
RAPPORT NR. 15



GUDENÅUNDERSØGELSEN
Algevækstforsøg

G U D E N Å U N D E R S Ø G E L S E N

1973 - 1975

ALGEVÆKSTFORSØG

VANDKVALITETSINSTITUTTET, ATV
Agern Allé 11, 2970 Hørsholm

Sagsnr.: 25.4.164

1976-07-01 - WWT-WF

Medarbejder:

Cand.scient. Eivind Gargas

Sagsbehandlere:

Cand.scient. Ebbe Lastein

Civ.ing. Poul B. Heise

INDHOLDSFORTEGNELSE

	SIDE
1. INDLEDNING	1
1.1 FORMÅL	1
2. BAGGRUND	2
3. UNDERSØGELSENS GENNEMFØRELSE	4
3.1 METODIK	4
3.2 UNDERSØGELSESMRÅDETS TOPOGRAFI, VANDBALANCE OG NÆRINGSSALTSBE- LASTNING	5
3.3 PRAKTISK GENNEMFØRELSE	9
4. RESULTATER	14
4.1 LABORATORIEFORSØG	14
4.2 FELTFORSØG	29
5. DISKUSSION OG KONKLUSION	33
6. REFERENCER	39

1. INDLEDNING

I forbindelse med Gudenåundersøgelsen 1973 - 75 er der udført en række undersøgelser til vurdering af algevæksten i en række af systemets søer.

Vandkvalitetsinstituttet, ATV, har som en specialundersøgelse gennemført en række algevækstforsøg - dels i laboratorieskala og dels som feltforsøg med det sigte at vurdere spildevandstilledningers virkning ved udledning i søer. Som måleobjekt er valgt udledningen fra Søholt rensningsanlæg til recipienten Silkeborg Langsø. Algevækstforsøgene er udført dels som laboratorieforsøg på filtreret søvand og en udvalgt testalgepopulation og dels som feltforsøg på ubehandlet søvand.

1.1 FORMÅL

Ved laboratorieforsøgene at opnå en teoretisk viden om, hvilken effekt tilsætningen af spildevand af forskellig rensningsgrad og i varierende koncentrationer vil have på recipientvandets potentielle gødskningskapacitet. Herved forstås den maximale mulighed for algeproduktion ud over den algebiomasse, der allerede er produceret (laboratorieforsøgene udføres på filtreret søvand).

Ved feltforsøgene at opnå en viden om, hvilken effekt tilsætningen af spildevand af forskellig rensningsgrad og i varierende koncentrationer vil have på ændringen i algebiomassen i recipienten, idet der indstilles en ny ligevægt mellem forøget algeproduktion og forøget algekonsumering.

2. BAGGRUND

Et akvatisk økosystem er et dynamisk system, i hvilket en række biotiske og abiotiske tilstandsvariabler ændrer værdi i tid og rum som følge af forskellige processer. Det er derfor størrelsen (koncentrationen) af de enkelte tilstandsvariabler samt hastigheden af de processer, der omdanner en tilstandsvariabel til en anden, der karakteriserer systemets øjeblikkelige tilstand.

Forståelsen af et sådant kompliceret systems kausale tidsmæssige ændring er meget begrænset. Det er vigtigt at opnå en forøget viden om systemets struktur og funktion for derigennem at kunne forudsige tilstandsændringer samt at kunne gribe regulerende ind over for eventuelle gener i form af kraftig algevækst. En forøget viden kan opnås ved at opstille en matematisk model og kalibrere den på systemet. Forudsætningen for en sådan kalibrering er, at der for det system, som modellen skal opstilles for, er foretaget målinger af relevante tilstandsvariabler, processer og tvangsfunktioner.

Algevækstforsøg relaterer direkte den biologiske respons til "vandet" og dets næringssalte, hvorved algevækstforsøg sammenlignet med kemiske analyser af vandet indebærer muligheder for prognoser for spildevandets vækstfremmende eller væksthæmmende effekt på recipientvandet i forskellige koncentrationer.

Ved valg af algevækstmetodik til karakterisering af et vandsystems øjeblikkelige trofigrad samt

2. BAGGRUND

Et akvatisk økosystem er et dynamisk system, i hvilket en række biotiske og abiotiske tilstandsvariabler ændrer værdi i tid og rum som følge af forskellige processer. Det er derfor størrelsen (koncentrationen) af de enkelte tilstandsvariabler samt hastigheden af de processer, der omdanner en tilstandsvariabel til en anden, der karakteriserer systemets øjeblikkelige tilstand.

Forståelsen af et sådant kompliceret systems kausale tidsmæssige ændring er meget begrænset. Det er vigtigt at opnå en forøget viden om systemets struktur og funktion for derigennem at kunne forudsige tilstandsændringer samt at kunne gribe regulerende ind over for eventuelle gener i form af kraftig algevækst. En forøget viden kan opnås ved at opstille en matematisk model og kalibrere denne på systemet. Forudsætningen for en sådan kalibrering er, at der for det system, som modellen skal opstilles for, er foretaget målinger af relevante tilstandsvariabler, processer og tvangsfunktioner.

Algevækstforsøg relaterer direkte den biologiske respons til "vandet" og dets næringssalte, hvorved algevækstforsøg sammenlignet med kemiske analyser af vandet indebærer muligheder for prognoser for spildevandets vækstfremmende eller væksthæmmende effekt på recipientvandet i forskellige koncentrationer.

Ved valg af algevækstmetodik til karakterisering af et vandsystems øjeblikkelige trofegrad samt

effekten af forskellige tekniske indgreb, må der tages hensyn til flere faktorer. Et hvilket som helst måleteknisk indgreb vil gribe forstyrrende ind i økosystemets balance, hvorved grundlaget for en realistisk vurdering af systemets aktuelle mekanismesammenhænge forringes. Det kraftigste indgreb vil medføre den kraftigste forstyrrelse i systemet, men vil også samtidig indebære muligheden for en mere effektiv proces- og parameterstyring. Ændringer i algevækstprocesserne i et akvatisk økosystem belyses derfor bedst ved at udføre algevækstforsøg samtidig dels in situ og dels i laboratoriet.

3. UNDERSØGELSENS GENNEMFØRELSE

3.1 METODIK

Algevækstforsøgene er udført som batch forsøg. Det vil sige, at forsøgene er udført i lukkede systemer uden mulighed for udveksling af stoffer mellem forsøgsmediet og omgivelserne. Der er foretaget en række forsøg, hvor tilvæksten i algebiomasse er bestemt som funktion af tilsætning af spildevand af forskellig rensningsgrad og i varierende koncentrationer. Forsøgene er udført dels som laboratorieforsøg og dels som feltforsøg.

3.1.1 LABORATORIEFORSØG

Ved laboratorieforsøg er forsøgsvandet filtreret gennem et GF/C glasfiberfilter med en porediameter på ca. 0,5 μ , hvorved alt partikulært materiale filtreres fra. Det filtrerede vand overføres derefter til forsøgskolberne, hvorefter spildevandet tilsættes. Før tilsætning af spildevand er dette behandlet i en MSE 150 Watt ultralyd homogenisator ved 20.000 HZ i to minutter, hvorved alt partikulært materiale i spildevandet sønderdeles. Derefter tilsættes testalgerne. Under optimale lys-, temperatur- og CO₂-forhold vil testalgerne forøge deres biomasse, indtil et eller flere af næringssaltene i forsøgsmediet er kommet i minimum. Derefter stoppes forsøget.

Forsøgsteknikken er beskrevet i /10/.

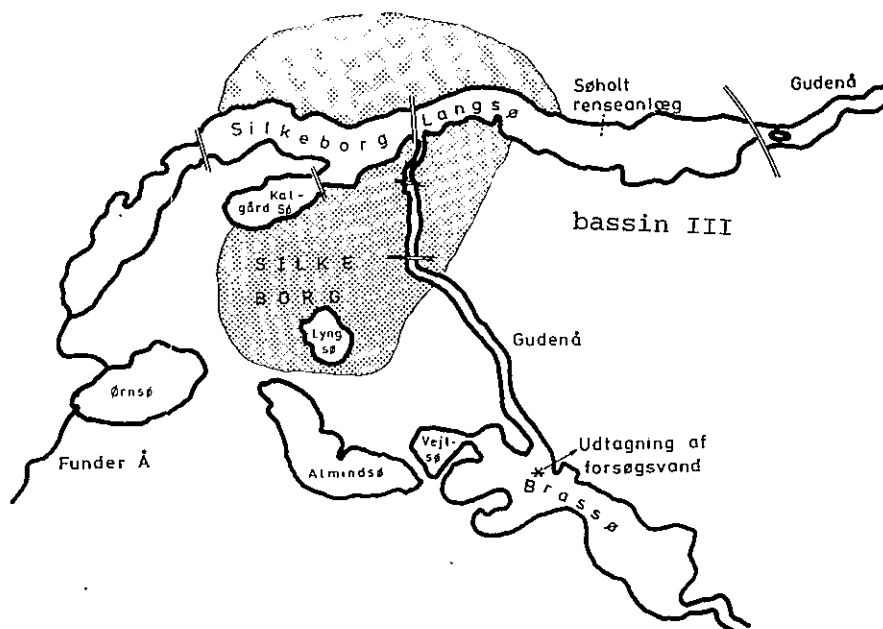
3.1.2 FELTFORSØG

Feltforsøgene er udført med ubehandlet forsøgsvand i 300 liter polyethylenbeholdere (se fig. 3.1) udhængt direkte i søen og med sollyset som energikilde. Forsøgsmediet udgøres i disse forsøg derfor af den naturlige planktonalgepopulation plus de zooplanktonorganismer, der predaterer på planktonalgerne. Ved tilsætning af spildevand er der ikke, som ved laboratorieforsøgene, foretaget nogen forudgående sønderdeling af spildevandspartiklerne. Da forsøgsmediet i feltforsøgene udgøres af naturligt søvand, er kompleksiteten af de biologiske processer, der foregår her, langt større end i dyrkningskolberne i laboratoriet.

Med hensyn til teorien for algevæksten kan der som for laboratorieforsøgenes vedkommende henvises til /10/.

3.2 UNDERSØGELSESONRÅDETS TOPOGRAFI, VAND- BALANCE OG NÆRINGSSALTSBELASTNING

På fig. 3.1 er der vist et kort over undersøgelsesområdet med angivelse af udledningen fra Søholt rensningsanlæg. Som det fremgår af figuren, er Silkeborg Langsø opdelt i tre bassiner. Arealet af de tre bassiner er tilsammen $2,35 \text{ km}^2$. Med en middeldybde på ca. 3 m bliver det samlede vandvolumen ca. $7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. De største tilløb til søsystemet er Gudenåen, Funder Å samt bidraget fra Søholt rensningsanlæg.



Figur 3.1 Kort over Silkeborg Langsø med angivelse af til- og afløb samt udledningsstedet fra Søholt rensningsanlæg.

Silkeborg Langsø opdeles ved vejbroer i tre bassiner, hvoraf det østre bassin, bassin III, i det følgende omtales som Silkeborg Langsø.

Der er udnyttet vandføringsresultater (Hedeselskabet) for perioden januar til december 1974 i Funder Å, Gudenåen før Silkeborg Langsø (ved papirfabrikken), Lin Å, Gjern Å og ved Tvilumbro. På basis af disse vandføringsmålinger er middelvandføringen i sø afløbet beregnet til ca:

$$13,700 \text{ m}^3/\text{sek} \sim 1,18 \cdot 10^9 \text{ l/døgn.}$$

Ifølge rapporten: "Gudenåundersøgelsen 1973 - 75, Spildevandsundersøgelser" / 3 / fås døgnmiddelbelastningen fra Søholt rensningsanlæg:

$$13.500 \text{ m}^3 \text{ spildevand pr. døgn}$$

$$\text{gennemsnitskonc. af total-N, } 35 \text{ g/m}^3$$

$$\text{gennemsnitskonc. af total-P, } 9 \text{ g/m}^3$$

Heraf beregnes:

$$\text{middeldøgnbelastning af N: } 13.500 \cdot 35 \sim 470 \text{ kg N}$$

$$\text{middeldøgnbelastning af P: } 13.500 \cdot 9 \sim 120 \text{ kg P.}$$

Antages det, at middelbelastningen af N og P fra Søholt rensningsanlæg fordeles i den vandmasse, der forlader Silkeborg Langsø, fås:

$$\text{forøgelsen af N: } \frac{470 \cdot 10^6}{1,18 \cdot 10^9} \text{ mg/l} \sim 0,4 \text{ mg N/l}$$

$$\text{forøgelsen af P: } \frac{120 \cdot 10^6}{1,18 \cdot 10^9} \text{ mg/l} \sim 0,1 \text{ mg P/l}$$

I gennemsnit for året er koncentrationen af N og P i henholdsvis Brassø og udløbet af Silkeborg Langsø:

	Total-N mg/l	Total-P mg/l
Brassø	2,09	0,13
Silkeborg Langsø	2,30	0,22

Den relative belastning med N og P af den østlige del af Silkeborg Langsø (bassin III) som følge af udledning af spildevand fra Søholt rensningsanlæg er:

	Målt	Beregnet
Relativ belastning af N	10 %	20 %
Relativ belastning af P	69 %	60 %

For at opnå en forøgelse af N koncentrationerne i Brassø vandet på de beregnede 20 % skal der tilsættes følgende mængder spildevand:

$$(1000 - x) \cdot 2,09 + x \cdot 35 = 1000 \cdot 2,51$$

$$2090 - 2,09x + 35x = 2510$$

$$32,9x = 420$$

$$\underline{x = 13}$$

Det vil sige, at 13 ml spildevand + 987 ml Brassø vand giver en N forøgelse på 20 % ~ en spildevandstilsætning på volumenbasis på ca. 1,5 %.

