MG/L	UN/UP	TN/TP
73	9	18	0.010	0.830	0.144	0.244	0.1	3.4
74	2	26	0.700	1.310	0.107	0.172	6.5	7.5
74	3	25	0.034	0.420	0.014	0.105	2.4	4.0
74	4	23	0.102	0.460	0.034	0.122	3.0	3.8
74	5	15	0.263	0.500	0.054	0.125	4.9	4.0
74	6	13	0.725	1.130	0.065	0.155	11.2	7.3
74	7	9	0.021	1.380	0.054	0.220	0.4	6.3
74	7	30	0.039	0.950	0.076	0.200	0.5	4.8
74	8	20	0.037	0.900	0.100	0.230	0.4	3.9
74	9	9	0.035	1.050	0.140	0.300	0.3	3.5
74	9	25	0.055	0.800	0.140	0.270	0.4	3.0
74	10	16	0.470	0.725	0.160	0.225	2.9	3.2

Tabel 6.23

Vedsø

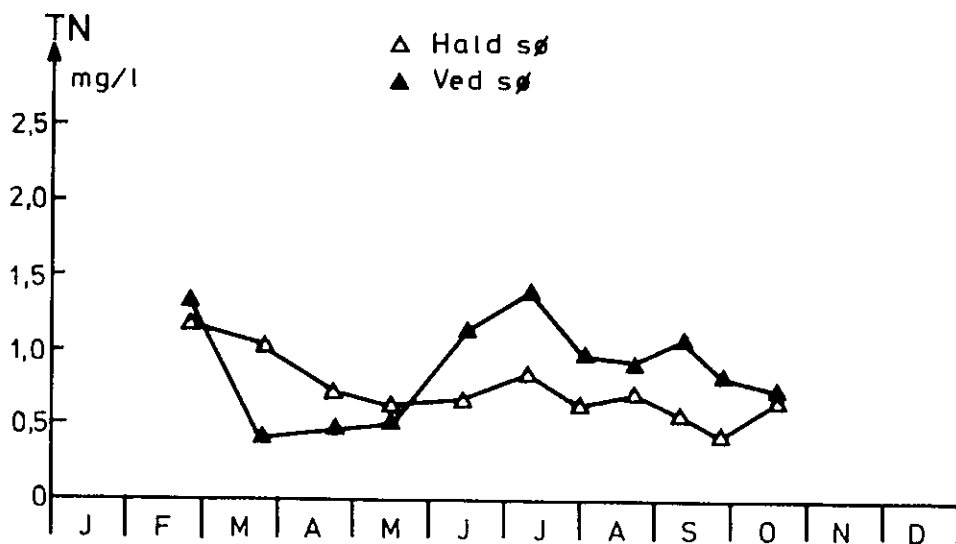


Fig. 6.16.

Årsvariation af TN for Hald sø og Vedsø.

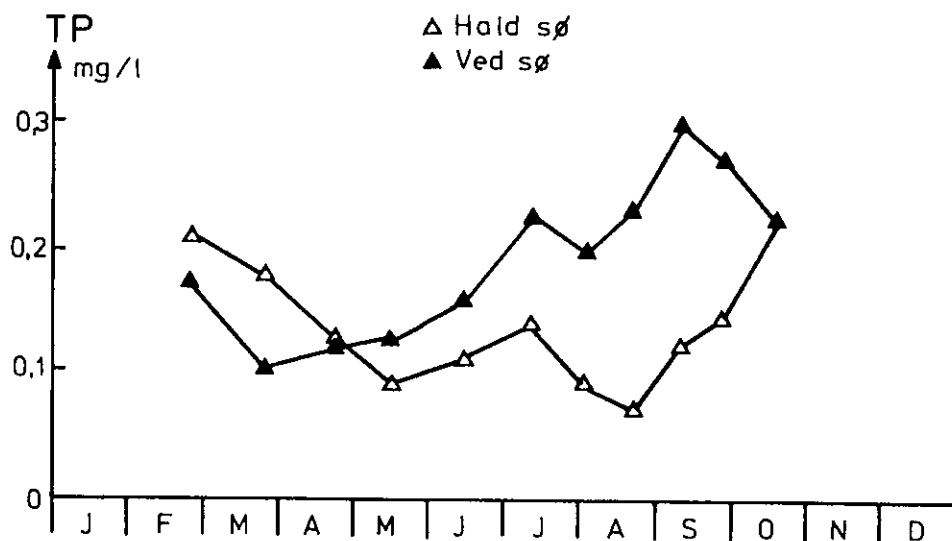


Fig. 6.17.

Årsvariation af TP for Hald sø og Vedsø.

## 6.5.13 VESSØ

Vessø ligger som "satellit-sø" til Gudensø - Ry mølle sø. Søen er helt omgivet af landbrugsarealer. I området ligger ingen bymæssige bebyggelser. Søens tilstand afspejler således specifikt landbrugspåvirkning. Jf. bilag 1 er koncentrationen af henholdsvis kvælstof- og fosforforbindelser, som man ville forvente fra landbrugsafstrømning. Stor kvælstofafstrømning om foråret og mere konstant fosforafstrømning med svag stigning om efteråret.

Til sammenligning med andre søer, der påvirkes specifikt, kan en sø som Almind sø benyttes. Almind sø påvirkes mere specifikt af afstrømning fra skovområder.

I tabel 6.24 er for nogle tilstandsvariable vist forskellen de to søer imellem.

	SIGTEDYBDE (m)			KLOROFYL ( $\mu\text{g/l}$ )	PP
	max.	min.	middel	middel	$\text{g/C/m}^2/\text{år}$
VESSØ	2,5	0,8	1,5	38	150
ALMIND SØ	7,2	3,3	4,6	4,3	45

Tabel 6.24.

Sammenligning mellem udvalgte tilstandsvariabler i Vessø og Almind sø.

Af tabellen fremgår, at Vessø er eutrofieret, og sammenligningen viser, hvilken betydning landbrugspåvirkning kan have på en sø.

I tabel 6.25 er vist TN/TP samt UN/UP. Det ses, at fosfor er vækstbegrænsende næringsstof. Både TN/TP og UN/UP forholdene er meget høje, hvilket skyldes den høje kvælstofafstrømning til søen.

N/P FORHOLD I GUDENÆNS SØER STATION=751

OMRÅDE=VE

ÅR	MÅ	DA	UN MG/L	TN MG/L	UP MG/L	TP MG/L	UN/UP	TN/TP
73	0	13	*****	1.210	0.011	0.059	*****	17.5
74	2	28	1.592	2.180	0.004	0.032	398.0	68.1
74	3	28	1.436	2.050	0.003	0.016	478.7	128.1
74	4	28	1.227	1.600	0.004	0.033	306.7	51.2
74	5	16	1.091	1.560	0.018	0.069	60.6	22.6
74	6	14	0.710	1.450	0.013	0.030	54.6	48.3
74	7	11	*****	1.150	0.004	0.083	*****	13.9
74	8	1	0.187	1.010	0.010	0.069	18.7	14.6
74	8	22	0.028	0.865	0.009	0.078	3.1	11.1
74	9	12	0.236	0.840	0.040	0.096	5.9	8.7
74	9	27	0.300	0.730	0.042	0.094	7.1	7.8
74	10	17	0.275	0.860	0.032	0.072	8.6	11.9

Tabel 6.25

Vessø

## 6.5.14 ØRNSØ

Ørnsø gennemstrømmes af Funder å, og den årlige stofbelastning er opgjort til  $170 \text{ g N/m}^2/\text{år}$  og  $23 \text{ g P/m}^2/\text{år}$ . Den gennemsnitlige opholdstid er ca. 18 døgn.

Produktionen i Ørnsø er den næsthøjeste af de målte og bærer i høj grad præg af, at næringsstofferne findes i overskud. Således er produktionen pr. klorofylenhed blandt de største, der er målt:  $11 \text{ g C(mg CH)}^{-1} \text{m}^{-3} (2 \text{ timer})^{-1}$ .

I figurerne 6.18 og 6.19 er vist forløbet over året for fosfor- og kvælstoffraktioner.

I tabel 6.26 er vist TN/TP samt UN/UP i Ørnsø. Såvel de aktuelt målte koncentrationer som forholdet mellem N og P fraktioner viser at der ikke er tale om en næringsstofbegrænset algevækst i Ørnsø.

N/P FORHOLD I GUDENÆVNS SÆR STATION=751 OMRÅDE=6

ÅR	MA	DA	UN MG/L	TN MG/L	UP MG/L	TP MG/L	UN/UP	TN/TP
73	9	11	0.421	1.140	0.028	0.115	15.0	9.9
74	2	25	1.325	1.680	0.057	0.120	23.2	14.0
74	3	27	0.730	1.450	0.030	0.115	24.3	12.6
74	4	22	0.418	0.840	0.029	0.152	14.4	5.5
74	5	16	0.174	1.130	0.044	0.130	4.0	8.7
74	6	11	0.815	1.420	0.020	0.125	40.8	11.4
74	7	8	0.480	1.250	0.010	0.175	48.0	7.1
74	7	29	0.387	1.100	0.037	0.190	10.5	5.8
74	8	19	0.880	1.200	0.070	0.222	12.6	5.4
74	9	11	1.020	1.290	0.078	0.200	13.1	6.4
74	9	23	1.210	1.400	0.075	0.190	15.1	7.4
74	10	17	1.320	1.340	0.081	0.160	16.3	8.4

Tabel 6.26

Ørnsø.



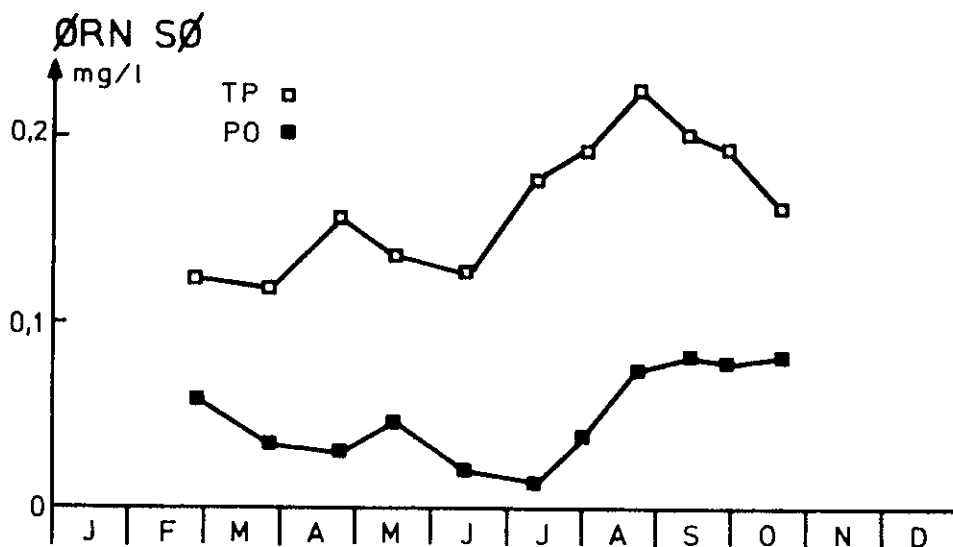


Fig. 6.18.

Årsvariation af TP og PO i Ørn Sø.

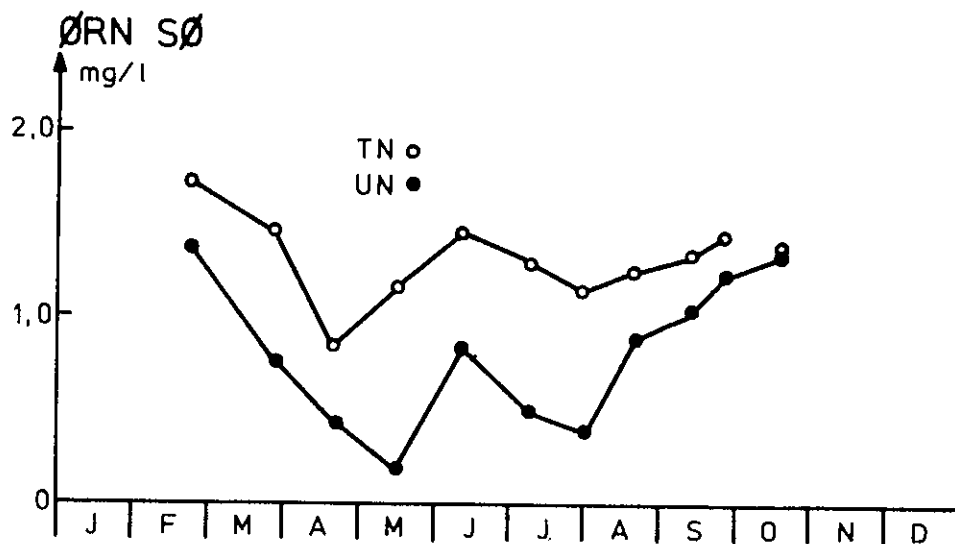


Fig. 6.19.

Årsvariation af TN og UN i Ørn Sø.

## 7. PRIMÆRPRODUKTIONEN

### 7.1 FORMÅL

Formålet med måling af primærproduktion og algebiomassebestemmelser er at belyse søernes eutrofieringsproblematik ved målinger af mængde og vækst af planteplankton.

### 7.2 BAGGRUND

Ved undersøgelserne er det forudsat, at kvælstof og fosfor samt de fysiske forhold i miljøet, herunder lyset, er bestemmende for størrelsen af planktonets vækst. De øvrige nødvendige næringsstoffer undtagen silicium er forudsat at eksistere i tilstrækkelige mængder. Dette gælder f.eks. kulstof og diverse metaller.

Produktionen af planteplanktonet er målt 12 gange igennem undersøgelsen. Samtidig er målt klorofyl-a, det farvestof i algerne, der er aktivt ved udnyttelsen af lyset. Disse målinger benyttes til indikering af den øjeblikkelige mængde af plankton, phytoplanktonets biomasse. Sammenholdes dette med målinger af de kemiske forhold i søerne og de tilførte stofmængder, er der hermed skabt et materiale, der kan tjene til forståelse af søernes eutrofieringsproblematik.

## 7.3 RESULTATER

Der er udført målinger af brutto phytoplanktonproduktionen 12 gange i løbet af undersøgelsen, 1 gang i 1973 og 11 gange i 1974. Målingerne er sammenfattet i tabel 7.1. Målingerne angiver bruttoproduktionen for phytoplanktonet i måleperioden: uge 13 - uge 42, 1974. Prøvetagningstidspunkterne fremgår af figur 7.3. Målingerne udført i 1973 er ikke medtaget i tabellen, idet disse målinger først og fremmest er benyttet ved udvælgelsen af søer og fastsættelse af målestationer i disse.

Sønavn	Bruttoproduktionen i måleperioden (230 dage) g C/m <sup>2</sup>	Bruttoproduktionen pr. år g C/m <sup>2</sup> /år	10 %'s dybde i gennemsnit SY m	Gennemsnitl. indhold af chl-a µg l <sup>-1</sup>
Almind sø	45	48	5,3	4,5
Brassø	240	260	1,1	70
Rald sø	200	210	3,2	34
Hinge sø	270	290	0,6	114
Nårressø	230	250	1,7	33
Salten Langsø I	160	170	1,5	33
" II	120	130	1,4	29
Silkeborg Langsø I	280	300	0,8	101
" II	240	260	0,8	91
" III	300	320	0,9	78
Slåen sø	30	30	6,0	3,3
Søndersø	280	300	1,1	80
Tange sø I	440	470	1,1	81
" II	390	420	0,8	87
Thor sø	80	90	1,7	15
Ved sø	230	250	1,1	63
Vessø	150	160	1,6	38
Ørn sø	310	330	1,0	112

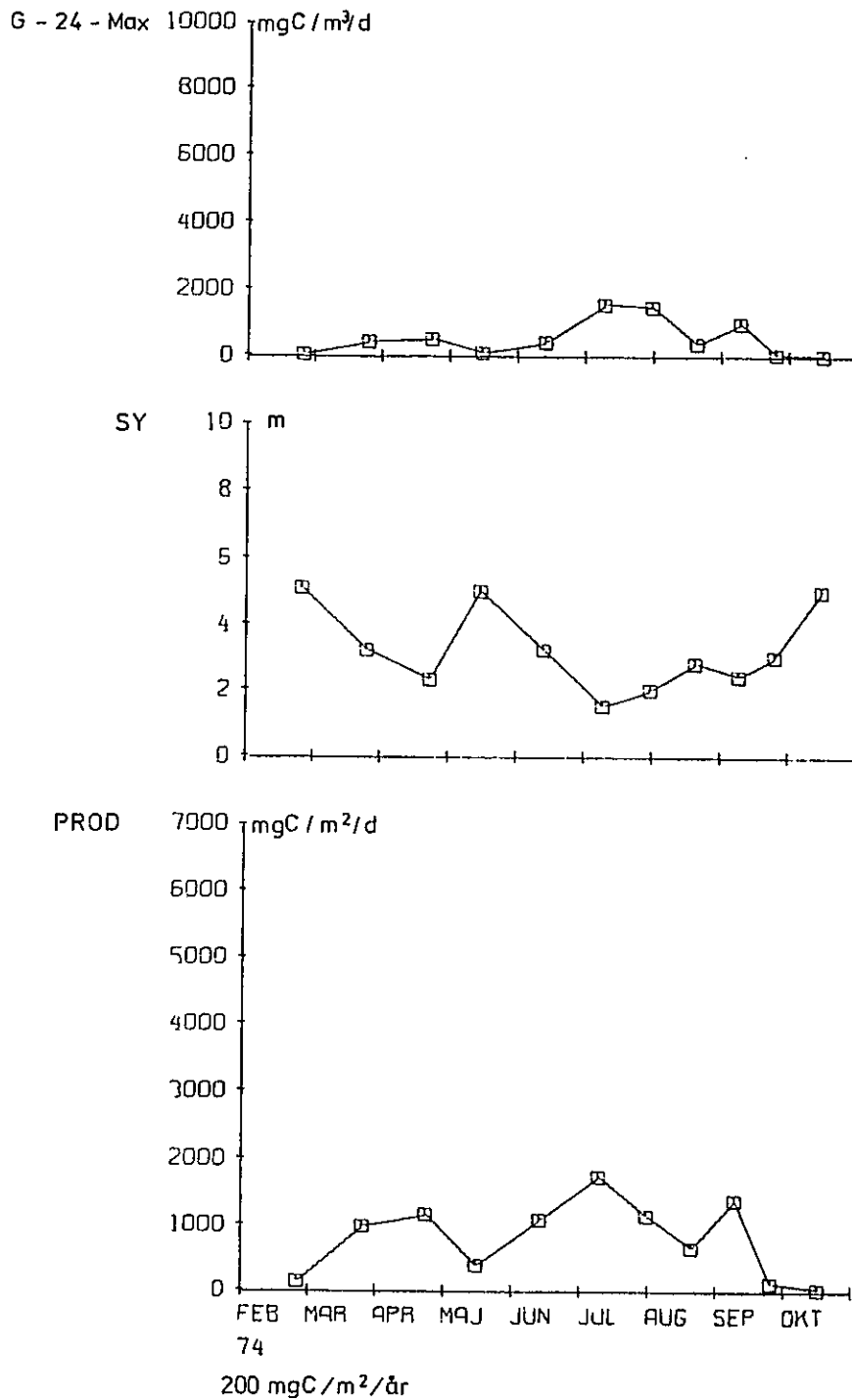
Tabel 7.1 Primærproduktionsdata for de undersøgte Gudenåsøer.

Målingerne er udført efter  $^{14}\text{C}$ -metoden ved inkubationsforsøg i laboratoriet /17/.

Som eksempler på vigtige primærproduktionsdata er for henholdsvis Hald sø og Hinge sø vist figurerne 7.1 og 7.2, hvor forløbet over måleperioden af  $G_{24 \text{ max}}$ , SY og produktionen (prod.) under  $1 \text{ m}^2$  søoverflade er optegnet. I bilag 1 er tilsvarende figurer angivet for alle søerne.

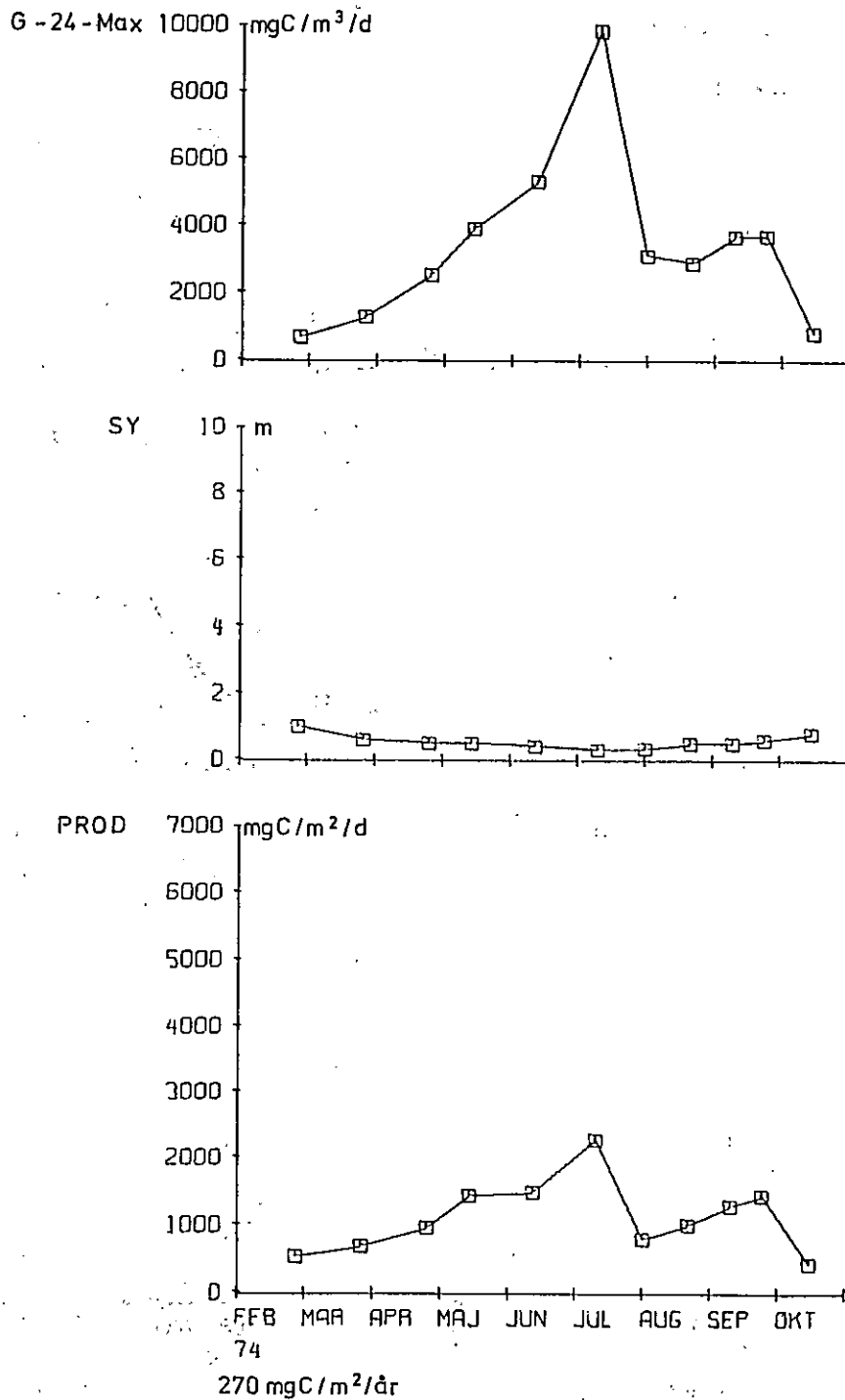
- 1)  $G_{24 \text{ max}}$  angiver den dybde, hvori den største produktion er målt. Angives i  $\text{mg C/m}^3/\text{dg}$ .
- 2) SY, 10 %'s dybden. Den dybde, hvori 10 % af lyset under overfladen resterer.
- 3) Prod. Phytoplanktonproduktionen under  $1 \text{ m}^2$  søoverflade. Angives i  $\text{mg C/m}^2/\text{dg}$ .

