
RAPPORT NR. 16



GUDENÅUNDERSØGELSEN
Sømodeller

G U D E N A U N D E R S Ø G E L S E N

1973 - 1975

SØMODELLER

VANDKVALITETSINSTITUTTET, ATV
Agern Allé 11, 2970 Hørsholm

Sagsnr.: 25.4.052
1977-04-12 - WWT-WF-LR

Sagsbehandlere:

civ.ing., lic.techn.
Niels Nyholm
civ.ing. Poul B. Heise

INDHOLDSFORTEGNELSE

	SIDE
0. RESUME	1
1. INDLEDNING	4
2. SØMODEL	5
2.1 GENEREL BESKRIVELSE	5
2.2 ANVENDELSE PÅ GUDENÅSYSTEMETS SØER	11
3. MODELBEREGNINGER PÅ UDVALGTE SØER	18
3.1 SALTEN LANGSØ	19
3.2 BRASSØ	26
3.3 ØRNSØ	32
3.4 SILKEBORG LANGSØ	37
3.5 TANGE SØ	
4. KONKLUSIONER	64
5. USIKKERHED PÅ MODELBESKRIVELSE OG PROGNOSE	65
6. REFERENCER	67

APPENDIX : INDHOLD
 SYMBOLLISTE
 PARAMETERVÆRDIEN

0. RESUME

I forbindelse med Gudenåundersøgelsen er opstillet en matematisk simuleringssmodel, LAVSOE, som beskriver algevækst samt fosfor- og kvælstofomsætning i lavvandede, eutrofe søer. I nærværende rapport gøres kortfattet rede for modellens principielle opbygning, og anvendelsen af modellen til simulering af eutrofieringsforholdene i følgende søer i Gudenåsystemet beskrives:

Salten langsø

Brassø

Ørnsø

Silkeborg langsø (3 bassiner)

Tange sø (2 bassiner).

Modellen er benyttet både til at belyse søernes aktuelle tilstand samt til udarbejdelse af prognoser for fremtidige tilstande, svarende til ændrede belastningsforhold.

Om beregningsresultaterne for de enkelte søer kan sammenfattes følgende:

SALTEN LANGSØ

Ved den aktuelle belastning er både fosfor og kvælstof begrænsende for algevæksten, og det synes muligt at opnå en væsentligt forbedret vandkvalitet gennem en reduktion af fosfor og/eller kvælstofbelastningen. En øget nærings saltbelastning forudsiges at resultere i en ret begrænset forværring af søens tilstand.

BRASSØ

I Brassø er både fosfor og kvælstof begrænsende for algevæksten. Det synes ikke muligt at opnå store forbedringer af søens vandkvalitet. Ved en reduceret fosforbelastning kan primærproduktionen reduceres noget, men den forudsagte sigtedybdeforøgelse er

relativt begrænset. Søens tilstand vil ikke blive væsentligt forringet ved en øget nærings saltbelastning.

ØRNSØ

Ved den aktuelle belastning er fosfor begrænsende for algevæksten og kvælstof kun i en meget kort periode. Søens tilstand synes ikke at blive væsentligt forværret ved en øget næringsstoffertilførsel. Ved en reduceret fosfortilførsel er det muligt at forbedre vandkvaliteten mærkbart.

SILKEBORG LANGSØ

I den vestlige del af søen er både fosfor og kvælstof begrænsende og vurderes at spille en omtrent sideordnet rolle. Det synes muligt at opnå en betydelig forbedring af forholdene ved en væsentlig reduceret næringsstoffertilførsel. Ved en vidtgående fosforfjernelse vil kun fosfor være begrænsende og en reduktion af kvælstoftilførslen derfor uden effekt. Ved en mindre vidtgående fosforreduktion vil det derimod være af betydning også at fjerne kvælstof. En øget belastning forudsiges at medføre en vis, men dog begrænset forringelse af vandkvaliteten.

Den østlige del af søen gennemstrømmes af Gudenåen, som medfører meget store næringsstoffmængder. Et væsentligt fosforbidrag er dog også spildevandet, som udledes fra Søholt rensningsanlæg. Under de aktuelle belastningsforhold er fosfor og kvælstof begrænsende i korte perioder. Det synes kun muligt at opnå en væsentlig forbedring af vandkvaliteten i denne del af Silkeborg langsø, hvis næringsstoffertilførslen fra Gudenåen reduceres betydeligt. Det vil formentlig kun have begrænset effekt at fjerne fosfor ved Søholt rensningsanlæg.

TANGE SØ

Under de aktuelle belastningsforhold er både fosfor og kvælstof begrænsende for algevæksten. I den sydlige del af søen er fosfor imidlertid dominerende som begrænsende faktor. Det synes

muligt ved en vidtgående reduktion af fosfortilførslerne at opnå en væsentlig forbedret vandkvalitet i søen. Effekten forudsiges at være størst i søens nordlige del. En forøget nærings-salttilførsel vil tilsyneladende kun have begrænset virkning i det sydlige søbassin, hvorimod forholdene forudsiges mærkbart forværret i det nordlige.

Det konkluderes sammenfattende, at både fosfor og kvælstof synes at være begrænsende for algevæksten i størstedelen af de betragtede søer, idet fosfor dog må betegnes som det dominerende begrænsende næringsstof. Af denne årsag, og fordi en langt større del af fosfortilførslerne end af kvælstoftilførslerne er kontrollerbare, må det anbefales at koncentrere en eventuel fremtidig rensningsteknisk indsats om fosforfjernelse. Modelberegningerne viser dog, at der i de fleste tilfælde skal ske ret vidtgående reduktioner af fosfortilførslerne, før virkeligt signifikante forbedringer opnås.

1. INDLEDNING

Til brug for vurderingen af eutrofieringsforholdene i en række af Gudenåsystemets lavvandede søer er opstillet en matematisk simuleringsmodel "LAVSOE", som beskriver algevækst samt omsætning af fosfor og kvælstof under en årscyklus. Modellen er anvendt til kvantitativt at beskrive de aktuelle forhold og derefter til at udarbejde prognoser for eutrofieringsforholdene i en fremtidig ligevægtstilstand, svarende til en række alternative belastningssituationer.

Modelberegninger er foretaget for følgende søer i Gudenåsystemet:

Mossø (3 bassiner)

Salten Langsø

Brassø

Ørnsø

Silkeborg Langsø (3 bassiner)

Tange sø (2 bassiner).

Til brug for beregningerne i forbindelse med Mossø er opstillet en særskilt model "BOXSOE", som med hensyn til reaktionskinetisk beskrivelse er identisk med LAVSOE-modellen, men hvor søbassinet opdeles i flere totalt opblandede bokse, hvorimellem der kan ske en vandudveksling. I forbindelse med Ørnsø, Silkeborg Langsø samt Tange sø er LAVSOE-modellen ligeledes anvendt til at simulere flere søbassiner, som har forbindelse med hinanden. I disse tilfælde er beregningerne foretaget for et bassin ad gangen, idet de enkelte bassiner er betragtet som adskilte søer. Ved hjælp af BOXSOE-modellen kan flere bassiner behandles samtidigt, og der kan tages hensyn til en eventuel både frem- og tilbagegående vandtransport mellem bassinerne.

Beregningerne i forbindelse med Mossø er rapporteret særskilt og er altså ikke inkluderet i nærværende rapport.

2. SØMODEL

Den anvendte sømodel LAVSOE er en videreudvikling af en model, som tidligere er anvendt til modelbeskrivelse af syv fynske søer /1/. En udførlig dokumentation af modellen vil for midler bevilget af Teknologirådet blive udarbejdet i løbet af sommeren 1977. I nærværende rapport beskrives modellens principielle opbygning, men der går ikke i detaljer med hensyn til reaktionskinetik for de indgående processer. En generel omtale af modellen findes desuden i /2/. Specielt vedrørende den reaktionskinetiske beskrivelse af væksten af phytoplankton kan henvises til /3/ og /4/.

2.1 GENEREL BESKRIVELSE

Udgangspunktet for opstilling af en sømodel (eutrofieringsmodel) er en modelbeskrivelse af det fysiske system og derefter en definition af de tilstandsvariabler, modellen skal beskrive, samt de massestrømme, der knytter sig hertil.

LAVSOE-modellen simulerer algevækst og omsætning af kvælstof og fosfor under en årscyklus i en sø, som antages at have konstant dybde, og hvor vandmassen antages fuldt opblandet (back-mix flow).

Der betragtes en sø i ligevægt, og der kan prognosticeres om den nye ligevægtstilstand efter en ændring i næringsstofbelastning eller vandskifte. Modellen kan ikke beskrive det transiente forløb umiddelbart efter et indgreb, og for at estimere det tidsrum, der hengår før en ny ligevægt er etableret, må anlægges supplerende betragtninger. Årsagen til, at det ikke forsøges at simulere søens dynamiske udvikling på længere sigt, er, at den domineres af processer i sedimentet, som man har mangelfuldt kendskab til, og som det desuden volder problemer at tage hensyn til i en model, der simulerer søens korttidsdynamik (det vil sige variationerne igennem et enkelt år).

Figur 2.1 er et blokdiagram over massestrømmene i LAVSOE-modellen. Figuren illustrerer modellens tilstandsvariabler og relationerne mellem disse, samt desuden stoftransporterne til og fra systemet.

Modellens tilstandsvariabler er:

1. Algebiomasse
2. Alge-P
3. Alge-N
4. Opløst uorganisk P (ortofosfat)
5. Opløst uorganisk N
6. "Detritus-P"
7. "Detritus-N"

P og N i sedimentet optræder ikke som egentlige tilstandsvariabler, men der holdes ved massebalancen regnskab med udvekslingen af P og N mellem vand- og sedimentfase.

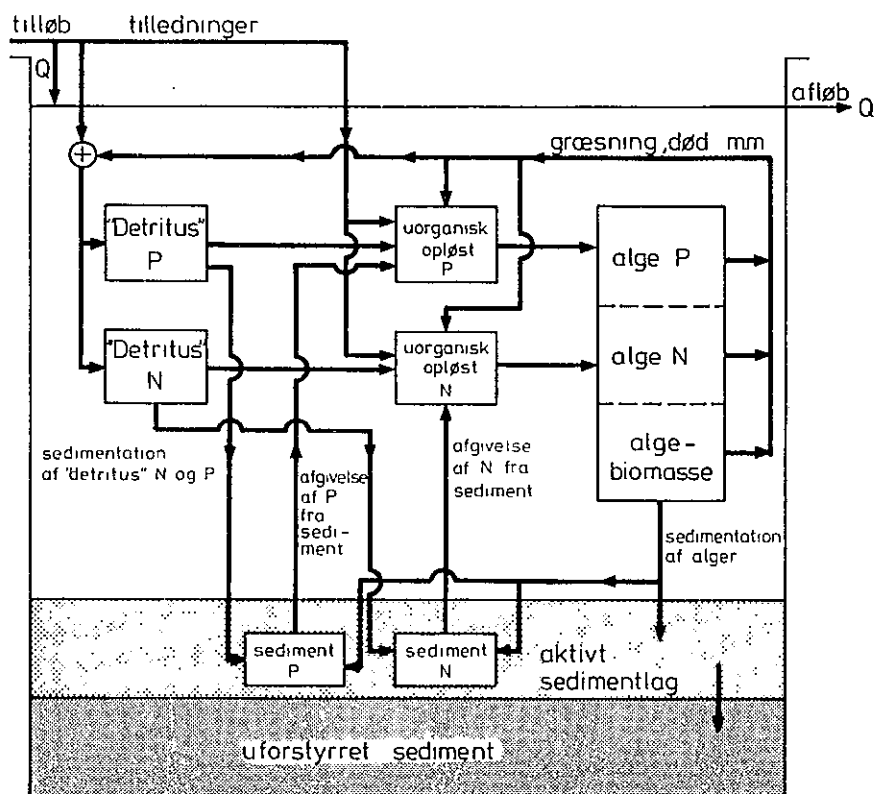
Der opereres med følgende processer:

1. Algevækst
2. Optagelse af N og P i algebiomasse
3. Decimering af alger (græsning m.m.)
4. Sedimentation af alger
5. Sedimentation af N og P i detritusfase
6. Mineralisering af N og P i detritusfase
7. Afgivelse af næringssalte fra sedimentfase til vandfase.

For flere af processerne, for eksempel algevækst, har man et ret indgående kendskab til både reaktionskinetik, støkiometri og værdiintervaller for reaktionskonstanterne (parametrene). I andre tilfælde er den eksisterende viden imidlertid mangelfuld, og som en første tilnærmelse antages her ofte simpel 1. ordens kinetik, og parameterverdierne fastsættes skønsmæssigt.

Reaktionskomplekset styres af en række udefra kommende påvirkninger (tvangsfunktioner), som ikke ændres gennem de interne processer i søen.

MODEL FOR LAVVANDET SØ
MASSESTRØMME



Figur 2.1 Blokdiagram for LAVSOE-modellen.
'(Stofafgang ikke vist).

Tvangsfunktionerne i LAVSOE-modellen er:

1. Lysindstråling
2. Temperatur
3. N- og P-tilledninger
4. Vandgennemstrømning

Hensigten med modellen er kun at beskrive grove, gennemsnitlige forløb for tilstandsvariablerne over tidsperioder af størrelsesordenen uger, og tvangsfunktionernes variation beskrives derfor kun som udjævnede gennemsnitsværdier på for eksempel månedsbasis, hvorimellem der interpoleres.

Selve modellen er en sammenstilling af differentielle massebalancer for systemet af tilstandsvariabler. En massebalance for tilstandsvariabel nr. i kan eksempelvis gengives således:

$$\frac{dC_i}{dt} = TIL_i + \sum_{j=1}^{j=n} r_{i,j} - D \cdot C_i$$

hvor C_i = koncentrationen af den pågældende komponent (g/m^3)

TIL_i = tilførselshastigheden pr. volumenenhed fra eksterne kilder ($g/m^3/dg$)

$\sum_{j=1}^{j=n} r_{i,j}$ = summen af reaktionshastighederne for interne processer, hvori komponent i indgår

D = den hydrauliske fortyndingshastighed, udtrykt som søens afløb pr. volumen og tidsenhed (hr^{-1}).

Modellen udgøres således af et sæt samhørende 1.ordens ordinære differentiaalligninger. Ligningssystemet er ulineært og desuden ret kompliceret, blandt andet fordi beskrivelsen af algevæksten er forholdsvis detaljeret. Differentiaalligningssystemet integreres numerisk på datamat.

Udover integration af differentiaalligningerne for de nævnte tilstandsvariabler integreres de mest betydende massestrømme (for eksempel primærproduktion og transport af næringsalte ud og ind af søen samt mellem sediment- og vandfase), og der opstilles en N- og P-balance. Regnemaskineprogrammet er skrevet i FORTRAN IV og implementeret på NEUCC's IBM 370/165 anlæg. Der er forholdsvis stor fleksibilitet med hensyn til in- og output, således at programmet kan anvendes på data for forskellige søer.

INPUT til programmet er:

1. Morfometriske data
2. Tabeller som gengiver årstidsvariationen af
 - a) temperatur
 - b) solindstråling
 - c) N- og P-tilledninger
 - d) vandgennemstrømning
3. Lysekstinktionsparametre

Ad 2 c) Der skelnes her mellem følgende bidrag:

1. Tilledninger som er konstante året igennem (spildevand)
2. Målte stoftransporter fra øvrige kilder
3. Estimerede bidrag fra diffuse kilder (blandt andet af-

strømningen fra søens direkte opland samt nedbørsbidraget).

Der lægges vægt på at beskrive næringstilførslernes årstidsvariation så nøjagtigt som muligt - tilførslen i sommermånederne vil således ofte have langt større betydning end tilførslen i den kolde årstid. Det bemærkes, at hensyntagen til tilførslernes årstidsvariation i forbindelse med vurdering af en søs eutrofiering i meget høj grad lettes ved anvendelse af en matematisk simuleringsmodel.

OUTPUT fra programmet er:

1. Tabeller og kurver over årsvariation af
 - a) primærproduktion
 - b) algebiomasse
 - c) sigtedybde
 - d) N- og P-koncentrationer (total-N og -P samt fraktionerne: 1) uorganisk, opløst N og P 2) "detritus"-N og -P 3) alge-N og -P
2. Massebalance for søen
3. Integrerede fluxe på årsbasis, for eksempel
 - a) total årlig primærproduktion
 - b) total sedimentation af N og P
 - c) total afgivelse af N og P fra sediment

KALIBRERING

Til nøjagtig fastlæggelse af visse parametre kræves sammenligning af modelberegningerne med målte værdier for primærproduktionen, algebiomasse - for eksempel målt som klorofyl-a - og næringssaltkoncentrationer. Det skal understreges, at der ikke er tale om simpel kurvefitning. Kalibreringen tjener til justering af modelberegningerne, og hvis massebalancen alene benyttes som datagrundlag, vil modellen i mange tilfælde med et sæt standardparametre kunne forudsige et tilnærmelsesvist korrekt niveau for primærproduktion og sigtedybde, hvis i øvrigt modellens forudsætninger blandt andet om total opblanding kan anses for opfyldte.

VURDERING

Det primære formål med udviklingen af "LAVSOE"-modellen har været at fremskaffe et værktøj, som kan benyttes i forbindelse med vurderinger af måledata for søundersøgelser, og som desuden kan benyttes til udarbejdelse af prognoser over effekterne af ændrede belastningsforhold. Mange andre sømodelprojekter er mere grundforskningsbetonede og lægger hovedvægten på anvendelse af matematisk simuleringsteknik som et middel til at opnå en bedre forståelse af sø-økosystemets funktion. "LAVSOE"-modellen er mere direkte orienteret med praktiske anvendelser. Modellen er derfor gjort forholdsvis simpel, og der er lagt særlig vægt på at opstille en massebalance for fosfor og kvælstof.

Med modelberegningerne i forbindelse med de udvalgte søer i Gudenåsystemet samt de tidligere omtalte 7 fynske søer er tilvejebragt et betydeligt erfaringsmateriale med hensyn til modellens evne til at simulere de aktuelle eutrofieringsforhold i lavvandede søer, og det har vist sig, at man i de fleste tilfælde opnår anvendelige resultater. Ved de nævnte simuleringer har kun et fåtal af modellens parametre måttet varieres fra sø til sø.

Med hensyn til vurdering af pålideligheden af de prognoser for fremtidige forhold som udarbejdes ved hjælp af modellen, har man imidlertid ingen sikre holdepunkter, idet prognoserne endnu ikke har kunnet kontrolleres. Det må desuden påregnes, at variationen i de klimatiske forhold i mange tilfælde kan influere mere på den vandkvalitet, som kan observeres i et enkelt år - end en ændring i tilførslen af næringsstoffer, og derfor kan de udarbejdede prognoser kun vurderes relativt indbyrdes samt i forhold til de beregninger, som simulerer de aktuelle forhold. Om pålideligheden kan i øvrigt siges, at den omstændighed, at man med modellen har kunnet simulere algevæksten i en lang række forskellige søer, tyder på, at man under forudsætning af, at der anlægges en relativ betragtningsform, kan have tillid til prognoserne.

2.2 ANVENDELSE PÅ GUDENÅSYSTEMETS SØER

I dette afsnit samt i appendix A 1 er beskrevet, hvorledes modellen er anvendt til at behandle datamaterialet fra Gudenåsystemets søer.

2.2.1 PARAMETERVÆRDIER

De i modellen indgående parametre er for størstedelens vedkommende tillagt en standardværdi, som er anvendt ved samtlige modelkørsler. Disse standardværdier er anført i tabel A 1.1. Enkelte parameterværdier varierer imidlertid fra sø til sø (tabel A 1.2). Det pågældende parametervalg kommenteres i forbindelse med omtalen af de enkelte søer.

2.2.2 TVANGSFUNKTIONER

LYSINDSTRÅLING

Der er benyttet månedlige middelværdier for den daglige indstråling (0 - 3000 nm) igennem perioden 1959 - 71. Målingerne er udført af Hydroteknisk Laboratorium, Den kongelige Veterinær- og Landbohøjskole, på klimastationen i Tåstrup og beskrevet i /5/.

