



ES

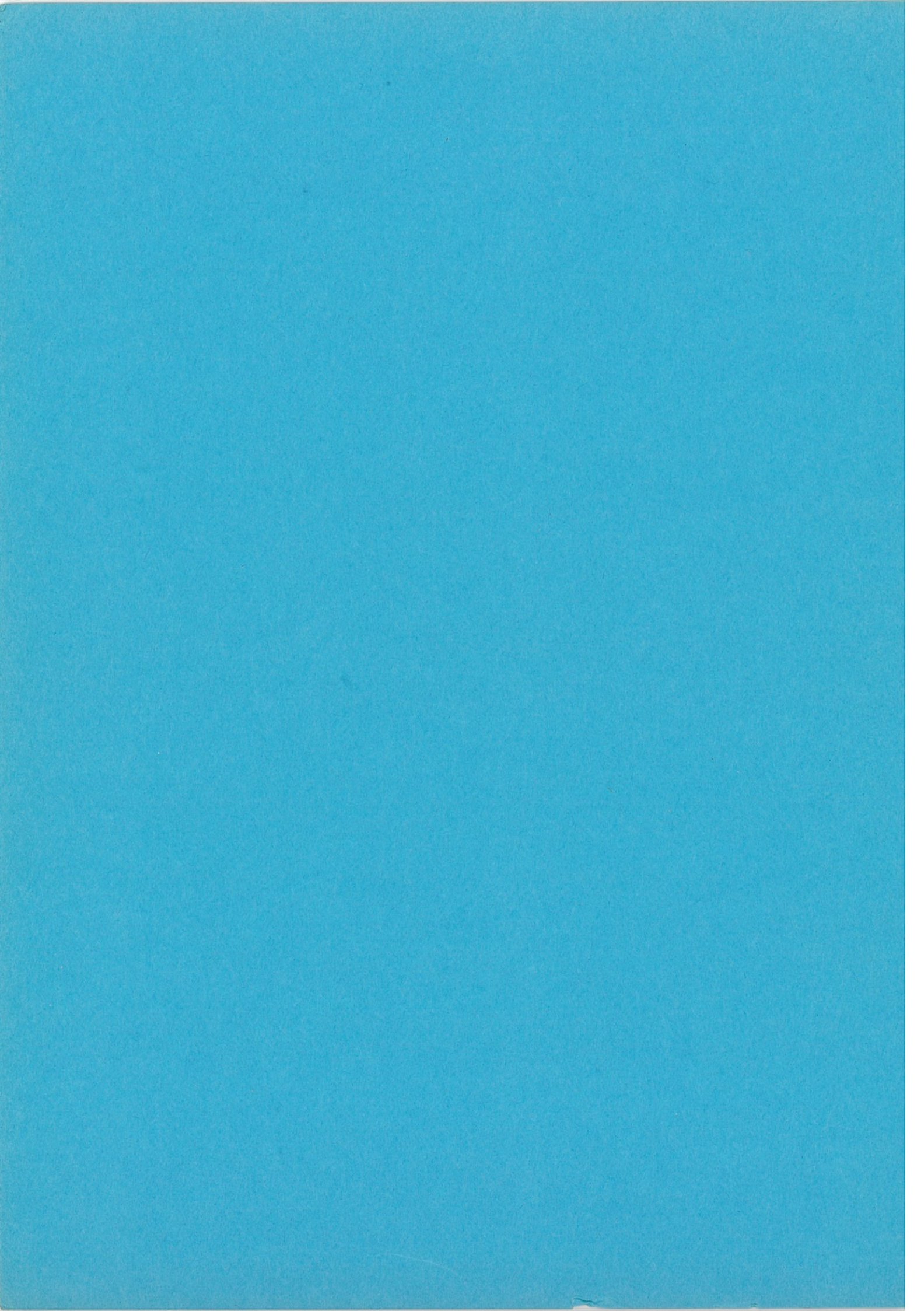
ARBEJDSDOKUMENT

RECIPIENTKVALITETSPLANLÆGNING I HOVEDSTADSREGIONEN

FURESØEN 1900-2020



HOVEDDEL



RETTELSESBLAD TIL "FURESØEN 1900 - 2020" HOVEDDEL. ARBEJDSDOKUMENT,
UDARBEJDET FOR HOVEDSTADSRÅDET AF VANDKVALITETSINSTITUTTET I 1985.