## HAL 1



Figur 7.1 Hald sø. -  $G_{24max}$ , SY og primærproduktion.

## HIN 1



Figur 7.2 Hinge sø. - G<sub>24max</sub>, SY og primærproduktion.

## 7.4 VURDERINGER

### 7.4.1 ÅRSPRODUKTIONEN

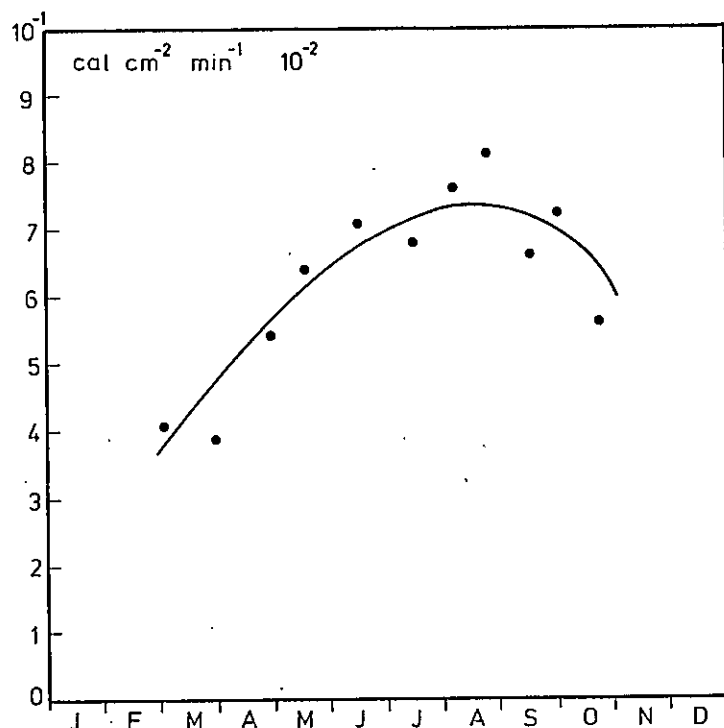
Phytoplanktonproduktionen er målt over et tidsrum af 230 dage indeholdende den produktive del af året. Om vinteren, i det tidlige forår og det sene efterår er produktionen begrænset af lyset. Produktionen om vinteren formodes at følge forholdene i Esrom sø /15/, hvor den pr. dag udgør 5% af gennemsnitsdagsproduktionen om sommeren. Antages produktionskurverne at følge insulationskurven /18/ forår og efterår, kan årsproduktionen beregnes som produktionen i måleperioden  $\cdot 1,07$ . De korrigerede værdier er anført i tabel 7.2.

### 7.4.2 PHYTOPLANKTONETS LYSADAPTATION

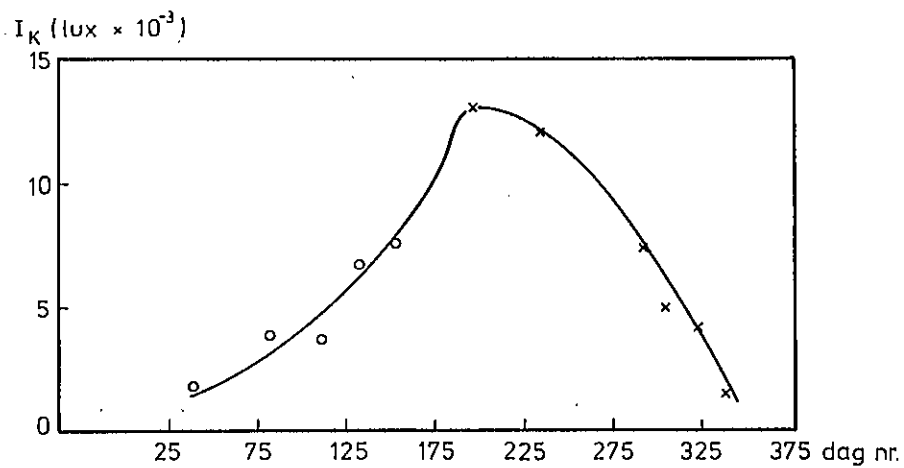
Phytoplanktonets produktion afhænger bl.a. af algerne lystilpasning: lysadaptationen, som angives ved en såkaldt  $I_K$ -værdi. En høj værdi betyder, at algerne er tilpasset kraftigt lys og omvendt for en lille  $I_K$ -værdi.

I Øresund er udført undersøgelser over  $I_K$ -værdiens variation på årsbasis /19/. Fra denne undersøgelse stammer figur 7.3, der viser disse forhold.

I Gudenåundersøgelsen er der for hver sø udført lignende undersøgelser. Resultatet er sammenfattet i figur 7.4, der viser  $I_K$ -variationen for samtlige søer på årsbasis. Der er en god overensstemmelse mellem de to kurver. Forskellen mellem den opstigende og nedstigende del af kurverne tillægges ingen betyd-



Figur 7.3  $I_K$ -værdiens årsvariation,  
Gudenåsystemets søer.



Figur 7.4  $I_K$ -værdiens årsvariation,  
Øresund (E. Steemann Nielsen)



ning, idet et forløb, som på figur 7.3, vil blive udjævnet ved beregningen af gennemsnittene. (Hvert punkt er et gennemsnit af målingerne i 14 søer fordelt over et stort trofiskektrum). Lysadaptationen udtrykt gennem  $I_K$ -værdierne for hver måleuge varierer kun lidt fra sø til sø. Adaptationsforholdene er derfor tilsyneladende ikke afhængige af forholdene i den enkelte sø, men af størrelser som temperatur, algearter og lys.

I bilag 4 er udregnet forholdet produceret mængde kulstof pr. chlorofyl-a enhed pr. 2 timer. Dette forhold ligger omkring 5. Det er vist /20/, at dette er tilfældet under optimale produktionsforhold, som formentlig hersker nær overfladen.

Disse resultater tages til indtægt for målingernes troværdighed.

### 7.4.3 MINIMUMSFAKTORER

Det er tidligere nævnt, at væksten af phytoplanktonet er begrænset af lyset på visse årstider. Hermed menes, at hvis lysstyrken blev forøget, ville produktionen stige, alle andre forhold lige. I vækstsæsonen fra ca. marts til oktober kan mangel på næringsstoffer bevirke en begrænsning af produktionen. Næringsstofferne kvælstof og fosfor er oftest på tale som vækstbegrænsende faktorer, men også andre stoffer, f.eks. silicium, der er nødvendig for vækst af kiselalger, kan virke begrænsende. Perioder, hvor et eller flere af disse næringsstoffer og/eller deres salte kan virke produktionsbegrænsende, er indiceret ved meget lave koncentrationer i vandmassen. Det skal dog understreges, at dette ikke nødvendigvis betyder, at produktionen vil være næringsstofbegrænset.

Tabel 7.2 viser, at der i de fleste af de undersøgte søer er sandsynlighed for en næringsstoffbegrænsning, idet der ofte er målt "lave" værdier af opløste kvælstof- og fosforsalte. Fosfor forekommer oftest i små mængder. Søernes ordning efter, hvor ofte der forekommer "lave" koncentrationer af fosfor, og ordningen efter størrelsen af primærproduktion, er i hovedtrækkene den samme. At disse to opstillinger ikke angiver de samme forhold, ses ved betragtning af forholdene for Slåen sø, hvor der kun een gang er observeret "lave" værdier af kvælstof- og fosforsalte. Slåen sø, der betegnes "naturlig eutrof", burde således i spektret placeres i modsat ende af Almind sø. Når en sø med så lille en årsproduktion som Slåen sø bliver placeret således, skyldes det bl.a. antagelsen, at lave næringsssaltkoncentrationer er vækstbegrænsende. Da der er et stadigt genbrug (recycling) af næringsssalte i vandmassen, vil der kunne opretholdes en produktion selv uden påviselige koncentrationer af opl. næringsssalte i vandet. Størrelsen af produktionen vil afhænge af bl.a. mængden af biomassen ved begyndelsen af en periode med lavt næringsstoffindhold. Disse forhold er dokumenteret bl.a. for Esrom sø / 5/, hvor koncentrationen af kvælstofsalte bliver mindre end detektionsgrænsen i flere måneder.

#### 7.4.4 ALGESUCCESSION/SI-BEGRÆNSNING

Begrænsninger af algevæksten på grund af mangel på silicium giver sig ikke nødvendigvis udtryk i produktionen målt pr.  $m^2$ . Den eventuelle begrænsning vil kun gøre sig gældende over for kiselalger, hvorfor betydningen af algesuccessionen kort skal omtales.

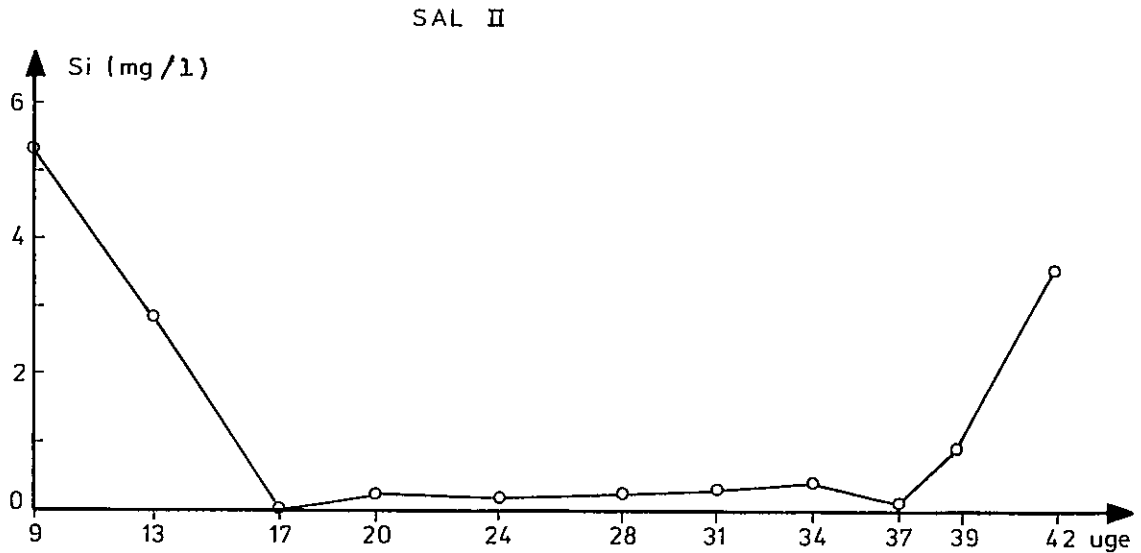
Sønavn	*) P < 10 µg l <sup>-1</sup> konstateret i antal gange	*) N < 10 µg l <sup>-1</sup> konstateret i antal gange	*) P < 20 µg l <sup>-1</sup> konstateret i antal gange	*) N < 20 µg l <sup>-1</sup> konstateret i antal gange
Almind sø	7	1	12	1
Brassø	4	0	5	0
Hald sø	0	0	0	0
Hinge sø	3	0	6	2
Nørresø	0	0	0	1
Salten Langsø I	3	0	6	1
" II	5	0	8	0
Silkeborg Langsø I	2	0	4	1
" II	3	0	7	2
" III	1	0	3	1
Slåen sø	1	1	1	2
Søndersø	0	0	0	0
Tange sø I	1	0	3	0
" II	3	0	5	1
Thor sø	2	0	4	1
Ved sø	0	1	1	2
Vessø	6	0	8	0
Ørn sø	1	0	2	0

Tabel 7.2 Tabellen angiver det antal målinger ud fra i alt 12, hvor forhold som angivet i tabellens hoved er til stede.

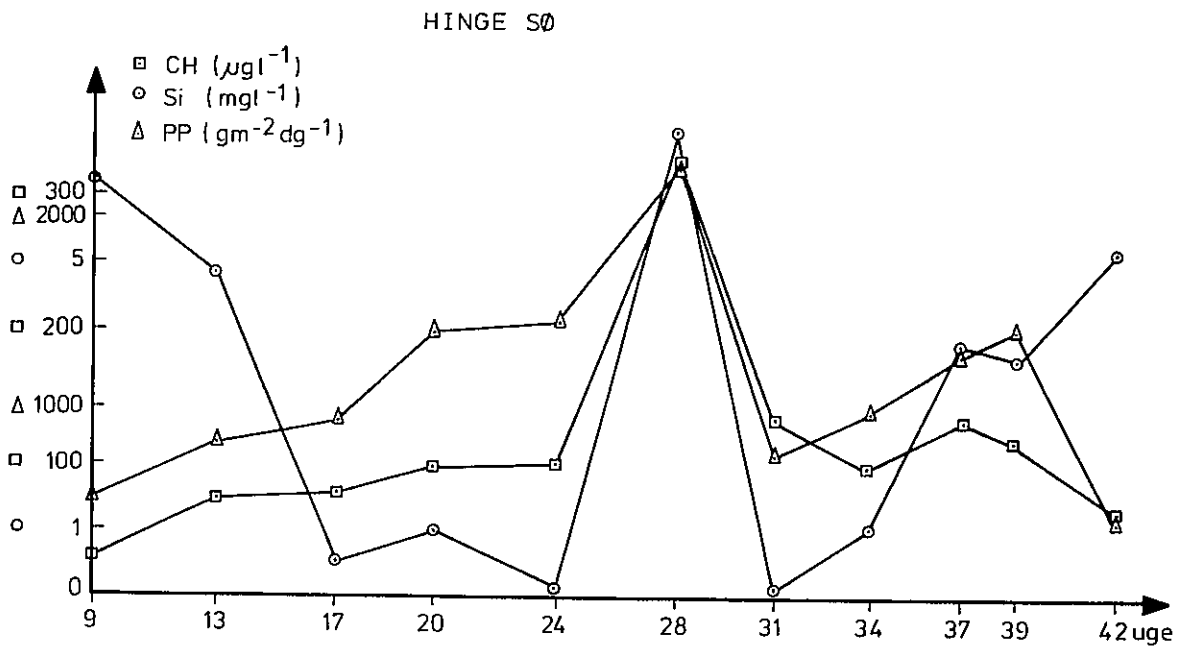
\*) P betyder her opløst fosfor, og  
N betyder summen af opl. salte.

Efter vinterens ophør starter en kraftig vækst især af kiselalger. Kiselalgerne afløses hen på forsommeren af grønalger, som i sensommeren afløses af blågrønalger. Disse sidste er ved masseforekomst de mest generende, idet de frembyder syns- og lugtgener. Om efteråret kan blågrønalgerne igen afløses af kiselalger. Ved at betragte siliciumkoncentrationen kan det følges, hvorledes kiselalgerens vækst foregår. De fleste arter af kiselalger sedimenterer hurtigt, og i kiselalgerens vækstperioder sker der derfor en stadig formindskelse af Si-koncentrationen i de overfladenære vandlag. Forholdene er vist i figur 7.5, der gengiver koncentrationsforløbet af Si i overfladen af Salten Langsø. Det ses, at silicium i hele sommerperioden er på et lavt niveau i overfladen af søen.

Årsvariationen for siliciumkoncentrationen, chlorofyl-a-koncentrationen og produktionen pr.  $m^2$  er angivet for Hinge sø i figur 7.6. Her indtræder i uge 28 en resuspension af siliciumholdigt bundmateriale (jvf. afsnit 8). Der sker en opblomstring af kiselalger, indiceret ved den samtidige stigning i produktion af chlorofyl-a-indhold. Heraf fremgår det, at diatomevæksten i Hinge sø har været begrænset af silicium, idet vandets indhold af kvælstof- og fosforsalte ikke er højere i uge 28 end i ugerne 24 og 31.



Figur 7.5 Salten langsø. Siliciumindhold (mg/l)



Figur 7.6 Hinge sø. Chlorofylindhold (CH  $\mu\text{g/l}$ )  
Siliciumkoncentration.  
Produktionsforløb ( $\text{g/m}^2/\text{dg}$ ).

#### 7.4.5 SAMMENLIGNING MELLEM FORSKÉLLIGE PRODUKTIONS- MÅLINGER

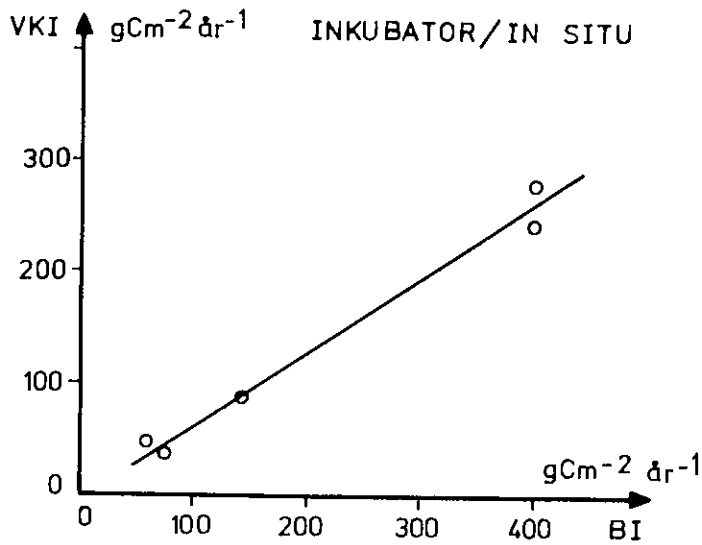
I tabel 7.1 er angivet årsproduktionen bestemt ved laboratorieproduktionsmålinger for de undersøgte søer. Visse af søerne har tidligere været undersøgt ved "in situ" produktionsmålinger /21/, og resultaterne herfra og fra indeværende undersøgelse er angivet i tabel 7.3.

Sønavn	"in situ" målinger udført af Botanisk Institut, Århus g C/m <sup>2</sup> /år	Laboratiemålinger udført af VKI g C/m <sup>2</sup> /år
Almind sø	60	50
Brassø	400	260
Slåen sø	70	30
Thor sø	140	90
Silkeborg Langsø	400	300

Tabel 7.3 Primærproduktionsmålinger udført af henholdsvis Botanisk Institut, Århus Universitet, og VKI i 1974. Målingerne udført af Botanisk Institut stammer for de flestes vedkommende fra perioden 1962 - 63.

Det ses, at laboratoriebestemmelserne alle ligger under "in situ" resultaterne.

Afbildes resultaterne som vist i figur 7.7, ses det, at der stort set er en lineær sammenhæng mellem "in situ" og laboratorieresultaterne. Det er da forudsat, at primærproduktionsforholdene og -niveauerne er uændret. For Slåen sø og Almind sø er belastningsforholdene de samme i dag som for ti år siden. For Thor søs og Brassø's vedkommende er spildevandsbelastningen



Figur 7.7 Figuren viser sammenhængen mellem målinger udført af Botanisk Institut og VKI. (Til trods for de antagne forudsætninger vedr. belastningsforhold m.m. for de angivne søer, og det forhold at produktionsniveauet kan variere meget fra år til år i den enkelte sø - er lineariteten usædvanlig god. En egentlig kalibrering af inkubator og in situ-målinger forventes gennemført for ferske recipienter i 1977).

holdt på stort set samme niveau, idet det skønnes, at reduktionen i belastningen ved afskæring af visse kloakledninger og forbedret rensning modsvares af belastning fra regnvandsoverløb og befolkningstilvækst.

For Silkeborg Langsø er spildevandsbelastningen øget siden 1962 - 64, men på grund af den meget korte opholdstid og den relativt store belastning skønnes dette kun at medføre en beskedent forøgelse i primærproduktionen.

Som hovedreference for inkubatormålingerne er benyttet /17/. Som reference for "in-situ" metoden kan anføres /1/ og /22/. I tabel 7.4 er metodikprincipper angivet.

	in-situ	Inkubator
exponering	i felten	i termostateret akvarium
exponeringstid	0,5 soldøgn	2 timer
suspenderingsmekanisme for algerne	bølgeslag	rotering af flasker
lyskilde	solen	lysstofarmatur
målemetode for radioaktivitet	Geiger-Müller rør	liquid scintillation
beregningsmåde	direkte ud fra analyser	fra analyser og med kendskab til den daglige gennemsnitsinsolation og lysets nedtrængen i vandet

Tabel 7.4 Summarisk sammenligning mellem in-situ- og inkubatormetoden til primærproduktionsmåling.



I tabel 7.5 er primærproduktionsværdier for de undersøgte søer angivet med "inkubator-værdier" og korrigerede "in-situ" værdier, idet det er antaget, at der er proportionalitet mellem resultaterne i overensstemmelse med figur 7.7. Desuden er den af Forureningsrådet /23/ angivne klassifikation benyttet.

Sønavn	Brutto primærproduktion		Klassifikation i A, B og C søer
	Inkubatorværdier g C/m <sup>2</sup> /år	in-situ værdier g C/m <sup>2</sup> /år	
Almind sø	50	70	A
Brasse	260	390	B
Hald sø	210	60	B
Hinge sø	290	110	C
Nørre sø	250	60	B
Salten Lange I	170	24	B
" II	130	10	B
Sikkelvig Lange I	300	13	C
" II	260	100	C
" III	320	10	C
Slæen sø	30	20	A
Søndersø	300	10	C
Tange sø I	470	0	C
" II	420	0	C
Thor sø	30	14	AB
Ved sø	250	60	B
Vestsø	160	0	B
Ørn sø	330	0	C

Tabel 7.5 Årsproduktion i de undersøgte søer angivet ved laboratorieværdier (inkubator) og værdier svarende til benyttelsen af "in-situ" metoden. Desuden er anført en "inddeling" af søerne i A, B og C søer.

## 7.4.6 SIGTEDYBDE/CHLOROFYL

Sigtedybden er et mål for vandets indhold af partikulært materiale. I eutrofe søer, hvor en væsentlig del af partikelindholdet er algebiomasse, vil sigtedybden således være et mål for denne.

Sigtedybden, VI, er en kontrastmåling og ikke som 10 %'s dybden, SY, en lysmåling. SY svarer dog tilnæret til VI. Sammenhængen mellem VI og SY er årstidsafhængig, som det fremgår af tabel 7.6. For de undersøgte søer i Gudenåsystemet findes for 1974 følgende sammenhæng:

$$VI = 0,83 \cdot SY + 0,31$$

hvor VI og SY angives i m.