Baggrunden for at benytte standardindstrålingsværdier og ikke de aktuelle indstrålinger i undersøgelsesåret er, at primærproduktionsmålingerne, som ligger til grund for modelkalibreringerne, er foretaget ved hjælp af inkubatormetoden /7, 8/ og primærproduktion beregnet svarende til den nævnte standardindstråling.

Undersøgelsesåret har endvidere ikke været atypisk med hensyn til solindstråling.

TEMPERATUR

Temperaturvariationerne er beskrevet ved hjælp af tabeller, som indeholder 11 målte værdier. Svarende til dag nr. 0 og dag nr. 365 er skønsmæssigt anvendt værdien 2°C .

N- OG P-TILLEDNINGER

Der er anvendt tabeller, bestående af 26 talsæt. Forholdet mellem total-P og uorganisk, opløst P respektive total-N og uorganisk, opløst N er ligeledes beskrevet ved hjælp af tabeller med 26 talsæt. Jf. rapporten over stoftransporter /6/.

VANDGENNEMSTRØMNING

Hvor det har været muligt, er benyttet vandmængder, målt i søernes afløb. Der er anvendt tabeller, bestående af 26 talsæt. Jf. /6/.

2.2.3 PRIMÆRPRODUKTION

I LAVSOE-modellen beregnes en nettotilvækst i algebiomasse, jf. /3/, som ved kalibreringen af modellen sammenlignes med primærproduktionsmålinger, som er udført i inkubator /7, 8/. Det antages således, at de ved inkubatorforsøgene bestemte primærproduktioner med tilnærmelse repræsenterer nettotilvæksten. Estimer for den målte årlige primærproduktion er beregnet ved trapezintegration, idet det er antaget, at primærproduktionen ved årets start og slutning er lig med nul. Ved beregning af primærproduktionen på grundlag af inkubatorforsøgene er anvendt gennemsnitlige lysstyrker for en 13 årig periode (se ovenfor).

I udtrykket for phytoplanktonets væksthastighed indgår en lysadaptationsparameter, I_K , som beregnes ud fra inkubatorforsøgene. Ved modelberegningerne benyttes en tabel over gennemsnitsværdier for I_K -parameteren for samtlige undersøgte søer i Gudenåsystemet (tabel A 1.3).

2.2.4 ALGEBIOMASSE

Ved kalibrering af modellen er beregnet algebiomasse, udtrykt som tørstof, sammenlignet med målinger af koncentrationen af klorofyl-a under antagelse af det konstante forhold

$$\varphi = 42$$

mellem algetørstof og klorofyl, jf. /3/.

Planktonalgers klorofylindhold kan imidlertid variere betydeligt, og klorofylmålingerne kan således kun benyttes som udtryk for størrelsesordenen af algebiomassen. Ved kalibreringen af modellen er derfor lagt mindre vægt på at opnå en god overensstemmelse mellem målte og beregnede værdier for klorofylkoncentrationer end for primærproduktioner.

2.2.5 LYSEKSTINKTIONSFORHOLD OG SIGTEDYBDE

I modellen antages en simpel eksponentiel dæmpning af lyset i området 400 - 700 nm (det fotosyntetisk aktive område), og der tages ikke hensyn til ændringer i spektralfordelingen.

Ekstinktionskoefficienten, ϵ , antages at være proportional med koncentrationen af klorofyl-a, CH (mg/l):

$$\epsilon = a + b \cdot CH$$

se i øvrigt /3/.

Parametrene a og b er bestemt for de enkelte søer ved lineær regressionsanalyse (ϵ vs. CH). Ekstinktionskoefficienten er beregnet ud fra målinger af sigtedybden, SY, som antages at svare til en dybde, hvor lysintensiteten er reduceret til 10 % af lysintensiteten ved overfladen, d.v.s.

$$SY = \frac{-\ln 0.10}{\epsilon}$$

(jf. /10/).

Til bestemmelse af a og b er i de fleste tilfælde anvendt væg-
tet lineær regression (se f.eks. /9 /), hvor vægtfaktorerne er
valgt proportionale med variansen på måledataene. Klorofylmålin-
gerne antages at være behæftet med en konstant relativ fejl på
20 %, mens usikkerheden på sigtedybdemålingerne antages at væ-
re konstant og lig med 5 cm.

Variansen på den afhængige variabel, $y = f(x)$, kan med tilnær-
melse beregnes som

$$\text{Var } \{y\}_{\text{eff}} \approx (\Delta y)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x} \cdot \Delta x\right)^2$$

Variansen på ϵ bliver følgelig

$$\text{Var } \{\epsilon\}_{\text{eff}} \approx (\Delta \epsilon)^2 + (b \cdot \Delta \text{CH})^2$$

og da
$$\epsilon = \frac{-\ln 0.10}{SY}$$

fås
$$\Delta \epsilon = \frac{1}{-\ln 0.10} \cdot \epsilon^2 \cdot \Delta SY$$

Ved vægtfaktorberegningerne er b tillagt den konstante værdi
 $b = 17 \cdot 10^{-3}$ ($\mu\text{g chl-a}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{l}$), og det endelige udtryk
for den effektive varians for ϵ bliver:

$$\text{Var } \{\epsilon\}_{\text{eff}} \approx (0.022 \cdot \epsilon^2)^2 + (17 \cdot 10^{-3} \cdot 0.20 \cdot \text{CH})^2$$

Ved at udføre en vægdet regression opnås, at målinger, svarende
til høje klorofylkoncentrationer, ikke får en uforholdsmæssig
stor indflydelse.

I enkelte tilfælde er dog anvendt en simpel uvægtet regression,
idet det skønnedes, at der herved opnåedes bedre resultater.

Resultaterne er anført i tabel A 1.4, og måledata og regressions-
linjer er afbildet på figur A 1.1. Der er vist resultater for
samtlige søer, hvor et tilstrækkeligt datamateriale har været
til rådighed, Mossø dog undtaget. Sønnavnsforkortelserne, som er

anvendt i tabel A 1.4 og på figur A 1.1, fremgår af tabel A 1.5. I enkelte tilfælde er regressionen baseret på kun tre punkter og må derfor tages med forbehold. Hvor så få data har været til rådighed, er resultaterne kun medtaget, hvis målingerne skønnes at dække et passende variationsområde.

For Thorsø eksisterer 12 målepunkter, men på grund af disses uheldige fordeling må den estimerede hældning her ikke tillægges større betydning.

Som gennemsnitsværdi for samtlige hældningskoefficienter findes:

$$\bar{b} = 18.5 \text{ (l/mg/m)},$$

hvad der er i god overensstemmelse med f.eks. Bannister /11/.

Afskæringerne er udtryk for den del af lysdæmpningen, som ikke forårsages af tilstedeværelsen af alger, og som altså skyldes bl.a. vandets farvning af opløste stoffer samt suspenderet, dødt materiale. Afskæringerne ses at være små i rene søer som Almind sø og Slåen sø.

Det må påpeges, at relationen, som benyttes til beregning af ekstinktionskoefficienten, ikke indeholder nogen dynamik med hensyn til vandets baggrundsdæmpning (konstant a-værdi), og da denne kan forventes at formindskes med aftagende eutrofigrad og altså aftagende belastning, bliver de ved hjælp af modellen forudsagte ændringer i sigtedybden antageligt for små i en række tilfælde. Det har imidlertid ikke været muligt at ændre dette forhold, da der ikke har været datamateriale til rådighed, som kunne danne grundlag for en mere detaljeret beskrivelse af lysdæmpningen.

2.2.6 BEREGNINGSTEKNIK VED BEHANDLING AF FLERE SØBASSINER

I en række tilfælde er behandlet flere søer eller søbassiner, som står i forbindelse med hinanden. Ved beregningerne er antaget, at transport af stof kun finder sted fra opstrøms til nedstrøms søer/bassiner. Af programtekniske grunde har det yderligere måttet antages, at alger, som forlader et søbassin, tilføres det næste bassin som "detritus". Hvor der er tale om adskilte søer, er dette en rimelig tilnærmelse, men hvor en enkelt sø er opdelt i flere bassiner, introduceres herved en fejl. Fejlen får imidlertid ikke indflydelse på de massebalancer, som opstilles for fosfor og kvælstof, og der kan derfor kompenseres for fejlen gennem kalibreringen af modellen.

Regneteknisk er sammenkoblingen af flere bassiner foretaget ved at gennemregne ét bassin ad gangen, idet der startes med det bassin, som ligger længst opstrøms. Under beregningsgangen genereres en tabel over de stofmængder, som fjernes via afløbet, og denne tabel benyttes som input til det følgende bassin efter eventuel sammenlægning med tabeller over øvrige stoftransporter til det pågældende bassin.

2.2.7 UDARBEJDELSE AF PROGNOSE

Efter kalibrering af modellen, så den beskriver forholdene i den pågældende sø, er udarbejdet prognoser over den forventede eutrofieringstilstand under ændrede belastningsforhold med hensyn til fosfor og kvælstof. Der betragtes en fremtidig ligevægtstilstand, hvor de øvrige tvangsfunktioner, som påtrykkes systemet (temperatur, solindstråling og vandgennemstrømning), er som i kalibreringssituationen - kun størrelsen af fosfor- og kvælstoftilførslerne ændres.

Ved beregningerne opdeles næringssalttilførslerne, som følger:

1. Tilførsler direkte til søen, som er konstante igennem året (spildevand).

2. Målte stoftransporter fra opstrøms kilder (f.eks. tilførsel fra Gudenåen). Dette bidrag er beregnet ved hjælp af en tabel for stoftransporterne i Gudenåsystemet /6/.
3. Estimerede bidrag fra diffuse kilder i søens direkte opland.

Under ændrede belastningsforhold vil den relative fordeling af stoftransporterne igennem året være uændret for bidrag nr. 1 og nr. 3. Med hensyn til den del af næringssalttilførslen, som skyldes bidrag nr. 2, kan der imidlertid tænkes en ændret årstidsvariation, idet bl.a. forholdet mellem tilførsler fra spildevand og fra overfladisk afstrømning kan ændres. Det har imidlertid ikke været muligt inden for undersøgelsens rammer at medtage en årstidsvariation i den opstillede stoftransportmodel, og ved sømodelberegningerne er det derfor antaget, at stoftransporternes relative fordeling igennem året forbliver uændret for bidrag nr. 2's vedkommende. Da det indbyrdes forhold mellem de tre forskellige bidrag forskydes under ændrede belastningsforhold, vil den totale næringsstofftilførsels relative fordeling igennem året dog være genstand for nogen variation.

Ved prognoserne betragtes som nævnt en fremtidig ligevægtssituation, og der siges intet om det tidsrum, der hengår, før en sådan ny ligevægt er opnået. I Gudenåsystemets søer er opholdstiden imidlertid i de fleste tilfælde kort, og efter en ændring af belastningen kan en ny ligevægtstilstand derfor forventes opnået relativt hurtigt - i nogle tilfælde sandsynligvis allerede efter forløbet af en enkelt årscyklus. Som en rettesnor for varigheden af overgangsperioden, før en ny ligevægtstilstand er opnået, kan antagelig regnes med af størrelsesordenen tre fosfor- eller kvælstofopholdstider /12/.

Det bemærkes, at i forbindelse med vurderingen af de fremtidige spildevandsforhold, herunder alternative rensningstekniske indgreb, jf. /13/, er der regnet med sådanne overgangsperioder for Mossø og Skanderborg sø, idet opholdstiderne her er større end to år.

3. MODELBEREGNINGER PÅ UDVALGTE SØER

Afsnittet indeholder de vigtigste resultater af modelberegningerne sammen med en kortfattet vurdering af søernes aktuelle tilstand på grundlag af de foretagne beregninger. Endvidere er søgt vurderet den forventede fremtidige tilstand svarende til en række alternative belastningssituationer.

Hvorledes de forskellige belastningsforhold kan tænkes at fremkomme i praksis (rensningstekniske indgreb, befolkningsudvikling m.v.) er anført i Samlerapporten /13/.

Udvalgte data for de enkelte søer er anført i tabelform, og der henvises generelt til rapportererne over henholdsvis søundersøgelser /10/ og stoftransporter /6/.

Til karakterisation af sigtedybdeforholdene opereres i denne rapport med tre størrelser:

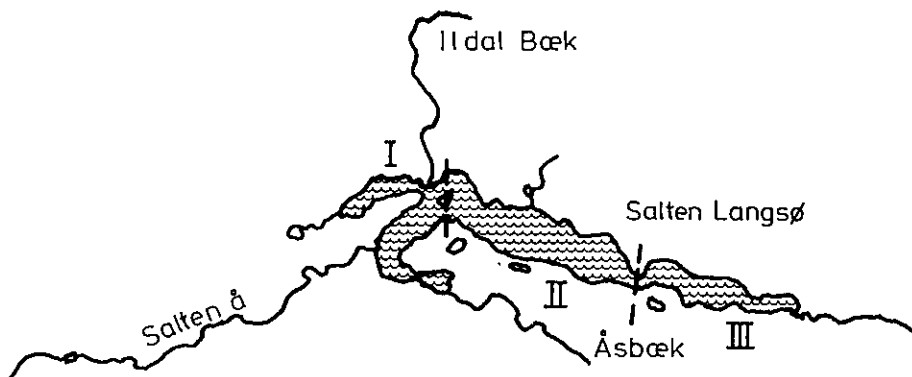
- SY_{\min} = den minimale sigtedybde
- $SY_{120-260}$ = gennemsnitsværdi for sigtedybden mellem dag nr. 120 og dag nr. 260
- SY_{1-365} = gennemsnitsværdi for sigtedybden på årsbasis.

Ved sammenligning mellem målte og beregnede gennemsnitstal må her påpeges, at ved modelberegningerne findes et middeltal for en kontinuert variabel, mens de "målte" værdier er gennemsnitstal for et begrænset antal observationer, og alene af denne årsag kan der opstå uoverensstemmelser.

Med hensyn til den minimale sigtedybde må som hovedregel forventes, at den observerede værdi er mindre end den beregnede, idet modelberegningerne kun beskriver udjævnedede forløb.

Ved vurdering af graden af overensstemmelse mellem modelberegninger og observerede data må man derfor med hensyn til sigtedybdeforhold i første række betragte de viste kurver over årstidsvariationer og kun benytte de angivne gennemsnits- og ekstremumstal som et supplement.

3.1 SALTEN LANGSØ



Figur 3.1 Kortskitse af Salten langsø.

Salten langsø opdeles naturligt i tre bassiner, hvis vigtigste morfometriske data fremgår af tabel 3.1. Ved modelberegningerne er søen imidlertid for simpelhedens skyld beskrevet som et enkelt fuldt opblandet bassin, og de måledata, som er benyttet ved kalibrering af modellen, er beregnet som volumenvægtede gennemsnit af tallene for de enkelte bassiner. Areal og middeldybde for hele søen samt gennemsnitlig opholdstid er ligeledes anført i tabel 3.1.

BASSIN	STATION	AREAL	MIDDEL- DYBDE	MAKSIMAL DYBDE	GENNEM- SNITSOP- HOLDSTID
		(ha)	(m)	(m)	(døgn)
1	752	85	2,24	5,5	11
2	751	151	6,53	12,1	55
3	753	64	2,63	3,5	10
HELE SØEN		300	4,49	12,1	76

Tabel 3.1 Morfometriske data og middellopholdstid for Salten langsø.

Tabel 3.2 er en opgørelse af belastningen med kvælstof og fosfor, samt en estimeret akkumulering af disse stoffer i søen.

B E L A S T N I N G S B I D R A G	N	P
	(tons/år)	(tons/år)
1. Direkte målt tilførsel (Salten bro)	50,9	8,0
2. Spildevand direkte til sø	2,8	0,9
3. Diffust bidrag fra øvrige opland	15,0	0,3
SAMLET BELASTNING	68,7	9,2
AKKUMULEREDE MÆNGDER	22,7	3,7

Tabel 3.2 N- og P-tilførsler samt ophobning i Salten langsø.

I tabel 3.3 er anført lysekstinktionsparametre, primærproduktion samt gennemsnitstal og mindsteværdi for sigtedybden.

BASSIN	LYSEKSTINKTIONSPARAMETRE		PP	SIGTEDYBDEPARAMETRE		
	Baggrunds- ekstinktion	Afhængighed af klorofyl- koncentrat.	Primær- produkt.	SY _{min}	SY ₁₂₀₋ 260	SY ₁₋ 365
	a (m ⁻¹)	b (l/mg/m)	gC/m ² /år			
1	0,96 ± 0,19	21,6 ± 9,2	179	0,8	1,2*	1,3*
2	0,80 ± 0,30	32 ± 13	142	0,7	1,2*	1,3*
3	1,1 ± 0,5	13 ± 26	64	1,2	1,3	1,6
HELE SØEN	0,95	22,3	159	0,8	1,2	1,3

* = En måling udeladt.

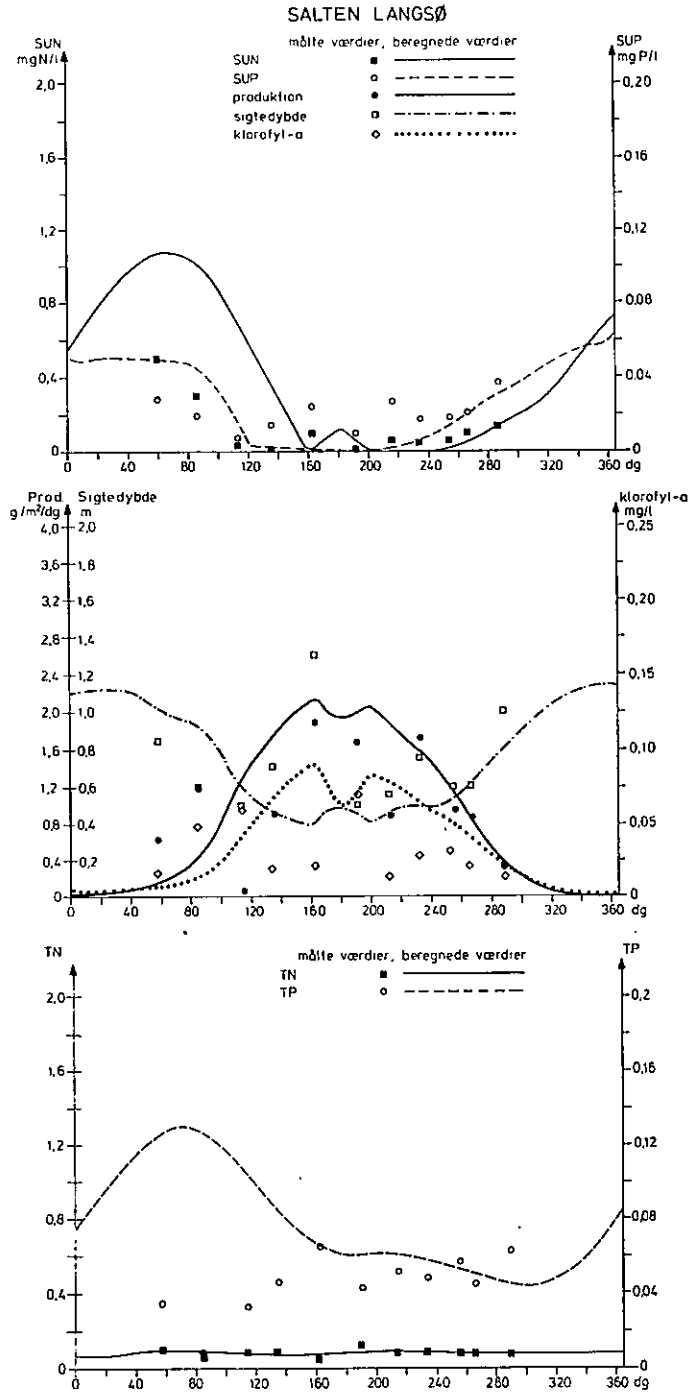
Tabel 3.3 Lysekstinktionsparametre, primærproduktion og sigtedybdeforhold for Salten langsø.