Indholdsfortegnelse:

- 4.4.2 Reduktion af regnvandsbelastning samt etablering af sandfiltrering på Stavnsholt Renseanlæg, situation i 1995.
- 4.4.4 Reduktion af regnvandsbelastning samt etablering af sandfiltrering på Stavnsholt Renseanlæg, situation i 2020

side V: 4. afsnit:

Ifølge modelberegningerne reduceres fosforkoncentrationen i Furesøen i 2020 knap til halvdelen af den koncentration, der opnås ved den nuværende belastning, hvis begge rensningstekniske indgreb realiseres.

side 3: Tabel 1.1:

	Opmålt	VS-kote m DNN	Overflade areal 10^6 m^2	Volumen 10^6 m^3	Max dybde m	Middel dybde m	Direkte opl. til søerne	Opland til afløb km^2
Storsøen (vest)	1917		7,24	114,90	36,9	15,9		
Furesøen	kontrol- leret	20,3					31,7	81,0
Storekalv	1976		1,97	4,96	4,9	2,5		

RETTELSESBLAD TIL "FURESØEN 1900 - 2020" HOVEDDEL, fortsat

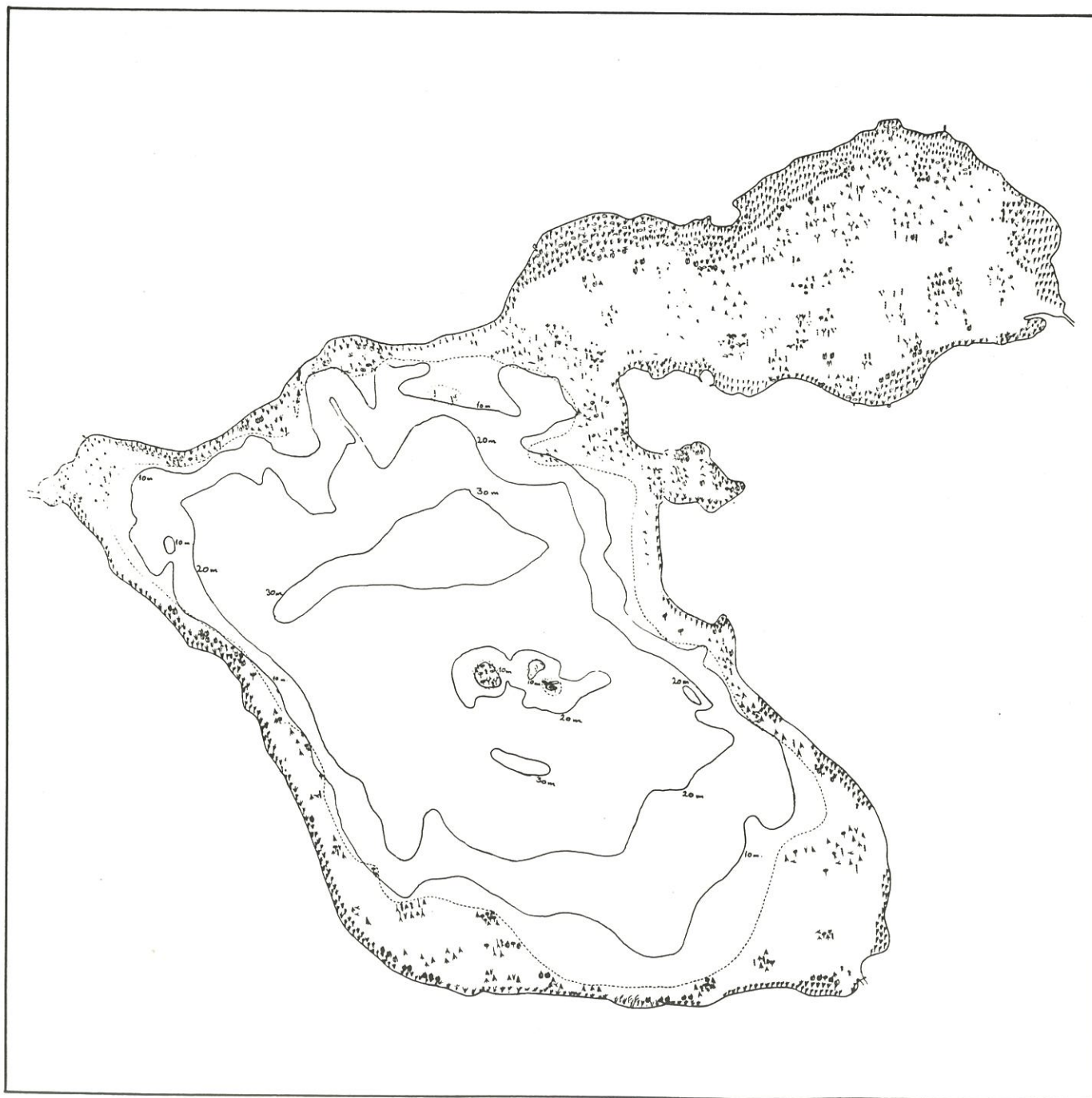
- Side 21 : sidste sætning:
Koncentrationen i 1990 beregnes således til at ville svare til koncentrationen, der forekom omkring 1964 og i 2020 at svare til koncentrationen, der forekom omkring 1961.
- Side 22: 5 linjer fra neden:
niveau (~ 0,2 mg P/l) som i 1965-66.
- Side 23: 8 linjer fra oven:
svarende til situationen i 1964 (~ 0,13 mg P/l)
10 linjer fra oven:
omkring 1961 (~ 0,065 mg P/l)
- Side 39: 2. linje:
faktorer).
- Side 86: Nederst tilføjes:
I : 1969
II : 1978
III : 1983
IV : 1995 uden indgreb
V : 2020 uden indgreb
VI : 1995 med afskæring af regnbelastning
VII : 2020 med afskæring af regnbelastning
VIII: 1995 med afskæring af regnbelastning samt reduktion af fosforbelastning for Stavnsholt Rensningsanlæg
IX : 2020 med afskæring af regnbelastning samt reduktion af fosforbelastning for Stavnsholt Rensningsanlæg
X :1995 med tilledning af spildevandet fra Stavnsholt Rensningsanlæg til modellens bundboks.
- Side 95: Overskrift afsnit 4.4.2 rettes til
- Side 97: Overskrift afsnit 4.4.4:
1995 ændres til 2020