Tilsvarende beregninger for P giver, at 9 ml spildevand + 991 ml Brassø vand medfører en P forøgelse på 60 % ~ en spildevandstilsætning på volumenbasis på ca. 1 %.

Ved algevækstforsøgene er der tilsat spildevandsmængder fra 0 % til 18 % ved feltforsøgene og fra 0 % til 12 % ved laboratorieforsøgene.

3.3 PRAKTISK GENNEMFØRELSE

Som omtalt i afsnit 3.2 er det hovedsagelig vandmasserne fra Brassø, der med Gudenåen transporteres til Silkeborg Langsø. Det er derfor vand fra Brassø (se fig. 3.1), der har udgjort forsøgsmediet ved algevækstforsøgene.

Spildevandet fra Søholt rensningsanlæg er i dag mekanisk rensset. Der har været diskuteret muligheden for en udbygning med biologisk-kemisk rensning. Algevækstforsøgene er derfor udført dels med mekanisk rensset spildevand og dels med biologisk-kemisk rensset spildevand.

Det ville være forbundet med uforholdsmæssige store vanskeligheder at udtage spildevand fra Søholt rensningsanlæg og foretage biologisk rensning udelukkende med det formål at teste gødskningseffekten af det biologisk rensede spildevand ved algevækstforsøg. Det blev derfor besluttet at udtage spildevandet fra et rensningsanlæg, der i forvejen havde biologisk rensning, nemlig Resenbro rensningsanlæg. Herved indføres der en mulig fejlkilde ved forsøgene, da Resenbro rensningsanlæg ikke i samme omfang som Søholt rensningsanlæg modtager industrispildevand.

Ved hvert forsøg er spildevandet fra Resenbro rensningsanlæg udtaget som en gennemsnitsprøve indsamlet over et døgn. Det mekanisk rensede spildevand er anvendt direkte, mens det biologisk rensede spildevand yderligere er tilsat FeCl_3 , hvorved op til 90 % af $\text{PO}_4\text{-P}$ bundfældes (d.v.s. en kemisk rensning), og kun supernatanten anvendes ved forsøget.

Ved gennemførelsen af laboratorieforsøgene er spildevand og recipientvand hurtigst muligt efter udtagning og den omtalte forbehandling i nedkølet stand sendt til Vandkvalitetsinstitutets algevækstlaboratorium, hvor forsøgene er foretaget.

I tabellerne 3.2 - 3.5 er der angivet den procentuelle tilsætning af spildevand samt de aktuelle koncentrationer af total-N og total-P for henholdsvis mekanisk rensed og biologisk-kemisk rensed spildevand for de fire laboratorieforsøg. Efter forsøgets igangsættelse er der udtaget prøver til bestemmelse af tilvæksten i algebiomasse hver dag.

De udtagne prøver er analyseret for:

- celleantal (bestemt med coulter counter)
- cellevolumen (bestemt med coulter counter)
- klorofyl-a
- tørstof
- partikulært-N
- partikulært-P

LABORATORIEFORSØG

Forsøgsperiode: 13.6. - 25.6.1974

Spildevands- tilsætning i % af vol.	Total næringssaltkoncentration i forsøgs- flaskerne			
	Mekanisk		Biologisk-kemisk	
	N, mg/l	P, mg/l	N, mg/l	P, mg/l
0	1,530	0,080	1,530	0,080
1,5	1,867	0,247	1,792	0,097
3,0	2,204	0,414	2,054	0,114
6,0	2,878	0,747	2,578	0,147
9,0	3,414	1,080	3,102	0,181
12,0	4,226	1,414	3,626	0,241

Tabel 3.2 Procentvis spildevandstilsætning og aktuelle næringssaltkoncentrationer ved algevækstforsøgene 13.6. - 25.6.1974.

Forsøgsperiode: 13.7. - 25.7.1974

Spildevands- tilsætning i % af vol.	Total næringssaltkoncentration i forsøgs- flaskerne			
	Mekanisk		Biologisk-kemisk	
	N, mg/l	P, mg/l	N, mg/l	P, mg/l
0	0,730	0,005	0,730	0,005
1,5	0,898	0,041	0,815	0,009
3,0	1,065	0,077	0,900	0,017
6,0	1,400	0,149	1,076	0,034
9,0	1,735	0,221	1,262	0,051
12,0	2,070	0,292	1,410	0,062

Tabel 3.3 Procentvis spildevandstilsætning og aktuelle næringssaltkoncentrationer ved algevækstforsøgene 13.7. - 25.7.1974.

Forsøgsperiode: 1.8. - 13.8.1974

Spildevands- tilsætning i % af vol.	Total næringssaltkoncentration i forsøgs- flaskerne			
	Mekanisk		Biologisk-kemisk	
	N, mg/l	P, mg/l	N, mg/l	P, mg/l
0	0,465	0,105	0,465	0,105
1,0	0,730	0,237	0,673	0,106
2,0	0,995	0,369	0,881	0,106
3,0	1,261	0,498	1,091	0,107
5,0	1,792	0,765	1,507	0,108
7,0	2,322	1,029	1,923	0,112

Tabel 3.4 Procentvis spildevandstilsætning og aktuelle næringssaltkoncentrationer ved algevækstforsøgene 1.8. - 13.8.1974.

Forsøgsperiode: 15.9. - 29.9.1974

Spildevands- tilsætning i % af vol.	Total næringssaltkoncentration i forsøgs- flaskerne			
	Mekanisk		Biologisk-kemisk	
	N, mg/l	P, mg/l	N, mg/l	P, mg/l
0	0,700	0,230	0,700	0,230
1,0	1,006	0,378	0,907	0,342
2,0	1,310	0,525	1,114	0,455
3,0	1,615	0,673	1,321	0,568
5,0	2,225	0,968	1,735	0,793
7,0	2,835	1,264	2,149	1,019

Tabel 3.5 Procentvis spildevandstilsætning og aktuelle næringssaltkoncentrationer ved algevækstforsøgene 15.9. - 29.9.1974.

FELTFORSØG

Ved gennemførelsen af feltforsøgene er forsøgene påbegyndt umiddelbart efter udtagning og forbehandling af spildevandet. Forsøgene er udført i 2 "blokke" udhængt i Brassø, hver med plads til 6 · 300 liter polyethylensække. I tabel 3.6 er der angivet den procentuelle tilsætning af spildevand for de 3 feltforsøg. Efter forsøgenes igangsættelse er der udtaget prøver til bestemmelse af tilvæksten i algebiomasse hver anden dag. De udtagne prøver er analyseret for klorofyl-a.

Spildevandstilsætning i %		
20.3. - 1.4.	15.4. - 27.4.	2.5. - 15.5.
0	0	0
1,5	2	2
3	4	4
6	9	8
9	12	11
12	18	18

Tabel 3.6 Procentvis spildevandstilsætning ved de 3 algevækstforsøg i felten.

4. RESULTATER

4.1 LABORATORIEFORSØG

På figurerne 4.1 a-f - 4.4 a-f er der afbildet hele vækstforløbet fra første dagen efter podningen af forsøgsmediet med testalgen Selenastrum capricornutum, til den stationære fase er nået - for nærmere forklaring henvises til appendix, afsnit 7. Figurerne er ordnet parvis, således at de for hver forsøgsserie viser vækstforløbet af testalgen ved tilsætning af samme mængde henholdsvis mekanisk rensset og biologisk-kemisk rensset spildevand.

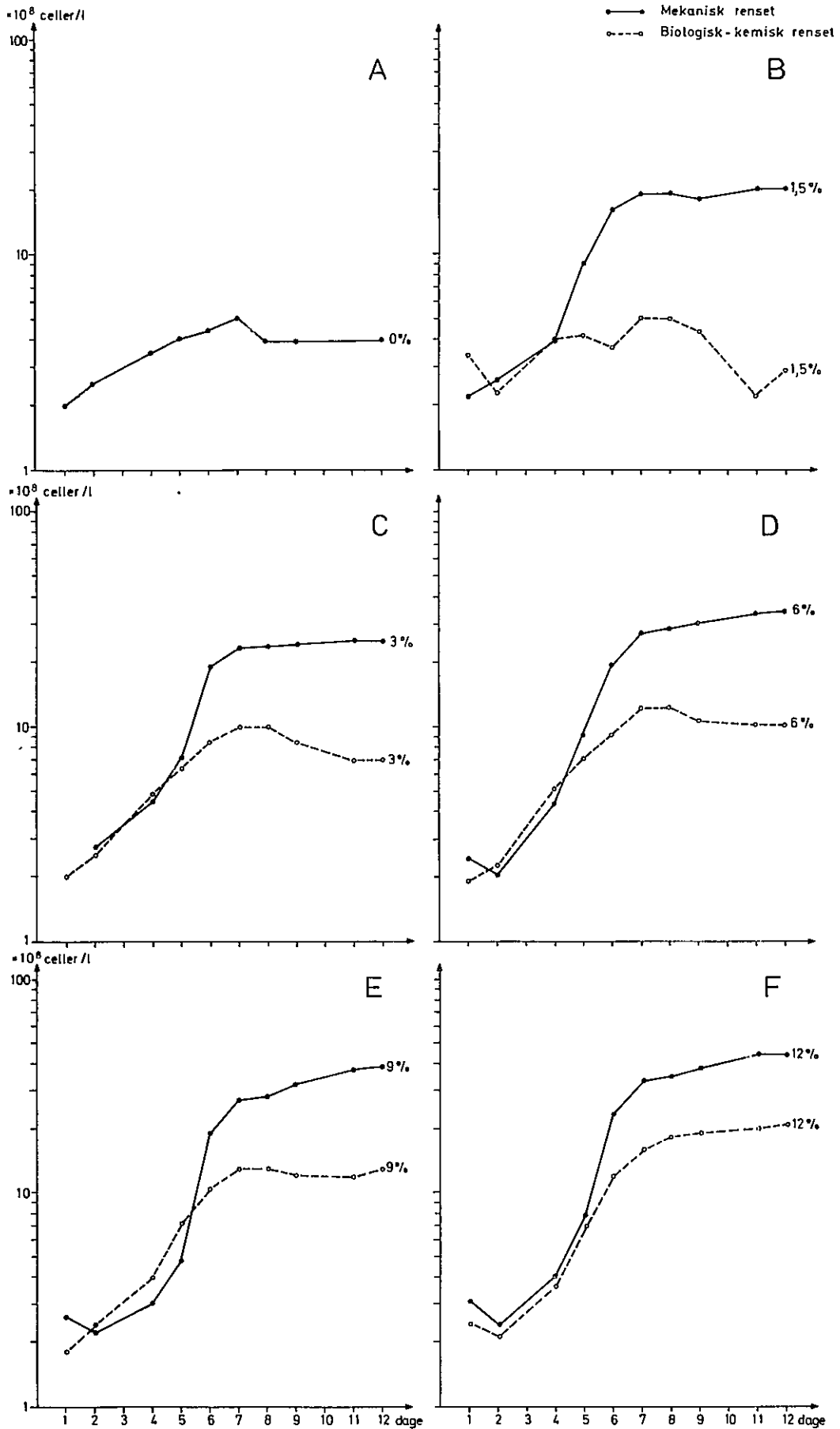
På figurerne 4.5 a-f - 4.12 a-f er der afbildet den maximale producerede biomasse (X_{\max}) angivet som:

- 1) celleantal pr. liter
- 2) cellevolumen pr. liter
- 3) klorofyl-a pr. liter
- 4) tørstof pr. liter
- 5) partikulært kvælstof pr. liter
- 6) partikulært fosfor pr. liter

for hver af de 4 forsøgsserier for tilsætning af henholdsvis mekanisk rensset og biologisk-kemisk rensset spildevand.