3.1.1 MODELKALIBRERING

De anvendte parameterverdier afviger ikke væsentligt fra standardværdierne. Resultaterne af modelkørslerne fremgår af figur 3.2 (årstidsvariationer) samt af tabel 3.4 (massebalancer) og tabel 3.5 (primærproduktion og sigtedybdeforhold).

Overensstemmelsen mellem målte og beregnede størrelser er i de fleste tilfælde udmærket. Flere af de målte klorofylkoncentrationer er dog betydeligt mindre end de beregnede værdier, et forhold, der blandt andet kan skyldes variation i algernes klorofylindhold (jf. afsnit A4).

I Salten langsø synes både fosfor og kvælstof at være begrænsende faktorer. I begyndelsen af vækstperioden bliver fosfor øjensynligt begrænsende og senere også kvælstof. I slutningen af vækstperioden er kun kvælstof begrænsende. Fosfor- og kvælstof-tilførslerne synes at spille en omtrent lige vigtig rolle for algevæksten.



Figur 3.2 Modellsimulering af Salten langsø.

	TILFØRSEL		AKKUMULERING	
	N	P	N	P
	g/m ² /år	g/m ² /år	g/m ² /år	g/m ² /år
Modellsimulering	22,8	3,05	5,4	1,09
Estimeret ud fra målte data	22,9	3,07	4,9	1,02

Tabel 3.4 Massebalance for Salten langsø.

	PP	SY _{min}	SY ₁₂₀₋₂₆₀	SY ₁₋₃₆₅
	Primærprodukt.			
	g C/m ² /år	m	m	m
Modellsimulering	153	0,77	0,94	1,54
Estimeret ud fra målte data	159	0,8	1,2	1,3

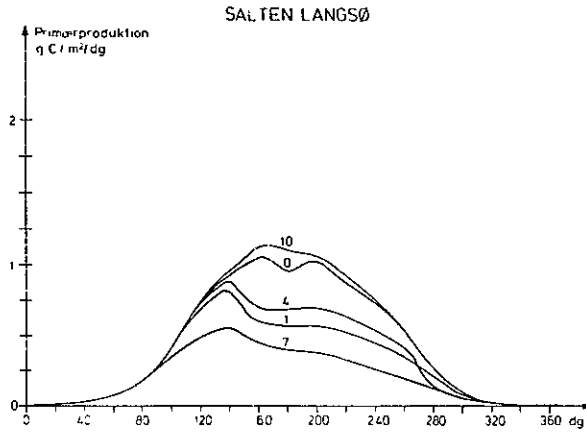
Tabel 3.5 Vandkvalitetsparametre for Salten langsø.

3.1.2 PROGNOSE

Prognoseværdier for primærproduktions- og sigtedydbeforhold samt stofakkumulering svarende til en række udvalgte belastningsalternativer er anført i tabel 3.6. På figur 3.3 er udvalgte årstidsvariationer illustreret. Ved alternativerne nr. 6 og 7 samt nr. 11 og 12 forudsættes det direkte spildevandsbidrag på 2,8 tons N/år og 0,9 tons P/år afskåret, mens dette bidrag ved de øvrige alternativer er forudsat uændret.

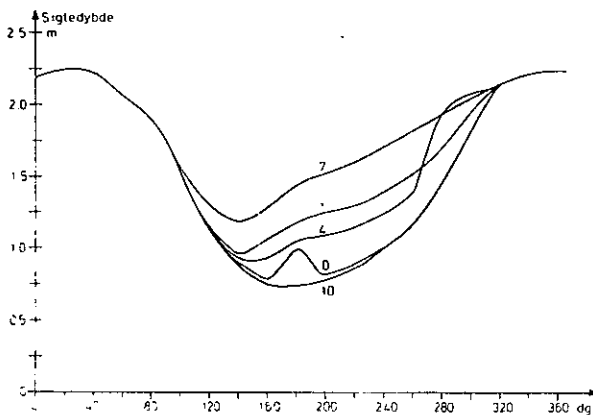
Nr.	Massebalancer								Vandkvalitetsparametre				
	Tilførsel				Akkumulering				PP g C/m ² /år	SY min m	SY 120- 260 m	SY 1- 365 m	
	N		P		N		P						
tons	g/m ²	tons	g/m ²	tons	g/m ²	tons	g/m ²						
Standard													
0	68,4	22,8	9,2	3,05	16,2	5,4	3,3	1,09	153	0,77	0,94	1,54	
1	38,6	12,9	6,0	1,99	10,7	3,6	2,2	0,73	108	0,97	1,22	1,70	
2	59,3	19,8	6,2	2,06	15,1	5,0	2,5	0,83	143	0,84	1,00	1,58	
3	29,4	9,8	3,0	1,00	8,5	2,8	1,3	0,43	84	1,14	1,41	1,80	
4	47,8	15,9	7,6	2,52	12,6	4,2	2,6	0,86	124	0,92	1,09	1,65	
5	79,7	26,6	11,5	3,85	18,0	6,0	3,7	1,23	164	0,75	0,91	1,53	
6	65,6	21,9	8,3	2,75	16,0	5,3	3,1	1,02	152	0,84	0,95	1,55	
7	26,6	8,9	2,1	0,70	8,7	2,9	1,1	0,38	80	1,18	1,45	1,81	
8	68,4	22,8	6,0	1,99	16,3	5,4	2,5	0,82	153	0,82	0,95	1,55	
9	68,4	22,8	7,6	2,52	16,4	5,5	2,9	0,96	154	0,80	0,94	1,55	
10	79,7	26,6	12,9	4,30	18,3	6,1	4,0	1,34	167	0,73	0,89	1,52	
11	68,4	22,8	5,1	1,69	16,1	5,4	2,2	0,73	149	0,83	0,97	1,56	
12	68,4	22,8	2,1	0,70	13,5	4,5	1,15	0,38	118	1,01	1,15	1,66	

Tabel 3.6 Salten langsø. Modellsimulering af indgreb.



Figur 3.3

Prognosen for fremtidige primærproduktions- og sigtedybdeforhold i Salten langsø svarende til udvalgte belastningsalternativer (nummerering se tabel 3.6).



Det ses, at man ved en væsentlig reduktion af fosfor og/eller kvælstofbelastningen kan forvente en betydelig forbedret vandkvalitet. Reduceres alene fosforbelastningen, bliver fosfor den dominerende begrænsende faktor, og ved fosforreduktioner over en vis størrelse ophører kvælstof med at være begrænsende. Ved belastningsalternativ nr. 7, hvor både fosfor- og kvælstoftilførslerne er reduceret kraftigt, spiller mangel på fosfor ligeledes en større rolle end mangel på kvælstof. Det må derfor anses for vigtigere at søge at formindske tilledningerne af fosfor end at søge at formindske tilledningerne af kvælstof, hvis en forbedring ønskes.

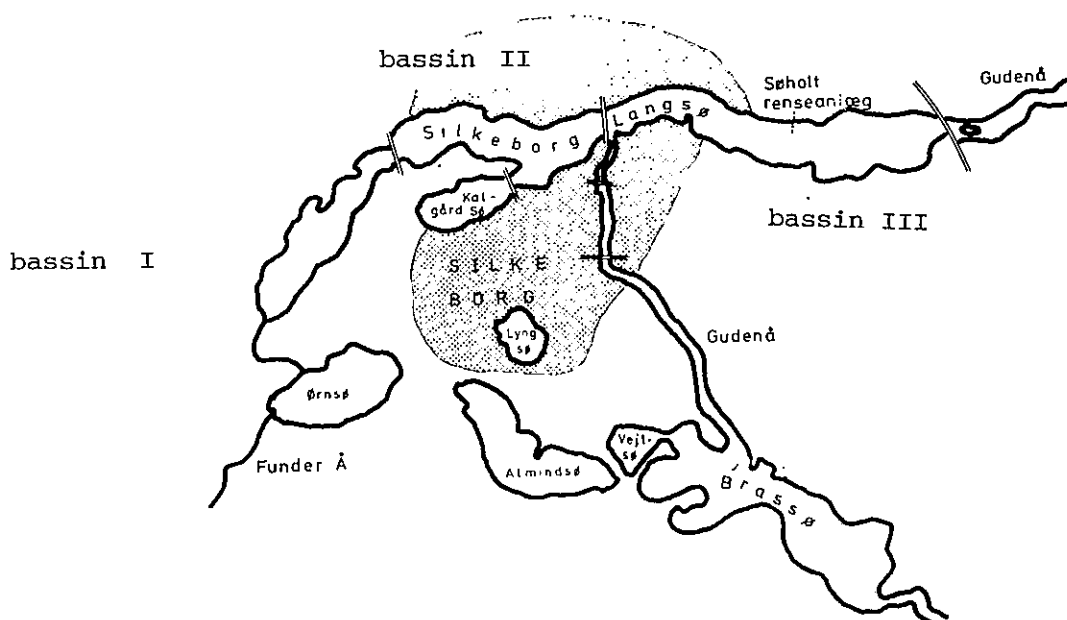
Ved forøgelse af fosfor- og kvælstofbelastningen (alternativ nr. 10) forudsiger modellen en forholdsvis begrænset forværring af søens tilstand.

3.2 BRASSØ

Brassøs beliggenhed i Gudenåsystemet fremgår af figur 3.4, som viser søerne omkring Silkeborg. Brassø gennemstrømmes af Gudenåen og har en meget kort hydraulisk opholdstid. Morfometriske data og gennemsnitlig opholdstid fremgår af tabel 3.7, og belastning samt stofophobning af tabel 3.8. I tabel 3.9 er anført lys-ekstinktionsparametre, primærproduktion samt sigtedybdeparametre.

AREAL ha	MIDDEL- DYBDE m	MAX. DYBDE m	GNS. OPHOLDSTID døgn
111	4,6	14,1	5,2

Tabel 3.7 Morfometriske data og middellopholdstid for Brassø.



Figur 3.4 Søerne omkring Silkeborg, bl.a. Ørn sø, Silkeborg langsø og Brassø.

BELASTNINGSBIDRAG	N tons/år	P tons/år
1. Direkte tilførsel med Gudenåen	772	51,5
2. Spildevand direkte til sø	0	0
3. Diffust bidrag fra øvrige opland	19	0,4
Samlet belastning	791	51,9
Akkumulerede mængder	21	1,5

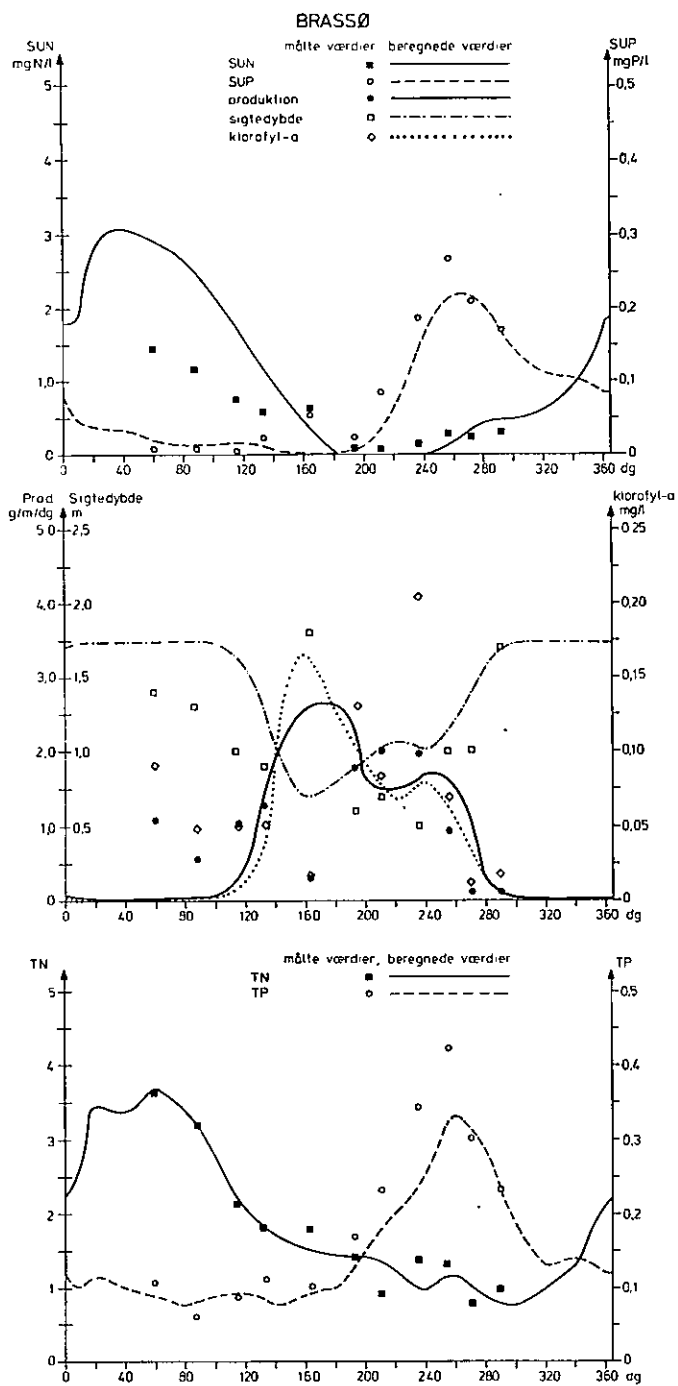
Tabel 3.8 N- og P-tilførsler samt ophobning i Brassø.

LYSEKSTINKTIONSPARAMETRE		PP	SIGTEDYBDEPARAMETRE		
Baggrunds- ekstinktion a (m ⁻¹)	Afhængighed af klorofylkonc. b (l/mg/m)	Primær- produktion g C/m ² /år	SY _{min.} m	SY ₁₂₀₋₂₆₀ m	SY ₁₋₃₆₅ m
1,30	12,7	279	0,60	0,97	1,1

Tabel 3.9 Lysekestinktionsparametre, primærproduktion og sigtedybdeforhold for Brassø.

3.2.1 MODELKALIBRERING

Resultaterne af modelsimuleringen fremgår af figur 3.5 og tabel 3.10 og 3.11. Modellen ses at beskrive variationerne i koncentrationerne af fosfor og kvælstof særdeles godt. At dette er tilfældet, hænger til dels sammen med den ringe hydrauliske opholdstid i søen, som bevirker, at koncentrationsniveauerne i ret høj grad styres af tilledningerne. Ses bort fra et enkelt sæt målepunkter omkring dag nr. 160, er der imidlertid også udmærket overensstemmelse mellem målte og beregnede primærproduktioner, sigtedybder samt klorofylkoncentrationer (et enkelt punkt omkring dag nr. 240 undtaget).



Figur 3.5 Modelsimulering af Brassø.

	TILFØRSEL		AKKUMULERING	
	N g/m ² /år	P g/m ² /år	N g/m ² /år	P g/m ² /år
Modellsimulering	710	47	15	1,4
Estimeret ud fra målte tal	713	47	19	1,4

Tabel 3.10 Massebalance for Brassø.

	PP PRIMÆRPRO- DUKTION g C/m ² /år	SY _{min.} m	SY ₁₂₀₋ 260 m	SY ₁₋ 365 m
Modellsimulering	274	0,68	1,01	1,41
Estimeret ud fra målte data	279	0,60	0,97	1,1

Tabel 3.11 Vandkvalitetsparametre for Brassø.

Der er anvendt en forholdsvis høj værdi for phytoplanktonets maksimale specifikke væksthastighed (μ_{\max} (20°C) = 1,8 dg⁻¹). Årsagen til, at dette har været nødvendigt, skal antageligt søges i det forhold, at den hydrauliske opholdstid er lav, og at søen derfor ikke kan regnes for totalt opblandet, idet visse partier gennemstrømmes hurtigere end andre. Det er nærliggende at antage, at der i søens mere stillestående områder foregår en algeproduktion, der er større end algeproduktionen i de mere hurtigt gennemstrømmede søafsnit. I den matematiske modelbeskrivelse kan ikke tages direkte hensyn til sådanne forhold, men der kan kompenseres herfor gennem kalibreringen af modellen.

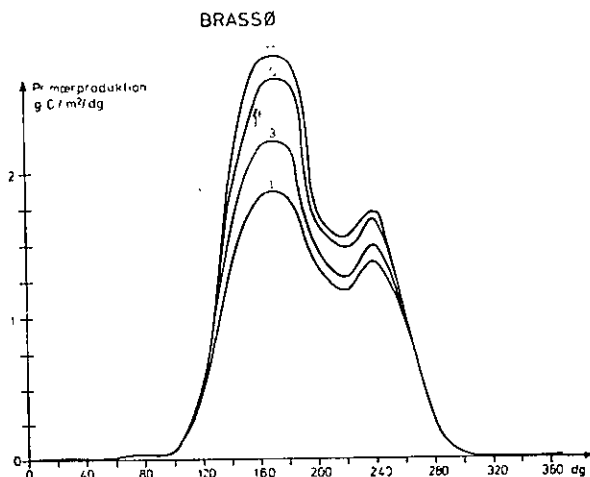
På baggrund af modelberegningerne kan konkluderes, at både fosfor og kvælstof er begrænsende for algevæksten. Fosfor er begrænsende i forsommeren, mens kvælstof er begrænsende senere på sæsonen. Kun i en ganske kort periode synes de to næringsstoffer at være begrænsende samtidigt.

3.2.2 PROGNOSE

Prognoser for primærproduktion, sigtedybdeforhold og stofakkumulering under en fremtidig ligevægtstilstand, svarende til alternative belastninger, fremgår af tabel 3.12 og figur 3.6. Hvis fosforbelastningen reduceres, bliver fosfor den dominerende begrænsende faktor i Brassø. Modelberegningerne viser, at der ved en væsentligt reduceret belastning med fosfor kan opnås en signifikant nedsat primærproduktion. Derimod forudsiges kun en forøgelse af den gennemsnitlige sigtedybde i sommerperioden på ca. 10 cm ved alternativ nr. 1, som svarer til den mindste næringsstofbelastning blandt de gennemregnede eksempler. Denne forudsigelse kan dog tænkes at være for konservativ, jf. afsnit 5.

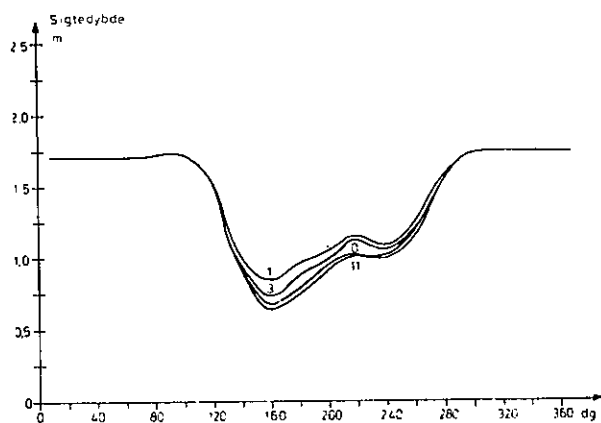
Nr.	Massebalancer								Vandkvalitetsparametre			
	Tilførsel				Akkumulering				PP g C/m ² /år	SY _{min} m	SY ₁₂₀₋ 260 m	SY ₁₋ 365 m
	N tons	P g/m ²	N tons	P g/m ²	N tons	P g/m ²	N tons	P g/m ²				
0	789	710	51,9	47	17	15	1,6	1,4	274	0,68	1,01	1,41
1	599	540	20,2	18	13	11	0,7	0,7	214	0,83	1,11	1,46
2	664	598	25,2	23	14	13	0,9	0,8	234	0,78	1,07	1,44
3	661	595	30,2	27	14	13	1,0	0,9	241	0,75	1,06	1,44
4	724	652	35,1	32	15	14	1,2	1,0	251	0,73	1,04	1,43
5	749	674	40,1	36	16	14	1,3	1,2	261	0,71	1,03	1,42
6	769	692	45,0	41	16	15	1,4	1,3	262	0,69	1,02	1,42
7	789	710	50,0	45	17	15	1,5	1,3	272	0,68	1,08	1,44
8	809	728	54,9	49	18	16	1,7	1,5	277	0,67	1,01	1,41
9	829	746	59,9	54	18	16	1,8	1,6	281	0,66	1,00	1,41
10	849	764	64,8	58	19	17	1,9	1,7	284	0,66	1,00	1,41
11	869	782	69,8	63	19	17	2,1	1,9	288	0,65	1,00	1,41
12	789	710	40,1	36	17	15	1,3	1,1	265	0,71	1,03	1,42
13	829	746	40,1	36	18	16	1,3	1,2	269	0,71	1,02	1,42

Tabel 3.12 Brassø. Modelsimuleringer af indgreb.