Forskellen mellem VI og SY er størst, når partikelindholdet i vandet er lavest, d.v.s. i de rene søer, samt i de mere eutrofe søer i vinter- og efterårsperioden, hvor produktionen også her er lav.

Uge nr.	a	b (m)
9	0,82	0,39
13	0,74	0,37
17	0,76	0,34
20	0,72	0,29
24	0,79	0,25
28	0,66	0,27
31	0,73	0,32
34	0,79	0,41
37	0,90	0,34
39	1,05	0,31
42	1,13	0,13

Tabel 7.6 Tabellen angiver sammenhængen mellem 10%'s dybden SY og sigtedybden VI i gennemsnit udregnet for 14 søer (18 stationer) for hver målerunde. Betydningen af a og b er følgende:

$$VI = a \cdot SY + b$$

Gennemsnittet af alle målerunder d.v.s. på årsbasis giver:

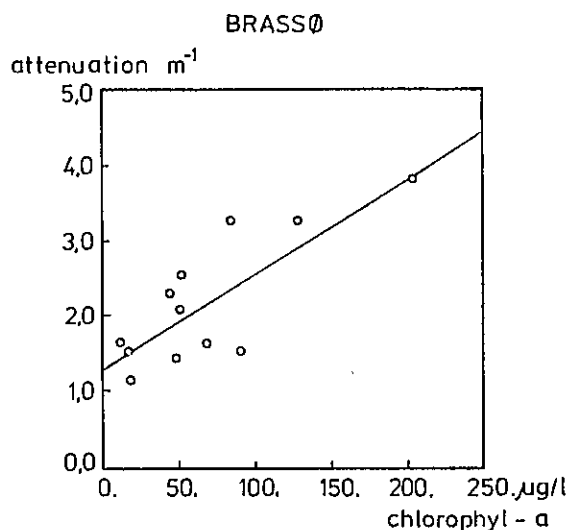
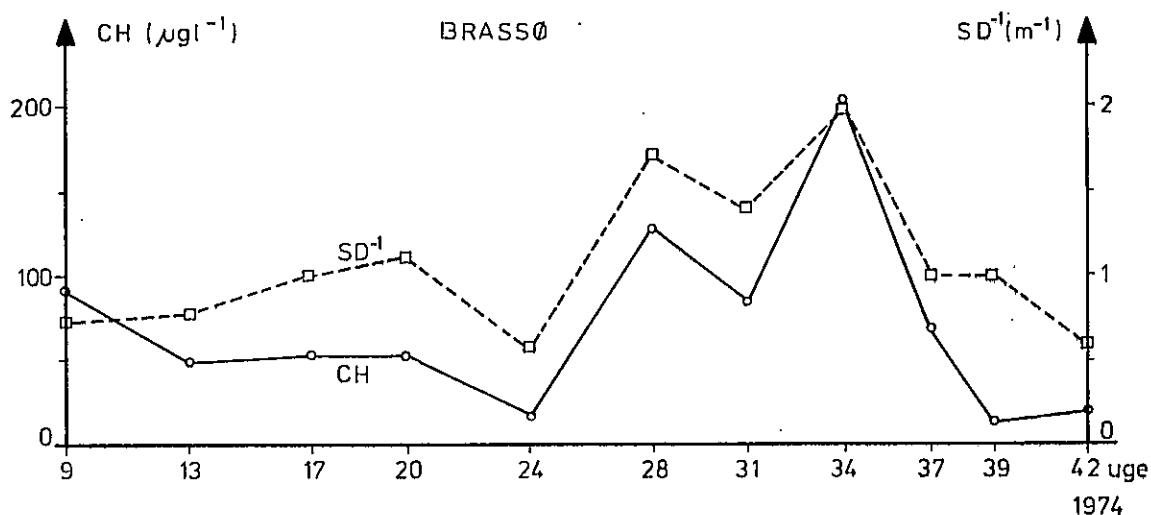
$$VI = 0,83 SY + 0,31$$

(VI og SY måles i m).

Sammenhængen mellem SY (lysabsorption) og algebiomasse er evalueret for samtlige undersøgte søer. Algebiomassen er udtrykt ved chlorofyl-a-koncentrationen i søoverfladerne, CH, og sigtedybden ved den reciprokke 10 %'s dybde,  $SY^{-1}$ . Figur 7.8 viser sammenhørende målinger af CH og  $SY^{-1}$  (attenuation) for Brassø, dels afbildet som funktion af årstiden, dels afbildet mod hinanden med regressionslinien indtegnet. Bilag 3 viser sammen-

hængen for samtlige undersøgte søer. Der er overensstemmelse mellem chlorofylindhold og 10 %'s dybde, og dermed sigtedybde. Overensstemmelsen er også her bedst i de eutrofierede søer og ringest i de rene søer, hvor algerne's betydning for lysabsorptionen er mindst.

Det skal endelig bemærkes, at der er korrelation mellem samtlige biomasseparametre: chlorofyl-a og partikulært fosfor, -kvælstof og -kulstof.



Figur 7.8 Sammenhæng mellem lysdæmpning (extinction) og klorofyl-a i Brassø i 1974.

### 7.4.7 BIOMASSEMÅLINGER

Den målte årsproduktion (P) angiver den mængde algekulstof, der i de undersøgte søer dannes pr. år pr.  $m^2$  søoverflade. Den totale årsproduktion er imidlertid ikke nettodannet algekulstof, idet dette efterhånden ved algernes død nedbrydes og igen indbygges i nye alger. Her beregnes forholdene P/B (årsproduktion/gennemsnitlig algebiomasse pr.  $m^2$  søoverflade), som formelt angiver, hvor mange gange i måleperioden algerne er i stand til at forny deres egen biomasse.

Som mål for biomassen i en sø anvendes her det gennemsnitlige kemiske iltforbrug COD af det partikulære materiale i søer, beregnet som differens mellem COD i en ufiltreret og en filtreret vandprøve. COD er angivet i g ilt pr.  $m^3$ . Dette omsættes til g algekulstof pr.  $m^3$  ved multiplikation med 1,1. Ved multiplikation med søens middeldybde findes endelig middelkoncentrationen pr.  $m^2$  søoverflade (B). Det forudsættes, at det partikulære kulstofindhold hovedsagelig udgøres af alger.

I tabel 7.7 er forholdet P/B beregnet for de undersøgte søer. Ud over middelkoncentrationen af algekulstof, beregnet på basis af COD-målinger, er der i tabellen anført middelkoncentrationer af algekulstof i søoverfladerne, beregnet på basis af chlorofyl-a-målinger ( $\sim CH \cdot 50$ ).

Måleperioden er 33 uger, og P/B-forholdet viser, at søernes algepopulationer i gennemsnit formår at opbygge deres egen biomasse på ca. 1 uge, jf. /10/. Undtagelser udgøres af Silkeborg Langsø III, Tange I og Tange II. I disse søer er P/B-forholdet højt grundet rigelige næringsstofftilledninger.

Sønavn	P Årsproduktion g C/m <sup>2</sup> /år	Gsn. CH i overfl. mg/m <sup>3</sup>	Gsn. kulstof (fra CH) i overfl. g/m <sup>3</sup>	Gsn. kulstof (PE-FO) fra alle dybder g/m <sup>3</sup>	Søens middel- dybde: $\bar{x}$ m	B Middel kulstof indhold $\bar{x}$ ·(PE-FO) g/m <sup>2</sup>	P/B år <sup>-1</sup>
Almind sø	50	4,5	0,2	0,83	10,4	8,6	6
Brassø	260	70	3,5	2,27	4,6	10,4	25
Hald sø	210	80	4,0	0,88	14,6	12,8	16
Hinge sø	290	90	4,5	5,05	2,3	11,6	25
Nørresø	250	130	6,5	1,21	7,0	8,5	30
Salten Langsø I	170	70	3,5	1,34	6,5	8,7	20
" II	130	30	1,5	1,90	2,2	4,2	31
Silkeborg Langsø I	300	160	8,0	3,51	2,6	9,1	33
" II	260	120	6,0	3,21	2,8	9,0	29
" III	320	210	10,5	3,14	2,0	6,3	51
Slåen sø	30	10	0,5	0,48	7,1	3,4	9
Søndersø	300	220	11,0	3,11	3,6	11,2	27
Tange sø I	470	180	9,0	2,62	1,5	3,9	120
" II	420	190	9,5	3,22	2,5 <sup>*)</sup>	8,1	52
Thor sø	80	20	1,0	0,73	3,0 <sup>*)</sup>	2,2	37
Ved sø	250	130	6,5	5,74	5,4	31,0	8
Vessø	160	70	3,5	1,88	3,0 <sup>*)</sup>	5,6	28
Ørn sø	330	140	7,0	1,94	4,1	8,0	42

Tabel 7.7

Biomassemålinger.

P ~ årsproduktion g C/m<sup>2</sup>/år

CH ~ chlorofylindholdet

PE ~ organisk stof bestemt med KMnO<sub>4</sub> på  
ufiltreret prøve

FO ~ organisk stof, filtreret prøve

B ~ gennemsnitlig algebiomasse (g/m<sup>2</sup>)

## 7.4.8 MÅLING AF KVÆLSTOFFIXERING

I uge 31 observeredes i alle søer et blågrønalgemaximum, og det blev besluttet at foretage en undersøgelse af, om der på dette tidspunkt i søerne forekom kvælstoffixering. Kvælstoffixering blev målt ved acetylenreduktionsmetoden, som er beskrevet i bilag 2. I alle de undersøgte søer målttes ingen acetylenreduktion, d.v.s. en eventuel kvælstoffixering i disse søer er mindre end detektionsgrænsen for målemetoden på ca. 3  $\mu\text{g N}_2/\text{l/dg}$ . De undersøgte søer var:

ALM	SAL	I	SLÅ	VES
BRA	-	II	SØN	ØRN
HAL	SIL	I	TAN	I
HIN	-	II	-	II
NØR	-	III	VED	

## 7.4.9 SUPPLERENDE PRIMÆRPRODUKTIONSMÅLINGER

Til supplement af primærproduktionsmålingerne i de intensivt undersøgte søer er der udført enkelte produktionsmålinger på nogle få andre af systemets søer, jf. tabel 7.8:

Gudensø, Jul sø, Alling sø, Stigsholm sø,  
Halle sø og Søbygård sø.

Forskell i prøveudtagningsmetodik ved disse søer (udtagning fra søbredden) i forhold til Brassø og Hinge sø (udtagning fra båd i søernes midte) og samtidig akkumulering af blågrønalger langs bredderne på de

angivne datoer har bevirket, at der i flere tilfælde var et ekstraordinært højt algeindhold i prøverne fra de supplerende søstationer. Uoverensstemmelser mellem produktionsværdier for søer på samme vandløbsstrækninger er således ikke overraskende. Et forsigtigt skøn på baggrund af disse få målinger siger følgende:

Årsproduktionen i Gudensø og Brassø er af samme størrelse, medens den er noget større i Jul sø.

Årsproduktionen i Hinge sø og Alling sø er af samme størrelse.

Halle sø er mere produktiv end Stigsholm sø. Det skønnes, at produktionen i Halle sø svarer til Brassø-niveau, medens produktionen i Stigsholm så svarer til Thor sø-niveauet.

Søbygård sø's eutrofi-niveau kan betegnes som hypereutrofieret (jf. Lillesø ved Skanderborg). Sø vandet kan tilsyneladende være relativt klart - således i sommerperioder tilsyneladende uden eller kun med få planktonalger, jf. den lave produktion. I dette tidsrum forekommer ofte store mængder af daphnier, som udøver en overordentlig stor græsningseffekt.



Sønavn	73.09.12	74.08.24	74.09.10	74.09.23	74.10.16
<u>Gudenåen</u>					
Gudensø			447	178	41
Jul sø			800	1600	131
Brassø			288	41	23
<u>Hinge å</u>					
Hinge sø	932	677	884	867	261
Alling sø	951	313	908	708	212
<u>Mattrup å</u>					
Stigsholm sø			117	45	95
Halle sø				454	223
<u>Gjern å</u>					
Søbygård sø			40	2,8	3

Tabel 7.8 I tabellen er anført produktionsmålinger udført på de angivne datoer. Tabellen belyser forskellen i produktionen i søer beliggende i rækkefølge på de nævnte år. Alle værdier er mg C/m<sup>2</sup> døgn.

## 7.5 SAMMENFATNING

Undersøgelser over primærproduktionsforhold i en række søer i Gudenåsystemet igennem 1974 viser følgende:

Af de undersøgte søer er der

- 2 A søer
- 9 B søer
- 8 C søer.

De skiftende phytoplanktonpopulationers lystilpasning varierer med året. Variationer af samme art er tidligere påvist i Øresund.

Sammenligning mellem årsproduktionen i 5 søer, målt i 1962-65 ved in situ målinger, og årsproduktionen i de samme 5 søer i 1974, målt ved inkubatormålinger, viser følgende sammenhæng:

$$P_{\text{inkub.}} = P_{\text{in situ}} \cdot 1,5$$

$$\text{eller } P_{\text{in situ}} = P_{\text{inkub.}} \cdot 0,67$$

Disse omsætningsforhold er benyttet ved eutrofierede og rene søer.

Forekomsten af periodevise "lave" værdier i koncentrationen af fosfor- og kvælstofsalte indikerer en sandsynlighed for næringssaltbegrænset algevækst.

I Nørre sø, Hald sø og Søndersø er der ikke konstateret sådanne forhold.

I resten af de undersøgte søer er der konstateret fosforbegrænsning i perioder.

I Almind-, Slåen- og Ved sø er der desuden konstateret kvælstofbegrænsning.

Analyser viser, at væksten af kiselalger kan være begrænset af silicium en stor del af året. I Hinge sø er siliciumbegrænsning påvist i sommerperioden.

Der er påvist en årstidsvarierende sammenhæng mellem sigtedybde og 10 %'s dybden.

For hver undersøgt sø er der påvist en sammenhæng mellem sigtedybde og chlorofylindhold.

Det er beregnet, at søernes algepopulation i gennemsnit formår at opbygge deres egen biomasse på ca. 1 uge. I stærkt belastede søer er reproduktionsraten dog større. Størst er den i Tange sø, bassin I.

I ingen af de undersøgte søer er der under et blågrønalgemaximum målt kvælstoffixering.

## 8. SEDIMENTUNDERSØGELSER

### 8.1. FORMÅL

Formålet med sedimentundersøgelserne var at skaffe kendskab til

Profundalsedimentets tekstur og kemiske sammensætning.

Sedimentets betydning for sammensætningen af den ovenliggende vandmasse (redoxbetiget binding/frigørelse af fosfor og kvælstof, samt sedimentations- og resuspensionsforhold).

Ved undersøgelsen er det ikke forsøgt at kortlægge sedimenternes mægtighed, men en enkelt måleserie er udført for at kunne indikere den recente sedimentation.

På basis af disse informationer etableres et referencemateriale for såvel de kulturpåvirkede søer, som de ubelastede søer. Sammenholdt med informationer fra stoftransportundersøgelsen / 16/ kan sedimentets andel i stofomsætningerne i søerne beregnes.

## 8.2. BAGGRUND

På sedimentets overflade lagres såvel organiske - som uorganiske partikler. Det sidste bl.a. i medfør af kemiske udfældningsreaktioner med fosforholdige stoffer. I sedimentet sker en nedbrydning af organisk stof samtidig med at opløselighedsforholdene ændres.

Resultatet er, at der især om sommeren sker en ophobning af kvælstof og fosforholdige salte i sedimentet. Disse koncentrationer er ofte større end koncentrationerne i vandmassen. Der sker derfor ved "diffusion" en transport af næringssalte op i vandmassen. Transporten forøges i den udstrækning den vindskabte cirkulation i søen er i stand til at resuspendere sedimentet.

Ved vurderingen af stofomsætningen i en sø er det således af væsentlig betydning at have kendskab til

- 1) Sedimentets kemiske sammensætning
- 2) Sedimentets reaktivitet med hensyn til binding/frigørelse af kvælstof og fosfor.
- 3) Fysiske og fysisk-kemiske faktorer, som har indflydelse på sedimentets sammensætning og reaktivitet, (sedimenttilvækst-hastighed, resuspensionsforhold og variationer i redoxforhold).

Det er vist, at sedimentets indhold af forskellige stoffer ændres gennem året, bl.a. som følge af de herskende kemiske forhold i vandfasen i kontakt med sedimentet. Ved denne undersøgelse er der derfor gennemført prøveudtagning og målinger i de perioder, hvor sådanne ændringer er sandsynlige.

### 8.3. UDFØRELSE

Følgende undersøgelser er udført:

Udtagning og analysering af sedimentkerneprøver til sedimentbeskrivelse (afs. 8.4.)

Ved laboratorieforsøg er sedimentsøjleprøver blevet underkastet forhold, der tilnærmet svarer til de naturligt forekommende, med henblik på at følge næringsstofudveksling mellem vand- og sedimentfase i afhængighed bl.a. af redoxforholdene (afs. 8.5).

Der er i udvalgte søer udført forsøg med sedimentfælder til klarlæggelse af sedimentations- og resuspensionsforhold. (afs. 8.6).

I Tange sø er sedimentets mægtighed blevet kortlagt med henblik på at beregne den recente sedimentation (afs. 8.7).

## 8.4. SEDIMENTBESKRIVELSE

### 8.4.1. PRØVEUDTAGNING

Sedimentprøver er udtaget som uforstyrrede sedimentkærneprøver ved hjælp af "kajak"-prøveudtager (bundhenter).

Der er ialt i undersøgelsen udtaget 41 sedimentprøver til sedimentkarakteristik. De udtagne prøver er 20-30 cm lange betinget af bundhenterens evne til at trænge ned i sedimentet. Antallet af lokaliteter fremgår af tabel 8.4.1. og placeringen af lokaliteterne fremgår af fig. 8.4.1.

Der er udført 3 prøvetagninger på søerne:

Almind sø, Brassø, Hald sø, Sønder sø, Tange sø og Vessø.

Disse formodes at repræsentere spektret af søer, hvori årstidsbestemte variationer kan forventes at forekomme.

Prøvetagningen er udført i ugerne 13, 31 og 42. Disse prøvetagningstidspunkter svarer til forårstotalcirkulation, sommerstagnation og umiddelbart efter dennes ophør.

### 8.4.2. VISUEL BESKRIVELSE OG ANALYSERING

Sedimentprøverne er "visuelt" beskrevet med hensyn til udseende, konsistens, lugt m.m. Derpå er der foretaget en segmentering af kærnerne, og de enkelte segmenter er analyseret efter et program omfattende: (forts. p. 8.7)

Kode	Lokalitet
ALM	Almind sø, vestbassin
BRA	Brassø, ud for Hattenæs
HAL	Hald sø, sydvestende,
HIN	Hinge sø, midte
MOS I	Mossø, ved Lindholm Hoved
MOS II	Mossø, ud for Augustenborg
NØR	Nørre sø, nordøstlige ende
SAL I	Salten Langsø, østlige ende af midtbassin
SAL II	Salten Langsø, midt i østbassin
SIL I	Silkeborg Langsø, vestbassin, midte
SIL II	Silkeborg Langsø, midtbassin, midte
SIL III	Silkeborg Langsø, østbassin, midte, lidt øst for Søholt
SKA	Skanderborg sø
SLÅ	Slåen sø, vestlige ende
SØN	Sønder sø, østsiden, lidt nord for sømidte
TAN I	Tange sø, sydbassin, før Ansbroen
TAN II	Tange sø, nordbassin, før indsnævring
THO	Thor sø, midte
VED	Ved sø, østenden
VES	Vessø, midte
ØRN	Ørn sø, sydlige del

Tabel 8.4.1.

Prøvetagningslokaliteter.  
I samtlige søer er det tilstræbt  
at udtage prøverne på det dybeste sted.



## Gudenå-systemets søer.

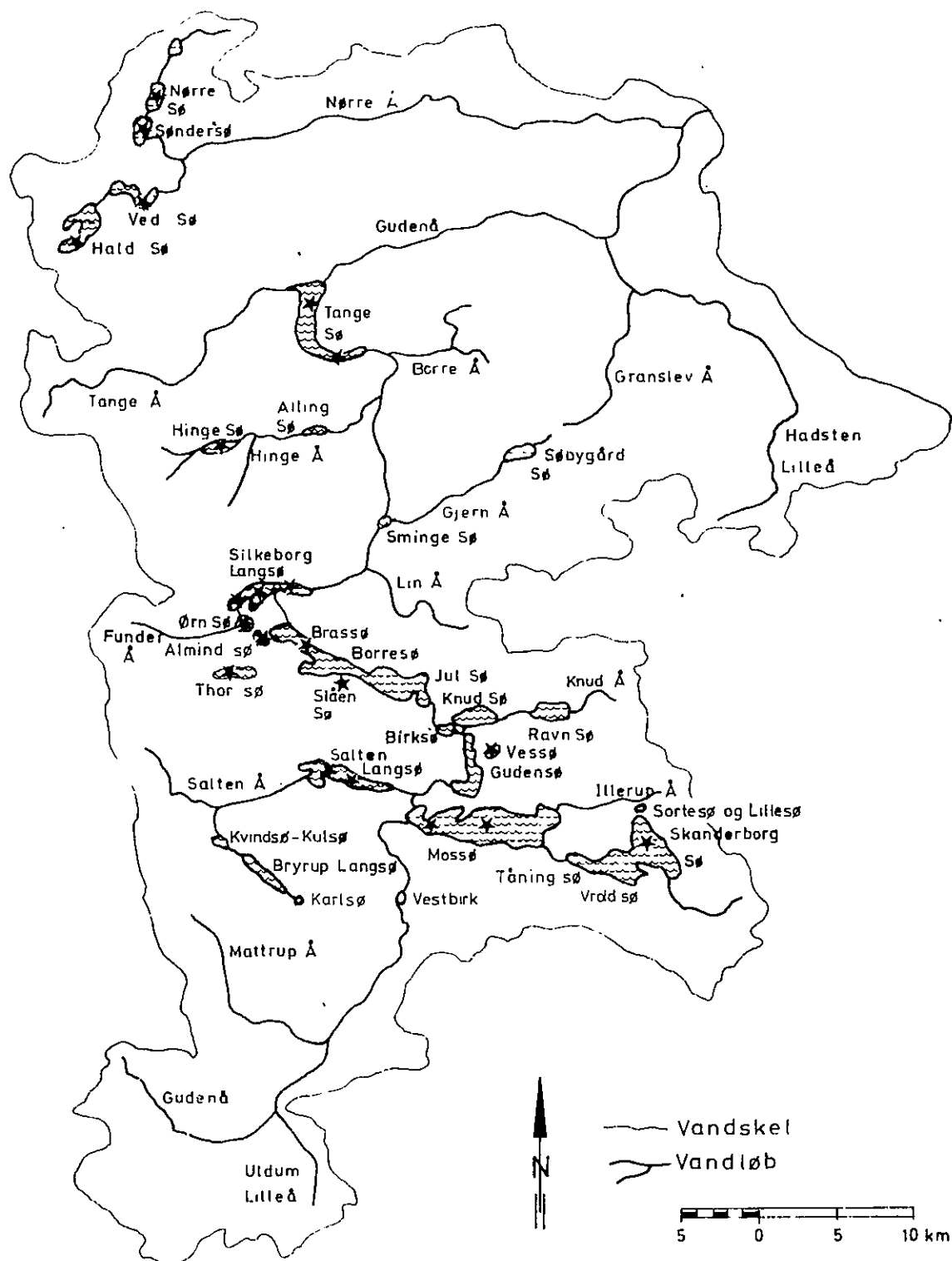


Fig. 8.4.1. Prøvetagningslokaliteter

angivet ved \*

TS	tørstof
GT	glødetab
COD	kemisk iltforbrug ( $\text{COD}_{\text{KMnO}_4}$ )
TN	total kvælstof
TP	total fosfor
Ca	calcium
Fe	jern
Pb	bly (Almind sø)

Disse parametre (excl. bly) er normalt anvendt til karakterisering af sedimentener.