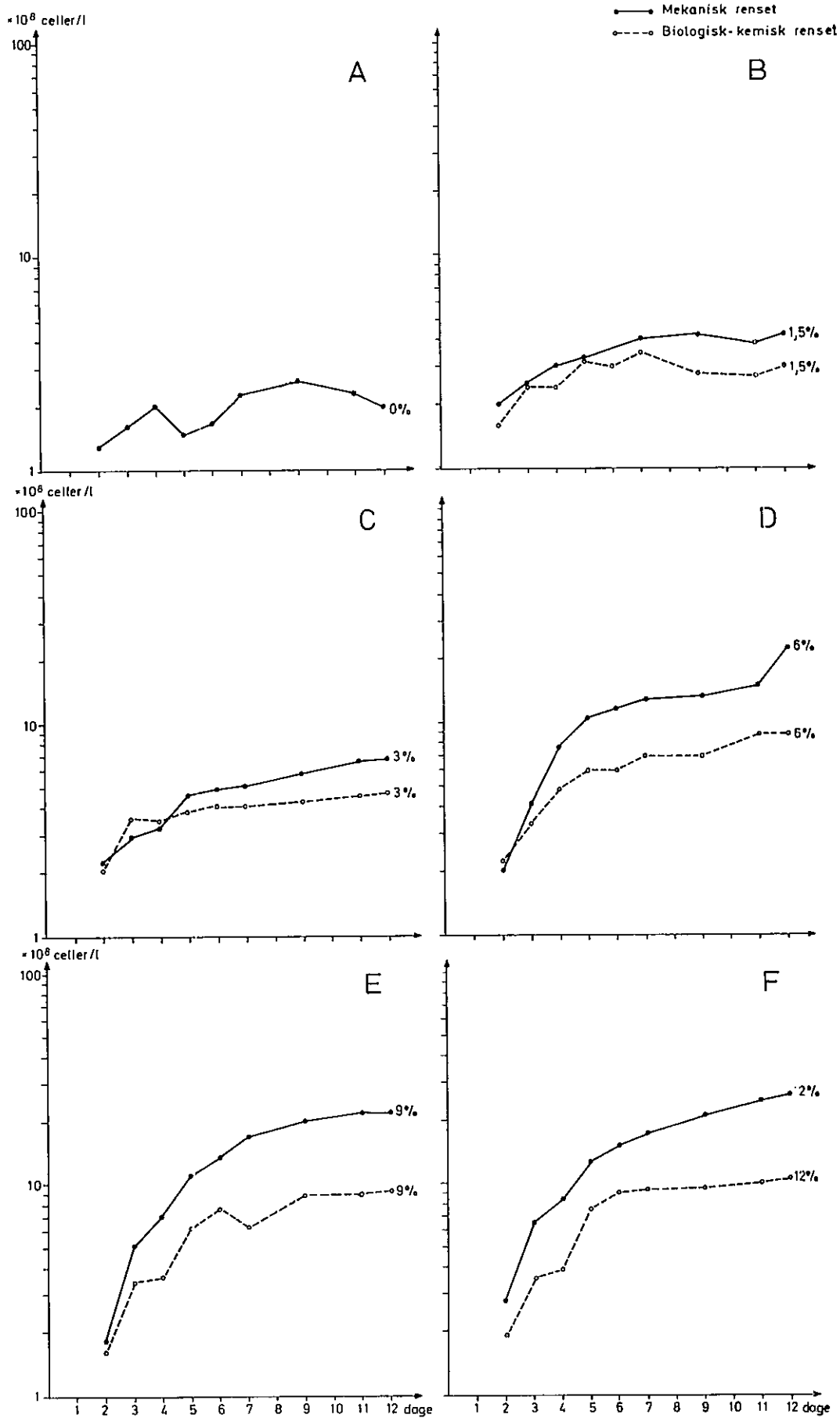
I tabellerne 4.1 - 4.4 er der vist effekten ved tilsætning af stigende koncentrationer af henholdsvis mekanisk rensset og biologisk-kemisk rensset spildevand på det filtrerede recipientvand fra Brassø, angivet ved parametrene:

- 1) maximal specifik væksthastighed (μ_{\max})
- 2) maximal udbyttekoefficient (Y_{\max}).



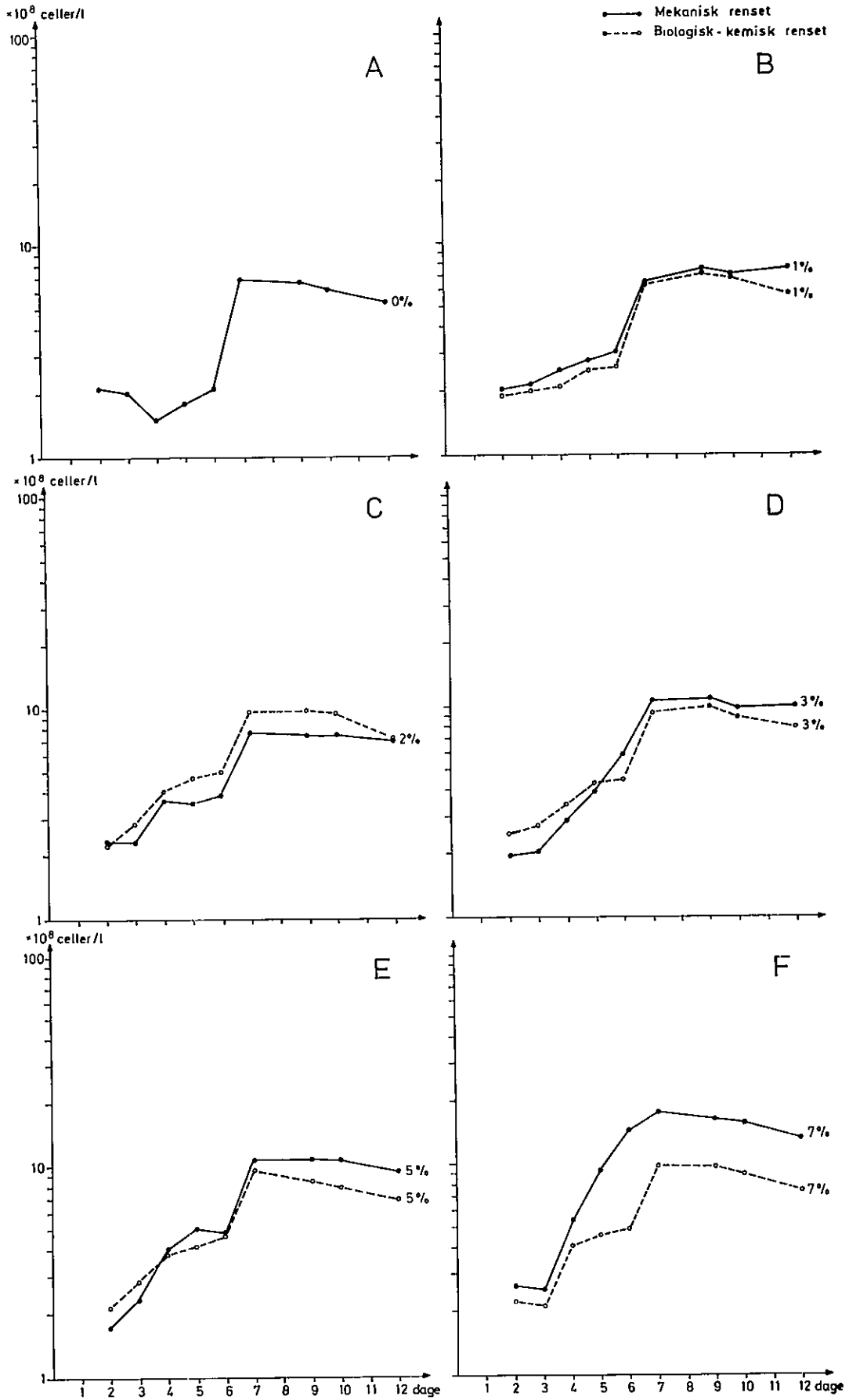
Figur 4.1 a-f Effekten af tilsætning af stigende mængder henholdsvis mekanisk- og biologisk-kemisk rensed spildevand på vækstforløbet af Selenastrum capricornutum.

Forsøgsperiode: 13.6. - 25.6.1974.



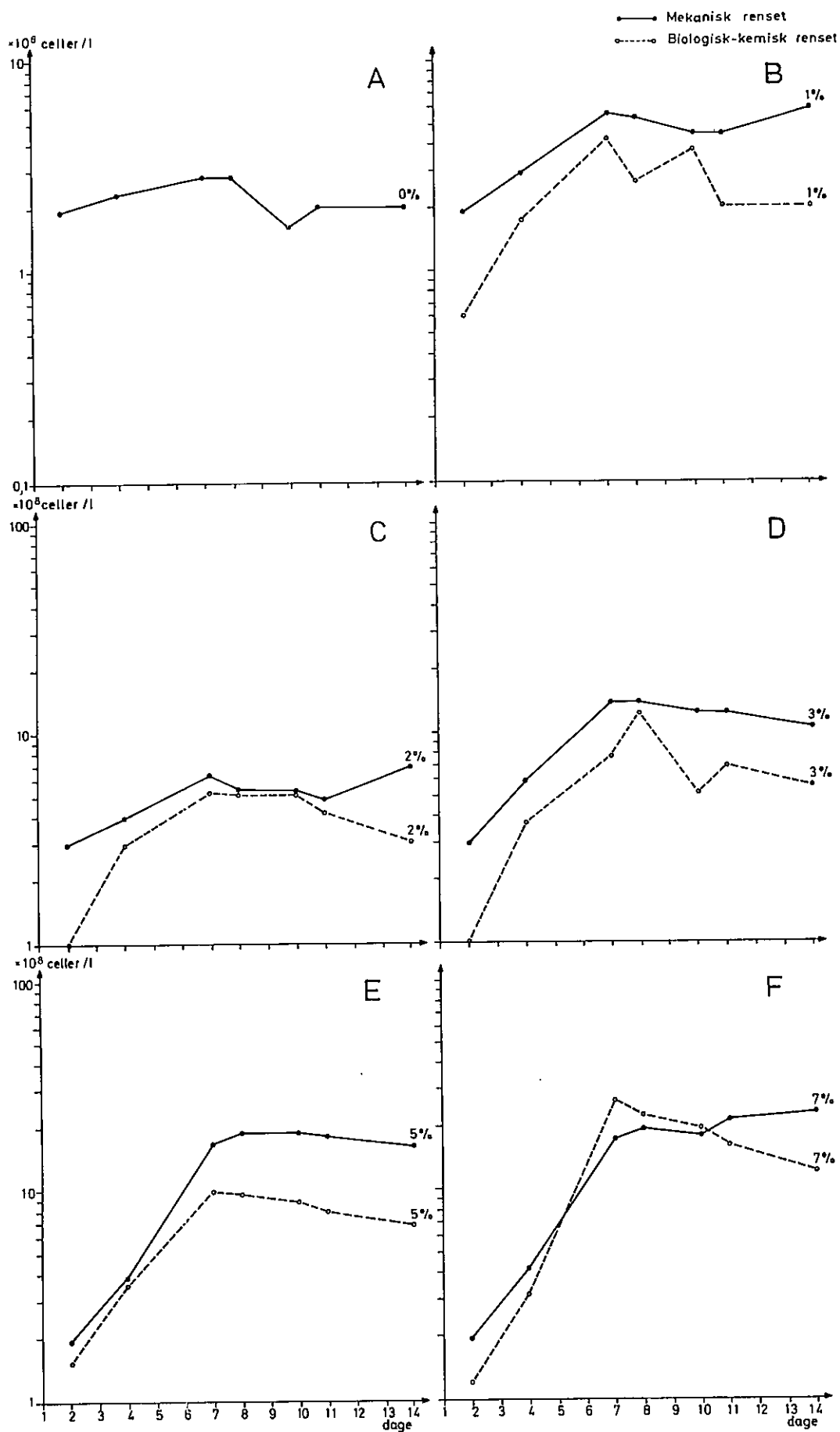
Figur 4.2 Effekten af tilsætning af stigende mængder af henholdsvis mekanisk- og biologisk-kemisk rensed spildevand på vækstforløbet af *Selenastrum capricornutum*.

Forsøgsperiode: 13.7. - 25.7.1974.