Figur 3.6

Prognoser for fremtidige primærproduktions- og sigtedybdeforhold i Brassø svarende til udvalgte belastningsalternativer (nummerering, se tabel 3.12).



3.3 ØRN SØ

Beliggenheden af Ørn sø er illustreret på figur 3.4. Ørn sø gennemstrømmes af Funder å og afløbet strømmer via Lysåen videre til Silkeborg langsø. Tabellerne 3.13, 3.14 og 3.15 viser henholdsvis morfometriske data og gennemsnitlig opholdstid, belastning og stofophobning samt lysekstinktionsparametre, sigtedybdeparametre og primærproduktion.

AREAL ha	MIDDEL DYBDE m	MAXIMAL DYBDE m	GSN. OPHOLDSTID døgn
42,2	4,07	10,5	18

Tabel 3.13 Morfometriske data og middellopholdstid for Ørn sø.

BELASTNINGSBIDRAG	N tons/år	P tons/år
1. Direkte målt tilførsel fra Funder å	31,3	4,5
2. Spildevand direkte til sø	3,9	1,3
3. Diffust oplandsbidrag	22	0,2
SAMLET BELASTNING	57,2	6,0
OPHOBNING	16,3	1,6

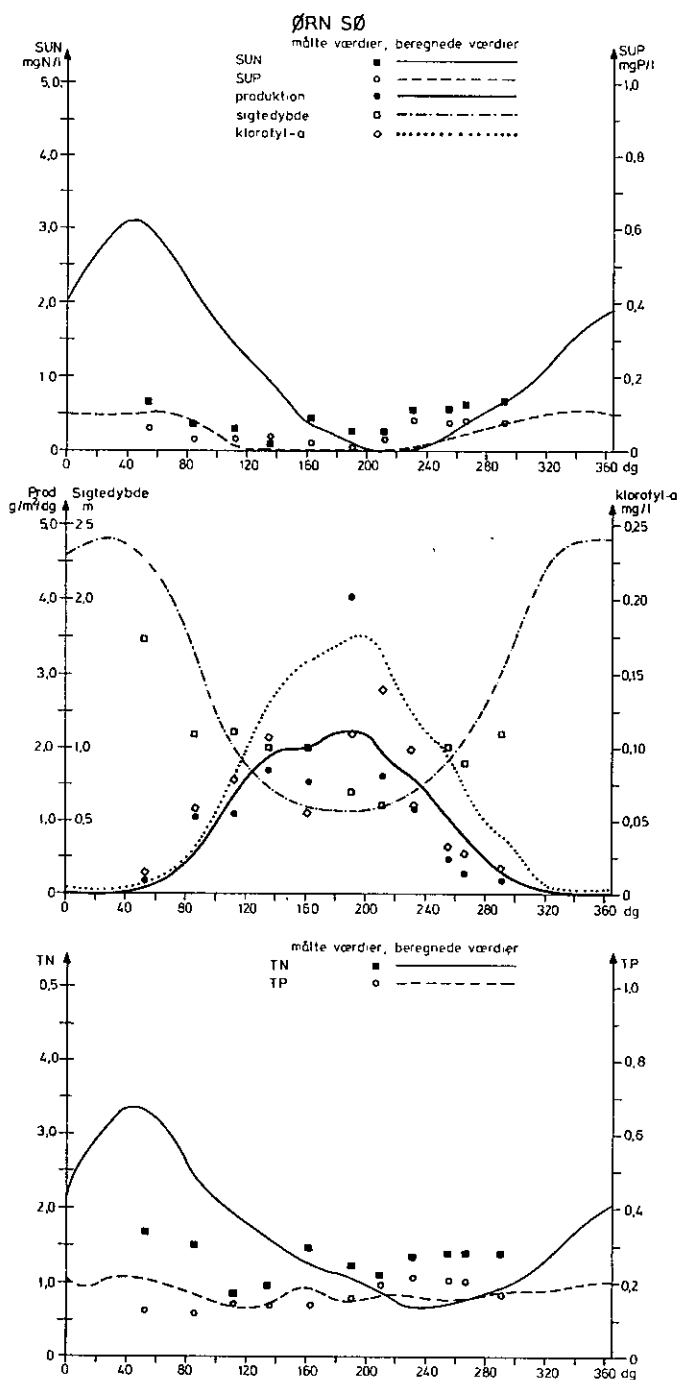
Tabel 3.14 N- og P-tilførsler samt ophobning i Ørn sø.

<u>LYSEKSTINKTIONSPARAMETRE</u>		PP	<u>SIGTEDYBDEPARAMETRE</u>		
Baggrunds- ekstinktion	Afhængighed af kloro- fylkoncent.	Primær- produktion	SY_{min}	$SY_{120-260}$	SY_{1-365}
a (m^{-1})	b ($l/mg/m$)	($g\ C/m^2/år$)	(m)	(m)	(m)
0,92	18,0	322	0,6	0,92	1,3

Tabel 3.15 Lysekstinktionsparametre, primærproduktion og sigtedybdeforhold for Brassø.

3.3.1 MODELKALIBRERING

Resultaterne af modelsimuleringen fremgår af figur 3.7 og tabel 3.16 og 3.17.



Figur 3.7 Modelsimulering af Ørn sø.

	TILFØRSEL		AKKUMULERING	
	N g/m ² /år	P g/m ² /år	N g/m ² /år	P g/m ² /år
Modellsimulering	135	14	34	4,0
Estimeret ud fra målte tal	135	14	39	3,8

Tabel 3.16 Massebalance for Ørn sø.

	PP Primærpro- duktion g C/m ² /år	SY _{min} m	SY ₁₂₀₋ 260 m	SY ₁₋ 365 m
Modellsimulering	325	0,56	0,70	1,45
Estimeret ud fra målte data	322	0,6	0,92	1,3

Tabel 3.17 Vandkvalitetsparametre for Ørn sø.

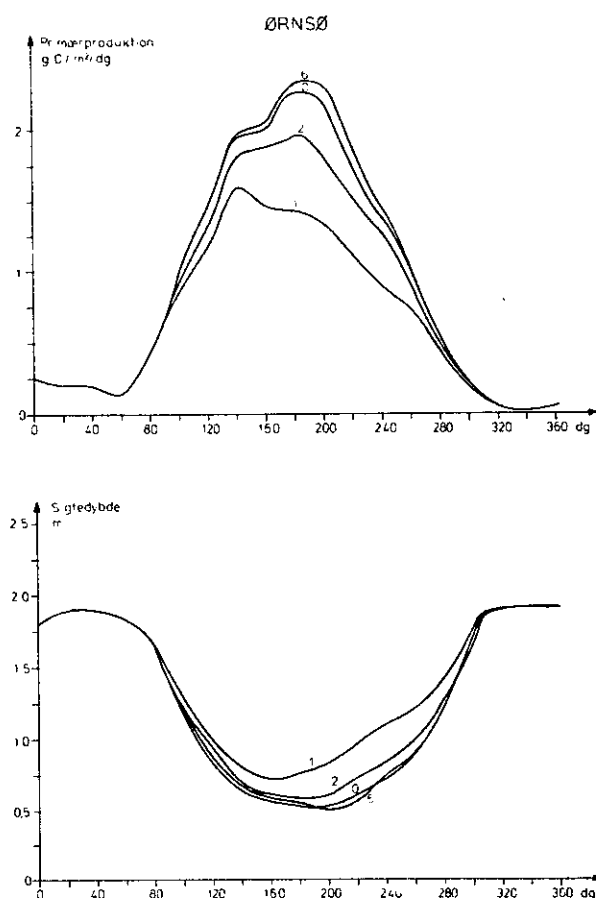
Der ses at være overensstemmelse mellem målte og beregnede værdier. En enkelt primærproduktionsmåling er dog betydeligt højere end de simulerede produktioner. For at få massebalancen til at stemme er anvendt en forholdsvis høj sedimentationskonstant for detritus-kvælstof, et forhold der kan forklares ved, at der fra Funder å tilføres en betydelig mængde partikulært materiale. Øvrige parameterverdier ligger inden for standardområdet.

Ved den aktuelle belastning er fosfor begrænsende for algevæksten. Kvælstof er kun begrænsende i en meget kort periode.

3.3.2 PROGNOSE

Resultater af modelsimuleringer af forskellige indgreb fremgår af figur 3.8 og tabel 3.18. Søens tilstand synes ikke at blive væsentligt forværret ved en forøget næringsstofftilledning. Ved en nedsat næringsstofftilledning kan vandkvaliteten forbedres betydeligt. Det vil have størst betydning at reducere fosfortilførelsen, da fosfor ved samtlige gennemregnede belastningsalternativer er den dominerende begrænsende faktor.

Ved alternativ 1, 2 og 3 antages de direkte spildevandstilførsler afskåret, samtidigt med at stoftilførslen fra Funder å reduceres (dog ikke ved alternativ nr. 3). Alternativ nr. 4, 5 og 6 svarer til øget spildevandstilførsel og uændret næringsstofftilførsel fra Funder å.



Figur 3.8

Prognoser for fremtidige primærproduktions- og sigtedybdeforhold i Ørn sø svarende til udvalgte belastningsalternativer (nummerering, se tabel 3.18).

Nr.	Massebalancer								Vandkvalitetsparametre			
	Tilførsel				Akkumulering				PP g C/m ² /år	SY _{min} m	SY ₁₂₀₋ 260 m	SY ₁₋ 365 m
	N tons	P g/m ²	N tons	P g/m ²	N tons	P g/m ²	N tons	P g/m ²				
0	57,1	135	6,0	14	14	34	1,7	4,0	325	0,56	0,70	1,45
1	33,7	80	2,0	4,7	8,2	19	0,6	1,4	235	0,76	0,94	1,57
2	43,9	104	3,4	8,0	11	26	0,9	2,3	289	0,65	0,78	1,49
3	53,2	126	4,7	11	14	13	1,3	1,1	315	0,58	0,72	1,46
4	60,2	143	7,0	17	15	35	1,9	4,5	328	0,56	0,69	1,44
5	68,2	162	8,0	19	16	38	2,2	5,2	332	0,55	0,69	1,44
6	73,2	173	9,0	21	17	40	2,4	5,6	332	0,54	0,69	1,44

Tabel 3.18 Ørn sø. Modellsimuleringer af indgreb.

3.4 SILKEBORG LANGSØ

Ved modelberegningerne er Silkeborg langsø opdelt i tre separate bassiner, se figur 3.4. Afløbet fra Ørn sø strømmer via Lysåen til det vestlige bassin (bassin nr. 1), som desuden modtager et betydeligt næringssaltbidrag fra spildevand og dambrug. Næringssalttilførslen til bassin nr. 2 stammer derimod næsten udelukkende fra afløbet fra bassin nr. 1. Bassin nr. 3 gennemstrømmes af Gudenåen og er derfor væsentligt forskellig fra de to øvrige bassiner. Stoftilførslerne domineres her af tilførslerne fra Gudenåen og fosfortilførslen desuden af spildevandsbidraget fra Søholt rensningsanlæg. Ved beregningerne i forbindelse med modelkalibreringen er stofinput-tabellen til bassin nr. 3 genereret ved sammenlægning af tabeller, som beskriver henholdsvis stofbidraget fra afløbet af bassin nr. 2 og stofbidraget fra afløbet af Brassø (Gudenåen). Ved simuleringer af effekten af ændrede belastningsforhold er antaget, at tillednin-

gernes fordeling igennem året svarer til fordelingen af tilførslen fra Gudenåen under kalibreringsituationen.

Tabellerne 3.19, 3.20 og 3.21 viser henholdsvis morfometriske data og middellopholdstid, belastning og stofophobning samt lys-ekstinktionsparametre, sigtedybdeforhold og primærproduktion for de tre bassiner.

	AREAL	MIDDELDYBDE	MAXIMAL DYBDE	GSN.OPHOLDSTID
	ha	m	m	døgn
BASSIN 1	46,0	1,96	3,5	9,3
BASSIN 2	85,2	2,75	4,5	24
BASSIN 3	92,8	2,59	4,9	2,1

Tabel 3.19 Morfometriske data og middellopholdstid for Silkeborg langsø (tre separate bassiner).

	<u>BASSIN 1</u>		<u>BASSIN 2</u>		<u>BASSIN 3</u>	
	N t/år	P t/år	N t/år	P t/år	N t/år	P t/år
1. Direkte målt eller estimeret tilførsel	40,9	5,1	45,0	6,1	789,1 45,0	50,8* 6,0**
2. Spildevand og dambrug direkte til sø	8,8	3,2	0	0	174,2	44,7
3. Diffust oplandsbidrag	12,0	0,1	3,0	0	55	0,4
SAMLET BELASTNING	61,7	8,4	48,0	6,1	106,3	102
OPHOBNING	16,7	2,3	3,0	0,1	76	6,8

* = AFLØB FRA BRASSØ.

** = AFLØB FRA BASSIN 2.

Tabel 3.20 N- og P-tilførsler samt ophobning i Silkeborg langsø-systemet.

	LYSEKSTINKTIONSPARAMETRE		PP	SIGTEDYBDEPARAMETRE			
	Baggrunds- ekstinktion	Afhængighed af klorofyl- koncentrat.		Primær- produkt.	SY _{min}	SY _{120- 260}	SY _{1- 365}
	a (m ⁻¹)	b (l/mg/m)		(gC/m ² /år)	m	m	m
BASSIN 1	1,0	17,9	320	0,5	0,7	0,9	
BASSIN 2	0,94	21,1	300	0,5	0,6	0,7	
BASSIN 3	1,2	19,5	338	0,5	0,6	0,9	

Tabel 3.21 Lysekstinktionsparametre, primærproduktion og sigtedybdeforhold i Silkeborg langsø-systemet.

I det følgende beskrives de to vestlige bassiner under eet, idet forholdene i disse bassiner minder om hinanden. Ingen af disse antages berørt af de store vand- og stofmængder fra Gudenåen, som via Brassø strømmer til det østlige bassin (bassin nr. 3).

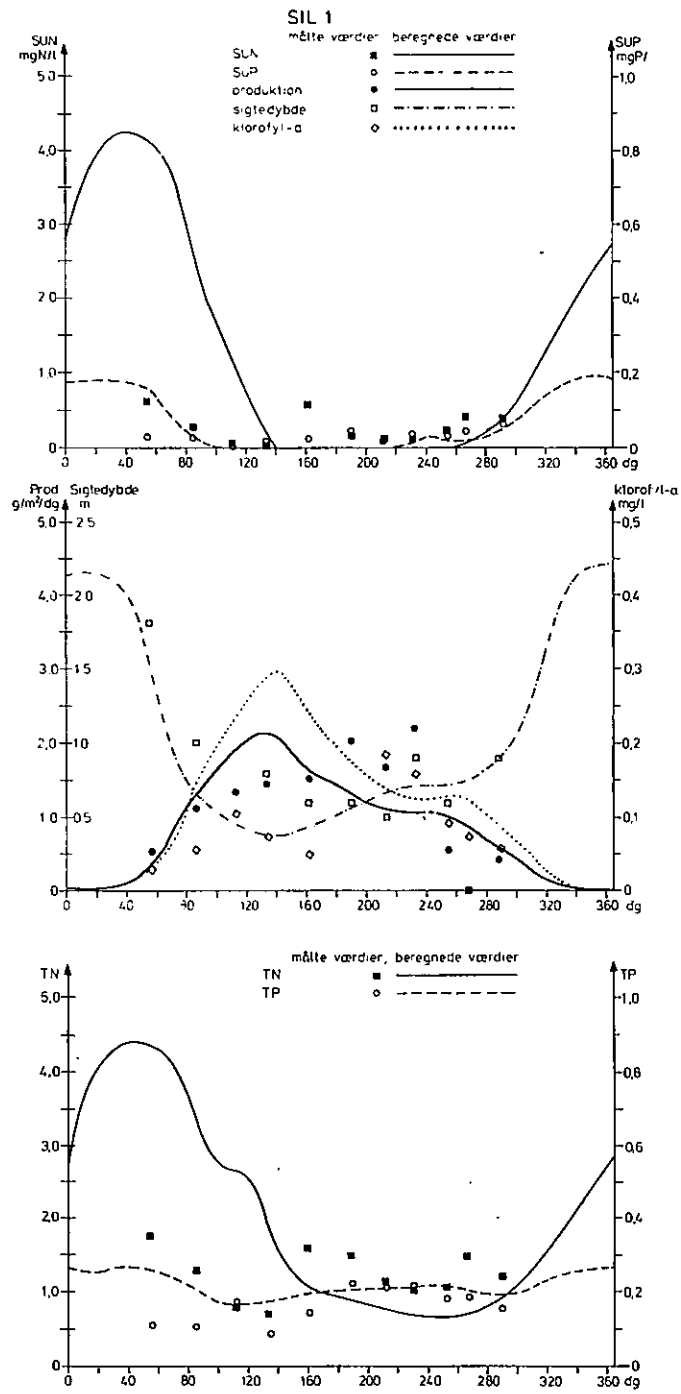
3.4.1 MODELKALIBRERING

Resultaterne af modelsimuleringerne fremgår af figur 3.9 - 3.11 samt tabel 3.22 og 3.23.