Analysemetoder fremgår af / 6/.

### 8.4.3. RESULTATER OG KOMMENTARER

Tabel 8.4.2. indeholder en beskrivelse af sedimenternes udseende og lugt.

Sedimentprøverne fremtræder ensartede. De består alle af gytje: en korn- og strukturfri sedimenttype, hvor hovedparten udgøres af organismerester, f.eks. sedimenteret plante- og dyreplankton. Sedimentet er ofte sortfarvet af indholdet af FeS, mens brunlig farve kan skyldes iltede Fe forbindelser. Konsistensen er salveagtig og sedimenterne er let klæbende. Sedimentoverfladen er flocculøs og lader sig let ophvirvle. Blade og grenstumper samt tagrørsstængler findes som regel ikke i prøverne. Sand i mængder, der kan konstateres ved beføling, forekommer kun i prøven fra Mossø I.

Observation af sand i nærheden af stationerne i Brassø, Tange sø og Mossø I må skyldes, at de alle gennemstrømmes af Gudenåen, og derfor er udsat for virkningerne af en materialetransport.

Kode	farve sort	farve brunlig	brunt overfl. lag	sand i prøven	lagdeling v. farveændring i prøven	lugt af H <sub>2</sub> S
ALM	x		x			x
BRA		x		x <sup>o</sup>		
HAL	x		x			x
HIN		x				
MOS I				x	x	
MOS II					x	
NØR	x		x			x
SAL I		x				
SAL II		x				
SIL I	x		x			
SIL II	x		x			
SIL III	x		x			
SKA			x		x	
SLÅ	x		x			
SØN		x				
TAN I	x		x	x <sup>o</sup>		
TAN II	x		x			
THO	x		x			
VED	x					
VES		x				
ØRN	x	x				

Tabel 8.4.2.

Visuel karakterisering af søsedimenter

<sup>o</sup>: der blev konstateret sandlag ikke langt fra prøveudtagningsstedet.

Lagdeling er kun synlig i prøverne fra Mossø I og II og Skanderborg sø. Disse prøver er opdelt efter de synlige grænseflader, og sedimentet over og under grænsefladen er analyseret separat. Resultaterne af disse analyser fremgår af tabel 8.4.3. Kun i Mossø I fremgår lagdelingen tydeligt ved forskelle i kemisk sammensætning over og under grænsefladen.

I tabel 8.4.4. er analyseresultaterne angivet som et gennemsnit af målingerne i de øverste 10 cm. Denne dybde er udvalgt, idet det antages, at påvirkningerne gennem det sidste årti bedst afspejles her /24/. Det er også indenfor denne dybde, at den væsentlige sedimentaktivitet foregår. Dette fremgår bl.a. af redoxmålingerne, jf. side 8.33. I kolonnen yderst til højre er phytoplankton-produktionen angivet: PP (inkubationsmålinger). Af systemets søer har Almind, Slåen og Thor sø de laveste produktioner. De mest produktive søer er Tange, Silkeborg og Ørn sø. Det forventes, at sedimentet vil afspejle dette forhold, idet phytoplanktonet, her angivet ved produktionen, indgår i sedimentets dannelse. Det fremgår, at kvælstof- og fosforindholdet i sedimentet i de to grupper af søer følger denne antagelse. De største værdier for kvælstof og fosfor forekommer imidlertid uden for de to ovennævnte grupper. Der er således ingen klar korrelation mellem PP og sedimentets indhold af kvælstof og fosfor. Dette viser sig også at gælde mellem PP og forholdet: N:P.

PP er udtrykt på kulstof-basis. Sedimentets indhold af organisk stof og dermed kulstof er udtrykt ved glødetabet: GT. Heller ikke her synes der at være nogen korrelation. De manglende korrelationer må forklares ved, at dels er sedimentets indhold af kvælstof og fosfor den mere eller mindre blivende rest efter en omsætning af organisk stof, herunder også en eventuel denitrifikation, dels er også materiale tilført udefra med til at bestemme sedimentets sammensætning.

LOKALITET Dybde (cm)	TN g/kg <sup>-1</sup> TS	TP g/kg <sup>-1</sup> TS	Ca g/kg <sup>-1</sup> TS	Fe g/kg <sup>-1</sup> TS	GT g/kg <sup>-1</sup> TS	TS g/kg <sup>-1</sup> prøve
Mossø I						
0 - 7,5	10,1	2,0	62	29	160	190
7,5-10,0	8,2	0,95	35	33	150	220
Mossø II						
0 - 4,5	12,9	1,9	110	17	220	74
4,5-10,0	12,2	1,6	120	30	210	95
Skander- borg Sø						
0 - 4,0	12,0	3,1	156	15	200	82
4,0-10,0	11,6	1,6	161	15	200	99

Tabel 8.4.3.

Sedimentanalyser for de søer, hvor der i sedimentet blev konstateret synlige gradienter i form af farveforskelle. Sedimentsøjlerne er adskilt og analyseret efter farveforskellene. Prøverne er alle udtaget i uge 12, 1975.

S Ø	TS g/kg <sup>-1</sup> prøv	GT g/kg <sup>-1</sup> TS	TP g/kg <sup>-1</sup> TS	TP g/kg <sup>-1</sup> W	TN g/kg <sup>-1</sup> TS	Ca g/kg <sup>-1</sup> TS	Fe g/kg <sup>-1</sup> TS	N:P	PP g/C/m <sup>2</sup> ·år
ALM	82	230	3,2	0,26	11,0	6	103	3,4	50
BRA	74	267	2,3	0,17	14,1	25	40	6,1	240
HAL	88	169	6,7	0,59	8,7	39	32	1,3	200
HIN	140	190	2,2	0,31	10,3	14	113	4,7	270
MOS I	190	160	1,5	0,29	9,2	48	21	6,1	-
MOS II	74	220	1,7	0,13	12,6	18	115	7,4	-
NØR	-	-	-	-	-	136	15	-	230
SAL I	85	210	4,4	0,37	12,6	11	111	2,9	160
SAL II	67	230	4,3	0,29	15,0	10	77	3,5	120
SIL I	98	220	4,6	0,45	11,7	7	88	2,5	280
SIL II	82	220	4,2	0,34	13,3	10	64	3,2	240
SIL III	71	280	2,9	0,21	15,5	15	29	5,3	300
SKA	90	200	2,4	0,22	11,8	159	15	4,9	-
SLÅ	95	265	4,6	0,44	10,9	7	140	2,4	30
SØN	59	361	2,5	0,15	22,2	15	25	8,9	280
TAN I	85	281	5,9	0,50	15,9	12	50	2,7	440
TAN II	72	280	5,1	0,37	14,5	10	48	2,8	390
THO	84	310	2,1	0,18	12,3	12	96	5,9	80
VED	65	240	4,0	0,26	16,4	15	28	4,1	230
VES	84	293	1,4	0,12	14,6	90	31	10,4	150
ØRN	95	280	6,0	0,57	13,5	10	151	2,3	310

Tabel 8.4.4. Analyseverdier for de øverste 10 cm af søsedimenterne. De anførte værdier er gennemsnit af analyser, foretaget på prøver, udtaget på forskellige tidspunkter af året.

Der er udført 2 - 3 sedimentprøvetagninger i søerne Almind, Bras, Hald, Sønder, Tange og Vessø. Disse formodes at repræsentere spektret af søer, hvori årstidsbestemte variationer kan forventes at forekomme. Prøvetagningerne er udført i ugerne 13, 31 og 42, 1974. Prøvetagningstidspunkterne svarer til forårstotalcirkulationen, sommerstagnationen og umiddelbart efter dennes ophør. Analyseresultaterne herfra indgår i de gennemsnitsanalyseværdier, der er anført i tabel 8.4.4. Tabel 8.4.5 viser enkeltresultaterne.

I Almind sø, Brassø og Hald sø optræder en årstidsvariation i sedimentets fosforindhold. Disse variationer er afbildet på fig. 8.4.2.

I Almind sø og (formentlig) Hald sø er der sket en fosforfrigørelse i perioden uge 13 til uge 31. I Brassø er der først sket en binding fra uge 13 til uge 31, og dernæst en frigørelse af samme størrelse fra uge 31 til uge 42. Fosforomsætningen i sedimenterne i disse perioder er af størrelsen:

Almind sø:	ca. 17 mg P/m <sup>2</sup>	. dg	frigøres
Hald sø:	ca. 260 mg P/m <sup>2</sup>	. dg	frigøres
Brassø:	ca. 90 mg P/m <sup>2</sup>	. dg	bindes og frigøres derpå igen.

(De angivne værdier må kun opfattes som orienterende, da usikkerheden på værdierne er stor).

## 8.13

S Ø	Dybde cm	TP g/kg <sup>-1</sup> TS			TN g/kg <sup>-1</sup> TS			Ca g/kg <sup>-1</sup> TS			Fe g/kg <sup>-1</sup> TS		
		13	31	42	13	31	42	13	31	42	13	31	42
ALM	0-1	3,5	2,5		11,7	14,1		5,0	4,8		110	98	
	1-2	3,6	2,7	2,9	11,4	11,9	11,8	7,0	4,0	4,8	114	98	106
	5-7	3,8	3,5	3,2	10,0	11,7	9,8	0,6	4,0	3,8	108	112	101
	10-12	3,3	3,1	3,3	9,2	10,6	9,9	0,6	3,9	2,1	102	103	95
	15-17	2,1	3,1	3,2	8,8	10,5	8,9	0,7	3,6	3,4	95	101	95
	20-22	3,0	3,2	3,5	8,3	9,5	9,0	0,7	3,7	3,8	101	98	81
	25-27	2,7	-		8,9	-		-	-	-	103	-	
	30-32		3,4			9,8			3,7			100	
BRA	0-1	3,6	3,8		20,0	7,6		44	49		34	36	
	1-2	1,9	4,4	1,8	18,2	8,0	16,6	37	52	48	36	36	43
	5-7	1,8	4,1	1,1	16,7	15,6	14,4	28	48	22	40	38	53
	10-12	1,3	2,1	0,8	18,2	8,0	12,3	50	38	18	32	40	40
	15-17	1,0	1,9	0,9	13,6	13,6	12,2	22	12	10	42	51	41
	20-22	1,5	2,3		10,1	9,1		13	13		39	44	
	25-27	0,7	1,0		12,3	11,9		14	10		34	41	
	30-32		0,5			10,5			11			41	
HAL	0-1	7,2			9,4			44			29		33
	1-2	7,3		5,0	7,9		10,6	40		26	35		
	5-7	9,7		5,0	9,2		8,4	36		49	40		33
	10-12	9,3		4,6	9,1		6,5	37		39	44		27
	15-17	3,0		5,6	8,1		8,2	11		7	26		30
	20-22	5,1			7,4			14			21		
SØN	0-1		3,1			21,0			8			30	
	1-2		3,2	2,7		24,1	21,8		10	8		30	28
	5-7		2,8	2,0		27,0	22,3		10	9		28	30
	10-12		2,4	1,7		24,0	17,0		9	18		30	26
	15-17		1,5	1,1		12,4	12,8		19	25		27	24
	20-22			2,2			11,6			24			21
	25-27			2,0			20,2			10			23
	30-32			1,9			11,6			24			19
TAN II	0-1	7,1	7,8		17,0	16,5		9	8		54	48	
	1-2	7,7	7,6	7,0	15,8	16,2	16,8	9	9	8	47	48	44
	5-7	5,5	5,1	6,2	15,7	15,9	16,3	10	8	8	54	48	44
	10-12	4,8	5,0	5,0	16,1	14,8	14,6	9	5	8	48	52	52
	15-17	1,3	4,8	4,0	21,0	13,6	13,2	17	9	8	47	56	52
	20-22			3,8			12,8			7			49
	25-27		3,6	3,1		13,2	11,6		7	7		48	50
	30-32		3,1			13,6			6			51	
VES	0-1		2,0			15,4			103			28	
	1-2		1,8	1,4		15,2	16,2		100	97		29	25
	5-7		1,5	1,0		13,5	14,1		93	87		34	30
	10-12		1,3	1,0		12,9	14,0		71	83		38	35
	15-17		1,3	1,4		13,4	14,5		60	64		39	31
	20-22			0,8			14,3			55			34
	25-27		1,0			14,2			60			29	

Tabel 8.4.5. Årstidsvariation og vertikal variation af fosfor, kvælstof, calcium og jern i sedimentet i søerne Almind, Bras, Hald, Sønder, Tange (nordbassin) og Vessø.



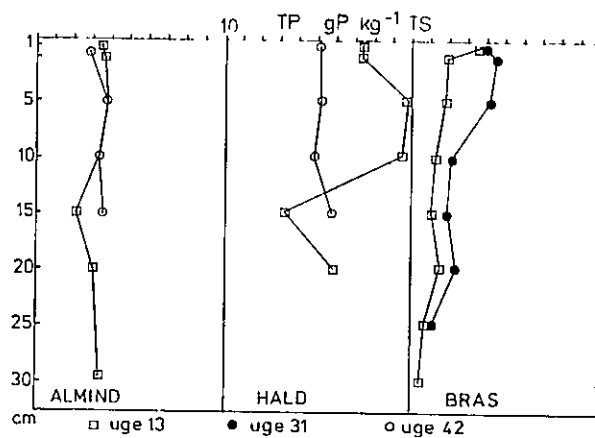


Fig. 8.4.2. Vertikale fosforprofiler for Almind sø, Hald sø og Brassø i uge 13, 31 og 42, 1974. I Brassøsedimentet sker først, som afbildet, en binding af fosfor fra uge 13 til uge 31. Dernæst sker en tilsvarende fosforfrigørelse fra uge 31 til uge 42. Kurven for uge 42 er beliggende oven i kurven for uge 13 og er af oversigtsgrunde ikke medtaget.

Laboratorieforsøg over sedimentudveksling viser frigørelse af fosfor under anaerobe forhold og binding af fosfor under aerobe forhold jvf. afsnit nr. 8.5.3. Overensstemmende hermed er der gennem længere tid i vækstperioden konstateret stratifikation i Almind sø og Hald sø (afsnit nr. 6) som bevirker, at der i denne periode optræder lave iltspændinger ved sedimentoverfladen i disse søer med en fosforfrigørelse til følge. En beregning af totalindholdet af fosfor i vandmassen i Almind sø og Hald sø viser, at der i perioden fra uge 13 til uge 42 sker en forøgelse svarende til en afgivelse fra sedimentet. For Brassø kan lignende beregninger ikke entydigt sige, om der sker sedimentbinding og -frigørelse af fosfor, idet hovedparten af fosformængden i Brassø tilføres og afledes via Gudenåen.

I Esrom sø, Furesø og Glumsø er det påvist /24/, /25/ at sedimentets øverste 5 cm tidligt på året indeholder 100-400% mere fosfor end de underliggende lag. Der angives en sammenhæng mellem disse forhøjede koncentrationer og fosforudvekslingen. Blandt de 6 undersøgte Gudenåesøer konstateres et lignende forhold kun i Brassø og Hald sø. I Gudenåesøerne er koncentrationen af de analyserede parametre som hovedregel svagt aftagende med dybden.

På analysemateriale fra to prøvetagningstogter er der udført dobbeltanalyser for fosfor for at vurdere analyseøjagtigheden. Resultaterne af disse målinger fremgår af tabel 8.4.6. "Ensidet varians-analyse" af dette materiale viser, at målenøjagtigheden for fosforbestemmelserne på søsedimenter angivet ved standardafvigelsen er 10%. 95% intervallet ved angivelse af resultater af fosforanalyser på søsedimenter er da 20%. Dette stemmer overens med almindelige vurderinger af analyseøjagtigheden.

LOKALITET DYBDE (cm)	UGE NR.	1. ANALYSE	2. ANALYSE
ALM	13	3.07	3.30
10-12	42	3.85	3.28
ALM	13	4.59	3.00
20-22	42	3.54	3.52
BRA	13	0.91	1.00
15-17	42	0.77	0.86
HAL	13	9.13	9.30
10-12	42	5.72	4.60
TAN	13	4.37	4.80
10-12	42	5.49	4.98

Tabel 8.4.6. Resultater af dobbeltbestemmelser af fosfor i søsedimenter. Alle værdier er mg P/l.

Fra en enkelt sø (Vessø) er der fra et areal omkring undersøgelsesstedet optaget 10 prøver, hvoraf de øverste 2 cm er analyseret for total kvælstof, total fosfor, calcium og jern. Dette er udført for at kunne vurdere lokale forskelle i sedimentoverfladen. Resultater af Disse målinger fremgår af tabel 8.4.7. Spredningerne på måleværdierne er et resultat dels af målenøjagtigheden dels af lokale forskelle i sedimentoverfladen. Målenøjagtigheden både for Ca, Fe og for TP, TN er af samme størrelsesorden som de fundne spredninger. Dette støtter antagelsen om, at der ikke forekommer store horisontale forskelle i indholdet af TN, TP, Ca og Fe i søerne. Målingerne bekræfter således valget af en enkelt station pr. søbassin som repræsentativ for hele bassinets profundaldel.

	Enhed	TN	TP	Ca	Fe
Analyse- værdier	g/kg <sup>-1</sup> TS	17,7	2,4	82,5	32,5
		17,9	2,6	82,0	31,9
		20,3	2,9	87,0	
		14,6	2,9		31,3
		13,2	2,6	81,3	30,6
			2,3		31,9
				81,2	31,3
		25,0	4,3	83,8	
		16,3	3,1	80,0	30,0
	17,1	2,5	83,8	30,0	
Gennem- snit	g/kg <sup>-1</sup> TS	17,8	2,8	82,7	31,2
Standard- afvigelse	g/kg <sup>-1</sup> TS	3,4	0,6	2,2	0,9
Variations- koefficient	%	19	21	3	3

Tabel 8.4.7.

Resultater af 10 ganges sediment prøvetagning omkring stationen i Vessø. Fra hver prøve er udtaget de to øverste cm.

## 8.5. UDVEKSLINGSFORSØG

Sedimentkærner til udvekslingsforsøg bringes til laboratoriet, og udvekslingsforsøgene er her udført i mørke i kølereol, hvor temperaturen er holdt på bundvandets niveau: 10 - 12° C.

### 8.5.1. FORSØGSMETODIK - KVÆLSTOF-FOSFORUDVEKSLING

Sedimentets udveksling af kvælstof og fosfor er i laboratoriet undersøgt ved hjælp af en opstilling som vist på fig. 8.5.1 og 8.5.2, henholdsvis under aerobe og anaerobe betingelser. En vandmængde cirkuleres mellem et reservoir og et sedimentrør ved hjælp af en pumpe. Vandet i systemet er filtreret søvand. Udvekslingen bestemmes ved successive analyser på vandfasen. Til analysering er udtaget vandprøver på 130 ml. Ved de anaerobe forsøg fyldes systemet op på ny efter hver prøveudtagning. Vandprøverne er analyseret for

TN	total kvælstof
UN	opløst uorganisk kvælstof
TP	total fosfor
PO	opløst uorganisk fosfor

Desuden er der målt pH i forsøgsvandet samt redoxpotentiale i sedimentet fra de aerobe forsøg.

Den benyttede forsøgsmetode skønnes at være sammenlignelig med metoder benyttet i andre undersøgelser til studier af udvekslingsforholdene for kvælstof og fosfor. Metoden afviger fra de af andre anvendte metoder ved sit cirkulationssystem og reservoiret.

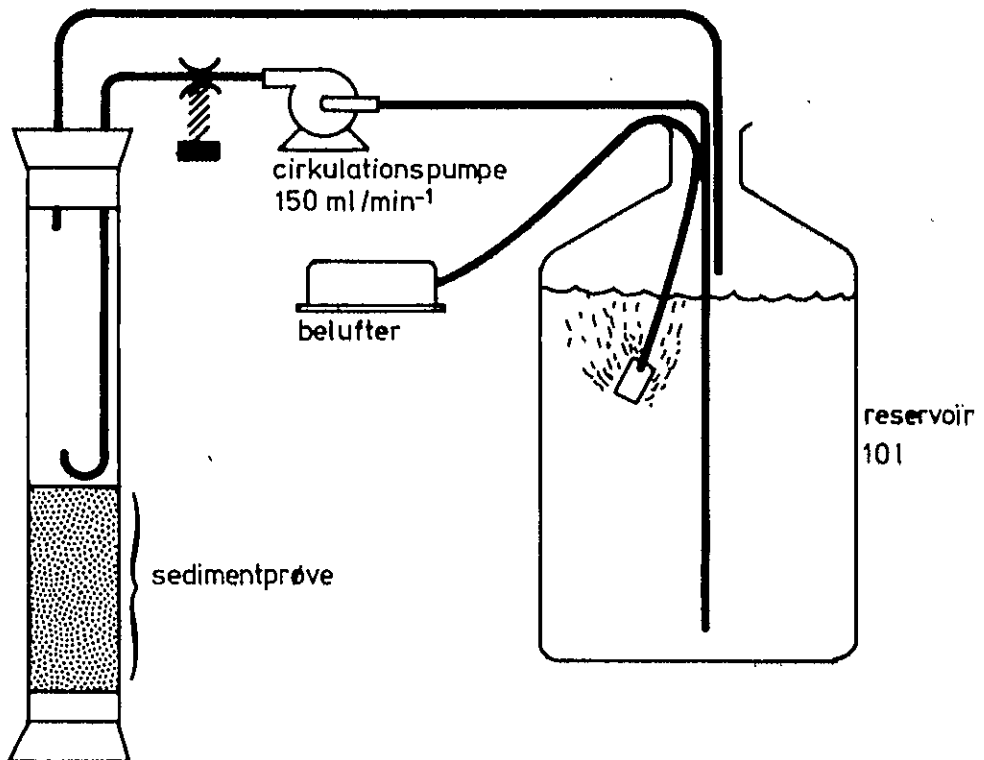


Fig. 8.5.1. Forsøgsopstilling ved aerobe udvekslingsforsøg for kvælstof og fosfor.