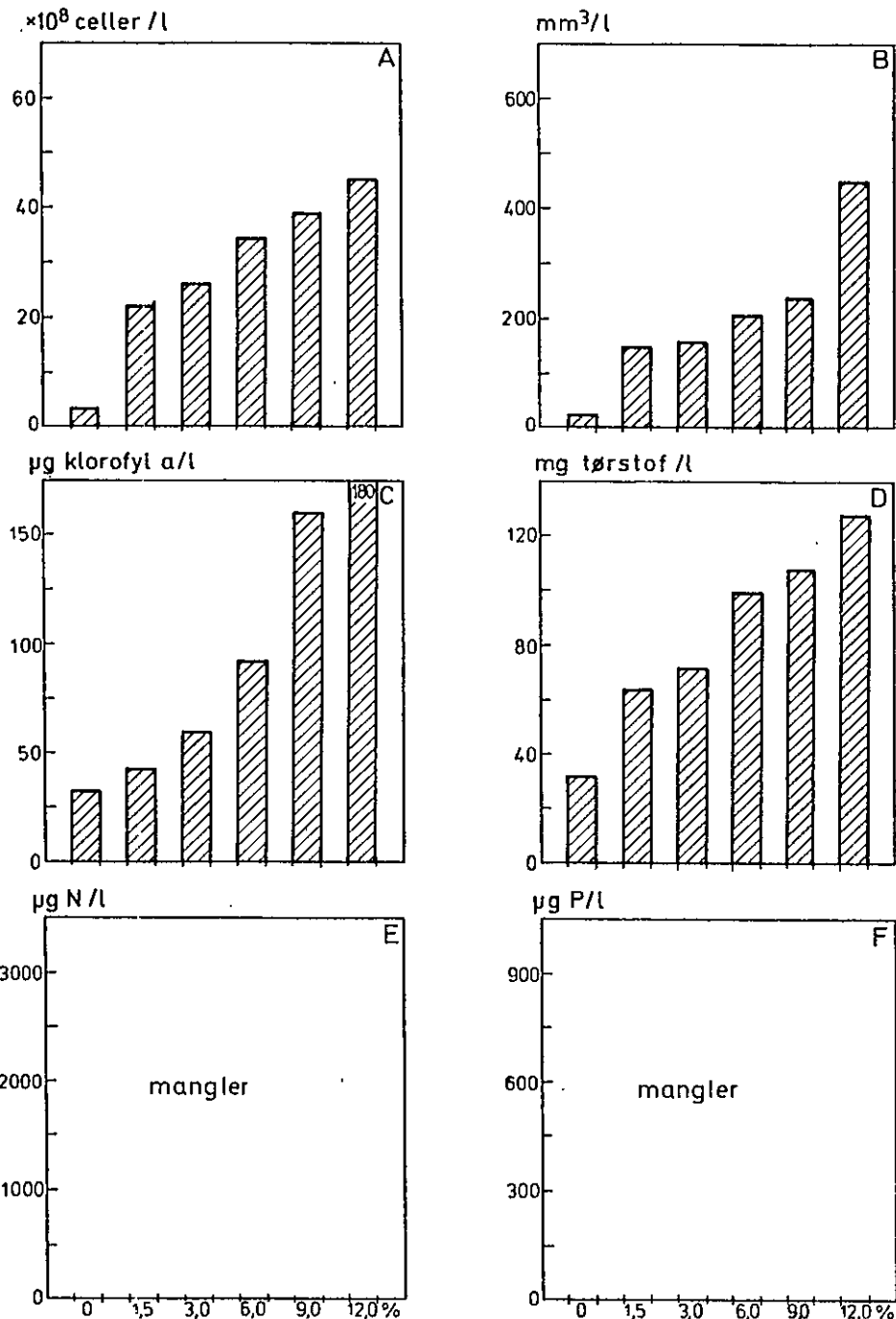
Figur 4.3 Effekten af tilsætning af stigende mængder af henholdsvis mekanisk- og biologisk-kemisk rensed spildevand på vækstforløbet af *Selenastrum capricornutum*.

Forsøgsperiode: 1.8. - 13.8.1974.



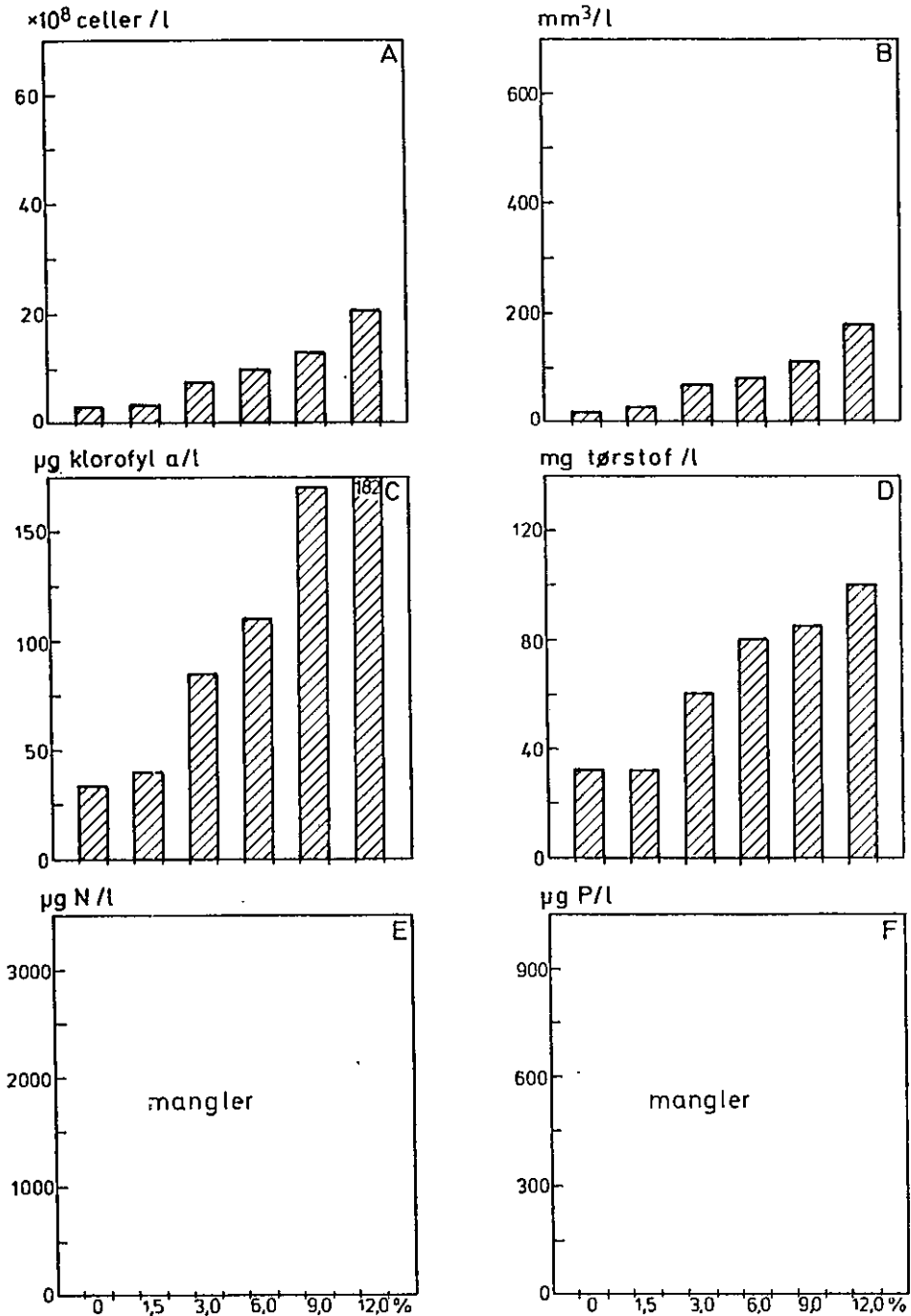
Figur 4.4 Effekten af tilsætning af stigende mængder af henholdsvis mekanisk- og biologisk-kemisk rensat spildevand på vækstforløbet af Selenastrum capricornutum.

Forsøgsperiode: 15.9. - 29.9.1974.



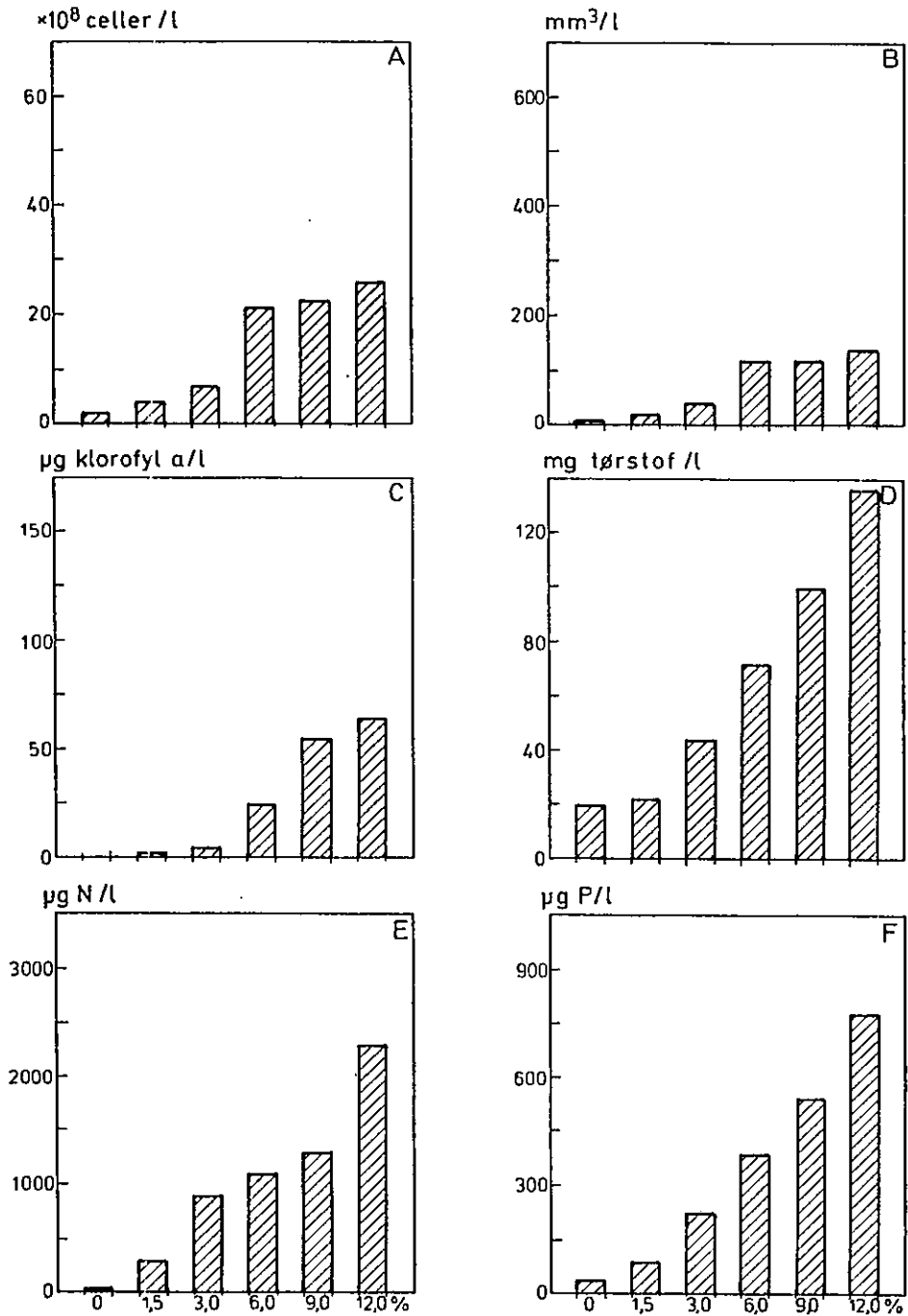
Figur 4.5 Effekten af tilsætning af stigende mængder mekanisk rensset spildevand på den maksimale producerede biomasse (X_{max}) af *Selenastrum capricornutum*.

A: celleantal/l, B: cellevolumen/l, C: klorofyl-a/l, D: tørstof/l, E: partikulært kvælstof/l, F: partikulært fosfor/l. Forsøgsperiode: 13.6. - 25.6.1974.