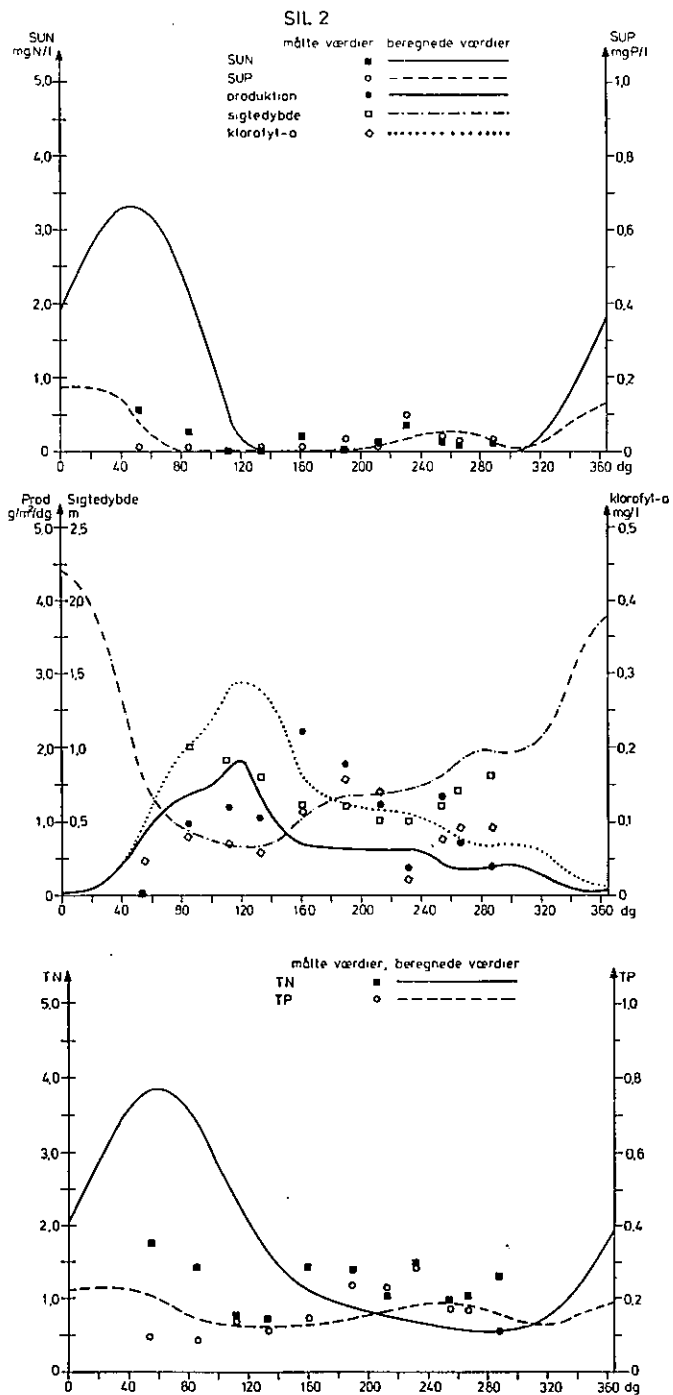
1) BASSIN 1 OG BASSIN 2

For bassin nr. 1's vedkommende er de beregnede resultater tilfredsstillende vurderet i relation til modellens begrænsninger. Dog er de målte klorofylkoncentrationer om foråret en del lavere end de beregnede. Primærproduktioner og sigtedybder beskrives derimod godt. Der er anvendt forholdsvis høje sedimentationskonstanter for fosfor og kvælstof. Et forhold, der kan hænge sammen med en betydelig tilførsel af partikulært materiale, som sedimenterer i søen. Øvrige pa-



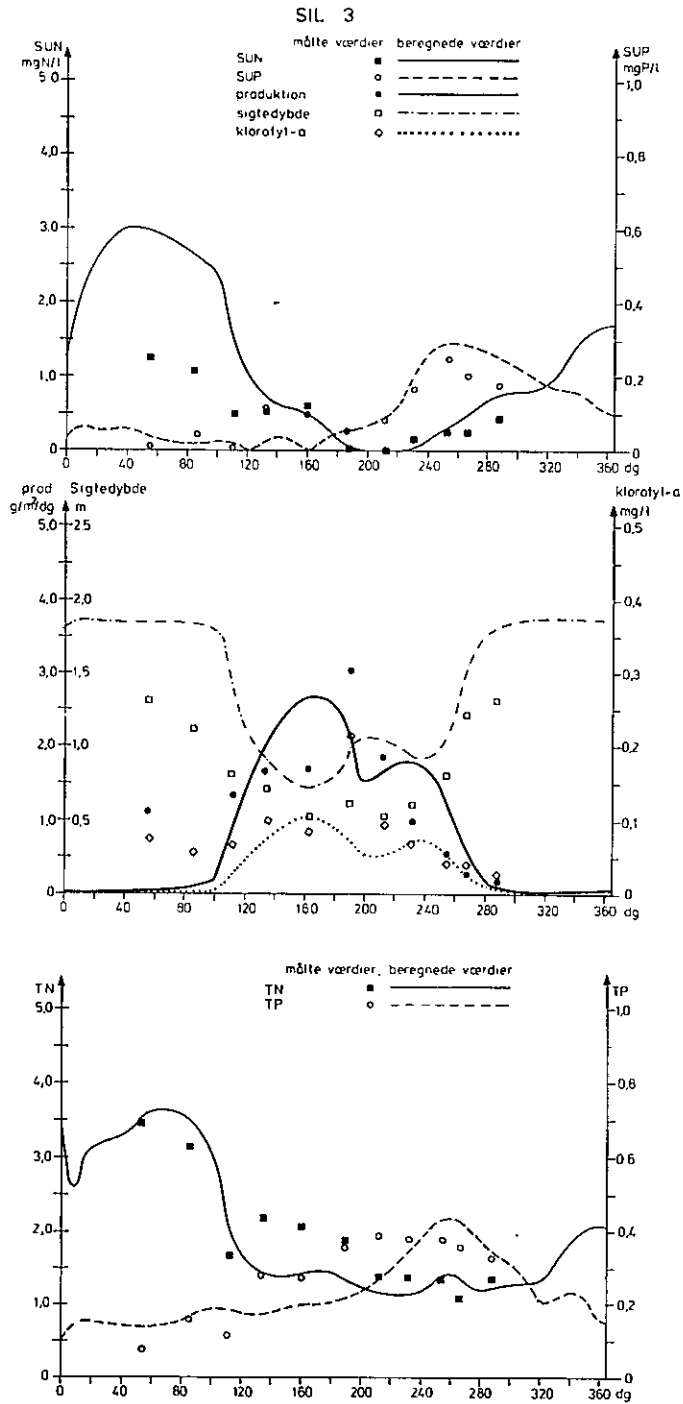


Figur 3.9 Modellsimulering af Silkeborg langsø,
BASSIN nr. 1.



Figur 3.10

Modellsimulering af Silkeborg langsø,
BASSIN nr. 2.



Figur 3.11 Modellsimulering af Silkeborg langsø, BASSIN nr. 3.

		TILFØRSEL		AKKUMULERING	
		N	P	N	P
		g/m ² /år	g/m ² /år	g/m ² /år	g/m ² /år
BASSIN 1	Modellsimulering	138	17	26	5,1
	Estimeret ud fra målte tal	134	18,3	36	5,0
BASSIN 2	Modellsimulering	63	6,2	14	1,6
	Estimereret ud fra målte tal	56,3	7,2	3,5	0,12
BASSIN 3	Modellsimulering	1173	108	75	6,7
	Estimeret ud fra målte tal	1146	110	81	7,3

Tabel 3.22 Massebalance for Silkeborg langsø systemet.

		PP primærpro- duktion g C/m ² /år	SY _{min} m	SY ₁₂₀₋₂₆₀ m	SY ₁₋₃₆₅ m
BASSIN 1	Modellsimulering	322	0,37	0,54	1,08
	Estimeret ud fra målte data	320	0,5	0,7	0,9
BASSIN 2	Modellsimulering	241	0,33	0,58	0,94
	Estimeret ud fra målte data	300	0,5	0,6	0,7
BASSIN 3	Modellsimulering	307	0,71	0,92	1,45
	Estimeret ud fra målte data	338	0,5	0,6	0,9

Tabel 3.23 Vandkvalitetsparametre for Silkeborg langsø systemet.

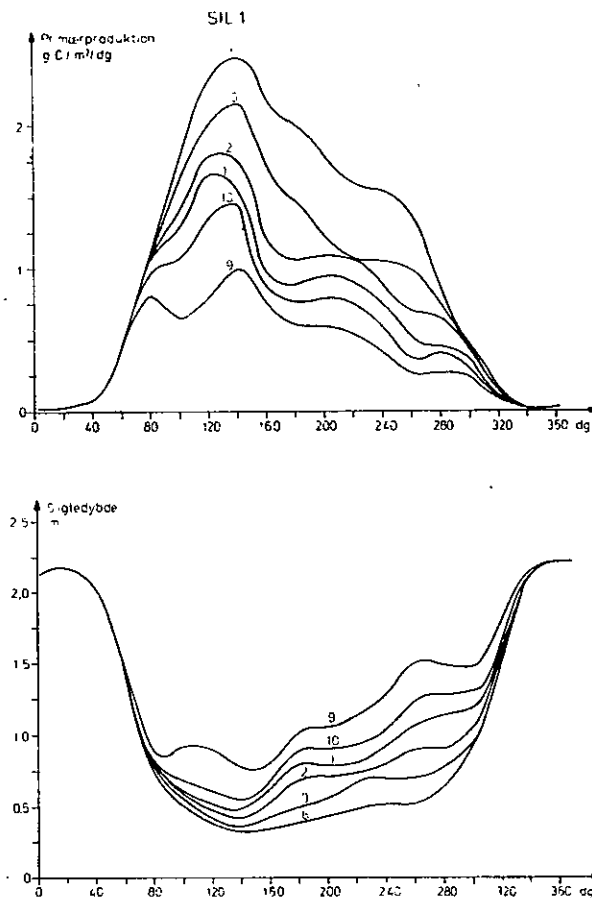
3.4.2 PROGNOSE

Resultaterne af de udførte modelsimuleringer fremgår af Figur 3.12 - 3.14 samt tabel 3.24 - 3.26.

BASSIN 1 OG 2

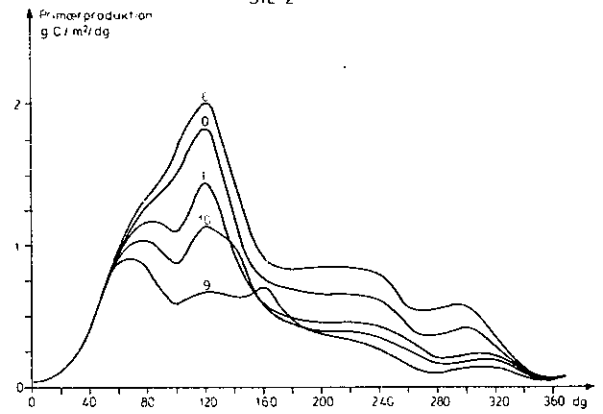
De gennemregnede alternativer svarer til de tidligere anførte 6 forskellige belastninger af Ørn sø kombineret med følgende belastninger af bassin nr. 1 udover tilførsler fra Ørn sø:

- I) intet spildevand, uændret diffust oplandsbidrag
- II) halveret spildevandstilførsel (1,6 tons P, 4,4 tons N), uændret diffust oplandsbidrag.



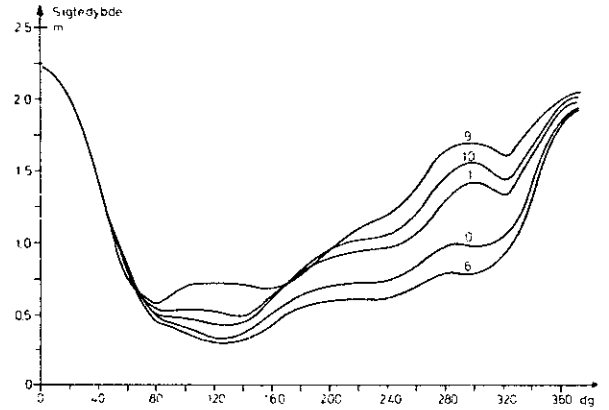
Figur 3.12 Prognoser for fremtidige primærproduktions- og sigtegybdeforhold i Silkeborg langsø (bassin 1) svarende til udvalgte belastningsalternativer (nummerering, se tabel 3.24).

SIL 2

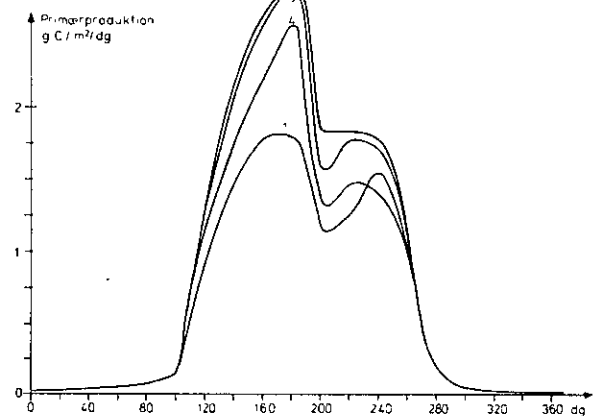


Figur 3.13

Prognoser for fremtidige primærproduktions- og sigtedybdeforhold i Silkeborg langsø (bassin 2) svarende til udvalgte belastningsalternativer (nummerering, se tabel 3.25).

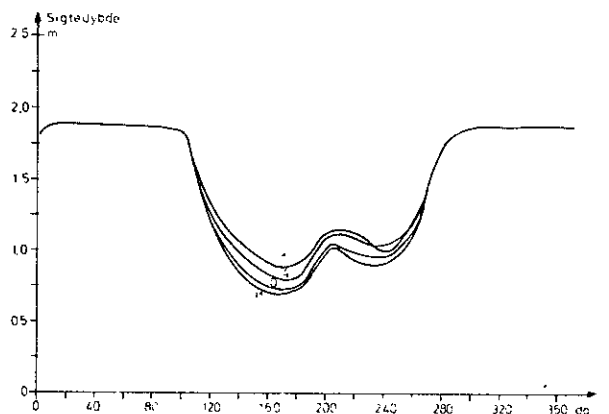


SIL 3



Figur 3.14

Prognoser for fremtidige primærproduktions- og sigtedybdeforhold i Silkeborg langsø (bassin 3) svarende til udvalgte belastningsalternativer (nummerering, se tabel 3.26).



Nr.	Massebalancer								Vandkvalitetsparametre			
	Tilførsel				Akkumulering				PP g C/m ² /år	SY _{min} m	SY ₁₂₀₋ 260 m	SY ₁₋ 365 m
	N tons	P g/m ²	N tons	P g/m ²	N tons	P g/m ²	N tons	P g/m ²				
0	63,4	138	7,6	17	12	26	2,3	5,1	322	0,37	0,54	1,08
1	47,6	104	4,9	11	8,7	19	1,6	3,4	238	0,48	0,73	1,21
2	54,3	118	5,9	13	10	22	1,9	4,0	275	0,42	0,64	1,14
3	60,6	132	6,8	15	11	25	2,1	4,6	306	0,39	0,57	1,10
4	65,7	143	8,3	18	13	27	2,5	5,5	341	0,35	0,51	1,06
5	71,9	156	9,0	20	14	30	2,8	6,0	376	0,34	0,45	1,03
6	75,9	165	9,8	21	14	31	2,9	6,4	397	0,33	0,42	1,01
7	54,6	119	4,4	9,6	9,4	21	1,3	2,9	287	0,45	0,61	1,12
8	59,0	128	6,0	13	11	23	1,8	3,9	308	0,39	0,57	1,10
9	38,8	84	1,7	3,8	5,9	13	0,6	1,2	150	0,77	1,04	1,41
10	43,2	94	3,3	7,3	7,4	16	1,1	2,3	203	0,55	0,84	1,28
11	56,9	124	5,1	11	10	22	1,5	3,3	309	0,39	0,56	1,09

Tabel 3.24

SIL 1, modelsimuleringer af indgreb.

Nr.	Massebalancer								Vandkvalitetsparametre			
	Tilførsel				Akkumulering				PP g C/m ² /år	SY _{min} m	SY ₁₂₀₋₂₆₀ m	SY ₁₋₃₆₅ m
	N tons	P g/m ²	N tons	P g/m ²	N tons	P g/m ²	N tons	P g/m ²				
0	54,2	63	5,3	6,2	12	14	1,3	1,6	241	0,33	0,58	0,94
1	42,4	50	3,5	4,1	8,9	10	0,9	1,1	186	0,42	0,74	1,08
2 *)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	52,2	61	4,7	5,5	11	13	1,2	1,4	232	0,35	0,60	0,96
4	55,9	66	5,8	6,8	12	14	1,4	1,6	247	0,32	0,57	0,93
5 *)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	63,9	75	6,8	8,0	14	16	1,7	2,0	281	0,30	0,50	0,86
7	48,3	57	3,2	3,7	9,9	12	0,9	1,0	208	0,39	0,64	1,01
8	51,2	60	4,2	5,0	11	13	1,1	1,3	226	0,37	0,61	0,97
9	36,7	43	1,4	1,6	6,8	8	0,5	0,5	135	0,68	0,91	1,24
10	39,4	46	2,4	2,8	8,1	9,5	0,7	0,8	165	0,48	0,81	1,14
11	49,9	59	3,7	4,3	10	12	1,0	1,2	218	0,38	0,62	0,99

*) Beregningerne gået i stå på grund af numeriske vanskeligheder.

Tabel 3.25

SIL 2, modelsimuleringer af indgreb.

Nr.	Massebalancer								Vandkvalitetsparametre			
	Tilførsel				Akkumulering				PP g C/m ² /år	SY _{min} m	SY ₁₂₀₋₂₆₀ m	SY ₁₋₃₆₅ m
	N		P		N		P					
tons	g/m ²	tons	g/m ²	tons	g/m ²	tons	g/m ²					
0	1090	1173	101	108	70	75	6,2	6,7	307	0,71	0,92	1,45
1	656	707	30,5	33	35	38	1,3	1,4	227	0,89	1,07	1,50
2	757	815	40,5	44	41	45	1,7	1,9	250	0,82	1,02	1,49
3	857	923	50,5	54	48	51	2,3	2,5	260	0,79	0,99	1,47
4	914	985	55,9	60	51	55	2,6	2,8	262	0,78	1,00	1,48
5	959	1034	67,1	72	56	60	3,4	3,7	284	0,74	0,96	1,46
6	1000	1082	78,3	84	61	65	4,3	4,6	289	0,72	0,94	1,45
7	1050	1131	89,4	96	66	71	5,3	5,7	305	0,74	0,93	1,45
8	1130	1222	112	121	75	81	7,2	7,7	315	0,71	0,92	1,45
9	1180	1271	123	133	80	86	8,1	8,7	315	0,71	0,91	1,44
10	1220	1319	135	145	85	91	9,1	9,8	315	0,71	0,91	1,44
11	1270	1368	145	157	90	97	10	11	316	0,71	0,91	1,44
12	831	895	75	81	54	58	4,4	4,7	286	0,71	0,93	1,45
13	701	756	42	45	83	90	1,9	2,1	299	0,77	1,00	1,45

Tabel 3.26

SIL 3, modelsimuleringer af indgreb.

De i tabel 3.24 - 3.25 anførte resultater svarer til følgende belastningskombinationer (0 svarer til den nuværende belastning):

KØRSEL NR.	BELASTNINGS- ALTERNATIV FOR ØRN SØ	BELASTNINGSLTERNATIV FOR SILKEBORG LANGSØ	
		BASSIN 1	BASSIN 2
0	0	0	0
1	1	0	0
2	2	0	0
3	3	0	0
4	4	0	0
5	5	0	0
6	6	0	0
7	0	I	0
8	0	II	0
9	1	I	0
10	1	II	0
11	4	I	0

Tabel 3.27 Ørn sø og Silkeborg langsø. Belastningskombinationer.

Af modelsimuleringerne fremgår, at man ved en vidtgående fosforfjernelse (alternativ nr. 9) kan opnå en betydelig forbedring af vandkvaliteten. Under disse forhold vil kun fosfor være begrænsende og en reduktion af kvælstoftilførslen derfor uden effekt. Iværksættes en mindre vidtgående reduktion af fosfortilførslen, har det derimod betydning også at fjerne kvælstof.

Beregningsresultaterne, svarende til alternativ nr. 6, viser, at den øgede belastning medfører en vis, men dog begrænset forværing af tilstanden i de to søafsnit.

BASSIN 3

Stoftilførslerne til bassin 3 domineres som nævnt af tilførslerne fra Gudenåen. Hertil kommer desuden et væsentligt fosforbidrag via spildevandet fra Søholt rensningsanlæg. Ved simuleringen af ændrede belastninger af Ørn sø og den øvrige del af Silkeborg langsø opnåedes kun ubetydelige ændringer af vandkvaliteten i bassin 3, og ved modelsimuleringerne af effekten af ændrede belastninger af dette bassin er derfor kun taget hensyn til mulige ændringer i stoftilførslen fra de to førstnævnte kilder. De gennemregnede alternativer svarer til følgende kombinationer af tilførsler fra de respektive kilder.

KØRSEL NR.	TILFØRSEL FRA BRASSØ SAMT BASSIN 2		DIREKTE SPILDE- VANDSTILFØRSEL		DIFFUST OPLANDS- BIDRAG	
	P	N	P	N	P	N
	tons/år	tons/år	tons/år	tons/år	tons/år	tons/år
0	56,8	834	44,7	174,2	0,4	55
1	30	600	0	0	0,4	55
2	40	700	0	0	0,4	55
3	50	800	0	0	0,4	55
4	56,8	834	0	0	0,4	55
5	56,8	834	11,2	45,0	0,4	55
6	56,8	834	22,4	90	0,4	55
7	56,8	834	33,6	135	0,4	55
8	56,8	834	65,0	220	0,4	55
9	56,8	834	67,2	265	0,4	55
10	56,8	834	78,4	310	0,4	55
11	56,8	834	89,6	355	0,4	55
12	30	600	44,7	174,2	0,4	55
13	30	600	11,2	45	0,4	55

Tabel 3.28 Silkeborg langsø, bassin 3.
Kombinationer af næringssalttilførsler.