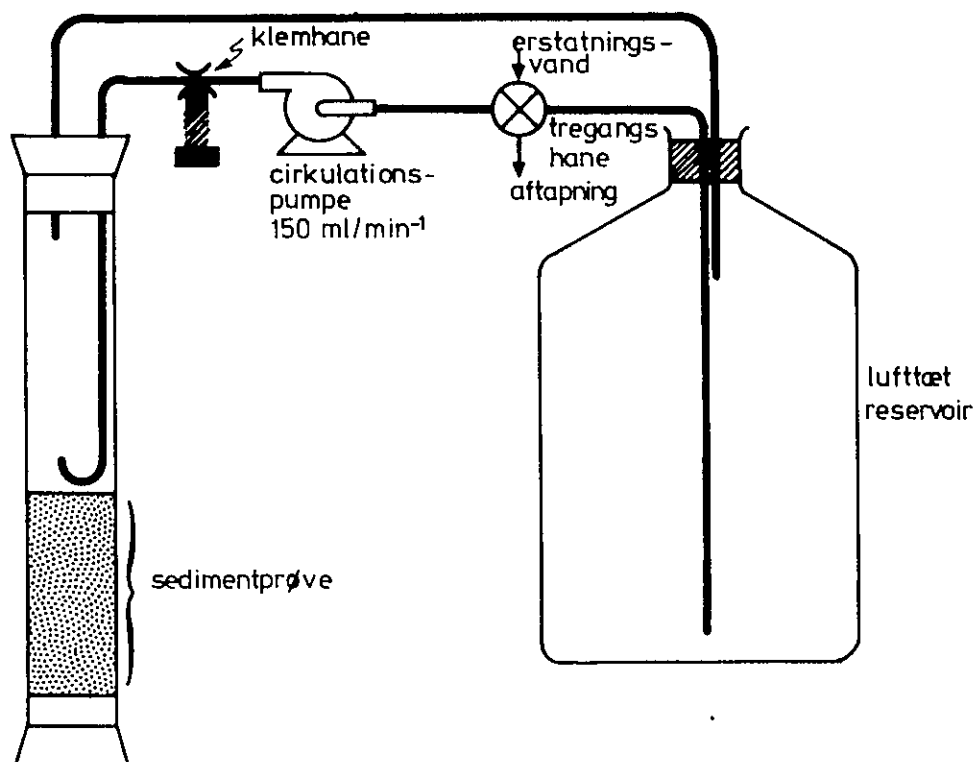


Fig. 8.5.2. Forsøgsopstilling med anaerobe udvekslingsforsøg for kvælstof og fosfor.

## 8.5.2. FORSØGSMETODIK - SEDIMENTRESPIRATION

Sedimentets iltforbrug - sedimentrespirationen - er i laboratoriet undersøgt ved hjælp af en opstilling, som vist på fig. 8.5.3. Iltforbruget måles med en iltelektrode, indsat i et lukket kredsløb, der også indeholder sedimentprøven. Den aktuelle visning på iltmåleren overføres til en skriver, således at det er muligt kontinuert at følge iltkoncentrationen i systemet.

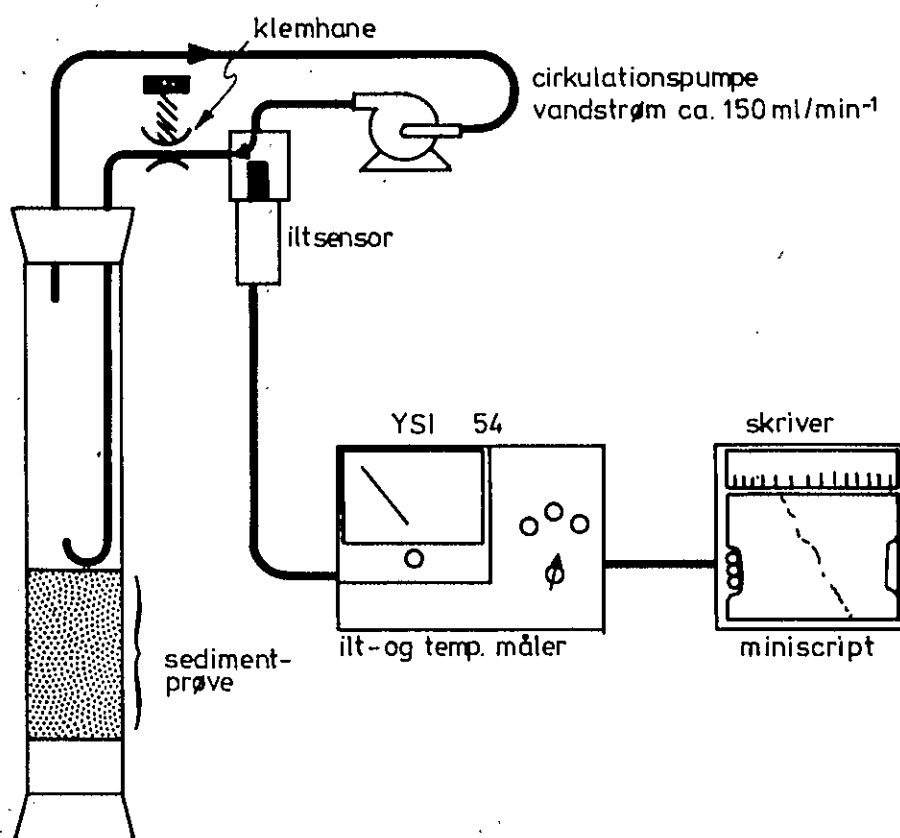


Fig. 8.5.3 Forsøgsopstilling ved måling af sedimentrespiration.



### 8.5.3. KVÆLSTOF- OG FOSFORUDVEKSLINGSFORSØG - RESULTATER OG KOMMENTARER

På sedimentprøverne til udvekslingsforsøg er der målt pH i vandfasen over sedimentet. Ved prøver, der senere skulle anvendes til anaerobe forsøg, er målingen foretaget direkte i vandet, der fulgte med prøven. Ved prøver, der senere skulle anvendes til aerobe forsøg, blev prøven tilført iltrigt vand, og pH i dette blev noteret, efter at stabil aflæsning var opnået. pH i sedimentet formodes kun at afvige uvæsentligt fra de målte værdier, bl.a. fordi samtlige værdier lå i intervallet pH 7,0 - 7,5. pH er derfor ikke angivet ved de forskellige forsøg, da pH i dette interval kun har en ringe indflydelse på udvekslingsforholdene.

I tabel 8.5.1. og 8.5.2 er vist resultaterne af kvælstof- og fosforudvekslingsforsøgene under henholdsvis aerobe og anaerobe forhold. I tabellerne er anført dels udvekslingskoefficienter ( $\text{mg stof/m}^2 \cdot \text{dg}$ ) dels korrelationskoefficienter  $r$  for udvekslingsforløbets tilpasning til rette linier. (Der ligger heri ingen angivelse af, at et retlinet forløb er teoretisk forventeligt).

	TN		UN		TP		PO	
	udv. mg/ m <sup>2</sup> /dg.	korr. koef. r	udv. mg/ m <sup>2</sup> /dg.	korr. koef. r	udv. mg/ m <sup>2</sup> /dg.	korr. koef. r	udv. mg/ m <sup>2</sup> /dg.	korr. koef. r
ALM	- 329	- 0,48	- 1	- 0,20	- 16	- 0,79	~	~
BRA	- 207	- 0,97	- 79	- 0,91	~	~	- 4	- 0,88
HAL	- 126	- 0,25	- 166	- 0,84	- 26	- 0,85	- 34	- 0,78
MOS I	- 35	- 0,83	- 52	- 1,00	+ 1	+ 0,51	0,6	0,82
MOS II	- 53	- 0,81	- 61	- 0,96	- 1	- 0,45	~	~
SIL I	- 77	- 0,95	- 36	- 0,89	(+ 5)	(+0,8)	~	~
SIL II	- 30	- 0,70	- 26	- 0,87	- 2	- 0,85	- 2	- 0,85
SIL III	- 36	- 0,67	- 34	- 0,87	- 3	- 0,85	- 2	- 0,60
SKA	- 103	- 0,95	- 90	- 0,94	~	~	+ 25	+ 0,89
SØN	- 876	- 0,77	- 260	- 0,99	- 22	- 0,87	- 19	- 0,84
TAN	- 360	- 0,33	- 192	- 0,97	- 29	- 0,99	~	~
VES	- 600	- 0,89	- 73	- 0,96	+ 8	+ 0,63	- 1	- 0,80

Tabel 8.5.1. Aerobt udvekslingsforsøg.

Tabellen viser de ved forsøg fundne udvekslingshastigheder samt beregnede r-værdier. pH i sedimentet i alle søerne ligger omkring 7,5.

- tegnet betyder, at vandmassens indhold af N og P formindskes.

+ tegnet betyder, at vandmassens indhold af N og P forøges.

~ tegnet betyder, at tilnærmelse med en ret linie er meningsløs.

( ) betyder, at kun en del af punkterne er benyttet, da forsøget tilsyneladende udviser 2 veladskilte forløb.

	TN		UN		TP		PO	
	udv. mg/m <sup>2</sup> ·dg	korr. koef. r	udv. mg/m <sup>2</sup> ·dg	korr. koef. r	udv. mg/m <sup>2</sup> ·dg	korr. koef. r	udv. mg/m <sup>2</sup> ·dg	korr. koef. r
ALM	26	0,93	25	1,00	11	0,89	6	0,58
BRA	31	0,78	21	0,90	22	0,95	22	0,92
HAL	53	0,98	42	0,96	34	0,99	32	0,98
SØN	38	0,74	47	0,98	9	0,59	6	0,93
TAN	41	0,78	43	0,89	28	0,83	28	0,92
VES	33	0,83	12	0,89	6	0,85	5	0,83

Tabel 8.5.2. Anaerobt udvekslingsforsøg

Tabellen viser de ved forsøg fundne udvekslingshastigheder samt beregnede r-værdier. pH i sedimentet i alle søer ligger omkring 7,5.

Vandmassens indhold af kvælstof og fosfor forøges under forsøgene.

Analyseresultaterne afsat som funktion af den tid efter forsøgenes start, hvor prøverne til analysering er udtaget afbilder enten et stigende eller et faldende forløb. Et stigende forløb - positiv udvekslingskoefficient - betyder, at vandmassens indhold af de pågældende stoffer formindskes (binding i sediment af fosfor, samt binding/denitrifikation i sedimentet af kvælstof). Ved hjælp af

regressionsanalyser er tilnærmelse til forløbet foretaget med rette linier. Fig. 8.5.4 og 8.5.5 viser eksempler på udvekslingsforløbet ved henholdsvis aerobe og anaerobe forsøg. På figurerne er analyseværdier og de sammenhørende regressionslinier indtegnet. Korrelationskoefficienten  $r$  er et mål for udvekslingsforløbets overensstemmelse med en ret linie. Den numeriske værdi af  $r$  kan antage værdier mellem 0 og 1. Overensstemmelsen er desto bedre, jo nærmere den numeriske værdi af  $r$  er ved 1. Ved disse forsøg anses numeriske  $r$ -værdier fra 0,8 til 1,0 for at være acceptable.

## MOSSØ St.1 – Aerob udveksling.

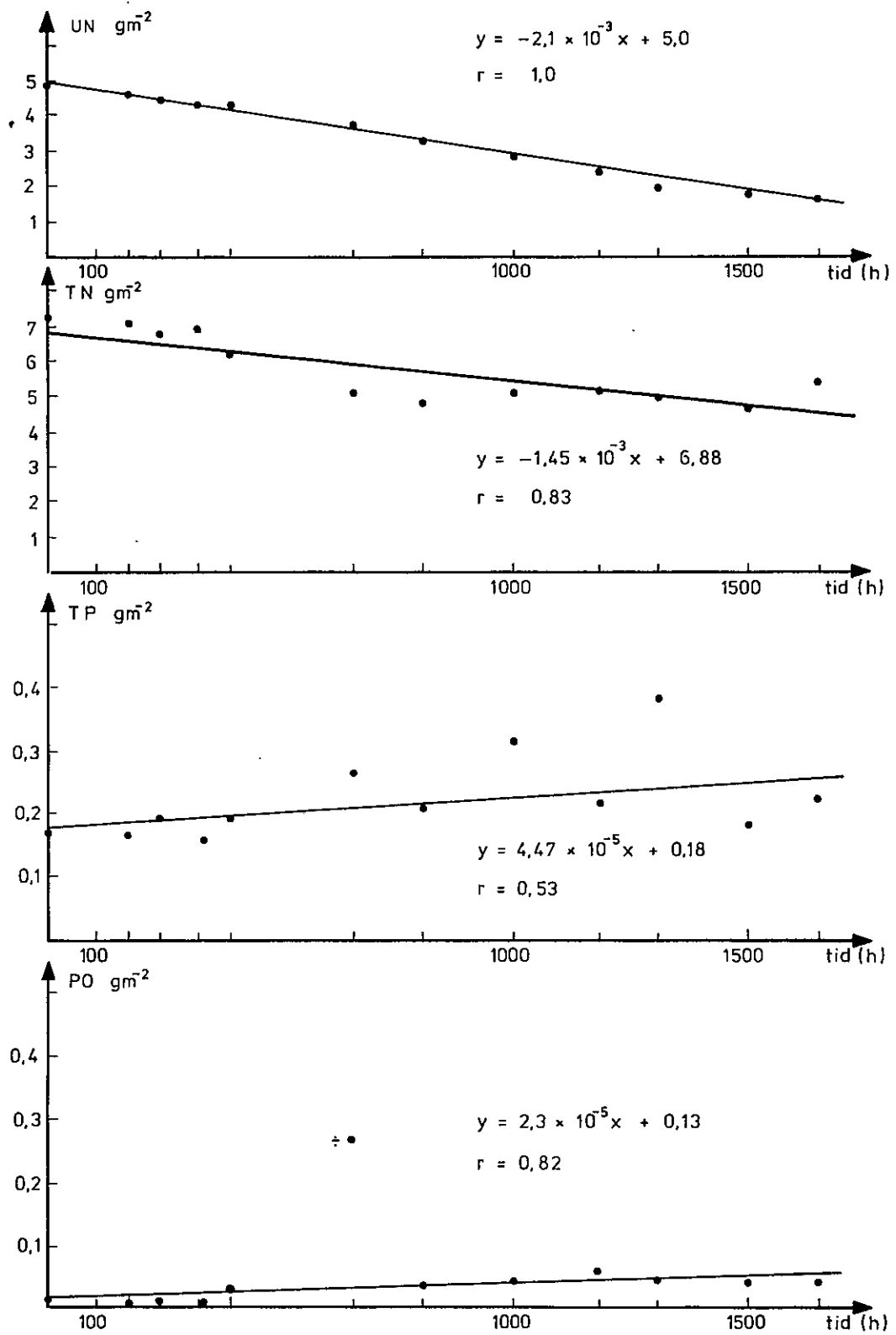


Fig. 8.5.4. Eksempel på udvekslingsforløb ved aerobe udvekslingsforsøg.

## HALD SØ St.1 - Anaerob udveksling.

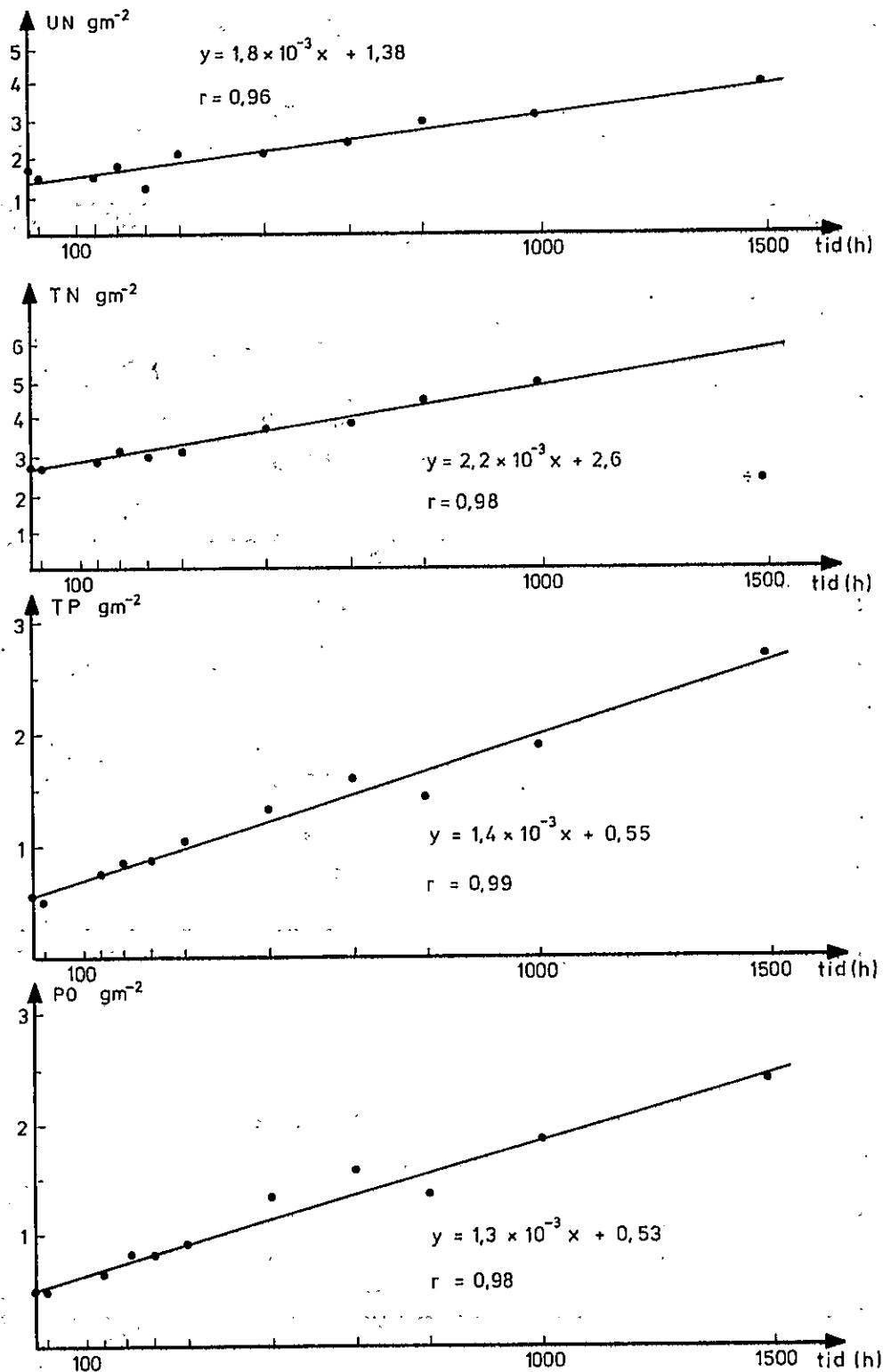


Fig. 8.5.5. Eksempel på udvekslingsforløb ved anaerobe udvekslingsforsøg.

Ved de aerobe forsøg forsvinder kvælstof fra vandmassen. Fosfor forsvinder formodentligt fra vandmassen. Ved de anaerobe forsøg sker der en tilvækst i vandets indhold af både kvælstof og fosfor.

En stor udvekslingshastighed for kvælstof er ofte sammenfaldende med en stor udvekslingshastighed for fosfor.

#### AEROBE FORSØG

Under de aerobe forhold sker der gennemgående en netto binding af fosfor i sedimenterne. Udvekslingshastigheden varierer mellem 0 og 30 mg P/m<sup>2</sup>·dg. Kvælstof bindes tilsyneladende ligesom fosfor ved de aerobe forsøg. Kvælstof kan via indbygning i bakterier bindes og via sedimentation tilføres sedimentet. Desuden optræder der ofte i søsedimenter en denitrifikation. Begge processer vil i udvekslingsforsøgene medføre, at kvælstof forsvinder fra vandfasen. Forskellige forhold ved forsøgene antyder, at denitrifikationsprocesserne er de vigtigste. En sammenligning af resultaterne fra nedenfor anførte områder viser, at dette dog tilsyneladende ikke er tilfældet i Hald- og Sønderø. De eksakte værdier for de undersøgte søer bør tages med noget forbehold, idet beregningerne for søerne: Almind, Bras, Hald, Sønder, Tange og Vessø kun baseres på 4 målepunkter. For de øvrige søer findes 12 målinger.

Intervallet for denitrifikationens størrelse skønnes således at være 0-100 mg N/m<sup>2</sup>·dg.

I stoftransportrapporten /16/ er der foretaget en beregning af denitrifikationens størrelse i systemets søer. Størrelsen af denitrifikationen er her vurderet ud fra følgende beregningsgrundlag:

- 1) Stoftransporten og sedimentkoncentrationen af kvælstof og fosfor.
- 2) Resultaterne fra de aerobe udvekslingsforsøg angivet i tabel 8.5.1., kombineret med "aktivt" søareal.
- 3) Teoretisk N/P-forhold i alger, kombineret med N/P-forhold i sediment og fosforophobning i søerne.

Tabel 8.5.3 viser beregninger af denitrifikationen ud fra de tre omtalte beregningsgrundlag.

Der er rimelig god overensstemmelse mellem værdier, beregnet på basis af stoftransport og udvekslingsforsøg. Ved udvekslingsforsøgsberegningerne findes for Mossø denitrificerede mængder varierende mellem 80 og 100 ton N/år, afhængigt af, om kun arealet af det dyndede sediment eller hele søens areal betragtes som "aktivt" søareal. For Brassø varierer mængderne tilsvarende mellem 15 og 32 ton N/år, afhængigt af, om kun de dybe dele af sedimentet ved Gudenåløbet eller hele søarealet betragtes som "aktivt" søareal.

Med usikkerheden ved beregningerne in mente, må det bemærkes, at der kun er en tydelig uoverensstemmelse mellem de beregnede værdier for Hald sø og Sønder sø.

Værdier, beregnet på basis af stoftransport og N/P-forhold i sedimentet, viser ligeledes gennemgående rimelig god overensstemmelse. Der er her en tydelig uoverensstemmelse for Mossø. Beregningsmetode 3 kan ikke anvendes på Hald sø, hvor der ifølge stoftransportberegningerne i 1974 ikke forekom nogen ophobning af fosfor. Ligeledes kan den ikke anvendes på Nørre sø og Sønder sø, hvor N/P-forholdet i sedimentet er større end 7.



Sø	Koncentration i sedimentoverflade		Ophobning/fjernelse i 1974		Denitrifikation ton N i 1974		
	g N/kg TS	g P/kg TS	ton N	ton P	1. stoftransport	2. Udvekslingsforsøg	3. N/P-forhold i sediment
Skanderborg søer	12,0	3,1	76	9,1	41	50	28
Mossø	12,9	1,9	136	3,8	110	300/80	0,8
Salten Langsø	12,4	4,7	23	3,8	13		17
Gudensø + Ry Møllesø			26	1,1			
Birk sø + Juul sø			103	5,6			
Borre sø			30	1,8			
Brassø	20,0	3,6	16	1,0	10	32/15	1,4
Ørnsø	11,4	6,0	32	4,2	24		21
Silkeborg Langsø I	11,7	4,6	14	0,9	12	7	4
" II	13,3	4,2	3	0,1	3	7	0
" III	17,0	2,8	76	6,8	34	11	6
Hinge sø	10,3	2,2	22	1,0	17		2
Alling sø	13,4	2,9	18	1,2	13		3
Tange sø I	15,1	5,7	178	16,5	135	86	72
" II	16,8	7,3	111	11,5	85		54
" III			10	1,0			
Hald sø	10,4	5,5	5	0	5	67	5 x P+
Vedsø	15,4	3,7	24	2,1	18		6
Nørresø	11,6	1,6	12	0,4	9		
Søndersø	21,4	2,9	3	0,4	~ 0	90	

Tabel 8.5.3.