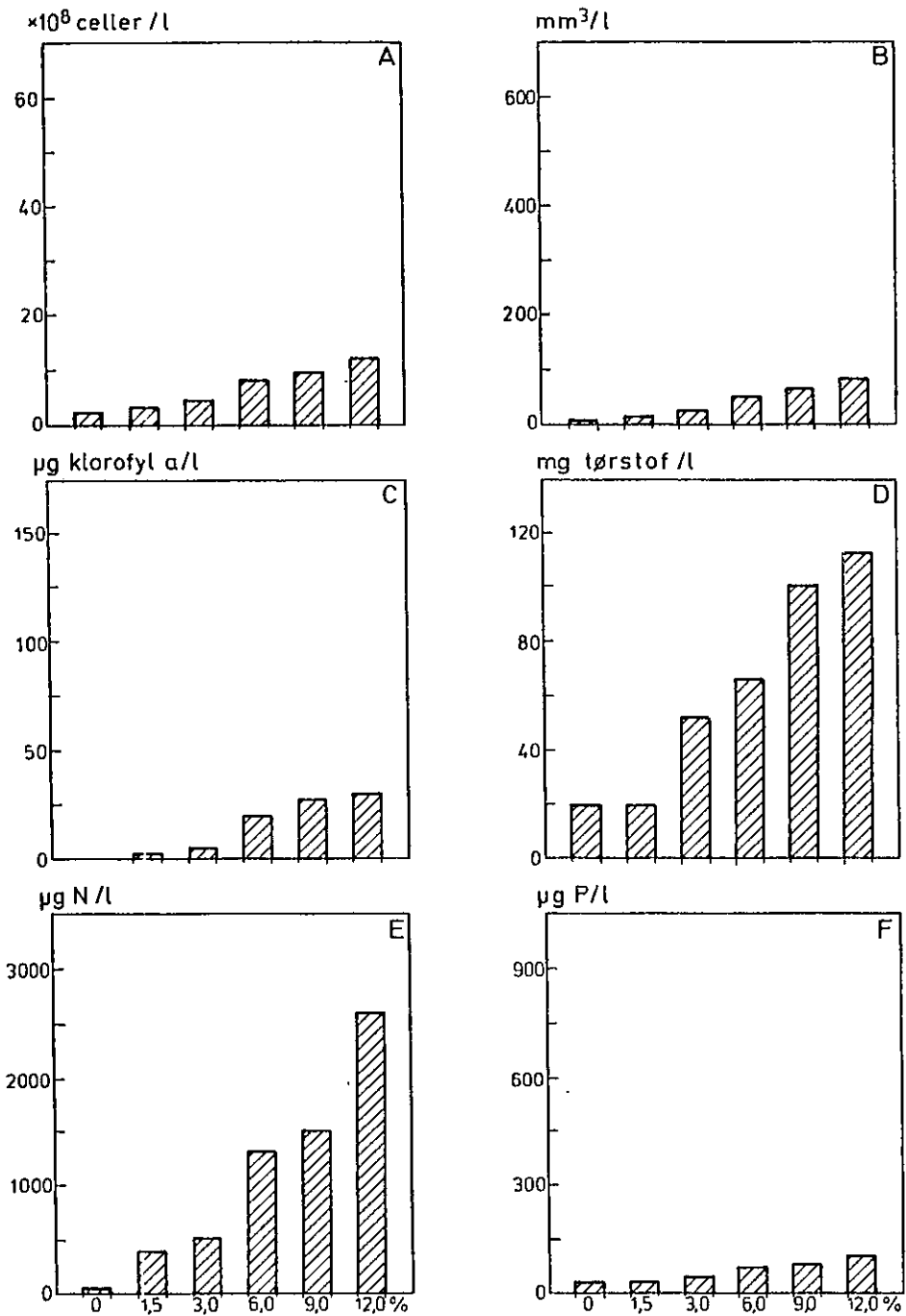
Figur 4.6 Effekten af tilsætning af stigende mængder biologisk-ke-
a-f misk rensset spildevand på den maximale producerede bio-
masse (X_{max}) af *Selenastrum capricornutum*.

A: celleantal/l, B: cellevolumen/l, C: klorofyl-a/l,
D: tørstof/l, E: partikulært kvælstof/l, F: partikulært
fosfor/l. Forsøgsperiode: 13.6. - 25.6.1974.



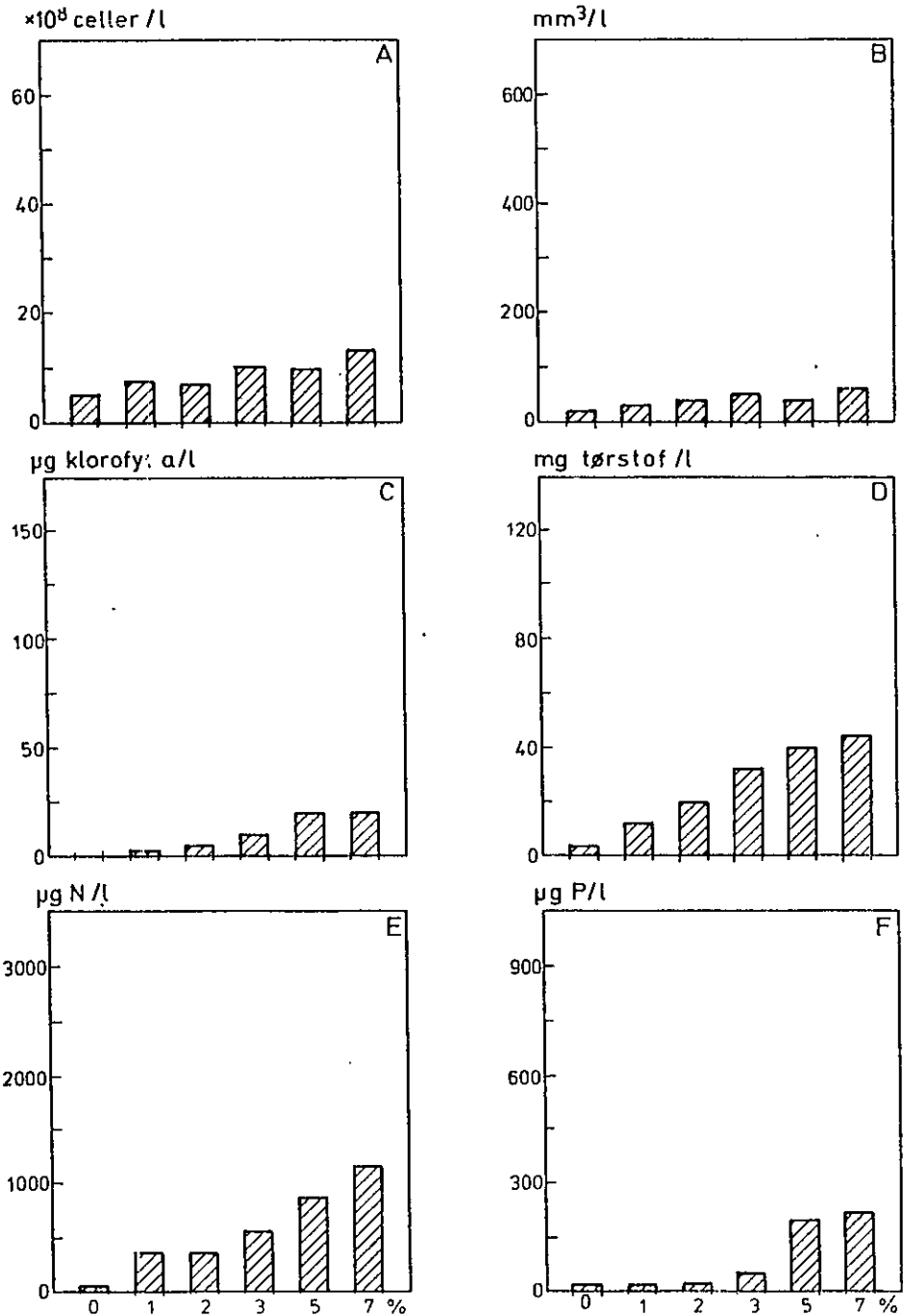
Figur 4.7 Effekten af tilsætning af stigende mængder mekanisk renset spildevand på den maksimale producerede biomasse (X_{\max}) af *Selenastrum capricornutum*.

A: celleantal/l, B: cellevolumen/l, C: klorofyl-a/l, D: tørstof/l, E: partikulært kvælstof/l, F: partikulært fosfor/l. Forsøgsperiode: 13.7. - 25.7.1974.

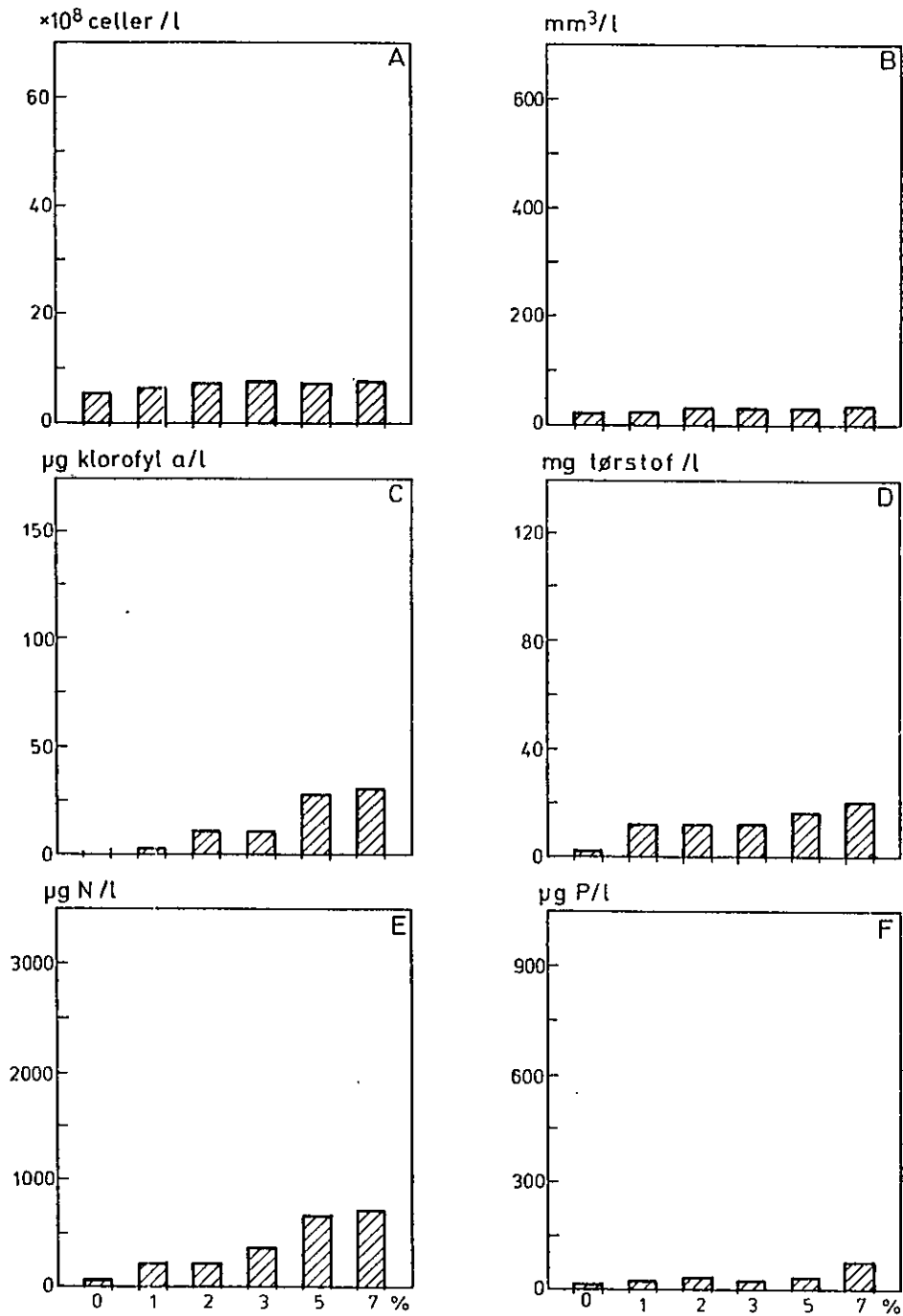


Figur 4.8 Effekten af tilsætning af stigende mængder biologisk- kemisk rensset spildevand på den maximale producerede biomasse (X_{max}) af *Selenastrum capricornutum*.