Belastningsalternativ nr. 1 svarer til afskæring af den direkte spildevandstilførsel kombineret med en væsentlig reduktion af stoftilførslen fra Gudenåen. Modelberegningerne forudsiger en

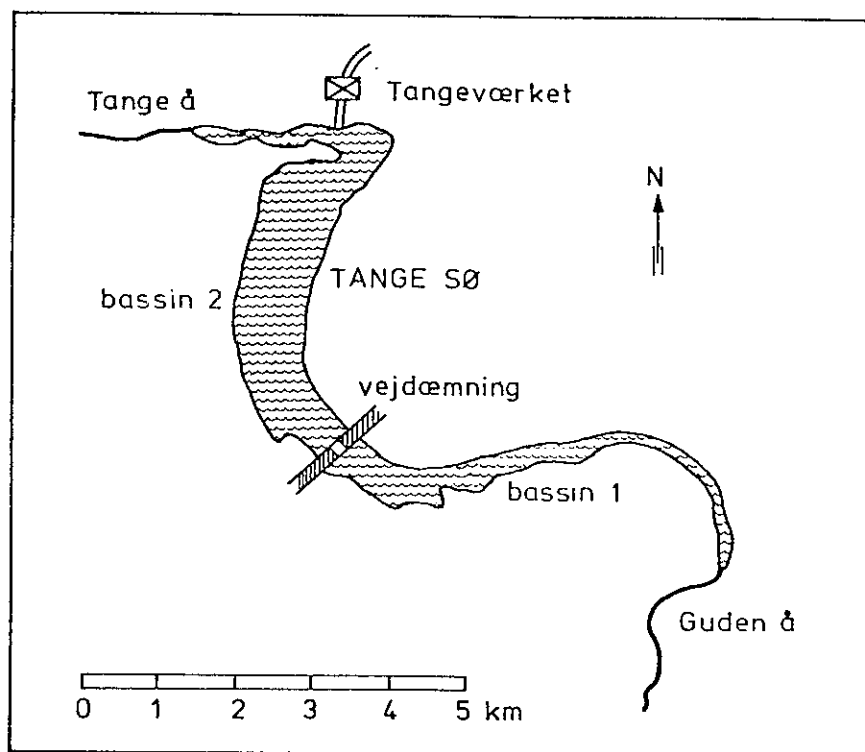
markant formindskelse af primærproduktionen (mindre produktion af organisk stof), men derimod kun en forøgelse af den gennemsnitlige sigtedybde i sommerperioden på 16 %. Under disse forhold er både fosfor og kvælstof begrænsende, men mangelen på fosfor er mest udtalt.

Mindre vidtgående reduktioner af næringssalttilførslerne, som f.eks. alternativ nr. 4, hvor kun spildevandstilførslen antages fjernet, vil ifølge modelberegningerne have en forholdsvis begrænset effekt. Simuleringer med øget næringsstofftilførsel (alternativ nr. 11) viser ingen mærkbar forværring af søens tilstand. Under belastningsforhold, svarende til alternativ nr. 11, er kun kvælstof begrænsende for algevæksten.

Det må konkluderes, at det vil være vigtigere at foretage rensningstekniske indgreb over for fosfor end over for kvælstof. Der skal imidlertid ske en ret stor reduktion af fosfortilledningen, før man opnår signifikante forbedringer af vandkvaliteten, og det vil øjensynligt kun give en mindre vandkvalitetsforbedring at indføre fosforfjernelse på Søholt renseanlæg (alternativ 4 og 5).

3.5 TANGE SØ

Figur 3.15
Tange sø



Tange sø er en kunstig sø, dannet ca. år. 1920 i forbindelse med Tangeværket's (elkraftanlæg) bygning. Søen gennemstrømmes af Gudenåen og opdeles naturligt i to bassiner i serie, adskilt af en vejdæmning. Morfometriske data og gennemsnitlig opholdstid som anvendt ved modelberegningerne fremgår af tabel 3.29.

	AREAL	MIDDEL- DYBDE	MAKSIMAL DYBDE	GENNEMSNI- TSGENNEMSNITS- OPHOLDSTID
	ha	m	m	døgn
BASSIN 1	140 *	1,50 *	5,6	1,6
BASSIN 2	484 *	3,0		9,4

* i sørapporten /12/ angives korrigerede tal, der afviger op til ca. 10 % fra de her anvendte.

Tabel 3.29 Morfometriske data og middellopholdstid for Tange sø (to separate bassiner).

Tabellerne 3.30 og 3.31 viser henholdsvis belastning og stofop-hobning samt lysekstinktionsparametre, sigtedybdeforhold og primærproduktion. Ved opgørelse af belastningen til bassin nr. 2 er ikke taget hensyn til tilførslerne fra Tange å, idet vandet herfra stort set føres videre via Gudenåen uden at blive opblandet i søbassinet.

	BASSIN 1		BASSIN 2	
	N tons/år	P tons/år	N tons/år	P tons/år
1. Direkte målt eller estimeret tilførsel	1672	104,2	1543	94
2. Spildevand og dambrug direkte til sø	0	0	9,2	3,0
3. Diffust oplandsbidrag	21,3	4,3	26	0,5
Samlet belastning	1693	108,5	1578	97,5
Ophobning	150	14,5	118	9,6

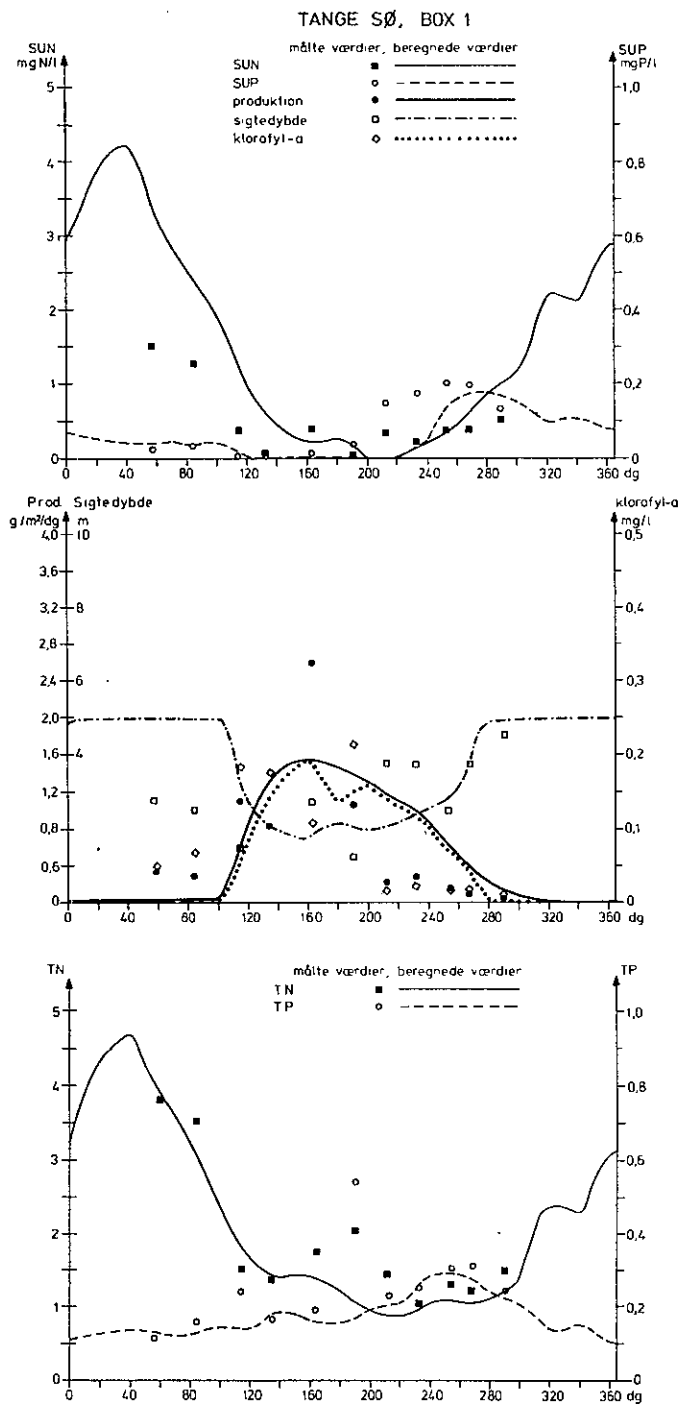
Tabel 3.30 N- og P-tilførsler samt ophobning i Tange sø (to bassiner).

	LYSEKSTINKTIONSPARAMETRE		PP Primærpro- duktion ($\text{gC/m}^2/\text{år}$)	SIGTEDYBDEPARAMETRE		
	Baggrunds- ekstinktion a (m^{-1})	Afhængighed af klorofyl- koncentrat. b ($1/\text{mg/m}$)		SY_{min} m	$\text{SY}_{120-260}$ m	SY_{1-365} m
BASSIN 1	1,14	11,2	472	0,5	1,1	1,1
BASSIN 2	1,8	8,2	437	0,5	0,95	1,0

Tabel 3.31 Lysekstinktionsparametre, primærproduktion og sigte-
dybdeforhold i Tange sø.

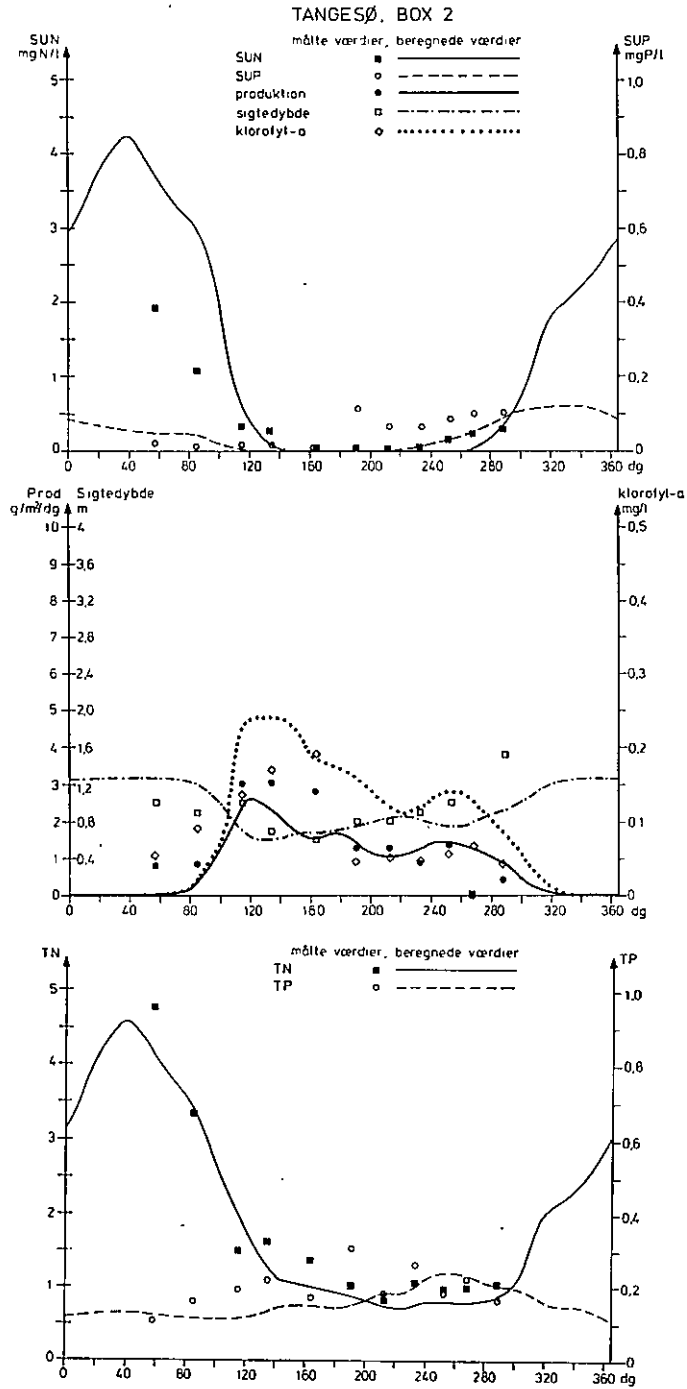
3.5.1 MODELKALIBRERING

Resultaterne af modelsimuleringerne fremgår af figur 3.16 og 3.17 samt tabel 3.32 og 3.33.



Figur 3.16

Modellsimulering af Tange sø, bassin 1.



Figur 3.17 Modellsimulering af Tange sø, bassin 2.

Med hensyn til parametervalget bemærkes, at der er anvendt forholdsvis høje værdier for algernes maksimale specifikke væksthastighed samt en lav værdi for algedecimeringsparameteren KGR. Årsagen hertil kan være, at vandmassen kun med tilnærmelse er fuldt opblandet i horisontal retning, idet et område omkring det tidligere åleje må formodes at gennemstrømmes hurtigere end den øvrige del af søen, jf. afsnit 3.2. Desuden er for bassin 1's vedkommende anvendt ret store sedimentationshastigheder for detritus-fosfor og -kvælstof. Baggrunden herfor er, at der via Gudenåen tilføres en stor mængde partikulært materiale, som sedimenterer i dette søafsnit. Af den opstillede massebalance fremgår da også, at stofakkumuleringen pr. arealenhed er meget stor i Tange sø's sydlige bassin.

Overensstemmelsen mellem målte og beregnede størrelser er generelt god, og med hensyn til total-fosfor og total-kvælstof endog særdeles god - et forhold, der må tilskrives det hurtige vandskifte. Den beregnede årlige primærproduktion i bassin 2 er dog noget mindre end den målte, hvad der til dels kan hænge sammen med, at det i modellen antages, at alger, som forlader bassin 1, tilføres bassin 2 som "detritus", jf. afsnit 2.2.6.

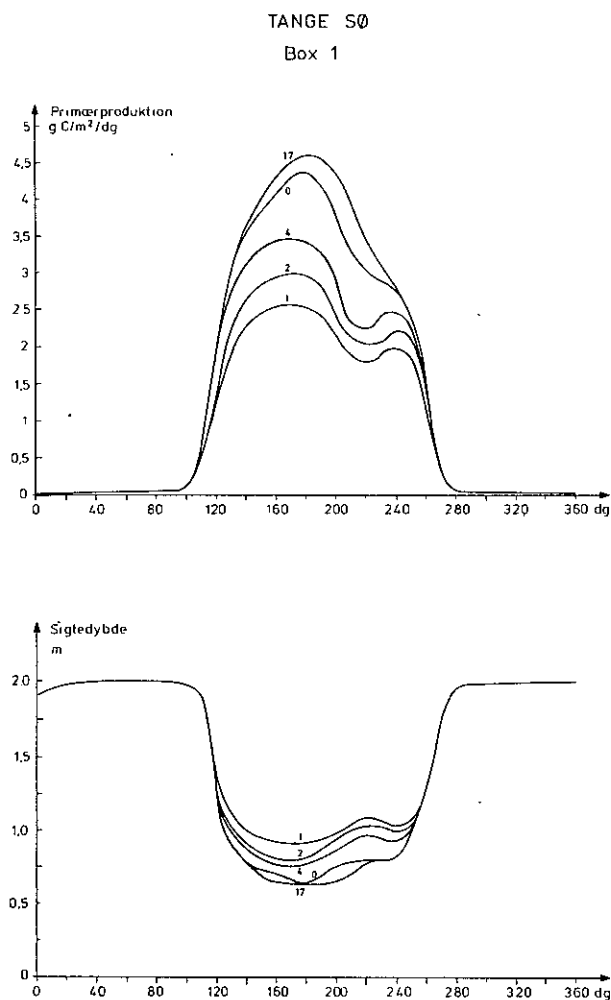
Under de aktuelle belastningsforhold er både fosfor og kvælstof begrænsende for algevæksten. I den sydlige del af søen (bassin 1) synes fosfor imidlertid at være dominerende som begrænsende faktor.

3.5.2 PROGNOSE

Resultaterne af de udførte modelsimuleringer fremgår af figur 3.18 og 3.19 samt tabel 3.34 - 3.35.

Alternativ nr. 0' svarer til en omfordeling af stoftilførslerne, således at spildevandsbidraget (som er konstant året igennem) nu antages at udgøre 46 % af de samlede fosfortilførsler og 12 % af de samlede kvælstoftilførsler. Herved skønnes opnået en mere

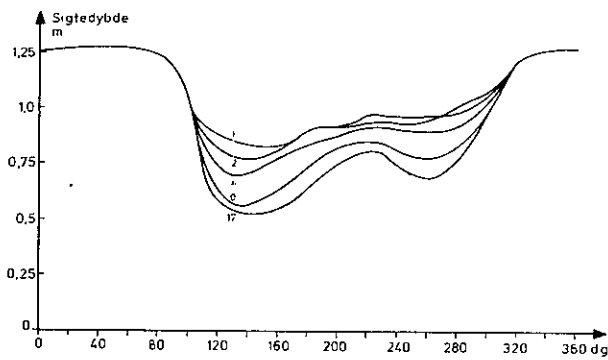
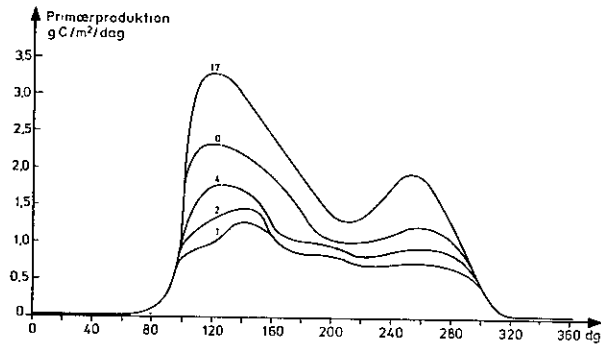
realistisk årstidsvariation for stoftilfødelingerne under ændrede belastningsforhold (jf. afsnit 2.2.7). De gennemregnede alternativer svarer til fordelinger af tilførslerne til bassin 1 mellem de respektive kilder som vist i tabel 3.36. Tilførslerne til bassin 2 antages kun ændret gennem ændringerne af tilførslerne til bassin 1.



Figur 3.18

Prognoser for fremtidige primærproduktions- og sigtedybdeforhold i Tange sø (bassin 1), svarende til udvalgte belastningsalternativer (nummerering, se tabel 3.34).

TANGE SØ
Box 2



Figur 3.19

Prognoser for fremtidige primærproduktions- og sigtedybdeforhold i Tange sø (bassin 2), svarende til udvalgte belastningsalternativer (nummerering, se tabel 3.35).

		TILFØRSEL		AKKUMULERING	
		N	P	N	P
		g/m ² /år	g/m ² /år	g/m ² /år	g/m ² /år
BASSIN 1	Modelsimulering	1202	77	111	11
	Estimeret ud fra målte tal	1209	77,5	107	10,4
BASSIN 2	Modelsimulering	327	20	25	2,4
	Estimeret ud fra målte tal	326	24	20	2,0

Tabel 3.32 Massebalancer for Tange sø (to bassiner).

		PP primær- produktion	SY _{min}	SY _{120- 260}	SY _{1- 365}
		g C/m ² /år	m	m	m
BASSIN 1	Modelsimulering	455	0,7	0,90	1,52
	Estimeret ud fra målte data	472	0,5	1,1	1,1
BASSIN 2	Modelsimulering	323	0,6	0,73	0,98
	Estimeret ud fra målte data	437	0,5	0,95	1,0

Tabel 3.33 Vandkvalitetsparametre for Tange sø.

BASSIN I.