Beregning af denitrifikation i Gudenåsystemets søer.

## ANAEROBE FORSØG

I alle de anaerobe forsøg måles en netto frigørelse af kvælstof og fosfor fra sedimentet til vandmassen. For fosfor ligger udvekslingshastigheden i intervallet 5-35 mg P/m<sup>2</sup>·dg. For kvælstof er intervallet 10-50 mg N/m<sup>2</sup>·dg.

## SAMMENLIGNING MED ANDRE UDERSØGELSER

Forskellige forfattere /26,27/ har beskæftiget sig med emnet: udveksling af opløste salte mellem vand og sediment i søer. I /24/ beskrives udvekslingsforsøg, udført på danske søer. Resultater herfra er gengivet i tabel 8.5.4.

SØ	A E R O B			A N A E R O B		
	TP mg/m <sup>2</sup> ·dg	NH <sub>3</sub> -N mg/m <sup>2</sup> ·dg	NO <sub>3</sub> -N mg/m <sup>2</sup> ·dg	TP mg/m <sup>2</sup> ·dg	NH <sub>3</sub> -N mg/m <sup>2</sup> ·dg	NO <sub>3</sub> -N mg/m <sup>2</sup> ·dg
Fure sø	-2,0	-1,2	-10,8	17,3	11,1	-17,7
Esrom sø	-1,4	5,9	2,2	12,3	13,7	-12,1
St. Gribsø	0,2	6,7		1,2	9,8	
Grane langsø	0,6	0,2	2,6	0,8	3,4	-2,3

Tabel 8.5.4 Tabellen er et uddrag af /24/ tabel 2. Minustegn betyder, at der sker en koncentrationsformindskelse i vandfasen. Metoden benyttet i ovenstående reference er sammenlignelig med i nærværende undersøgelse benyttede.

Af de fire nævnte søer er Esrom sø og Furesøen bedst sammenlignelige med de jyske søer. Sedimentet i dem alle består af gytje, i Furesøen dog af kalkgytje.

St. Gribsø er en skovsø med et stort indhold af humus og rester af plantedele, og er derfor ikke sammenlignelig med nogen af de undersøgte jyske søer.

VKI har i 1974 udført aerobe udvekslingsforsøg på sedimentet fra 5 fynske søer /28/. Ved målingerne er samme metode benyttet som i Gudenåundersøgelsen. Resultater fra denne undersøgelse er gengivet i tabel 8.5.5.

S Ø	TN mg/m <sup>2</sup> ·dg	UN mg/m <sup>2</sup> ·dg	TP mg/m <sup>2</sup> ·dg	PO mg/m <sup>2</sup> ·dg
Arreskov sø	-37	-43	-8	~
Brændegård sø	-24	-6	-20	~
Hvidkilde sø	-15	-11	-17	~
Ollerup sø	-30	-1	-26	-23
Sørup sø	-52	-21	-3	~

Tabel 8.5.5. Aerobe udvekslingsforsøg med sediment fra fynske søer.  
 - tegnet betyder, at der forsvinder stof fra vandfasen.  
 ~ tegnet betyder, at tilnærmelse med en ret linie er meningsløs.

I tabel 8.5.6 er resultaterne fra de tre undersøgelser sammenfattet.

SØUNDERSØGELSER	A E R O B		A N A E R O B	
	UN mg/m <sup>2</sup> ·dg	TP mg/m <sup>2</sup> ·dg	UN mg/m <sup>2</sup> ·dg	TP mg/m <sup>2</sup> ·dg
Gudenå søer	0 - ÷100	0 - ÷30	10 - 50	5 - 35
Sjællandske søer	+8 - ÷12	÷1 - ÷2	÷6 - +1	12 - 18
Fynske søer	÷1 - ÷15	÷3 - ÷26	-	-

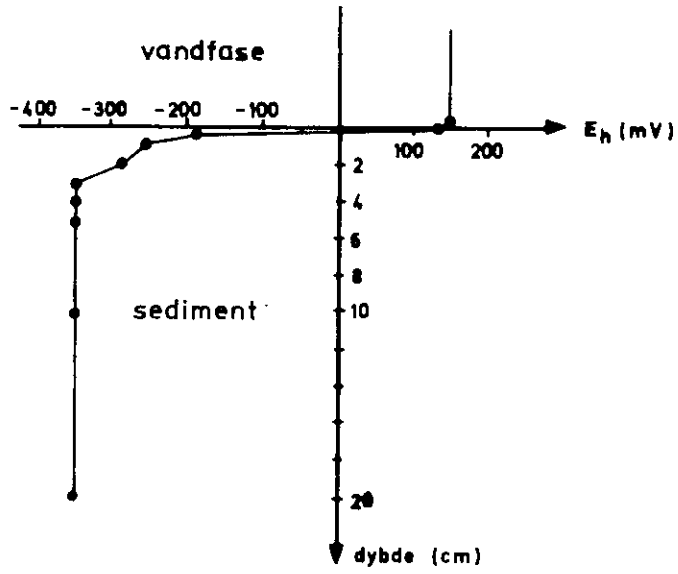
Tabel 8.5.6. Frigørelses hastigheder bestemt ved udvekslingsforsøg med sediment fra sjællandske, fynske og Gudenåsystemets søer. ÷tegnet betyder, at der forsvinder stof fra vandfasen.

### REDOXPOTENTIALEMÅLINGER

Redoxpotentialet -  $E_h$  - er et mål for iltningforholdene i sedimentet, og  $E_h$ -målinger er således udført for at karakterisere den iltede horisont ved de aerobe sedimentudvekslingsforsøg.

$E_h$  er vanskelig at måle. For at opnå nogen grad af reproducerbarhed er hver måling foretaget 2 min. efter at elektroden er blevet placeret i en ny dybde. Fig. 8.5.6 viser resultater af  $E_h$ -målinger på sediment fra Almind sø og Sønder sø til karakterisering af den iltede horisont. Det fremgår, at der kun er aerobe forhold i vandet over sedimentet og i den øverste del af dette. Under den iltede horisont er sedimentet anaerobt. I denne del af sedimentet formodes den målte denitrifikation at finde sted.

## ALMIND SØ



## SØNDER SØ

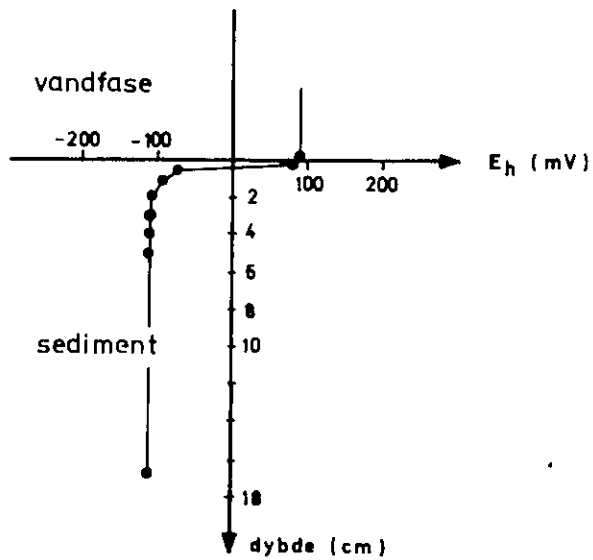


Fig. 8.5.6.  $E_h$ -målinger på sedimenter fra Almind sø og Sønder sø.

## 8.5.4. SEDIMENTRESPIRATION - RESULTATER OG KOMMENTARER

I tabel 8.5.7 er anført resultaterne af iltforbrugsmålingerne. Ud over det direkte målte specifikke iltforbrug ved den angivne forsøgstemperatur er iltforbruget af hensyn til muligheden for sammenligninger korrigeret til samme temperatur ved anvendelse af følgende sammenhæng:

$$OF_t = OF_{t_0} \cdot k^{(t-t_0)},$$

hvor  $OF$  = specifikt iltforbrug i  $g/m^2 \cdot dg$   
 $t$  = forsøgstemperatur i  $^{\circ}C$   
 $t_0$  = referencetemperatur i  $^{\circ}C$   
 $k$  = en konstant.

Værdien af  $k$  er ved sammenligning mellem forskellige undersøgelser angivet til 1,08 /28/.

Værdierne angivet i tabel 8.5.7 er meget høje sammenlignet med andre kendte målinger. Målinger på 6 svenske søer /29/ gav i gennemsnit et specifikt iltforbrug på  $1,8 g O_2/m^2 \cdot dg$ . Den højest målte værdi var ca.  $3 g O_2/m^2 \cdot dg$ .

Sø	Forsøgs temp.	Specifikt iltforbrug	
		målt g/m <sup>2</sup> ·dg	korrigeret g/m <sup>2</sup> ·dg ved 12 <sup>o</sup> C
HAL	14	4,5	4,2
HIN	7	5,8	9,2
MOS I	6	4,3	6,8
MOS II	8	15,8	21,5
MOS II	12 - 13	2,6	2,6
SAL I	12	1,9	1,9
SKA	7	7,0	11,1
TAN I	4	5,1	10,2
TAN I	13	19,0	17,6
TAN II	4	5,1	10,2
THO	11	4,9	5,3
VED	6	13,6	21,6

Tabel 8.5.7. Iltforbrug

Tabellen angiver de målte specifikke iltforbrug samt temperatur ved målingerne.

Iltforbruget er desuden anført korrigeret til 12<sup>o</sup> C.

Målinger på Esrom sø / 5/ har vist, at det specifikke iltforbrug varierede med årstiden. Værdierne lå i intervallet 0,1-0,4 g O<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>·dg. Andre såvel publicerede som upublicerede resultater af iltforbrugsmålinger på sedimenter udviser resultater af samme størrelsesorden. Den konstaterede afvigelse mellem de udførte og de refererede målinger nødvendiggør en vurdering af den anvendte metode. I undersøgelsen over de svenske søer har været anvendt samme slags sedimentbeholdere, iltelektrode og måleinstrument som i den foreliggende undersøgelse. Den eneste forskel er derfor cirkulationen, som her er besørget af en lille cirkulationspumpe, der giver et gennemløb på 150 ml/min. I den svenske undersøgelse opnås den nødvendige cirkulation af en magnetkoblet propel. Det må formodes, at den anvendte gennemstrømningshastighed er årsagen til fremkomsten af de høje iltforbrug. Selvom de målte værdier således ikke kan tjene som absolutte mål for iltforbruget, vil søernes indbyrdes forhold være karakteriseret af målingerne.

I stoftransportrapporten /16/ er der foretaget en beregning af sedimentrespirationens størrelse i systemets søer. Sedimentrespirationens størrelse er her vurderet ud fra beregnede bruttosedimentationer af organisk kulstof og fosfor og C/P-forhold i sedimentoverfladerne. De beregnede årsværdier for sedimentrespirationen er for de enkelte søer omsat til specifikt iltforbrug ved anvendelse af følgende sammenhæng:

$$OF = \frac{R}{A} \cdot \frac{1}{365} \cdot \frac{32}{12}$$

hvor OF = specifikt iltforbrug i g O<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>·dg  
 R = årlig sedimentrespiration i g C  
 A = søareal i m<sup>2</sup>.



Ved beregningerne er søarealet sat lig med søoverfladen. De fremkomne værdier for specifikt iltforbrug er således minimalværdier, idet til "aktive" søareal for nogle af søerne (f.eks. Mossø) er mindre end det totale søareal.

Tabel 8.5.8 viser de beregnede værdier af sedimentrespirationen og det specifikke iltforbrug i Gudenåsystemets søer.

Værdierne for specifikt iltforbrug varierer mellem 0,03 og 2,8 g O<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>.dg. Middelværdien er 0,62 g O<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>.dg.

Disse værdier er i udmærket overensstemmelse med de refererede værdier fra andre undersøgelser.

Sø	Sedimentrespiration	
	ton C	g O <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> .dg
Skanderborg søer	655	0,56
Mossø	244	0,11
Salten Langsø	50	0,12
Brassø	9	0,06
Ørnsø	142	2,5
Silkeborg Langsø I	29	0,46
" II	3	0,03
" III	78	0,61
Hinge sø	4	0,03
Alling sø	2	0,04
Tange sø I	483	2,8
" II	409	0,73
Nørresø	53	0,32
Søndersø	58	0,29

Tabel 8.5.8.

Beregnete værdier for sedimentrespiration og specifikt iltforbrug i sedimentet i Gudenåsystemets søer på grundlag af massebalancer.

## 8.6. SEDIMENTATIONS- OG RESUSPENSIONSFORHOLD

### 8.6.1. FORSØGSMETODIK

I et antal år har der været udsat fælde til opfangning af sedimenterende stof. Fældernes udseende fremgår af fig. 8.6.1. På det opsamlede materiale er der udført analyser for:

tørstof  
total kvælstof  
total fosfor  
calcium  
jern.

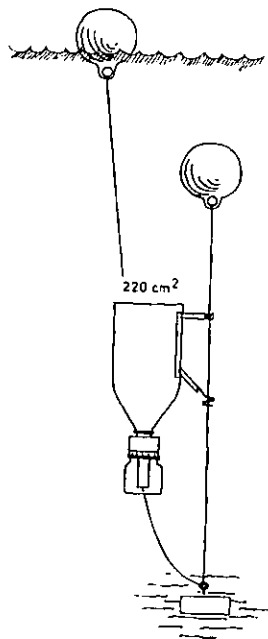


Fig. 8.6.1. Måleopstilling til opfangning af sedimenterende stof.

## 8.6.2. RESULTATER OG KOMMENTARER

I tabel 8.6.1 er der for de undersøgte søer angivet dels måleperioder, dels fangsterne i fælterne (seston) i de pågældende perioder. I tabel 8.6.2 er sestonanalyser sammenholdt med sedimentanalyser fra de undersøgte søer.

N:P forholdet i seston er gennemgående større end N:P forholdet i sedimentet. Dette skyldes, at der oftest er højere koncentrationer af kvælstof i seston end i sedimentet, i overensstemmelse med, at det bl.a. ved udvekslingsforsøgene blev påvist, at denitrifikationen i søerne er af en betydelig størrelse. I Hald sø blev en af de største denitrifikationshastigheder målt, jvf. tabel 8.5.1. Dette stemmer med, at forskellen mellem N:P forhold i seston og sediment er størst netop i Hald sø.

Uorganiske fosforforbindelser optræder ofte i søer bundet enten til jern (Fe) eller calcium (Ca). Fe:P forholdet for henholdsvis sediment og seston afviger i søerne: Hinge sø og Vessø. I begge søer er Fe:P forholdet størst i sedimentet. Gentagen ophvirvling af bundsediment vil bevirke en god mineraliseringsgrad, efterladende en fraktion af organisk stof i sedimentet, der er mere eller mindre tungt nedbrydelig. Dersom tilførslen af fosfor udefra er lille i forhold til mængden af fosfor, der ophvirvles, vil det være det samme materiale, der gang på gang ophvirvles. Efterhånden vil det være fuldstændigt mineraliseret, d.v.s. veliltet. Der vil derfor i sedimentet være mulighed for dannelse af  $\text{Fe(III)PO}_4$ , der er uopløseligt, og som efter en ophvirvling hurtigt resedimenteres. I de øvrige søer, hvor Fe:P forholdet gennemgående er størst i seston, kan forholdene forklares ved, at der i sedimentets anaerobe del i forbindelse med mineraliseringsprocesserne (som altså forløber anaerobt) sker

Lokalitet	Exponeringsperiode - uge nr.					Gennemsnit g TS/m <sup>2</sup> ·dg.
	Seston g TS/m <sup>2</sup> ·dg.					
	28 - 31	31 - 34	34 - 37	37 - 39	39 - 42	
Hald sø	2,9		1,1	2,3	3,0	2
Hinge sø		30,0		51,6	46,5	43
Salten Langsø I			9,8	12,3	19,1	14
Salten Langsø II	19,7					
Silkeborg Langsø I	19,5		19,1	27,6	45,3	28
Silkeborg Langsø III			18,9	19,9	17,1	15
Sønder sø	66,7		18,9	34,1	12,4	33
Tange sø I	7,8		13,5	16,4	12,2	13
Tange sø II	21,0	21,0				
Vessø		15,7	19,1	17,4	21,3	18

Tabel 8.6.1.

Tabellen viser mængden af opfanget stof i de udsatte sedimentfælder i g TS/m<sup>2</sup>·dg. i de angivne perioder.

Lokalitet	Exponer.- periode uge nr.	Sediment			Seston		
		N:P	Fe:P	Ca:P	N:P	Fe:P	Ca:P
Hald sø	28 - 31	1,3	4,8	5,8	3,4	6,1	14,3
"	37 - 39	1,3	4,8	5,8	7,1	-	-
Hinge sø	31 - 34	4,7	51,4	6,4	4,7	21,1	7,7
Salten Langsø I	37 - 39	2,9	25,2	2,5	5,4	27,3	2,1
Salten Langsø II	28 - 31	3,5	17,9	2,3	4,2	18,7	2,1
Silkeborg Langsø I	28 - 31	2,5	19,1	1,5	3,4	18,6	1,7
Silkeborg Langsø I	37 - 39	2,5	19,1	1,5	4,5	22,5	1,2
Silkeborg Langsø III	37 - 39	3,2	6,9	3,6	5,0	8,2	3,5
Sønder sø	28 - 31	8,9	10,0	6,0	6,4	7,1	3,4
"	37 - 39	8,9	10,0	6,0	7,8	5,7	2,7
Tange sø I	28 - 31	2,7	8,5	2,0	4,0	10,3	1,8
"	37 - 39	2,7	8,5	2,0	4,5	13,0	2,4
Tange sø II	28 - 31	2,8	9,4	2,0	5,0	9,6	9,0
Vessø	31 - 34	10,4	22,1	64,3	7,8	7,7	65,5
"	37 - 39	10,4	22,1	64,3	8,5	9,8	41,0

Tabel 8.6.2

Tabellen viser forskellen mellem analyser af sediment (overført fra tabel 8.4.4) og det sedimenterede stof, opfanget i udsatte fælder (seston). Alle analyser er relateret P-indholdet, der er sat = 1. (Alle tal er vægtforhold)

en omdannelse fra  $\text{Fe(III)PO}_4$  (uopløseligt) til  $\text{Fe(II)}_3(\text{PO}_4)_2$ , der er lettere opløseligt, og som ved en ophvirvling bringes op i vandmassen på opløst form.

Ca:P forholdet i henholdsvis sediment og seston afviger i følgende søer: Hald sø og Vessø. I Hald sø er forholdet størst for sestonets vedkommende, og i Vessø er det størst i sedimentet. I Vessø er sedimentet velmineraliseret, og ophvirvlede uopløselige Ca-P-forbindelser vil hurtigt resedimenteres. I Hald sø kan forholdene skyldes, at sedimentationsmålingen har fundet sted i en periode med kraftig produktion. Der er under disse forhold mulighed for, at Ca bundfældes som  $\text{CaCO}_3$ , som opfanges i de udsatte fælder.

For de øvrige søer følges forholdene i sediment og seston nogenlunde ad. Forskelle fra sø til sø skyldes formentlig forskelle i vandets sammensætning i de forskellige områder.

På grundlag dels af mængden af opfanget seston i de udsatte sedimentfælder (tabel 8.6.1.) og fosforanalyser på dette, dels af stoftransportmålingerne /16/, kan årssedimentationen af fosfor i søerne beregnes. I tabel 8.6.3. er resultatet af de to beregningsmetoder anført. Til sammenligning er desuden anført de tilførte fosformængder af søernes totale indhold af fosfor i vandmassen - begge dele på årsbasis - samt de beregnede fosforopholdstider i søerne.

Det er vist /30/ at der i søer, afhængig af dybden og tidspunktet på året, finder en ophvirvling sted af bundmateriale (resuspension). Ved resuspension vil udsatte sedimentfælder således mere end een gang have mulighed for at opfange en og samme mængde sedimenterende materiale. Antages det, at der 10 gange om året sker en resuspension af det lag sediment, der sedimenteres på årsbasis, vil en opgørelse af årssedimentationen på grund

SØ	Sedimenteret fosfor (fældeforsøg) t/år	Tilbageholdt fosfor (stoftransp.) /16/ t/år	Tilført fosfor /16/ t/år	Søens totale gennemsnitl. indh. af fosfor i vandmassen. t	Gennemsnitl. opholdstid for fosfor døgn		
HAL	6	~ 0	5,5*	10,5	700		
HIN	37	1,0	3,5	0,4	42		
SAL I	20	}	}	0,9	}		
SAL II	9			3,8		9,2	0,2
SAL III	-			-		-	-
SIL I	42	0,9	7,0	0,15	8		
SIL III	8	6,8	102	0,7	2,5		
SIL II	-	0,1	6,1	0,6	36		
SØN	22	0,4	5,6**	2,1	135		
TAN I	28	}	}	0,5	1,5		
TAN II	140			29	112	-	-
VES	5	-	0,2***	0,08	150		

\*) Oplandsbidrag: 2 t. Dambrugsbidrag: 2,8 t.

\*\*\*) Bidrag fra Nørre sø: 2,5 t. Bidrag fra aflastningsbygværker: ca. 3 t.

\*\*\*) Udelukkende oplandsbidrag ( $30 \text{ kg P km}^{-2}/\text{år}$ ).

Tabel 8.6.3. Beregning af fosforsedimentation og fosforopholdstiden i Gudenå Søerne. Beregningen af årssedimentationen på basis af fældeforsøg er udført under forudsætning af, at de beregnede gennemsnit i tabel 8.6.1. er årgennemsnit. Årgennemsnittet for søvandets fosforindhold er beregnet på basis af søkemålinger og søernes morfometri.



lag af fældefangster således give en værdi, der er 10 gange større end den virkelige værdi, der kan beregnes ud fra massebalancer over stoftransporten.

Af tabel 8.6.3. fremgår, at resuspensionen er størst i Sønder sø, Silkeborg Langsø I og Hinge sø. Kun for Silkeborg Langsø III er der overensstemmelse mellem årssedimentationerne, beregnet på basis af fældefangster og massebalance.

Omfanget af resuspensionsfænomenet kan ikke afgøres kvantitativt, da fangsten i de opstillede fælder både vil afhænge af frekvensen af ophvirvlingen og mængde af ophvirvlet stof pr. gang. Ophvirvlingsfænomenet har en desto større betydning jo større forholdet er mellem sedimentationen, beregnet ud fra fældefangsterne, og ophobningen beregnet ud fra massebalancer. Resuspensionen gør sig kraftigst gældende i de lavvandede søer og er mindst i de dybe søer.