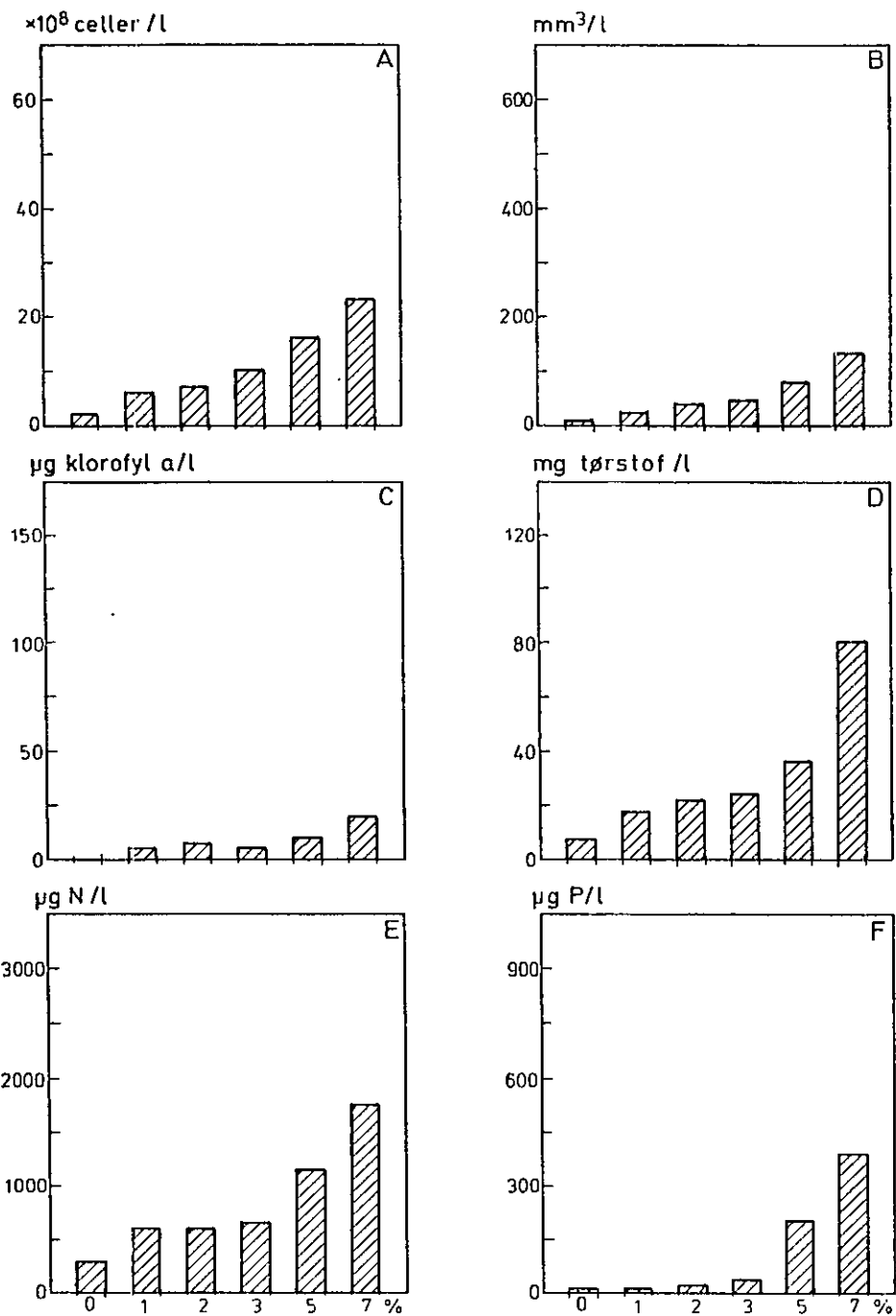
A: celleantal/l, B: cellevolumen/l, C: klorofyl-a/l,
D: tørstof/l, E: partikulært kvælstof/l, F: partikulært fosfor/l.
Forsøgsperiode: 13.7. - 25.7.1974.



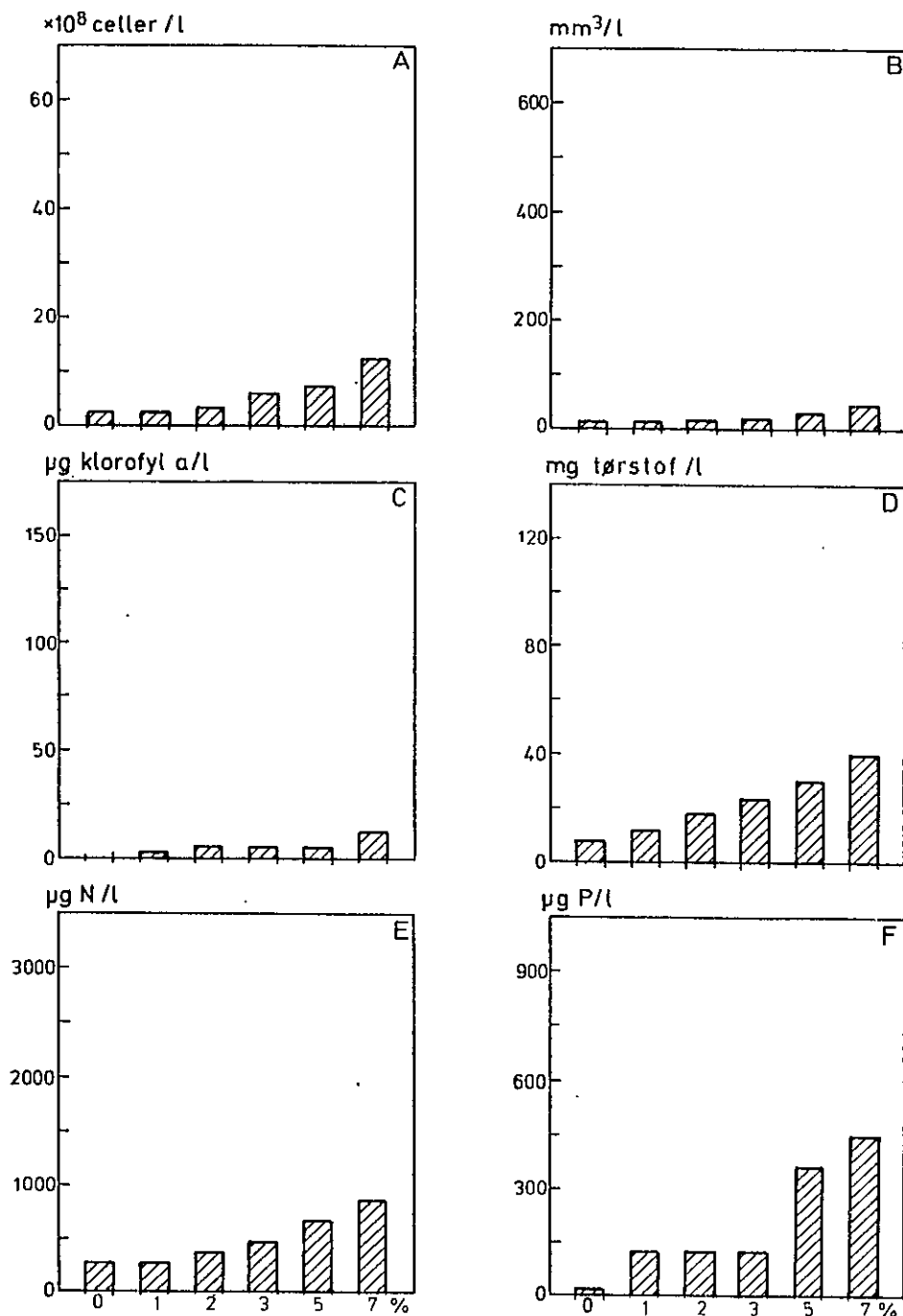
Figur 4.9 Effekten af tilsætning af stigende mængder mekanisk renset spildevand på den maximale producerede biomasse (X_{\max}) af *Selenastrum capricornutum*.
A: celleantal/l, B: cellevolumen/l, C: klorofyl-a/l, D: tørstof/l, E: partikulært kvælstof/l, F: partikulært fosfor/l. Forsøgsperiode: 1.8. - 13.8.1974.



Figur 4.10 Effekten af tilsætning af stigende mængder biologisk-ke-
a-f misk rensed spildevand på den maximale producerede bio-
masse (X_{\max}) af *Selenastrum capricornutum*.
A: celleantal/l, B: cellevolumen/l, C: klorofyl-a/l,
D: tørstof/l, E: partikulært kvælstof/l, F: partikulært
fosfor/l. Forsøgsperiode: 1.8. - 13.8.1974.



Figur 4.11 Effekten af tilsætning af stigende mængder mekanisk renset spildevand på den maximale producerede biomasse (X_{\max}) af *Selenastrum capricornutum*.
a-f A: celleantal/l, B: cellevolumen/l, C: klorofyl-a/l, D: tørstof/l, E: partikulært kvælstof/l, F: partikulært fosfor/l. Forsøgsperiode: 15.9. - 29.9.1974.



Figur 4.12 Effekten af tilsætning af stigende mængder biologisk-ke-
misk rensed spildevand på den maximale producerede bio-
masse (X_{max}) af *Selenastrum capricornutum*.

A: celleantal/l, B: cellevolumen/l, C: klorofyl-a/l,
D: tørstof/l, E: partikulært kvælstof/l, F: partikulært
fosfor/l. Forsøgsperiode: 15.9. - 29.9.1974.

Spildevandstilsætning i %	Maksimal specifik væksthastighed $\mu_{max} \cdot \text{dag}^{-1}$			
	Mekanisk rensning		Biologisk-kemisk rensning	
	Volumen	Celleantal	Volumen	Celleantal
0	0.35	0.26	0.35	0.26
1.5	0.82	0.60	0.36	0.29
3.0	1.02	0.99	0.44	0.28
6.0	1.01	0.79	0.45	0.30
9.0	1.46	1.13	0.68	0.56
12.0	1.02	1.11	0.79	0.59

Spildevandstilsætning i %	Maksimal udbyttekoefficient $Y_{max} \left(\frac{\text{mg tørstof}}{\text{mg}} \right)$			
	Mekanisk rensning		Biologisk-kemisk rensning	
	N	P	N	P
IKKE BESTEMT				

Tabel 4.1 Effekten af tilsætning af stigende mængder mekanisk- og biologisk-kemisk rensset spildevand på μ_{max} og Y_{max} . Forsøgsperiode: 13/6 - 25/6 1974

Spildevandstilsætning i %	Maksimal specifik væksthastighed $\mu_{max} \cdot \text{dag}^{-1}$			
	Mekanisk rensning		Biologisk-kemisk rensning	
	Volumen	Celleantal	Volumen	Celleantal
0	0.15	0.22	0.15	0.22
1.5	0.14	0.24	0.35	0.27
3.0	0.38	0.28	0.36	0.30
6.0	0.37	0.72	0.42	0.49
9.0	0.46	1.04	0.64	0.72
12.0	0.41	0.88	0.67	0.61

Spildevandstilsætning i %	Maksimal udbyttekoefficient $Y_{max} \left(\frac{\text{mg tørstof}}{\text{mg}} \right)$			
	Mekanisk rensning		Biologisk-kemisk rensning	
	N	P	N	P
0	95	100	95	500
1.5	73	259	51	667
3.0	49	196	104	1156
6.0	60	185	51	880
9.0	77	185	67	1220
12.0	59	174	43	1067

Tabel 4.2 Effekten af tilsætning af stigende mængder mekanisk- og biologisk-kemisk rensset spildevand på μ_{max} og Y_{max} . Forsøgsperiode: 13/7 - 25/7 1974

Spildevandstilsætning i %	Maksimal specifik væksthastighed $\mu_{max} \cdot \text{dag}^{-1}$			
	Mekanisk rensning		Biologisk-kemisk rensning	
	Volumen	Celleantal	Volumen	Celleantal
0	0.15	1.18	0.15	1.18
1.0	0.24	0.76	0.18	0.89
2.0	0.13	0.69	0.10	0.66
3.0	0.44	0.59	0.36	0.72
5.0	0.41	0.78	0.36	0.73
7.0	0.54	0.77	0.30	0.61

Spildevandstilsætning i %	Maksimal udbyttekoefficient $Y_{max} \left(\frac{\text{mg tørstof}}{\text{mg}} \right)$			
	Mekanisk rensning		Biologisk-kemisk rensning	
	N	P	N	P
0	100	500	100	500
1.0	39	1350	85	850
2.0	51	1900	95	633
3.0	59	650	57	1000
5.0	57	350	32	700
7.0	38	311	33	329

Tabel 4.3 Effekten af tilsætning af stigende mængder mekanisk- og biologisk-kemisk rensset spildevand på μ_{max} og Y_{max} . Forsøgsperiode: 1/8 - 13/8 1974