Nr.	Massebalancer								Vandkvalitetsparametre				
	Tilførsel				Akkumulering				PP g C/m ² /år	SY _{min} m	SY ₁₂₀₋₂₆₀ m	SY ₁₋₃₆₅ m	
	N tons	P g/m ²	N tons	P g/m ²	N tons	P g/m ²	N tons	P g/m ²					
0	1680	1202	108	77	156	111	15	11	455	0,70	0,90	1,52	
0'	1680	1203	108	77	170	122	16	11	491	0,66	0,84	1,50	
1	1010	720	29,3	21	84	60	3,5	2,5	321	0,91	1,06	1,58	
2	1110	791	39,3	28	95	68	4,7	3,3	358	0,83	1,00	1,56	
3	1210	861	49,2	35	105	75	6,0	4,3	385	0,78	0,96	1,54	
4	1310	933	58,4	42	116	83	7,2	5,2	406	0,76	0,93	1,53	
5	1400	1003	58,4	42	126	90	7,2	5,2	408	0,76	0,92	1,53	
6	1500	1075	58,4	42	136	97	7,2	5,1	412	0,76	0,94	1,54	
7	1500	1075	64,2	46	137	98	8,1	5,8	421	0,74	0,95	1,54	
8	1600	1146	74,2	53	147	105	9,5	6,8	435	0,73	0,93	1,53	
9	1580	1131	83,4	59	153	109	11	8,0	466	0,69	0,87	1,51	
10	1630	1167	98,4	70	162	116	14	9,8	483	0,67	0,84	1,50	
11	1730	1238	118	85	179	128	17	12	498	0,65	0,85	1,50	
12	1780	1274	128	92	188	134	19	14	507	0,65	0,82	1,49	
13	1830	1310	138	99	197	141	21	15	516	0,64	0,83	1,49	
14	1880	1346	148	106	205	147	22	16	516	0,64	0,84	1,49	
15	1700	1217	99,2	71	165	118	14	9,8	476	0,67	0,85	1,50	
16	1850	1325	134	96	192	137	20	14	513	0,65	0,82	1,49	
17	1930	1381	158	113	214	153	24	17	529	0,63	0,81	1,48	

Tabel 3.34

Tange sø, modelsimuleringer af indgreb.

BASSIN II.

Nr.	Massebalancer								Vandkvalitetsparametre				
	Tilførsel				Akkumulering				PP g C/m ² /år	SY _{min} m	SY ₁₂₀₋₂₆₀ m	SY ₁₋₃₆₅ m	
	N tons	P g/m ²	N tons	P g/m ²	N tons	P g/m ²	N tons	P g/m ²					
0	1580	327	97,5	20	121	25	12	2,4	323	0,61	0,73	0,98	
0'	1570	324	96,7	20	136	28	12	2,5	338	0,58	0,72	0,97	
1	981	203	30,2	6,2	72	15	3,9	0,81	186	0,82	0,90	1,07	
2	1070	221	38,9	8,0	80	17	5,0	1,0	207	0,77	0,87	1,05	
3	1160	239	47,5	9,8	87	18	6,1	1,3	227	0,73	0,85	1,04	
4	1250	258	55,4	11	94	19	7,0	1,4	246	0,70	0,82	1,02	
5	1330	276	55,4	11	99	20	7,0	1,4	270	0,70	0,79	1,01	
6	1430	295	55,3	11	106	22	7,0	1,4	281	0,68	0,77	1,00	
7	1420	294	60,4	12	105	22	7,5	1,5	282	0,67	0,77	1,00	
8	1510	313	68,9	14	113	23	8,6	1,8	310	0,67	0,74	0,98	
9	1490	307	76,3	16	120	25	9,6	2,0	306	0,62	0,75	0,99	
10	1530	315	88,6	18	127	26	11	2,2	322	0,60	0,73	0,98	
11	1610	332	106	22	142	29	14	2,8	354	0,55	0,70	0,97	
12	1650	341	113	23	152	31	15	3,1	377	0,54	0,68	0,95	
13	1690	349	121	25	157	32	16	3,3	383	0,53	0,67	0,95	
14	1730	358	129	27	165	34	18	3,6	408	0,52	0,64	0,94	
15	1590	329	89,4	18	130	27	11	2,3	323	0,60	0,73	0,98	
16	1720	355	118	24	153	32	15	3,1	369	0,55	0,69	0,96	
17	1770	366	137	28	174	36	19	3,9	416	0,51	0,64	0,94	

Tabel 3.35

Tange sø, modelsimuleringer af indgreb.

Nr.	"DIREKTE INPUT"		"SPILDEVAND"		DIFFUST OPLANDSBIDRAG	
	P tons/år	N tons/år	P tons/år	N tons/år	P tons/år	N tons/år
0	104,2	1479	0	0	4,3	213
0'	54,2	1279	50	200	4,3	213
1	25	800	0	0	4,3	213
2	35	900	0	0	4,3	213
3	45	1000	0	0	4,3	213
4	54,2	1100	0	0	4,3	213
5	54,2	1200	0	0	4,3	213
6	54,2	1300	0	0	4,3	213
7	60	1300	0	0	4,3	213
8	70	1400	0	0	4,3	213
9	54,2	1279	25	100	4,3	213
10	54,2	1279	40	150	4,3	213
11	54,2	1279	60	250	4,3	213
12	54,2	1279	70	300	4,3	213
13	54,2	1279	80	350	4,3	213
14	54,2	1279	90	400	4,3	213
15	70	1400	25	100	4,3	213
16	70	1400	60	250	4,3	213
17	54,2	1279	100	450	4,3	213

Tabel 3.36 Fordeling af næringsstofftilførsler til Tange sø, bassin 1, mellem de respektive kilder.

Alternativ nr. 1 svarer til en ret vidtgående reduktion af fosforbelastningen samt en noget formindsket kvælstoftilførsel. Der opnås herved en væsentligt forbedret vandkvalitet. Både fosfor og kvælstof er begrænsende, men fosformangelen dominerer.

En forøget belastning (alternativ nr. 17) vil have forholdsvis begrænset virkning med hensyn til det sydlige bassin (bassin 1), hvorimod forholdene forværres mærkbart i det nordlige bassin (bassin 2). Her er kun fosfor begrænsende i bassin 1, medens både fosfor og kvælstof er begrænsende i bassin 2.

Man vil med hensyn til Tange sø kunne opnå større forbedringer af vandkvaliteten ved at satse på rensning for fosfor end rensning for kvælstof.

4. KONKLUSIONER

Om resultaterne af modelberegningerne kan sammenfattende konkluderes, at både fosfor og kvælstof synes at være begrænsende for algevæksten i størstedelen og de betragtede søer, idet fosfor dog må betegnes som det dominerende begrænsende næringsstof.

I en række tilfælde er fosfor begrænsende i forår og forsommer, mens kvælstof er begrænsende under den sidste del af vækstsæsonen. En årsag hertil kan være, at der i denne periode (hvor vandtemperaturen er høj) frigives store mængder fosfor fra sedimentet. Hertil kommer, at om sommeren er landbrugsafstrømningen mindre end om foråret, d.v.s. der tilføres mindre kvælstof om sommeren end i begyndelsen af vækstsæsonen.

Fosfor er imidlertid som nævnt dominerende som begrænsende næringsstof. Af denne årsag, og fordi en langt større del af fosfortilførslerne end af kvælstoftilførslerne er kontrollerbare, må det anbefales at koncentrere en eventuel fremtidig rensningsteknisk indsats om fosforfjernelse.

Modelberegningerne tyder dog på, at der i de fleste tilfælde skal ske ret vidtgående reduktioner af fosfortilførslerne, før virkeligt signifikante forbedringer opnås. Imidlertid må de forudsagte forbedringer ikke blot vurderes i forhold til søernes nuværende tilstand, men også i forhold til en forventet fremtidig tilstand med eventuel øget belastning. Anlægges en sådan vurdering, er de resultater, som kan opnås ved at gennemføre en fosforfjernelse, i flere tilfælde betydelige.

5. USIKKERHED PÅ MODELBESKRIVELSE OG PROGNOSE

Enhver vandkvalitetsmodel bygger på en række forudsætninger og forenklinger, som gør det muligt at beskrive massestrømmene i økosystemet ved hjælp af matematiske ligninger. Karakteristisk er bl.a., at der foretages en aggregering til få tilstandsvariable eller "compartments", hvorved kun forenklede træk af systemets reaktioner kan beskrives. Den her anvendte model, LAVSOE, er forholdsvis simpel, og er i sin struktur tilpasset det data-materiale, som har været tilvejebragt gennem Gudenåundersøgelsen.

Ved at konstruere en relativt simpel model opnås ved praktiske anvendelser en række fordele i forhold til mere komplicerede modeller:

1. Modellen bliver mere håndterlig og mindre arbejdskrævende at benytte.
2. Der kræves relativt få måledata.
3. Der er større sikkerhed for, at modellen indeholder de kvalitativt korrekte dynamiske sammenhænge, idet man lettere kan overskue modellen.

Til gengæld kan mere komplicerede modeller forventes at give mere detaljeret og i nogle tilfælde nøjagtigere information, samt i forskningsøjemed at bidrage til forøget indsigt.

LAVSOE-modellen har vist sig at give acceptable resultater ved simulering af en række forskellige lavvandede søer i Danmark, og det har været muligt at anvende parameterverdier inden for et forholdsvis begrænset variationsområde. Derfor er der god grund til at formode, at de prognoser, som udarbejdes ved hjælp af modellen, er kvalitativt korrekte, og at forskellige rensningsalternativer herved kan vurderes i forhold til hinanden.

Med hensyn til forudsigelserne vedrørende sigtedybder må dog påpeges, at modellen antageligt er for konservativ. Lysets dæmpning i vandet antages i modellen at være direkte proportional med klorofylkoncentrationen, og der tages ikke hensyn til, at vandets baggrundsdæmpning kan ændre sig med belastningen. De forudsagte ændringer i sigtedybden må derfor antages at være underestimerede i flere tilfælde, (se afsnit 2.2.5).

6. REFERENCER

- /1/ Vandkvalitetsinstituttet, ATV:
Recipientundersøgelse af 7 fynske søer.
Udkast til rapport, 1975.
- /2/ Nyholm, N.:
Sømodeller.
Stads- og Havneingeniøren, nr. 11, 2 - 7, 1976.
- /3/ Vandkvalitetsinstituttet, ATV, (Niels Nyholm):
En matematisk model for vækst af planktonalger.
1976.
- /4/ Nyholm, N.:
A Mathematical Model for the Growth of Phytoplankton.
International Symposium on Experimental Use of Algal
Cultures in Limnology - Sandefjord, Norway, 26 - 28
October, 1976.
- /5/ Hansen, O.B., Petersen, J.:
Solindstråling.
Individuel opgave ved Laboratoriet for Teknisk Hygiejne.
Danmarks tekniske Højskole, 1974.
- /6/ Vandkvalitetsinstituttet, ATV:
Gudenåundersøgelsen 1973 - 75, Stoftransport.
Rapport nr. 12, Gudenåudvalget, 1976.
- /7/ Gargas, E., Nielsen, C.S., Lønholdt, J.:
An Incubator Method for Estimating the Actual Daily
Planktonalgae Primary Production.
Water Res., 10, 853 - 860, 1976.

- /8/ Gargas, E., Hare. I.:
User's Manual for Estimating the Daily Phytoplankton
Production Measured in Incubator.
Contribution from the Water Quality Institute, Danish
Academy of Technical Sciences, No. 2, 1976.
- /9/ Himmelblau, D.M.:
Process Analysis by Statistical Methods.
Wiley, New York, 1970.
- /10/ Vandkvalitetsinstituttet, ATV:
Gudenåundersøgelsen 1973 - 75, Søndersøgelser.
Rapport nr. 14, Gudenåudvalget, 1976.
- /11/ Bannister, I.I.:
Production Equations in Terms of Chlorophyll Concentrat-
ions Quantum Yield and Upper Limit to Production.
Limnol. Oceanogr. 19, 1 - 12, 1974.
- /12/ Sonzogni, W.C., Uttormark, P.C., Lee, G.F.:
A Phosphorus Residence Time Model: Theory and Application.
Water Res. 10, 429 - 435, 1976.
- /13/ Vandkvalitetsinstituttet, ATV:
Gudenåundersøgelsen 1973 - 75,
Samlerapport.
Gudenåudvalget, 1976.

A P P E N D I X

SYMBOLLISTE

a	baggrundsekstinktion for vand	(m^{-1})
AB	biomassekoncentration af alger	(mg tørvægt/l)
AFGP _{LM}	maksimal fosforafgivelseshastighed fra sediment	(g P/m ² /dg)
AFGN _{LM}	maksimal kvælstofafgivelseshastighed fra sediment	(g N/m ² /dg)
b	lysdæmpningskoefficient for klorofyl-a	(l/mg/m)
C	intracellulær substratkoncentration	(mg/mg tørvægt)
CH	koncentration af klorofyl-a	(mg/l)
D	hydraulisk fortyndingshastighed	(dg ⁻¹)
DP	koncentration af detritus-fosfor	(mg/l)
DN	koncentration af detritus-kvælstof	(mg/l)
fac	korrektionsfaktor	
FD	relativ daglængde	
I	lysentensitet i spektralområdet 400 - 700 nm	(cal/m ² /dg)
I _H	lysentensitet ved begyndende lysinhibering	(cal/m ² /dg)

forts.....

SYMBOLLISTE FORTS....

I_K	mætningslysintensitet	(cal/m ² /dg)
I_O	indfaldende lysintensitet	(cal/m ² /dg)
K_A	halvmætningskonstant for alge- decimering	(mg tørvægt/l)
K_C	mætningskonstant for intra- cellulært substrat	(mg/mg tørvægt)
K_S	halvmætningskonstant for ekstra- cellulært substrat	(mg/l)
KDN	hastighedskonstant for nedbryd- ning af detritus-kvælstof	(dg ⁻¹)
KDP	hastighedskonstant for nedbryd- ning af detritus-fosfor	(dg ⁻¹)
KGR	hastighedskonstant i udtryk for algedecimering	(mg/dg)
KSA	1. ordens sedimentationskonstant for alger	(dg ⁻¹)
KSEDDN	sedimentationskonstant for detri- tus-kvælstof	(dg ⁻¹)
KSEDDP	sedimentationskonstant for detri- tus-fosfor	(dg ⁻¹)
k	hastighedskonstant for substrat- optagelse	(l/mg tørvægt/dg)
Q_{10}	faktor, hvormed en reaktionshastig- hed forøges med en temperaturstig- ning på 10°C	

forts.....

SYMBOLLISTE FORTS....

r	reaktionshastighed	(g/m ³ /dg)
S	ekstracellulær substratkoncentration	(mg/l)
S _i	intracellulær substratkoncentration pr. volumenenhed vand	(mg/l)
SUN	koncentration af opløst, uorganisk kvælstof	(mg/l)
SUP	koncentration af opløst, uorganisk fosfor	(mg/l)
SY	sigtedybde	(m)
SY ₁₂₀₋₂₆₀	"sommer-sigtedybde" (gennemsnitsværdi for perioden dag nr. 120 - dag nr. 260)	(m)
t	tid	(dg)
T	temperatur	(°C)
TN	koncentration af total-kvælstof	(mg/l)
TP	koncentration af total-fosfor	(mg/l)
V 11	forhold mellem hastighed for fri- givelse af fosfor fra sediment og fosfersedimentation	
V 15	forhold mellem hastighed for fri- givelse af kvælstof fra sediment og kvælstofsedimentation	
VC	forhold mellem kulstof og tørvægt i alger	
VM	brøkdelen af decimerede alger som antages straks at mineraliseres.	

GRÆSKE BOGSTAVER

β	omregningsfaktor fra total lysindstråling til intensitet af fotosyntetisk aktivt lys	
ϵ	ekstinktionskoefficient	(m^{-1})
θ	temperaturkoefficient	
μ	specifik væksthastighed	(dg^{-1})
ϕ	forhold mellem tørstof og klorofyl-a	

INDICERING

a	absolut behov, svarende til væksthastigheden nul
i	intracellulær
l	begrænsende forhold
N	nitrogen
m	maksimal
max	maksimal resp., svarende til ikke begrænsende forhold
P	fosfor
s	mætning

SØNAVNSFORKORTELSER

SØNAVN, FORKORTET:SØNAVN:

ALM	Almind sø
BRS	Brassø
GUS	Guden sø
HLD	Hald sø
HNG	Hinge sø
JUL	Jul sø
NRS	Viborg Nørre sø
SAL	Salten langsø
SIL	Silkeborg langsø
SLA	Slåen sø
SRS	Viborg Sønder sø
TAN	Tange sø
THO	Thor sø
VED	Vedsø
VES	Vessø
ØRS	Ørn sø

A.1 PARAMETERVÆRDIER

De anvendte parameterverdier ved modelberegningerne er anført i tabel A.1.1 og tabel A.1.2.

Symbolernes betydning fremgår af symbollisten, p. A10 .

SYMBOL	ENHED	VÆRDI	TEMPERATUR- KOEFFICIENT
a	m ⁻¹	1,0	
AFGPLM	g P/m ² /dg	0,1	1,07
AFGNLM	g N/m ² /dg	0,5	1,07
b	m ⁻¹ (mg/l)	17	
C _{N,a}	µg N/mg tørvægt	40	
C _{N,max}	µg N/mg tørvægt	100	
C _{P,a}	µg P/mg tørvægt	1,46	
C _{P,max}	µg P/mg tørvægt	20	
fac		1,33	
K _A	mg tørvægt/l	4	
K _P	µg P/mg tørvægt	3,0	
KDN	dg ⁻¹	0,01	
KDP	dg ⁻¹	0,1	1,14
KGR	mg tørvægt/dg	0,6	1,07
		3,0	
KSA	dg ⁻¹	0,05	
KSEDDN	dg ⁻¹	0,03	
KSEDDP	dg ⁻¹	0,03	

fortsættes.....

Tabel A.1.1 (tekst - se næste side)

tabel A.1.1 fortsat.....

SYMBOL	ENHED	VÆRDI	TEMPERATUR- KOEFFICIENT
k_P	l/mg tørstof/dg	5	
k_N	l/mg tørstof/dg	4	
V 11		1,2	1,14
V 15		1,0	1,14
VC		0,6	
VM		0,6	
v_A	m/dg	0,20	
β		0,41	
μ_{max}		1,5	1,05
φ		42	

Tabel A.1.1: Standardværdier for parametrene i LAVSOE-modellen (se symbollisten). Temperaturafhængigheden for hastighedskonstanter beskrives ved udtrykket:

$$k(T) = k(20) \cdot \theta^{(T - 20)},$$

hvor θ er temperaturkoefficienten.

Referencetemperaturen for samtlige hastighedskonstanter er: 20°C.

PARAMETER	SALTEN	BRAS	ØRN	SILKEBORG LANGSØ			TANGE SØ	
	LANGSØ	SØ	SØ	box 1	box 2	box 3	box 1	box 2
μ_{\max} (dg ⁻¹)	1,2	1,8	1,5	1,7	2,2	2,4	2,1	2,2
V 11	1,7	1,2	1,5	1,2	1,5	1,5	1,0	1,3
V 15	1,8	1,0	1,0	1,0	1,2	1,0	1,0	1,0
V 16	1,8	1,0	1,0	1,0	1,2	1,0	1,0	1,0
KGR (mg/dg)	0,6	0,1	0,6	0,6	0,1	0,1	0,1	0,1
KSEDDN (dg ⁻¹)	0,01	0,015	0,1	0,15	0,01	0,15	0,6	0,06
KSEDDP (dg ⁻¹)	0,01	0 015	0,03	0,10	0,01	0,10	0,3	0,03

Tabel A.1.2: Parameterværdier som varierer fra sø til sø.