Sedimentet virker som ophobningssted for organisk stof, der her nedbrydes bl.a. under et iltforbrug. Forholdene i sedimentet er derfor altid anaerobe, jvf. fig. 8.5.6. Nedbrydningen kan finde sted også uden tilstedeværelse af ilt, men går da langsommere. Nedbrydningsprodukterne kan yderligere nedbrydes, såfremt materialet anbringes under iltende forhold. Resuspensionen udgør netop en sådan hændelse. I de søer, hvor resuspensionen er stor, kan der derfor forventes et velmineraliseret sediment, hvor de målelige indhold af organisk stof, kvælstof og fosfor består af en langsomt omsættelig restfraktion. På grund af hyppige ophvirvlinger og deraf følgende god mineraliseringsgrad, vil der ikke kunne forventes gradienter i sedimentets øverste del (0-50cm). Kun i Silkeborg Langsø III har resuspension tilsyneladende en minimal betydning. Langt den største del af det tilførte partikulære fosfor tilledes med spildevand og i så store mængder i forhold til det i selve søen dannede, at denne sø ikke er typisk.

Ud fra tabel 8.6.3. er det muligt at foretage en størrelsesordensvurdering af resuspensionens betydning. Hinge sø benyttes som eksempel. Denne sø tilføres ca. 3,5 t fosfor pr. år, og det gennemsnitlige indhold i søens vandmasse er 0,4 t. Søens indhold fornyes i gennemsnit 9 gange pr år. På grundlag af fældeforsøg opgøres en årlig sedimentation til 37 t P, hvilket er 10 gange mere end søens totale fosfortilførsel. Man kan forestille sig, at ophvirvlingen finder sted et antal gange om året som enkelthændelser. Tidsrummet mellem to på hinanden følgende ophvirvlinger antages at være lang nok til, at der kan ske en mineralisering af det bundne fosfor. Planktonalgerne i søen vil ifølge disse antagelser have mulighed for at benytte den samme fosformængde ca. 10 gange.

Hinge sø er en af systemets lavvandede søer. En af de dybeste er Hald sø. Her er sedimentationen opgjort ved fældeforsøgene af samme størrelse som den beregnede mængde tilført fosfor. Ifølge stoftransportberegningerne ophobes der kun en lille mængde fosfor i søen. Fosforbudgettet for Hald sø afspejler derfor udelukkende hændelsesforløbet i selve søen, herunder opbygning og nedbrydning af organisk stof, sedimentation og resuspension. Dette i samspil med søens opdeling ved springlagsdannelse er bestemmende for årsproduktionens størrelse i den udstrækning, denne er bestemt af fosfor.

Fosfors omsætningscyklus i Hald sø er følgelig i hovedtrækkene således. Gennem foråret og sommerperioden vil fosfor tilgå sedimentet, hvor en mineralisering finder sted. Genopløseligt fosfor tilgår ikke vandmassen som helhed før om efteråret, idet springlaget indtil da virker som en barriere. Om efteråret sker en totalopblanding af vandmassen i søen. Herved åbnes der mulighed for at den fra sedimentet frigjorte fosformængde igen tilføres hele vandmassen. Disse forhold er vist på fig. 8.6.2. hvor søens totalindhold af fosfor findes angivet på årsbasis.

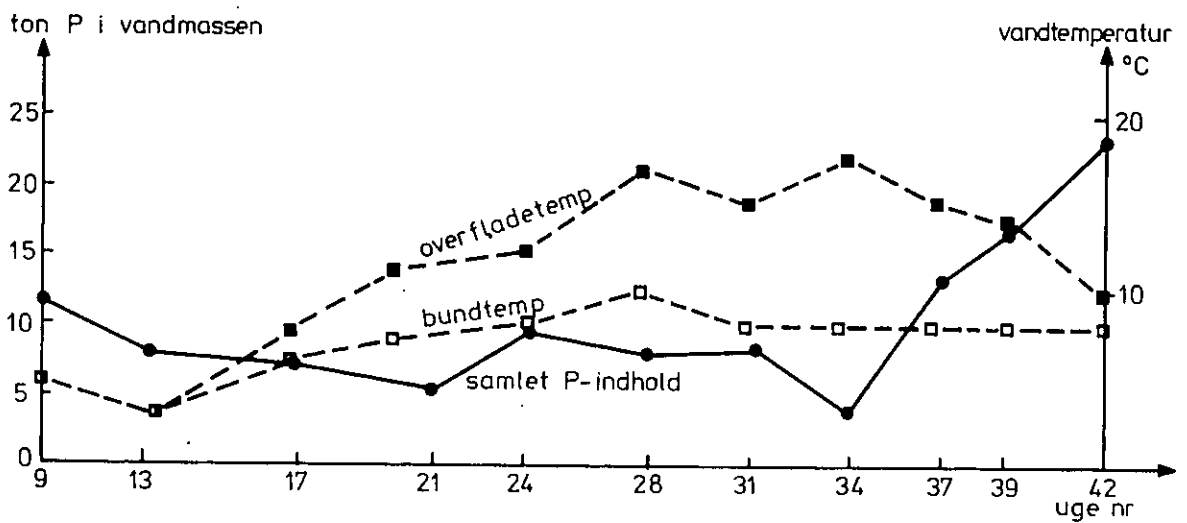


Fig. 8.6.2.

Total indhold af fosfor i vandmassen i Hald sø i relation til springlag.

Figuren viser, hvorledes fosforindholdet (● —) varierer med året. Tilstedeværelse af et springlag er indikeret ved temperaturkurverne (□ --). Det fremgår, at fosforindholdet i søen stiger kraftigt ved springlagets nedbrydning.

## 8.7. RECENT SEDIMENTATION

På sedimentprøvematerialet fra Almind sø er der udført analyser for indholdet af bly. Dette er foretaget, for at få en indikation af den recente sedimentation.

Fig. 8.7.1. viser resultatet af denne undersøgelse.

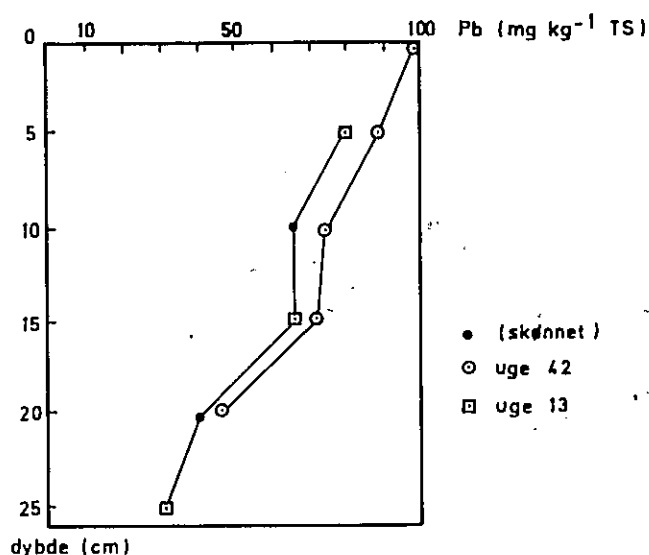


Fig. 8.7.1. Vertikal variation i blykoncentrationen i sedimentkærner fra Almind sø.

Det antages, at bly stammende fra motorbenzin vil sedimentere uforstyrret i denne sø på grund af dens dybde og dens ringe vandskifte. Den stigende trafikmængde kan afbildes ved forbruget af motorbenzin gennem årene. En tabel herover er udarbejdet af Danmarks Statistik for perioden 1948 - 1970.

Fig. 8.7.2. er udarbejdet efter denne tabel. Fra olie-selskabet BP er det oplyst, at tilsætningen af bly til benzin blev påbegyndt i Danmark i perioden 1935 - 1940, og at der indtil 1965 har været anvendt samme koncentra-tion.

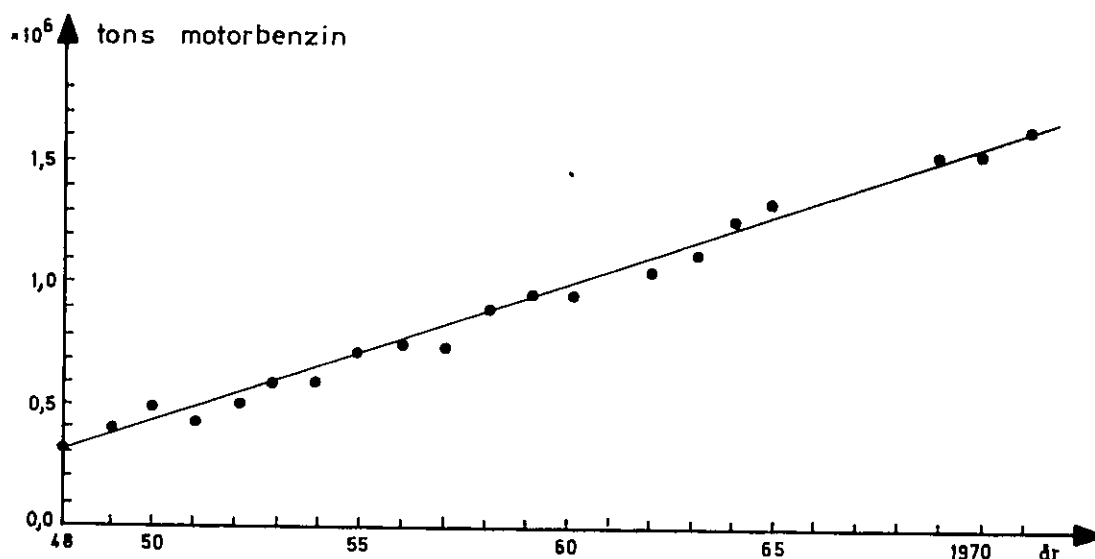


Fig. 8.7.2.      Udviklingen i benzinforbrug i Danmark i perioden 1948 - 70.

Den lineære udvikling i forbruget af motorbenzin kan korre-leres med det lineære vækstforløb for blykoncentrationen i de øverste 10 cm af Almind sø-sedimentet, svarende til perioden ca. 1945 - 1975. Det konstante blyniveau fra 10-15 cm dybde kan henføres til depressionen og krigs-tiden, hvor den industrielle aktivitet var dalende, altså perioden 1930 - 1945. Stigningen i blykoncentrationen fra 25 cm til 15 cm dybde afspejler således den tilta-gende industrielle aktivitet fra århundredskiftet frem til ca. 1930.

Er ovenstående antagelser korrekte, er sedimenttilvæksten i Almind sø i de seneste 45 år maksimalt af størrelsen 3 mm pr. år.

I stoftransportrapporten /16/ er der foretaget en beregning af sedimenttilvækstens størrelse i systemets søer. Sedimenttilvæksten er her beregnet ud fra kendskabet til årsophobningen af fosfor i søerne og fosformængden på en sedimentoverflade. De således beregnede værdier for sedimenttilvækst fremgår af tabel 8.7.1.

De beregnede værdier for sedimenttilvækst er gennemsnitsværdier for hele søarealet. For de dybe søer (f.eks. Mossø), hvor det "aktive" sedimentareal er mindre end søarealet, vil sedimenttilvæksten således være større end de beregnede værdier.

Der er i Tange sø, bassin I, gennemført en orienterende undersøgelse af sedimentudbredelsen. Det er konstateret, at kulturlaget - opstået efter opstemningen af søen 1920 - har en udbredelse over ca. 80% af søarealet og en middeltykkelse på 20 cm. Det skønnes herudfra, at sedimentforøgelsen gradvist er tiltaget og i dag udgør 1,2-2 cm pr. år. Den beregnede værdi i tabel 6.7. på 2,8 cm/år er beregnet under forudsætning af, at al fosforophobning mellem Tvilumbro og Ansbro foregår i Tange sø, bassin I. Dette er ikke tilfældet, idet en del fosfor ophobes på åstrækningen mellem Tvilumbro og Tange sø. Den beregnede værdi er således noget for høj.

De beregnede sedimenttilvækstværdier for systemets mindre belastede søer er af samme størrelse som den værdi, der er skønnet for Almind sø på basis af blyprofilen i søsedimentet.

I en artikel om sedimentforholdene i Esrom sø /25/ er den årlige sedimentation opgjort til 1 cm. Dette gælder også ved en undersøgelse, udført over sedimentationshastigheden i Haderslev Dam /10/.

Sø	Søareal $10^6 \text{ m}^2$	Sediment- tilvækst mm/år
Skanderborg søer	8,6	4 *
Mossø	16,88	1 *
Salten Langsø	3,0	3
Brassø	1,14	4
Ørnsø	0,42	18
Silkeborg Langsø I	0,46	4
" II	0,85	0,5
" III	0,93	32
Hinge sø	1,08	3
Alling sø	0,4	10
Tange sø I	1,24	28
" II	4,51	5
Hald sø	3,33	~ 0
Vedsø	1,47	5
Nørresø	1,22	2
Sønder sø	1,44	2

Tabel 8.7.1. Beregning af sedimenttilvækst i Gudenåsystemets søer i 1974.

\*) Hele søens areal benyttet. Sedimentationen foregår kun i de dybere dele af søerne.

## 8.8 TUNGMETALLER I SØSEDIMENTER

Sedimentundersøgelser for kviksølv er i Gudenåsystemet udført på lokaliteter mellem Vilholt og Klostermølle samt Mossø, i Ørn sø, Silkeborg Langsø og Remstrup å og i Tange sø og Tange å samt i Søndermølle å og Nørre å. Sedimentundersøgelser for øvrige metaller er udført på lokaliteter i Brassø, Remstrup å, Ørn sø og Silkeborg Langsø samt i de af Botanisk Institut undersøgte søer /31/ (kobber). Kviksølvanalyserne er udført af Isotopcentralen (IC) /32/ og VKI.

Valget af undersøgelseslokaliteter er for IC's og VKI's vedkommende sket på grundlag af lokaliteternes nuværende eller tidligere anvendelse som recipienter for spildevand fra hospitaler og papir- og papfabrikker, der traditionelt har benyttet kviksølv eller kviksølvforbindelser. Analyser på sedimentkerner fra Silkeborg Langsø for chrom, kobber og nikkel er udført som et supplement til Gudenåundersøgelsen på baggrund af den konstaterede belastning med chrom og nikkel fra Søholt rensningsanlæg samt kendskab til den ved papirfabrikundersøgelsen /33/ målte forhøjede chromkoncentration i bundfældeligt stof.

### 8.8.1 RESULTATER OG KOMMENTARER

I tabel 8.8.1 er angivet analyseresultater for tungmetalanalyser, udført af VKI. Tabel 8.9.2. viser en inddeling af de undersøgte lokaliteter i området efter kategorierne "ubelastede", svagt belastede og belastede med de undersøgte metaller. Variationsbredden for metal-koncentrationerne ved forskellig belastning er gengivet både på basis af tørstof og glødetab i sedimentprøverne, idet sedimentets metalbindende evne stiger med et vok-



sende indhold af organisk materiale (glødetab). Ved inddeling efter ydergrupperne "ubelastet" og belastet ligger sedimentkoncentrationerne inden for de angivne områder, både på tørstof- og glødetabsbasis, medens mellemgruppen - svagt belastet - eventuelt kun er klassificeret efter koncentrationer på tørstof eller glødetabsbasis. I tabellen er desuden anført særlige kilder.

Der er både i Silkeborg Langsø og i Tange sø en tendens mod lavere koncentrationer af kviksølv i de øvre dele af sedimentet i forhold til de nedre dele (dybere end 30 cm), svarende til at kviksølvbelastningen i de senere år er blevet reduceret.

Fig. 8.8.1. viser den horisontale variation af kviksølv i de øverste sedimentlag i Tange sø og Silkeborg Langsø.

Station	Dybde, cm	CHROM		KOBBER		NIKKEL	
		mg/kg TS	mg/kg GT	mg/kg TS	mg/kg GT	mg/kg TS	mg/kg GT
Brassø	0-1	8,2	~30	22	~80	14	~50
	1-2	8,8		21		18	
	5-6	12		27		20	
	10-11	9,1		32		16	
	20-21	18		16		19	
	25-26	12		10		13	
	30-31	9,5		8,3		12	
Ørnsø	0-10	11	48	53	230		
SIL I	0-10	15	65	31	140		
SIL II, 1	0-10	20	91	37	170	23	105
SIL II, 2	0-20	27	123	52	236		
R 1	0-15	2,1	84	11	440		
SIL III, 6	0-10	5,6	21	58	215		
SIL III, 7	0-20	19	83	83	360		
SIL III, 8	0-20	13	54	150	625		
SIL III, 1	0-10	48	171	123	440	26	93

Tabel 8.8.1. Analyseresultater fra Brassø, Remstrup å (R 1), Silkeborg Langsø og Ørnsø.  
Analyseresultaterne for kviksølv er alle angivet i /32/.

OMRÅDEKARAKTERISERING	"NORMALKONCENTRATIONER"		OMRÅDEINDELING - SÆRLIGE KILDER *
	mg/kg TS	mg/kg GT	
"Ubelastet" med kviksølv	0,002 - 0,1	0,1 - 1,0	Gudenå-Vilholt, Mossø, Ørn sø, Silkeborg langsø I, Silkeborg langsø II (vest), Tange sø I (syd), Tange å før Kjellerup.
Svagt belastet med kviksølv	0,1 - 0,15	> 1,0	Gudenå-Vilholt, Mossø, Søndermølle å, Nørre å.
Belastet med kviksølv	> 0,15 max målt: 3,8	> 1,0 max målt: 11,8	Remstrup å, Silkeborg langsø II (øst), Silkeborg langsø III, Tange å efter Kjellerup, Tange sø II (nord) *: Silkeborg Papirfabrik (udledning ophørt 1970), Silkeborg by (sygehus). Kjellerup sygehus.
"Ubelastet" med kobber	~ 20	50 - 100	Slåen sø, Knud sø, Brassø.
Svagt belastet med kobber	30 - 50		Silkeborg langsø I, Silkeborg langsø II (vest).
Belastet med kobber	> 50 max målt: 192	> 100 max målt: 370	Skanderborgsøeme, Ørn sø, Silkeborg langsø II (øst), Silkeborg langsø III *: Skanderborg by, Silkeborg by (Påtsø, Søholt) eventuelt Silkeborg Papirfabrik.
"Ubelastet" med chrom	< 10	< 40	Brassø
Svagt belastet med chrom	10 - 20	40 - 90	Ørn sø, Silkeborg langsø I
Belastet med chrom	> 20 max målt: 48	> 90	Silkeborg langsø II, Silkeborg langsø III. *: Silkeborg by (Søholt).
"Ubelastet" med nikkel	< 20	< 70	Brassø
Belastet med nikkel	> 20 max målt: 26	> 70	Silkeborg langsø III. *: Silkeborg by.

Tabel 8.8.2. Inddeling af de undersøgte områder efter belastning med kviksølv, kobber, chrom og nikkel.

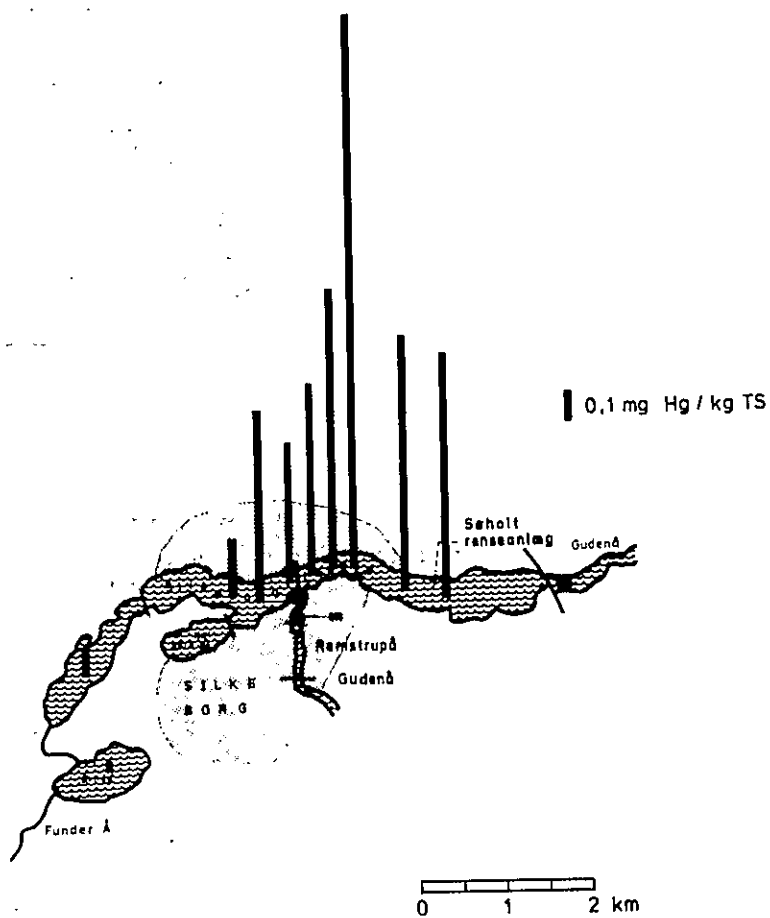
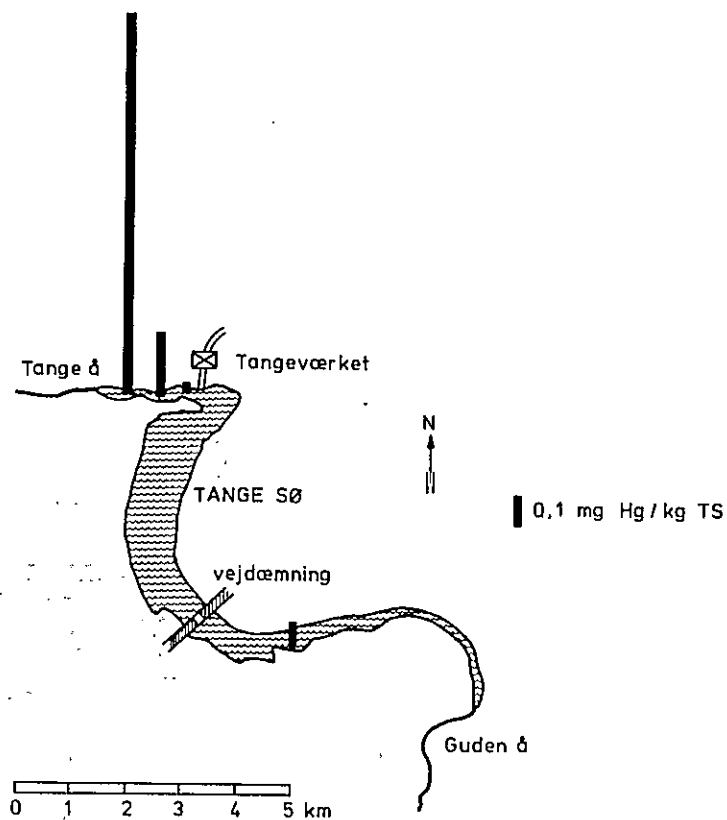


Fig. 8.8.1 Målte kviksølvkoncentrationer i de øverste sedimentlag i Tange sø og Silkeborg Langsø.