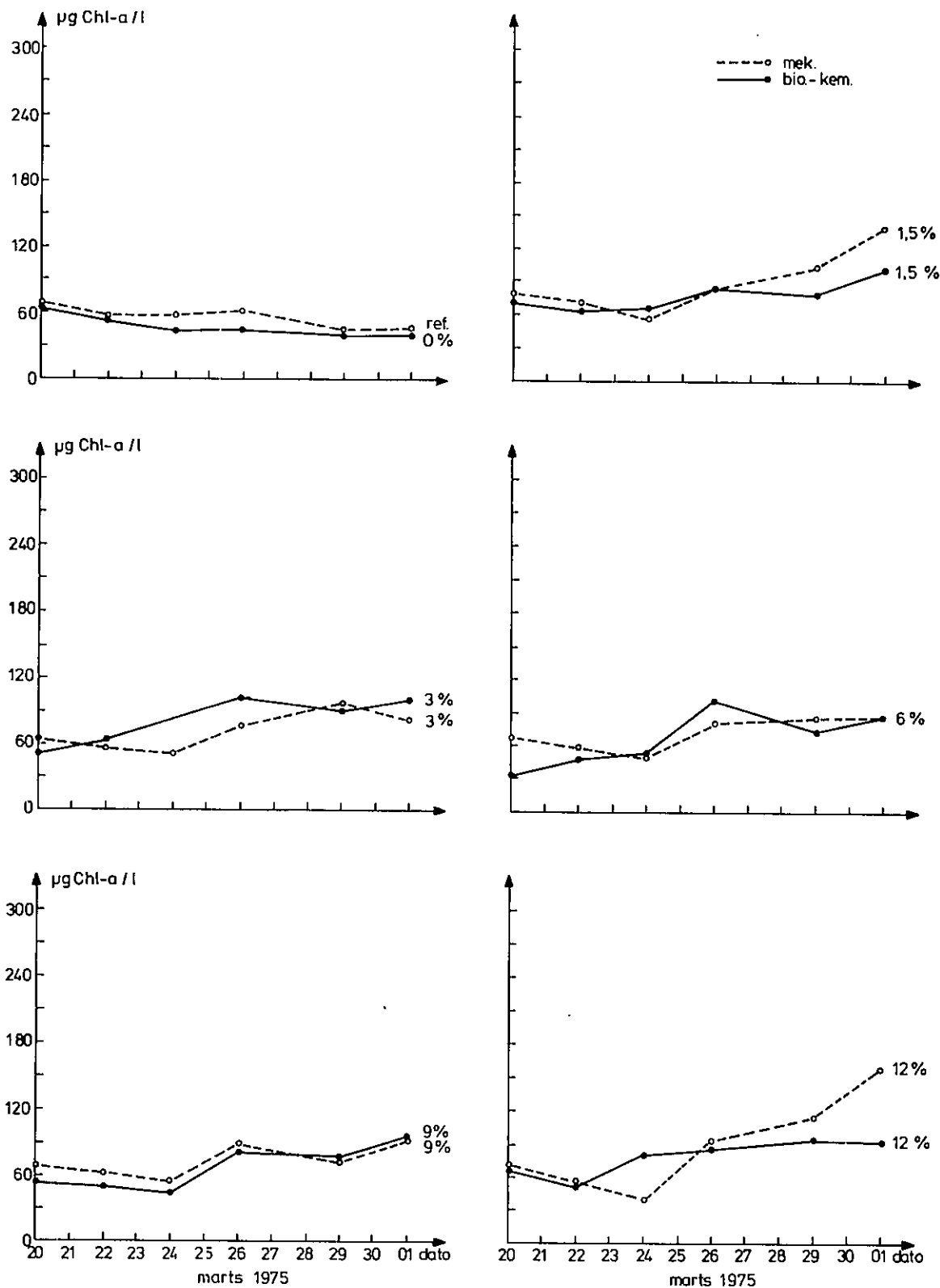
Spildevandstilsætning i %	Maksimal specifik væksthastighed $\mu_{max} \cdot \text{dag}^{-1}$			
	Mekanisk rensning		Biologisk-kemisk rensning	
	Volumen	Celleantal	Volumen	Celleantal
0	0.13	0.19	0.13	0.19
1.0	0.17	0.22	0.15	0.53
2.0	0.26	0.17	0.19	0.53
3.0	0.28	0.27	0.23	0.64
5.0	0.48	0.46	0.30	0.42
7.0	0.48	0.50	0.70	0.69

Spildevandstilsætning i %	Maksimal udbyttekoefficient $Y_{max} \left(\frac{\text{mg tørstof}}{\text{mg}} \right)$			
	Mekanisk rensning		Biologisk-kemisk rensning	
	N	P	N	P
0	40	667	40	667
1.0	32	1900	52	108
2.0	43	1300	49	142
3.0	40	650	51	192
5.0	31	180	45	81
7.0	46	210	46	87

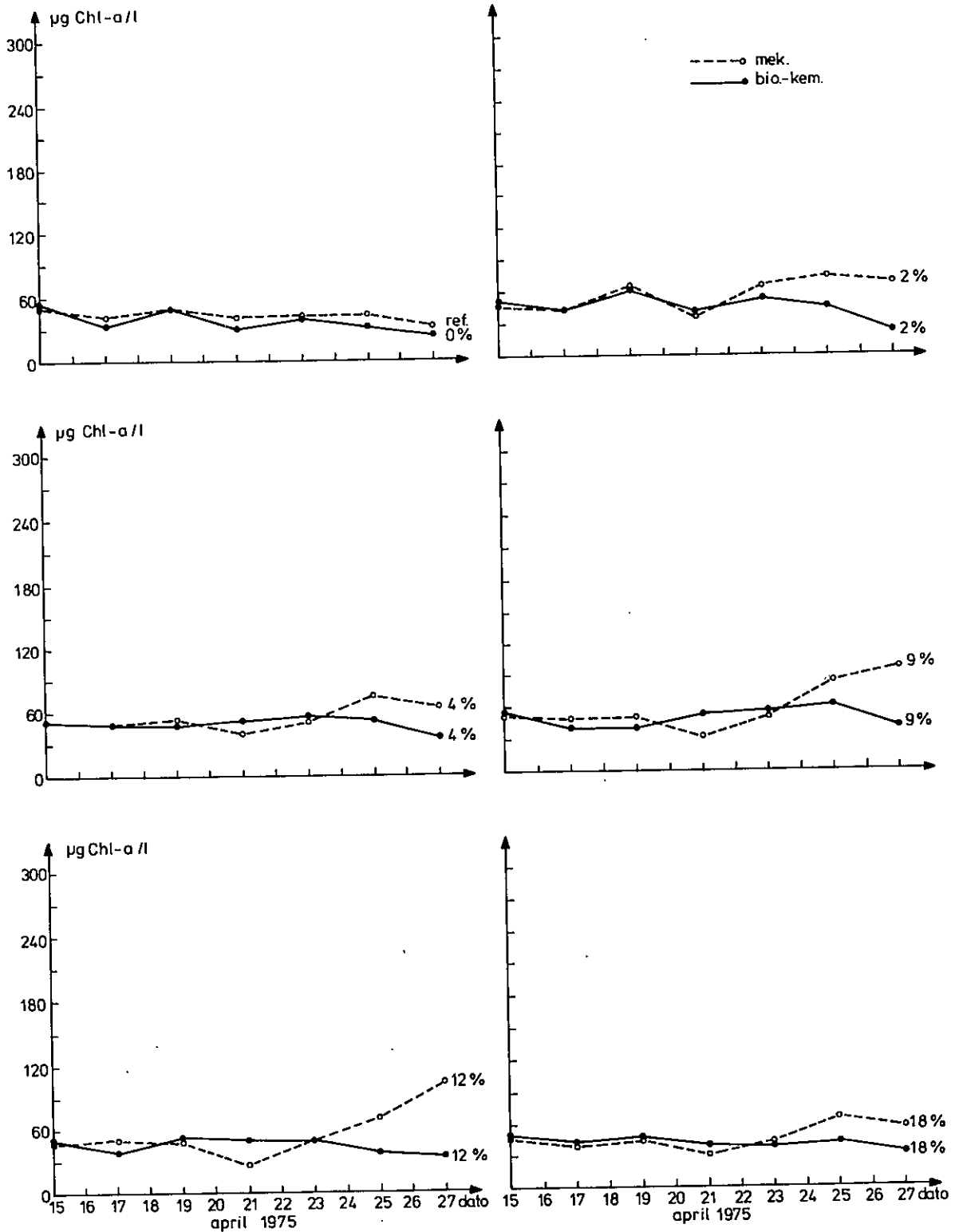
Tabel 4.4 Effekten af tilsætning af stigende mængder mekanisk- og biologisk-kemisk rensset spildevand på μ_{max} og Y_{max} . Forsøgsperiode: 15/9 - 29/9 1974

4.2 FELTFORSØG

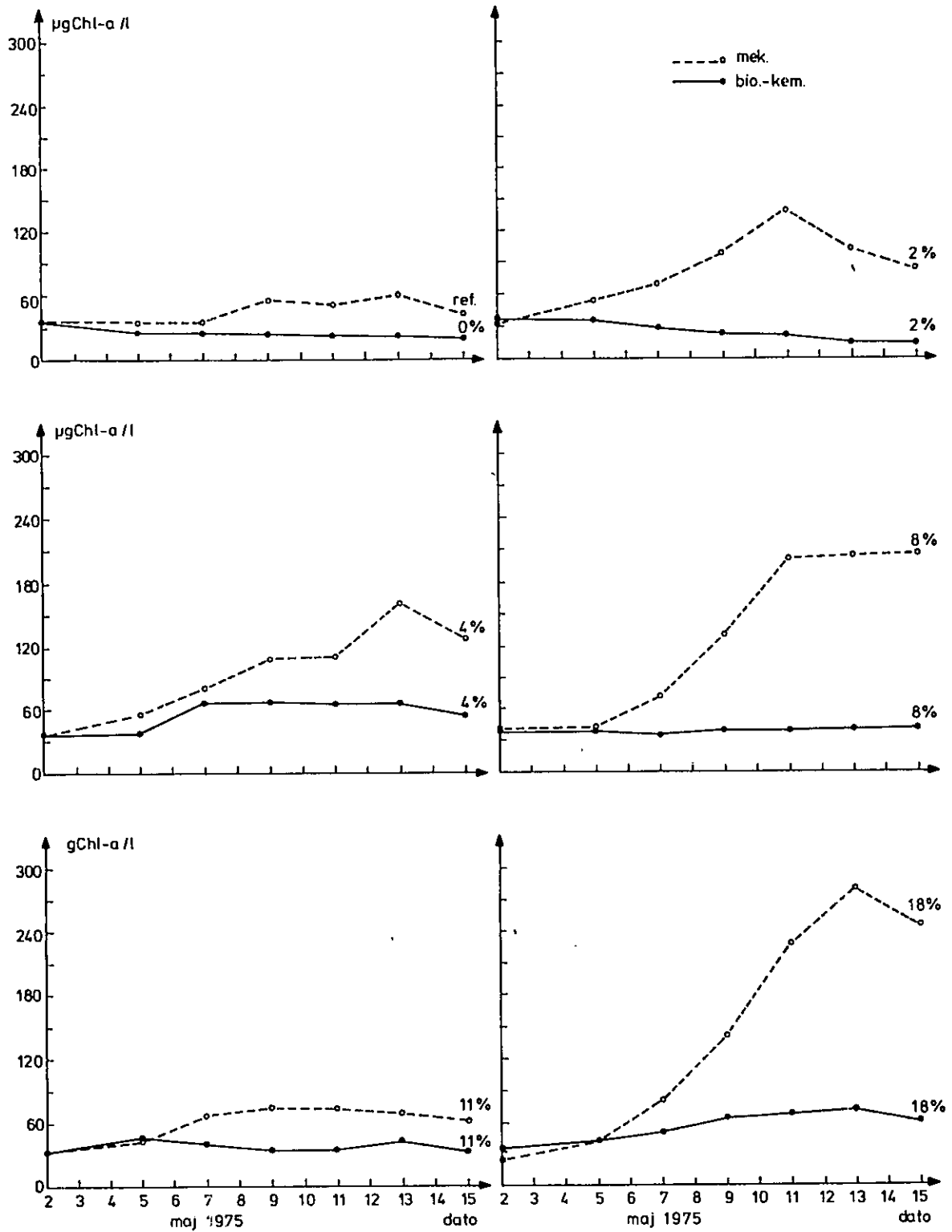
På figurerne 4.13 a-f - 4.15 a-f er der afbildet ændringen i algebiomassen fra tilsætningen af spildevandet, indtil der skønsmæssigt er etableret en ny dynamisk ligevægt mellem produktionen af ny algebiomasse og konsumeringen af algebiomassen (af zooplanktonet i sækkene).



Figur 4.13 a-f Effekten af tilsætning af stigende mængder henholdsvis mekanisk- og biologisk-kemisk rensset spildevand på indstillingen af en ny dynamisk ligevægt af algeproduktion og algekonsumering.



Figur 4.14 a-f Effekten af tilsætning af stigende mængder henholdsvis mekanisk- og biologisk-kemisk rensset spildevand på indstillingen af en ny dynamisk ligevægt af algeproduktion og algekonsumering.