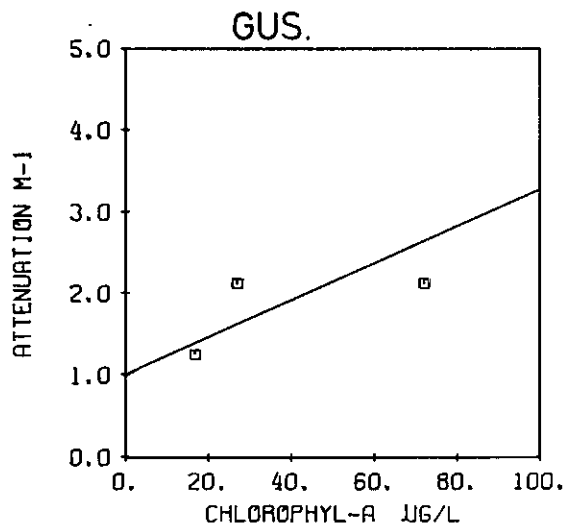
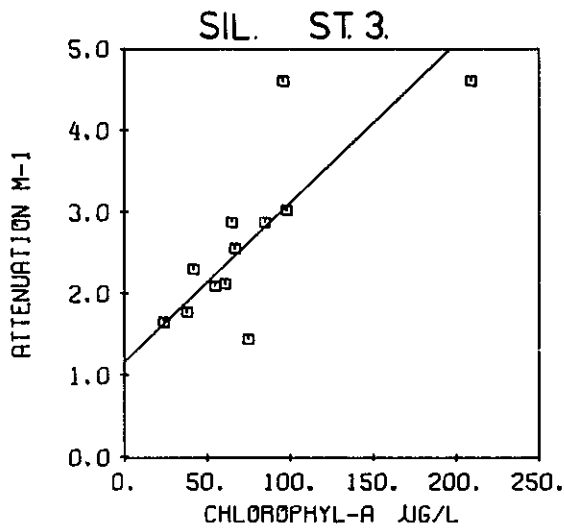
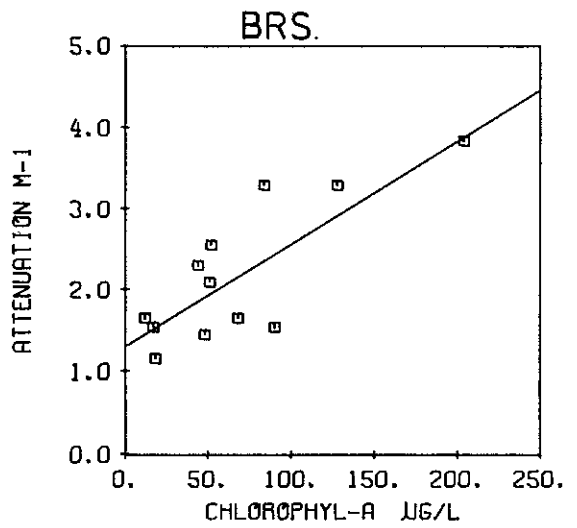
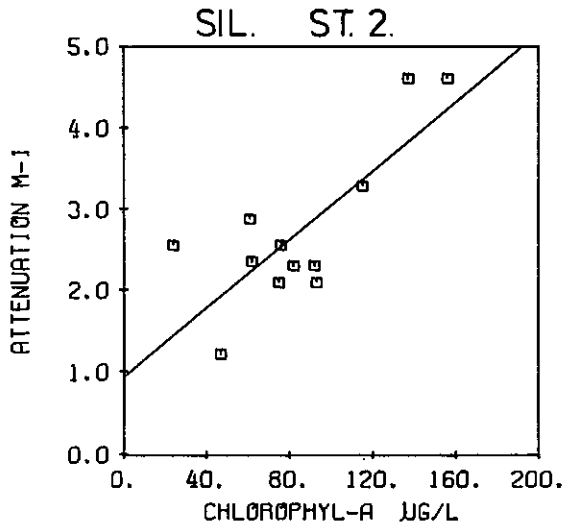
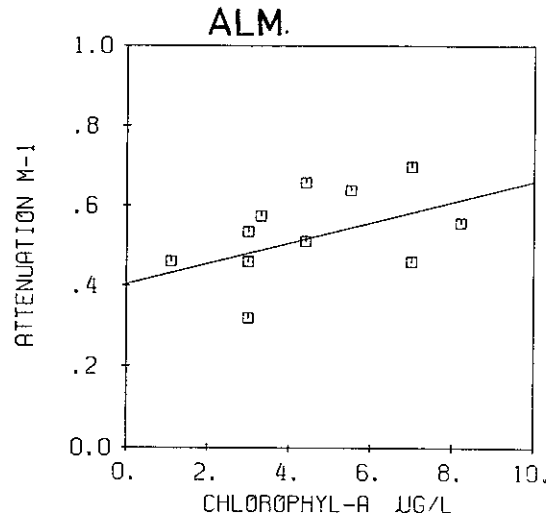
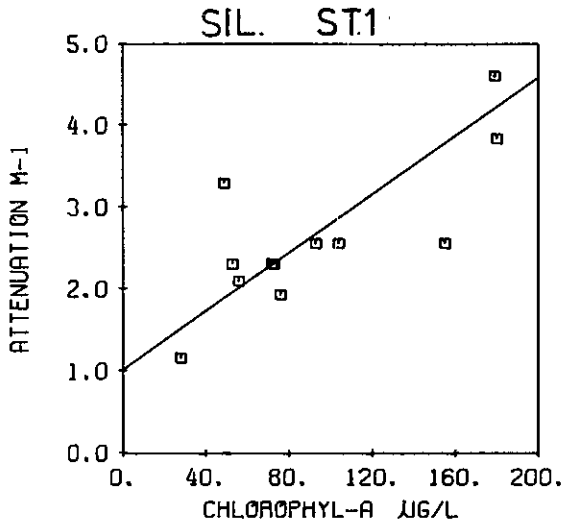
DAGNUMMER	I_K (cal/m ² /dg) · 10 ⁻⁵
58	5,9
85	5,6
115	7,8
134	9,2
163	10,2
191	9,8
212	10,9
233	11,7
253	9,5
267	10,4
288	8,1

Tabel A.1.3: Gennemsnitsværdier for I_K -parameteren, svarende til spektralområdet 400 - 700 nm.

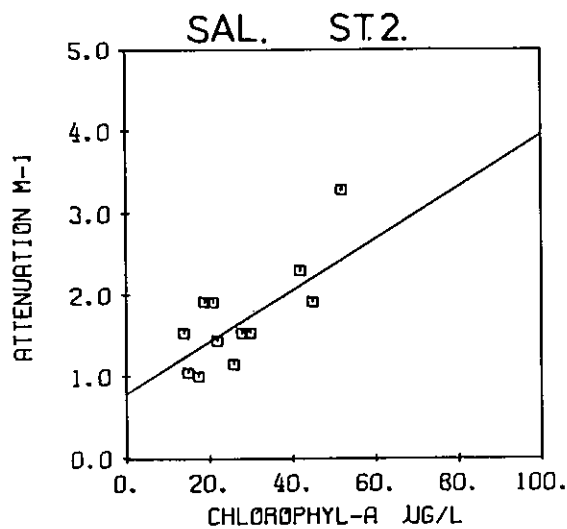
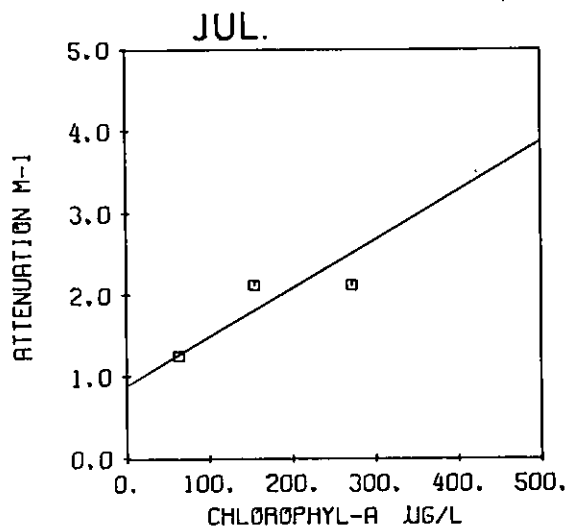
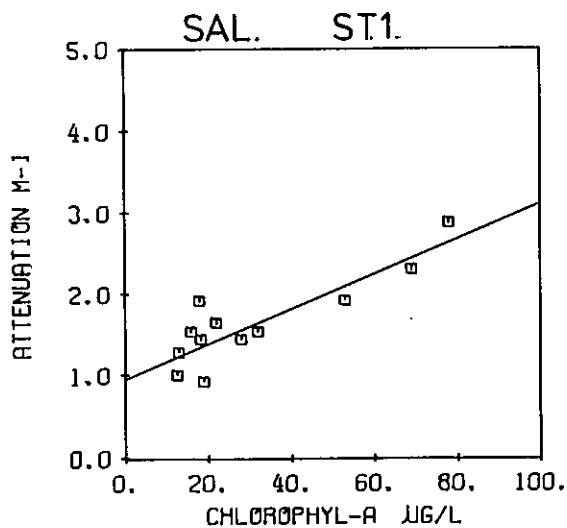
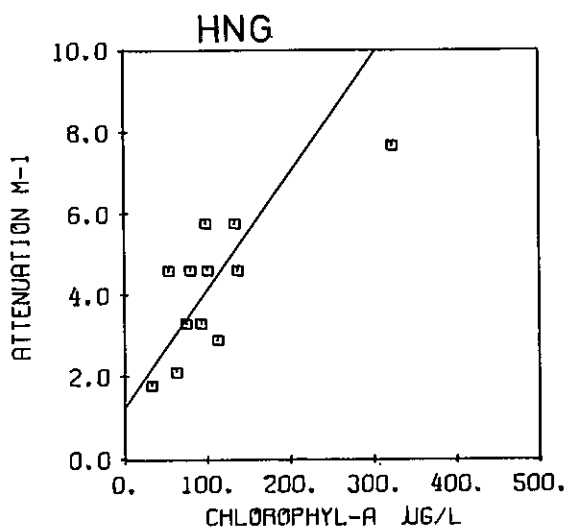
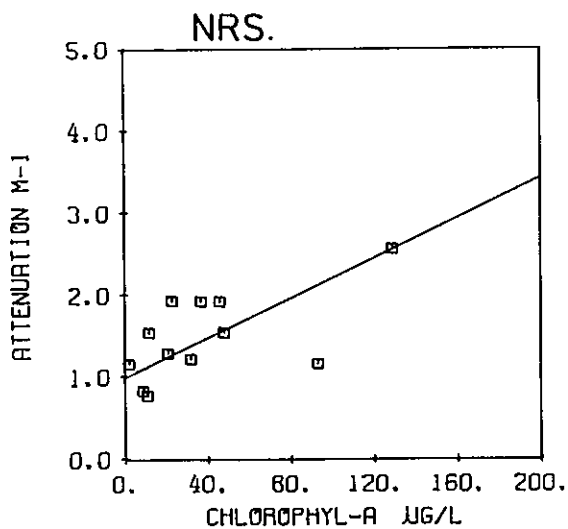
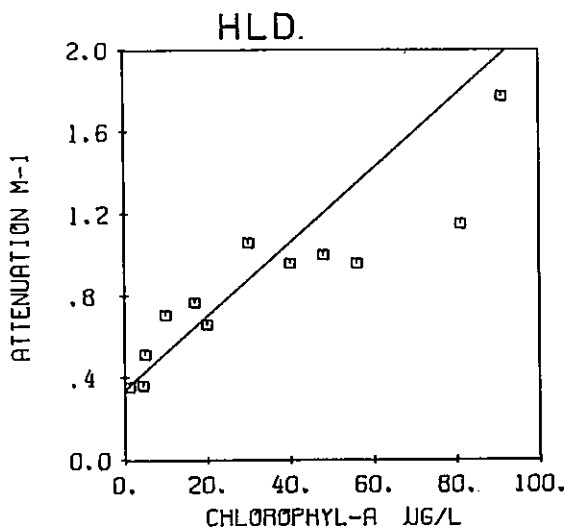
SØNAVN, FORKORTET	AFSKÆRING a (m ⁻¹)	HÆLDNING b (m ⁻¹ ·mg ⁻¹ ·l)	ANTAL MÅLEPUNKTER
ALM	0,404±0,065	2,6±17	11
BRS	1,30 ±0,15	12,7± 4,9	12
GUS	1,02 ±0,64	23 ±26	3
HLD	0,343±0,022	18,0± 3,4	12
HNG	1,24 ±0,65	28,9± 8,9	12
JUL	0,89 ±0,28	6,0± 2,8	3
NRS	0,99 ±0,12	12,2± 8,2	12
SIL st. 1	1,02 ±0,37	17,8± 6,0	12
SIL st. 2 *	0,94 ±0,50	21,1± 5,3	12
SIL st. 3	1,17 ±0,26	19,5± 5,0	12
SAL st. 1	0,96 ±0,19	21,6± 9,2	12
SAL st. 2	0,80 ±0,30	32 ±13	12
SAL st. 3	1,10 ±0,57	13 ±26	4
SLA	0,36 ±0,47	36 ±19	12
SRS	1,86 ±0,25	10 ± 8	12
TAN st. 1	1,14 ±0,07	11,2± 2,9	12
TAN st. 2	1,77 ±0,58	8,2± 9,5	12
THO	0,77 ±0,16	20 ±12	12
VED	1,14 ±0,21	18,7± 6,3	12
VES	1,15 ±0,23	14,2±10,7	10
ØRS	0,92 ±0,14	18,0± 4,4	12

* simpel, uvægtet regression

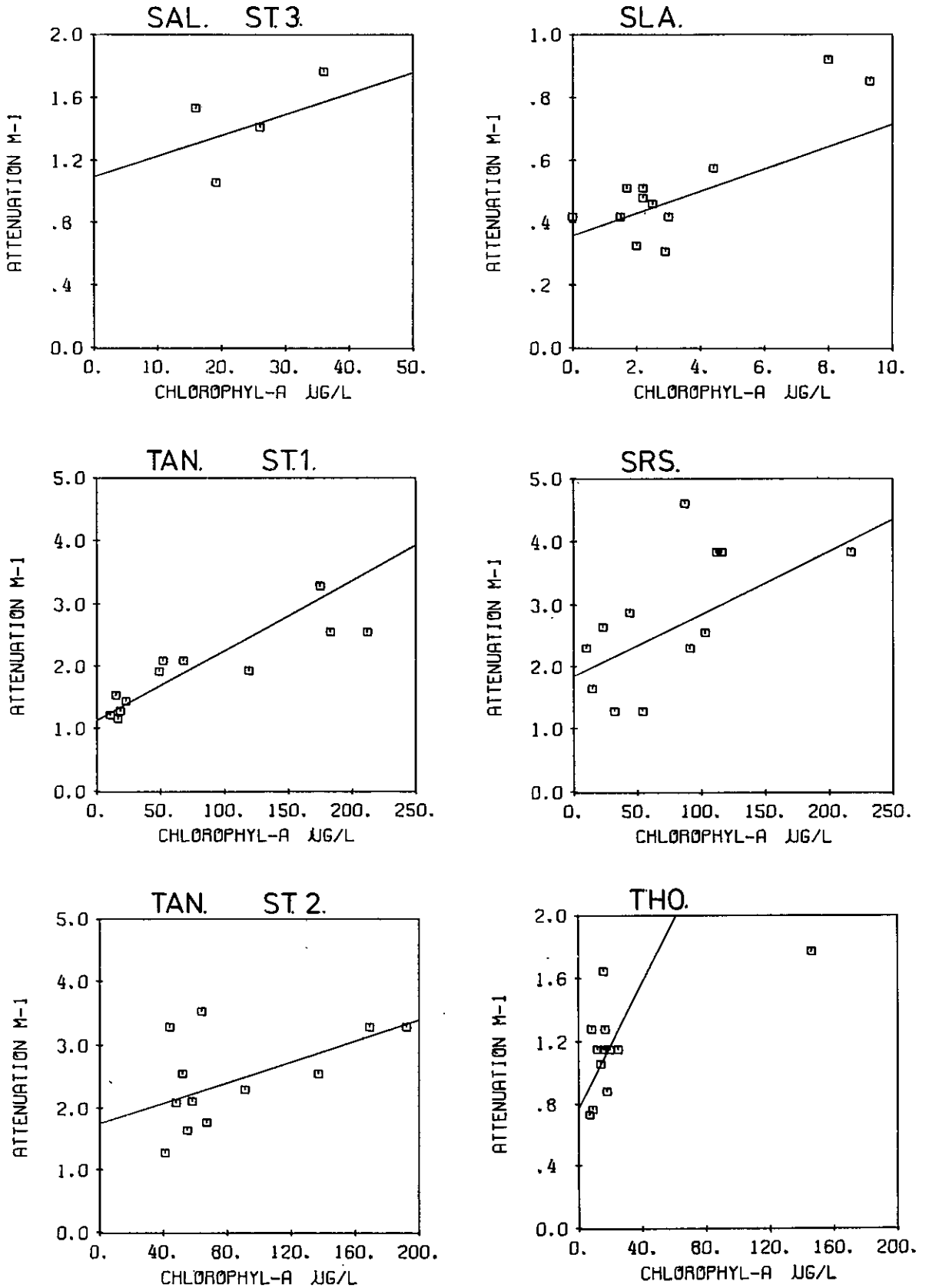
Tabel A 1.4: Vægtet regressionsanalyse af ekstinktionskoefficient mod klorofylkoncentration.



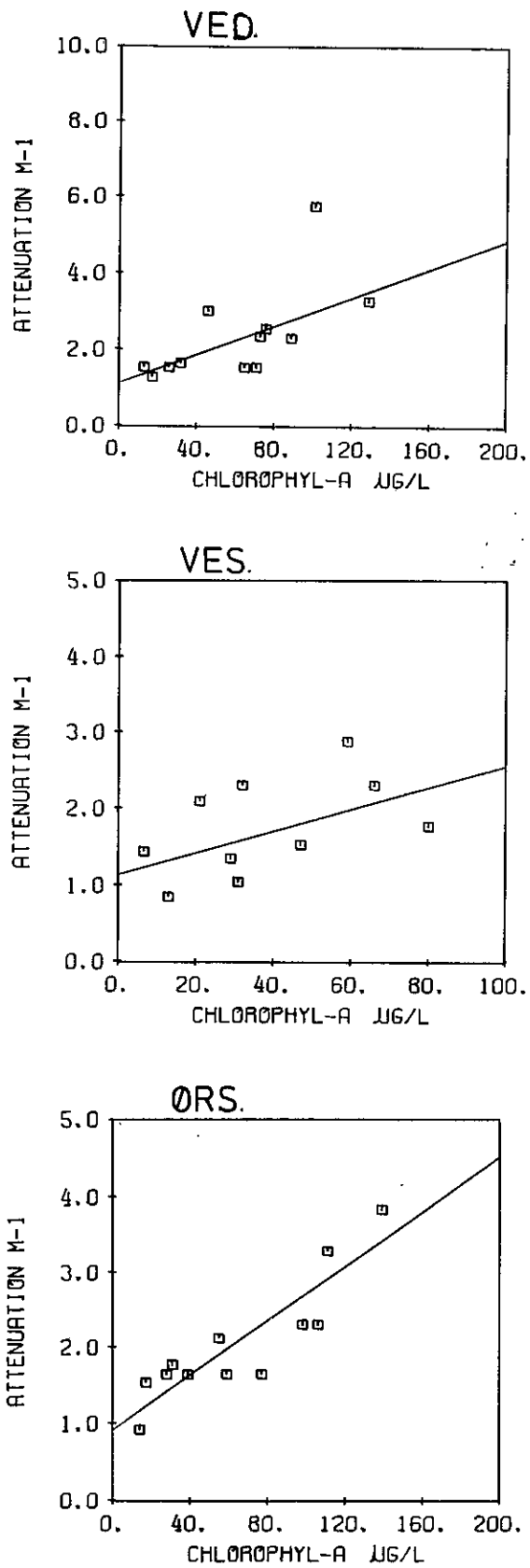
Figur A.1.1: Ekstinktionskoefficient vs. klorofyl-a koncentration.



Figur A.1.1 forts.: Ekstinktionskoefficient vs. klorofyl-a koncentration.



Figur A.1.1 forts.: Ekstinktionskoefficient vs. klorofyl-a koncentration.



Figur A.1.1 forts.: Ekstinktionskoefficient vs. klorofyl-a koncentration.