## 9. FAUNA- OG FLORAUNDERSØGELSE

### 9.1 FORMÅL

I forbindelse med VKI's søundersøgelser er der gennemført et delprogram med det formål at belyse følgende:

1. Kan søerne grupperes efter deres profundalfauna (barbundsfauna).
2. Er bundfaunaen i de undersøgte søer væsentlig i forbindelse med omsætningen af organisk stof.
3. Kan der i afløbet fra en sø konstateres et henfald af organisk stof dannet i søen, bedømt udfra frekvensanalyser af algesammensætningen.

### 9.2 BAGGRUND

Ud fra ønsket om at kunne gruppere søer i forskellige klasser har man fra ca. 1930 benyttet en inddeling af søerne efter deres profundalfauna. Profundalfaunaens mægtighed og artssammensætning afspejler den bundstruktur, som findes i de undersøgte søer. I visse søer, f.eks. Esrom sø /34/, anses bundfaunaens tilstedeværelse desuden for at være væsentlig for omsætningen af organisk stof i søbunden.

Da der ifølge amtsvandvæsenernes undersøgelser, /35/, i Gudenåen efter Tange sø er konstateret en ringere biologisk vandkvalitet, end man skulle forvente, besluttedes det at undersøge phytoplanktonarternes forekomst sat i relation til afstanden fra Tangeværket. Herved skulle det være muligt at få et kvalitativt billede af algernes henfald og dermed omsætningen af organisk stof stammende fra phytoplankton.

### 9.3 RESULTATER AF FAUNAUNDERSØGELSEN

I Gudenåundersøgelsens søprogram er der i uge 24, 1974 udtaget et antal prøver fra søernes profundalzone. Resultatet i form af artslister foreligger hos VKI.

Profundalfaunaens sammensætning fremgår oversigtsmæssigt af nedenstående tabel 9.1.

SØ	BEM.	ANTAL IND. I ALT <sub>2</sub> PR. m <sup>2</sup>	ANTAL OLIGO CHAETER No m <sup>-2</sup>	ANTAL CHIRO- NOM No m <sup>-2</sup>	ANTAL MUSL. No m <sup>-2</sup>	ANTAL CORE- THRA <sub>-2</sub> No m <sup>-2</sup>	ANDET
Almind	*	2950	1340	330		1280	
Bras	o	560	320	240			
Hald	* o	7550	6930	240		370	
Hinge	o	1740	1290	450			
Nørre	o	1430	30	210		1200	
Sil. 1. I	o	1620	670	950			
Sil. 1. II	o	1990	800	1200			
Sil. 1. III		27	30				
Sal. 1. I	o	950	440	510			
Sal. 1. II		1150	390	760			
Slåen		1850	320			1530	
Sønder		320		90		230	
Tange I	o	13070	2170	10720	80		110
Tange II	o	7380	3300	3200	560		320
Thor	o	1520	550	950		20	
Ved	o	690	80	600		10	
Ves	o	1140	330	450	200		150
Ørn	o	850	200	200		10	

\* = i disse prøver forekommer Chironomus anthracinus

o = i disse prøver forekommer Chironomus plumosus

Tabel 9.1 Søernes profundalfauna. Materialet stammer fra en enkelt prøvetagningsrunde, udført i uge 24, 1974 (midsommer).

#### 9.4 VURDERINGER AF RESULTATERNE FRA FAUNA-UNDERSØGELSEN

En gennemgang af totalantallene i tabel 9.1 viser, at søerne kan deles i 3 grupper.

GRUPPE NR.	SØNAVN	ANTAL (pr. $m^{-2}$ )
1)	Almind, Hald og Tange	> 2000
2)	Silkeborg 1.III, Søndersø	< 500
3)	Resten	fra 500 til 2000

Tabel 9.2 Inddeling af de undersøgte søer på grundlag af totalantallet pr.  $m^{-2}$ .

Gruppe 1) består af 2 dybe søer, hvori er konstateret springlag, hvoraf Almind sø er uden og Hald sø kun lidt belastet med spildevand. Disse søer er de eneste, hvori er fundet dansemyggen *Chironomus anthracinus*. Desuden indeholder gruppe 1) Tange sø, den mest produktive sø blandt de undersøgte, vurderet på basis af phytoplanktonproduktionen.

Gruppe 2) består af 2 søer, Søndersø, der har tjent som recipient for et stort bysamfund, og Silkeborg langsø III, der er kraftigt belastet med spildevand.

I gruppe 3) er langt de fleste af søerne placeret. Faunatæthederne er mellem 1000-2000 antal pr.  $m^{-2}$ . De fleste af søerne er lavvandede og må karakteriseres som eutrofe.

Bundfaunaens størrelse vurderes ved sammenligning med /34/, der angiver forholdene for Esrom sø. Følgende tabel viser størrelsesordenen af mængden af profundalfaunaen.

ESRUM SØ	Forår	Sensommer/efterår
OLIGOCHAETER	10.000	7.000
CHIRONOMIDER	30.000	10.000
MUSLINGER	3.000	5.000

Tabel 9.3 Størrelsen af profundalfaunaen i Esrom sø i antal  $m^{-2}$ , /34/.

De forhold, der her beskrives, går igen i følgende litteratur, /36/, /37/, /38/, /39/ og /40/.

I søer på Fyn og Sjælland er foretaget orienterende undersøgelser af faunatætheden, og resultaterne herfra er opstillet i tabel 9.4.

Det ses, at faunatætheden i de undersøgte jyske søer er lille i forhold til Esrom sø, men er på niveau med de øvrige fynske og sjællandske søer.

En inddeling i søtyper efter profundalfaunaen er foretaget af /38/ og modificeret af /36/. Der omtales følgende søtyper:

**ANTHRACINUS-TYPEN:** den dybde, kun lidt eutrofierede sø, hvori springlag kan konstateres

**PLUMOSUS-TYPEN :** den eutrofe, ofte lavvandede sø, med eller uden springlag, men ofte med anaerobe forhold i de bundnære vandlag over længere perioder.



Søtypen er ikke afhængig af faunatætheden, men der må kræves en vis tæthed (500 ind. pr.  $m^{-2}$ ), for at der kan foretages en pålidelig vurdering.

Søndersø og Silkeborg langsø III er de eneste søer, der ikke kan henføres til de to nævnte søtyper. Af de øvrige er alle søer i gruppe 3 + Tange sø fra gruppe 1 at regne for PLUMOSUS-søer, og det forekommer ikke urimeligt at henregne Almind- og Hald sø til gruppe 1, ANTHRACINUS-søer (til hvilken gruppe også Esrum sø hører).

NAVN	ST.	ANTAL PR. $m^2$ TUBIFICIDAE OG CHIRONOMIDAE	BEMÆRKNINGER
Esrum sø		15.500	kun i ringe grad eutrofieret. Tallet er gennemsnit for 1954-56, /34/
Hvidkilde sø	indløb	5.800	heraf 5.300 tubificider
Hvidkilde sø	2,1	2.000	
Hvidkilde sø	2,3	-	
Nielstrup sø	3,1	2.200	
Ollerup sø	4,2	1.000	
Ollerup sø	4,1	800	
Nørre sø	øst	700	
Nørre sø	6,1	-	
Sørup sø	1,2	-	
Brændegård sø	5,2	150	
Brændegård sø	5,1	-	
Arreskov sø	7,2-7,3 midt	-	
Tuel sø		1.600	unders.1935-36,/41/
Tissø		1.800	unders.1973,/42/
Haderslev dam		700	unders.1970,/10/
Haderslev dam		2.500	unders.1929,/43/
Haderslev dam		3.400	unders.1928,/43/
Gjorslev møllesø		12.000	unders.1972,/44/

Tabel 9.4 Sammenligninger af forekomst af barbundsfauna.

## 9.5 PROFUNDALFAUNAENS BETYDNING FOR OMSÆTNINGEN

I Esrum sø udgør alene tubificidernes indtagelse af sedimentpartikler 1,5 - 2,5 kg TS pr.  $m^{-2}$  år $^{-1}$ , hvilket svarer nogenlunde til det lag, der under aerobe forhold fremtræder oxideret, nemlig ca. 0,5 cm. Det beskrives af /28/, at tilstedeværelsen af faunaelementer i et antal som i Esrum sø, betyder 20 - 40 % forøgelse af sedimentets respiration.

Sammenholdes disse oplysninger med en viden om, at i en sø med springlag omsættes 70 - 80 % af det i søen producerede stof i det øverste lag og den resterende del omsættes på sedimentets overflade, /45/ og /46/, vil den fattige bundfauna i de undersøgte søer kun have en minimal betydning for omsætningen af organisk stof, uanset at springlag ikke forekommer i alle søer.

## 9.6 RESULTATER AF UNDERSØGELSEN AF PHYTOPLANKTON I SØAFLØB

På stationerne, der fremgår af tabel 9.5, er der udtaget en vandprøve på 1 liter. Phytoplanktonets artsammensætning og hyppigheden af de enkelte arter er undersøgt ved mikroskopiering.

Der er ikke foretaget egentlige tællinger, men det er vurderet, hvilke arter der forekom hyppigt i de enkelte prøver. Disse arter er markeret med symbolet X.

	Højspænding efter Tangeværket	Skibelund	Mellem Skibelund og Bjerringbro	Bjerringbro Park	Bjerringbro rens.anlæg	Stærkær	Ulstrup	Langå	Grensten
km nedstrøms fra Tange sø	0,4	1,4	3,0	4,2	5,5	8,3	13,8	23	28
<u>BLÅGRØNALGER:</u>									
Anabaena spiroides	X		X						
Anabaena solitaria	X		X	X					
Anabaena flos-aquae	X	X	X						
Aphanizomenon flos-aquae	X								
Aphanizomenon eleukinii					X	X	X	X	X
Microcystis aeruginosa	X	X	X						
Microcystis wesenbergii	X	X	X						
<u>CENTRISKE KISELALGER:</u>									
Melosira italica	X	X	X	X		X	X	X	X
Melosira varians		X							
Melosira granulata			X	X	X				
Stephanodiscus astraëa		X							
Stephanodiscus hantzshii		X							
<u>PENNATE KISELALGER:</u>									
Diatoma elongata		X							

Tabel 9.5 De hyppigst forekommende phytoplanktonarter i Gudenåen, nedstrøms Tange sø, på de angivne stationer.

### 9.6.1. VURDERING AF PHYTOPLANKTONUNDERSØGELSEN I SØAFLØB

Alle anførte arter i tabellen er planktonformer, der vil kunne genfindes i en lavvandet, eutrof sø som Tange sø. Alle arter forekom på flere stationer end anført, men da i ringere mængde. Der blev fundet langt flere arter, men disse forekom i ringe antal i prøverne, hvorfor de ikke er anført.

Af tabellen ses, at hyppigheden af blågrønalger aftager, og at der efter Bjerringbro kun er noteret een art, som forekommende hyppigt. Denne art forekom ikke hyppigt før Bjerringbro. Forholdene for kiselalgerne modsiger ikke dette mønster.

Der er således indikation for, at det organiske stof i form af planteplankton, der føres ud af en sø, nedbrydes. I Gudenåen efter Tange sø er der sket en vis nedbrydning af biomassen af alger. Dette synes at finde sted indtil Bjerringbro, det vil sige 4 - 5 km ned ad Gudenåen.

## 9.7 SAMMENFATNING

### 9.7.1 SØERNES PROFUNDALFAUNA

Det er muligt at foretage en inddeling af søerne efter deres profundalfauna. Inddelingen viser, at de fleste søer er af samme type. Almind sø og Hald sø er ANTHRACINUS-søer, de øvrige er PLUMOSUS-søer med undtagelse af Silkeborg langsø III og Søndersø, der ikke kan bedømmes.

Da faunaen i alle de undersøgte søer med undtagelse af Tange sø er fattig, vurderes profundalfaunaen at være uden betydning med hensyn til omsætningen af organisk stof i søerne.

### 9.7.2 AFLØB TANGE SØ, PHYTOPLANKTON OG FAUNA

I Gudenåen indtil Bjerringbro sker en reduktion i antallet af alger, som stammer fra Tange sø, hvilket indikerer, at Tange sø belaster Gudenåen med organisk stof, og at virkningen er tydeligst på strækningen indtil Bjerringbro. Dette indikeres desuden ved, at filtratorer (Hydra og Rheotanytarsus) udgør den væsentligste del af bundfaunaen. Filtratorer frafiltrerer organiske partikler og begunstiges derfor ved et stort indhold af planteplankton i vandet.

I forbindelse med Gudenåundersøgelsens vandløbsbiologiundersøgelse /47/ viste resultaterne, at der efter Tange sø var stor forekomst af filtratorer, hvis antal formindskedes med stigende afstand fra sø afløbet. I nævnte tilfælde optrådte først andre faunagrupper i betydende antal ved Bjerringbro.

## 10. REFERENCER

- /1/ Steemann Nielsen, E.:  
The Use of radioactive ( $^{14}\text{C}$ ) for measuring Organic Production in the sea.  
J. Cons. Perm. Int. Explor. Mer. 18, 117-140, 1952.
- /2/ Vandkvalitetsinstituttet, ATV:  
Måling af denitrogenfixering med acetylen-reduktionsmetoden og  $^{15}\text{N}$ -metoden.  
Vandkvalitetsinstituttet/ Isotopcentralen  
Forskningsrapport, in press 1977.
- /3/ Vandkvalitetsinstituttet, ATV:  
7 fynske søer, Undersøgelse for FAVI 1973-74.  
1975.
- /4/ Specialeprojekt, Botanisk Institut, Århus Universitet  
Sedimentudveksling, Skanderborg Lillesø,  
1975.
- /5/ Fælles Søprojekt. Esrom sø, 1974 og slutrapport  
1975-1976.  
Ferskvandsbiologisk Laboratorium, Københavns Universitet.  
Kemisk Laboratorium A, Danmarks farmaceutiske Højskole.  
Laboratoriet for teknisk Hygiejne, Danmarks tekniske Højskole.  
Vandkvalitetsinstituttet, ATV.
- /6/ Vandkvalitetsinstituttet, ATV:  
Interkalibreringsrapport. Vandanalyser.  
Gudenåundersøgelsen, 1973-75,  
Gudenåudvalget, 1974.
- /7/ Vandkvalitetsinstituttet, ATV:  
Interkalibreringsrapport. Sedimentanalyser.  
Gudenåundersøgelsen 1973-75,  
Gudenåudvalget, 1974.

- /8/ Andersen, Jens Møller:  
Nitrogen and phosphorus budgets and the role of  
sediments in six shallow Danish lakes.  
Archiv für Hydrobiol. 74, (4) 528-550, 1974.
- /9/ Wetzel, Robert G.:  
Limnology.  
W.B. Saunders Co., 1975.
- /10/ Vandkvalitetsinstituttet, ATV:  
Haderslev Dam - Samlerapport  
1972.
- /11/ Andersen, Jens Møller:  
Personlig kommunikation, 1977.
- /12/ Vandkvalitetsinstituttet, ATV:  
Sømodeller.  
Gudenåundersøgelsen 1973-75, rapport nr. 16.  
Gudenåudvalget, 1976.
- /13/ Heintzelmann, F.:  
Eutrofiering og simple stofbalance/eutrofieringsmodeller  
Ferskvandsbiologisk specialerapport.  
Ferskvandsbiologisk Laboratorium, Københavns Universitet.  
1977.
- /14/ Vollenweider, R.A.:  
Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes ...  
OECD - rapport, Paris  
1968.
- /15/ Vandkvalitetsinstituttet, ATV:  
Undersøgelser af Salten å.  
Gudenåundersøgelsen 1973-75, rapport nr. 9.  
Gudenåudvalget, 1976.

- /16/ Vandkvalitetsinstituttet, ATV:  
Stoftransport i Gudenåsystemet.  
Gudenåundersøgelsen 1973-75, rapport nr. 12.  
Gudenåudvalget, 1976.
- /17/ Gargas, E., Nielsen, C.E. & Lønholdt, J.:  
An incubator method for estimating the daily  
plankton algae primaryproduction.  
Water Res. 10:10, 1976.
- /18/ Hansen, S., Johansen, N.B. & Lønholdt, J.:  
Solindstråling betragtet som et stokastisk  
fænomen.  
Vand, 4, 1976.
- /19/ Steemann-Nielsen, E. & Hansen, V.K.:  
Influence of surface illumination on plankton  
photosynthesis in Danish waters.  
Physiologia Pl., 14, 593-613, 1959.
- /20/ Lastein, E. & Gargas, E.:  
The relationship between phytoplankton photosynthesis  
and light, temperature and nutrients in shallow lakes.  
S.I.L. kongres, København 1977. (vedlagt som bilag 4).
- /21/ Mathiessen, H.M.:  
Miljøændringer og biologisk effekt i søer.  
Vatten, 26, 149-173, 1970.
- /22/ Vandkvalitetsinstituttet, ATV. (E. Lastein).  
PP-dag, måling af planteplanktonets vækst.  
Vandkvalitetsinstituttet, ATV. Maj 1976.
- /23/ Forureningsrådet.  
Recipientforhold  
Publikation nr. 12, 1971.



- /24/ Jørgensen, S.E., Kamp-Nielsen, L. & Jacobsen, O.S.:  
A submodel for anerobic mud-water exchange of phosphate.  
Ecol. Modelling, 1, 133-146, 1975.
- /25/ Kamp-Nielsen, L.:  
A kinetic approach to the aerobic sediment  
water exchange of phosphorus.  
Ecol. Modelling, 1, 153-160, 1975.
- /26/ Tessenow, Uffe:  
  
Arch. Hydrobiol. suppl. 42 3/4, 273- 339
- /27/ Hayes, F.R. & Phillips, J.E.:  
Sediments.  
Limnology and oceanography, 3, 359-375, 1958.
- /28/ Edwards, R.W. & Rolley, H.J.:  
Oxygen consumption of river mud.  
Journ. Ecol. 19-53, 1965.
- /29/ Edberg, N. & Hofsten, B.V.:  
Oxygen uptake of bottom sediments,  
Studies in situ and in the laboratory.  
Water Res. 7, 1285, 1975.
- /30/ Lastein, E.:  
Recent sedimentation and resuspension of  
organic matter in eutrophic lake Esrom.  
Oikos, 27, (1)44-49, 1976.
- /31/ Botanisk Institut, Århus Universitet:  
Sedimentkarakteristik.  
Gudenåundersøgelsen 1973-75, rapport nr. 22.  
Gudenåudvalget, 1977.

- /32/ Isotopcentralen, ATV:  
Kviksølv i sediment og fisk.  
Gudenåundersøgelsen 1973-75, rapport nr. 31.  
Gudenåudvalget, 1976.
- /33/ Vandkvalitetsinstituttet, ATV:  
Undersøgelse af spildevand fra papir- og papfabrikker.  
Gudenåundersøgelsen 1973-75, rapport nr. 5.  
Gudenåudvalget, 1976.
- /34/ Jónasson, P.M.:  
Ecology and production of the profundal benthos  
in relation to phytoplankton on lake Esrom.  
Oikos, suppl. 14, 1-148, 1972.
- /35/ Gudenåudvalget.  
Amtsvandvæsenernes undersøgelser, 1971, rapport nr. 1.  
Gudenåudvalget, 1973.
- /36/ Brundin, L.:  
Chironomiden un andere Bodentiere der Südschwedischen  
Urgebirgseen.  
Inst. Frechwat. Res. Drottningholm, Rep. 30, 1-914, 1949.
- /37/ Paterson, C.G. & Fernando, C.H.:  
Benthic Fauna Colonization of a New Reservoir with  
Particular Reference to the Chironomidae.  
J.Fish.Res.Bd.Can., 27, 213-232, 1970.
- /38/ Thienemann, A.:  
Die beiden Chironomusarten der Tiefenfauna der  
Norddeutschen Seen. Ein hydrobiologisches Problem.  
Verh. Internat. Ver.Limnol., 1, 108-143, 1923.
- /39/ Wachs, B.:  
Vorkommen und Verbreitung der Oligochaeten in der  
Edertalsperre.  
Arch. Hydrobiol., 61, 190-204, 1965.

- /40/ Wiederholm, T.:  
The bottom fauna in Ekoln, a polluted bassin  
of lake Mälaren.  
Vatten, 2, 124-138, 1973.
- /41/ Berg, K.:  
Studies on the bottomanimals of Esrom lake.  
Det Kgl. Danske Vidensk.Selsk.Skr.,  
Naturv. & Mat. Afd. IX, Rk. VIII, 1938.
- /42/ Vestsjællands amt.  
Recipientundersøgelser, Søundersøgelser, 1973.
- /43/ Otterstrøm, C.V.:  
Undersøgelse af Haderslev dam, 1928-29.  
Ferskvandsfiskeribladet, 30, 45-60, 1932.
- /44/ Vandkvalitetsinstituttet, ATV.:  
Kemiske og biologiske undersøgelser af Gjorslev  
møllesø, 1972.
- /45/ Ohle, W.:  
Primärproduktion des Phytoplanktons und  
Bioaktivität Holsteinischer Seen. Methoden und  
Ergebnisse.  
Limnologisymposium, 23-24, 1964.
- /46/ Hargrave, B.:  
A comparison of sediment oxygen uptake, hypolimnetic  
oxygen deficit and primary production in lake Esrom,  
Denmark.  
Verh. Internat. Ver. Limnol., 18, 134-139, 1972.
- /47/ Vandkvalitetsinstituttet, ATV.  
Vandløbsbiologi  
Gudenåundersøgelsen 1973-75, rapport nr. 13.  
Gudenåudvalget, 1976.

# GUDENAUDVALGET'S

---

RAPPORTER VEDR. SØER UNDERSØGT VED GUDENAUNDERSØGELSEN 1973-75  
OMFATTER FØLGENDE:

- Rapport nr. 14: VANDKVALITETSINSTITUTTET, ATV:  
Søundersøgelser.
- " " 15: VANDKVALITETSINSTITUTTET, ATV:  
Algevækstforsøg.
- " " 16: VANDKVALITETSINSTITUTTET, ATV:  
Sømodeller.
- " " 20: VANDKVALITETSINSTITUTTET, ATV:  
Fordampningsundersøgelser, Mossø.
- " " 21: BOTANISK INSTITUT, ÅRHUS UNIVERSITET:  
Eutrofiering af Mossø.
- " " 22: BOTANISK INSTITUT, ÅRHUS UNIVERSITET  
Sedimentkarakteristik.
- " " 25: BOTANISK INSTITUT, ÅRHUS UNIVERSITET:  
Søkarakteristik.
- " " 26: FERSKVANDSBIOLOGISK LABORATORIUM,  
KØBENHAVNS UNIVERSITET,  
& BOTANISK INSTITUT, ÅRHUS UNIVERSITET:  
Karakterisering af søer.
- " " 30: ISOTOPCENTRALEN, ATV:  
Mossø - opblanding.
- " " 32: LABORARIET FOR FYSISK GEOGRAFI,  
ÅRHUS UNIVERSITET:  
Materialetransport.