Figur 4.15 a-f Effekten af tilsætning af stigende mængder henholdsvis mekanisk- og biologisk-kemisk rensset spildevand på indstillingen af en ny dynamisk ligevægt af algeproduktion og algekonsumering.

5. DISKUSSION OG KONKLUSION

Resultaterne af laboratoriebatchforsøgene, som de er udført her, kan ikke umiddelbart overføres til naturlige økosystemer. Ved vækstforsøgene er alt partikulært materiale filtreret bort. Det vil sige, at den mængde organisk stof, der kan produceres ud fra de næringssalte, der findes i filtratet, i naturen udgør en potentiel uudnyttet næringssaltreserve. Det er i sig selv vigtigt at have kendskab til størrelsen af denne potentielle næringssaltreserve. Ved at udføre vækstforsøgene på det ubelastede filtrerede forsøgsvand og derefter på det filtrerede forsøgsvand med varierende spildevandsbelastninger er det muligt at beregne den relative effekt, en sådan spildevandsbelastning ville have på recipienten.

Af figurerne 4.1 a-f - 4.4 a-f fremgår det, at bortset fra visse uregelmæssige vækstforløb så øges med stigende spildevandstilsætning både μ_{\max} og X_{\max} , og at denne øgning er størst for belastning med mekanisk rensed spildevand og mindst for belastning med biologisk-kemisk rensed spildevand.

På figurerne 4.5 a-f - 4.12 a-f er afbildet X_{\max} udtrykt ved 6 forskellige parametre. Som det fremgår af disse figurer, varierer X_{\max} noget uregelmæssigt mellem de fire forsøgsserier. Af tabellerne 4.1 - 4.4 ses det, at dette også er tilfældet for Y_{\max} . I de samme tabeller er angivet talværdierne for μ_{\max} .

Sammenlignet med resultaterne fra tidligere forsøg udført med samme næringssaltbelastning (men ikke som spildevand) er μ_{\max} -værdierne gennemgående unaturligt lave. Disse uregelmæssigheder skyldes

formentlig en interaktion af testalgens forskellige respons på spildevandstilsætningen:

- 1) en positiv respons på næringssaltene
- 2) en negativ respons på eventuelle toksiske stoffer.

Konklusionen på laboratoriealgevækstforsøgene bliver derfor, at en spildevandsbelastning af det filtrerede recipientvand fra Brassø bevirker en forøgelse af den potentielle algevæksteffektivitet og den potentielle algebiomasseproduktion. Denne forøgelse er stigende med stigende spildevandsbelastning og er størst for belastning med mekanisk rensset spildevand.

Som et gennemsnit for de fire forsøgsserier vil en belastning af henholdsvis 1 %, 5 % og 10 % spildevand have følgende effekt, (resultaterne af beregningerne for 10 % spildevandsbelastningen er i de tilfælde, hvor 7 % belastningen har udgjort den største belastning, fundet ved ekstrapolation):

	Tilsætning af mekanisk rensset spildevand			Tilsætning af biologisk-kemisk rensset spildevand		
	1 %	5 %	10 %	1 %	5 %	10 %
Forøgelse i produceret tørstof (X_{max})	28 mg/l (65 %)	40 mg/l (330 %)	73 mg/l (510 %)	10 100 %	28 mg/l (260 %)	50 mg/l (390 %)
Forøgelse i μ_{max} (cellevol.)	0,14/d (100 %)	0,42/dag (295 %)	0,73/dag (380 %)	0,09/d 70 %	0,18/dag (195 %)	0,39/dag (390 %)

Tabel 5.1 Ændringer i vækst-parametre ved laboratorieforsøg.

FELTFORSØG

I modsætning til laboratorieforsøgene er det ved feltforsøgene ikke muligt at bestemme effekten af spildevandsbelastningen på den naturlige algepopulations vækstparametre. Ved tilsætning af spildevand (næringsssalte) produceres der flere planktonalger (ikke nødvendigvis fordi væksthastigheden forøges). Når der er flere planktonalger til stede, vil predationen på disse af zooplanktonet (konsumeringen af dem) forøges. Efter nogle dage er der imidlertid indstillet en ny dynamisk ligevægt mellem forøget produktion og forøget konsumering. Det er resultatet af denne nye ligevægtsindstilling, der bestemmes ved feltforsøgene. Det vil sige, at med de usikkerheder, der altid vil være forbundet med biologiske forsøg, viser feltforsøgene direkte, hvilken effekt udledningen af spildevand i varierende koncentrationer og rensningsgrad vil have på algeproduktionen i Silkeborg Langsø.

I tabel 5.2 er der vist, hvilken effekt belastningen af henholdsvis 1 %, 5 % og 10 % spildevand vil have på indstillingen af en ny dynamisk ligevægt (forøget algeproduktion) i Silkeborg Langsø. Beregningerne er foretaget som et gennemsnit af de tre forsøgsserier. Niveauerne for ligevægtsindstillingen ved forsøget med 11 % belastning i maj måned ser ved sammenligning med de øvrige forsøg i samme forsøgsserie ud til at være for lav. Beregningen af effekten af de 10 % belastning er derfor for maj måned foretaget ved interpolation af resultaterne af 8 % og 18 % belastningsforsøgene.

	Tilsætning af mekanisk rensed spildevand			Tilsætning af biologisk-kemisk rensed spildevand		
	1 %	5 %	10 %	1 %	5 %	10 %
Forøgelse i algebio- masse (klorofyl-a) ved indstilling af en ny dynamisk lige- vægt	47 µg/l (140 %)	73 µg/l (220 %)	120 µg/l (365 %)	20 µg/l (60 %)	33 µg/l (100 %)	40 µg/l (120 %)

Tabel 5.2 Effekten af tilsætning af spildevand på ændringen af klorofyl-a indholdet i vandmassen.

Sigtedybden i en sø er omvendt proportional med indholdet af planktonalger (klorofyl-a). Dette er ikke ens for alle søer. Andre partikulære stoffer end alger samt opløste stoffer dæmper også lysets nedtrængen i vandet.

I Gudenåundersøgelsen, Søer / 4 /, er forholdet mellem klorofyl-a indholdet og sigtedybden i Gudenåsystemets søer diskuteret. Der er her foretaget regressionsanalyser over klorofyl-a indholdet og sigtedybden. På basis af disse regressionsanalyser er det muligt at omsætte tilvæksten i klorofyl-a indholdet fra algevækstforsøgene (tabel 5.2) til sandsynlige ændringer i sigtedybden, se tabel 5.3.

	Tilsætning af mekanisk rensed spildevand			Tilsætning af biologisk-kemisk rensed spildevand		
	0 %	5 %	10 %	0 %	5 %	10 %
Beregnet sigtedybde (m) ved indstilling af en ny dynamisk ligevægt	a) 1,25 b) 0,95	0,75 0,70	0,60 0,60	1,25 0,95	1,00 0,85	0,95 0,85

Tabel 5.3 Effekten af tilsætning af spildevand på ændring af sigtedybden.

a) "Brassø-korrelation", b) Silkeborg Langsø-korrelation".

Som det fremgår af tabel 5.3, er de beregnede ændringer i sigtedybden baseret på forskelligt grundlag, a) og b).

Sigtedybdeværdierne er beregnet ud fra regressionsanalyserne af klorofyl-a/sigtedybde for naturligt søvand fra henholdsvis Brassø (a) og Silkeborg Langsø (b), jvf. /4/. Som et gennemsnit for perioden marts til maj 1975 (perioden i hvilken der er foretaget algevækstforsøg i felten) var klorofyl-a indholdet i Silkeborg Langsø 73 µg/l og sigtedybden 0,80 m.

Det fremgår af tabel 5.3 række b), at tilsætningen af 0 % mekanisk rensset spildevand (på volumenbasis) i gennemsnit for sommermånederne medfører, at sigtedybden i Silkeborg Langsø bliver ca. 0,95 m. En spildevandstilsætning på 5 % (på volumenbasis) bevirker en sigtedybde på 0,70 m. I afsnit 3.2 blev det beregnet, af forøgelsen af P-koncentrationen af vandet fra Brassø som følge af den nuværende udledning fra Søholt rensningsanlæg var ca. 60 %, svarende til en aktuel belastning på ca. 0,1 mg P/l. Med de P-koncentrationer, som spildevandet fra Søholt rensningsanlæg har, samt det volumen af Silkeborg Langsø, i hvilken spildevandet opblandes, blev det beregnet, at spildevandsbelastningen på volumenbasis af Silkeborg Langsø var ca. 1 %.

Ved interpolation af de beregnede sigtedybder ved henholdsvis 0 % og 5 % belastning med mekanisk rensset spildevand fra tabel 5.3 fås, at 1 % belastning medfører en sigtedybde på ca. 0,88 m. Tilsvarende beregninger for belastning af henholdsvis 0 % og 5 % biologisk-kemisk rensset spildevand giver med en 1 % belastning en sigtedybde på ca. 0,93 m, dette svarer til en forbedring i sigtedybden på ca. 5 %.

Benyttes korrelationsværdierne gældende for Brassø (række a)), og interpoleres exponentielt, vil 1 % belastning, mekanisk rensning, medføre en sigtedybde på 1,13 m, og 1 % belastning, mekanisk-kemisk rensning, giver en sigtedybde på 1,18 m, dette svarer til en sigtedybdeforbedring på ca. 5 %.

Det kan derfor konkluderes, at en videregående rensning på Søholt rensningsanlæg fra mekanisk rensning til kemisk rensning med op til 90 % P-reduktion kun vil medføre en marginal forøgelse af sigtedybden. Årsagen til dette er, at P-belastningen til Silkeborg Langsø fra Brassø og Ørnsø udgør ca. 55 % af den samlede P-belastning til Silkeborg Langsø.

Selv uden P-bidrag fra Søholt rensningsanlæg ville P-indholdet i Silkeborg Langsø være højt. Algevæksten er som af mange andre faktorer også en funktion af P-indholdet. Dette forhold er dog koncentrationsbetinget. Ved meget lave koncentrationer af P (0 - 50 µg P/l) vil mindre ændringer i P-indholdet signifikant ændre produktionen af alger. Ved høje koncentrationer, som de nuværende koncentrationer i Brassø og Silkeborg Langsø (ca. 130 µg P/l og ca. 220 µg P/l), vil selv større ændringer i P-indholdet ikke medføre væsentlige ændringer i algevæksten og dermed sigtedybden.

En forbedring af vandkvaliteten og dermed en signifikant forøgelse af sigtedybden i Silkeborg Langsø vil således kræve en væsentlig reduktion af fosforbelastningen fra samtlige stofkilder til søen.

6. REFERENCER

- /1/ Forsberg, C.
Algal Growth Potential Test Improves Sewage
Effluent Control. *Ambio* 1: 26 - 29. 1972.
- /2/ Gargas, E. and Pedersen J.S.
Algal Assay Procedure Batch Technique,
Used at the Water Quality Institute,
VKI forskningsrapport, p. 48. 1974.
- /3/ Gudenåudvalget 1976
Gudenåundersøgelsen 1973 - 75
Spildevandsundersøgelser
VKI
- /4/ Gudenåudvalget 1976
Gudenåundersøgelsen 1973 - 75
Søundersøgelser
VKI
- /5/ Hughes, E. O., Gorham, P.R., and Zehnder, A.
Toxicity of an Unialgal Culture of Micro-
cystis aeruginosa. *Can. Jour. Microbiol.*
4: 225. 1958.
- /6/ "Provisional Algal Assay Procedure".
Jount Industry Government Task Force on
Eutrophication, New York, N.Y. 1969.
- /7/ Porcella, D.B., Grau, P., Huang, C.H.,
Radimsky, J., Toerien, D.F., and Pearson, E.A.
Provisional Algal Assay Procedure (First
Annual Report, Sanitary Engineering Research
Laboratory, University of California, Berkely).
1970.

- /8/ Skulberg, O.M.
Algal Cultures as Asses the Fertilizing
Influence of Pollution. In advances in
Water Pollution Research. Proc. 3rd Intl.
Conf. Water Poll. Res., Water Poll. Control
Fed., Washington, D.C., 1: 113. 1966.
- /9/ Toerien, D.F., Huang, C.H., Radimsky, J.,
Pearson, E.A., and Scherfig, J.
Final Report, Provisional Algal Assay Pro-
cedure for the Water Quality Office En-
vironmental Protection Agency, Project
No. 16010 DQB, ESRL Report No. 71 - 6.
1971.
- /10/ Gargas, E. et al.
Algal Assay Procedure, Batch Technique.
Vandkvalitetsinstituttet, ATV, 1974.