Arbejdsdokument
FURESØEN 1900-2020
HOVEDDEL





FURESØEN 1900-2020



HOVEDDEL

Arbejdsdokument

ÆNDRINGER I FURESØENS TILSTAND I PERIODEN 1900-2020

FORORD

Hovedstadsrådet er ifølge miljøbeskyttelsesloven recipientansvarlig myndighed i hovedstadsregionen, hvilket bl.a. indebærer, at Hovedstadsrådet skal udarbejde recipientkvalitetsplaner.

I denne undersøgelse er ændringerne i Furesøens tilstand i perioden 1900-1984 sammenholdt med ændringerne i søens belastning med spildevand.

I 1976-1978 gennemførte Hovedstadsrådet en større recipientundersøgelse af Mølleå-systemet.

I forbindelse med undersøgelserne blev der opstillet dynamiske (årsvariations) matematiske modeller for tilstanden i en række af søerne i Mølleå-systemet. Disse modeller blev imidlertid ikke kalibreret (tilpasset), da resultaterne af det efterfølgende regnafstrømningsprojekt endnu ikke forelå.

Den tidligere opstillede dynamiske model for Furesøen er kalibreret. Desuden er der opstillet og kalibreret en "simpel" model (årgennemsnitsmodel) for indholdet af fosfor i Furesøen. Den simple model er anvendt til at vurdere de ændringer i Furesøens tilstand, som man kan forvente på baggrund af den reduktion i belastningen, der fandt sted ved afskæringen af spildevandet fra Bistrup og Dronninggård renseanlæg i 1975-76 og indførelse af fosforfjernelse ved Stavnsholt renseanlæg. Desuden er effekten på Furesøens tilstand af yderligere rensetekniske foranstaltninger beregnet ved den simple og den dynamiske model for søen.

Nærværende arbejdsdokument er udarbejdet med konsulentbistand fra Vandkvalitetsinstituttet (ATV). Rapporten er et optryk af Vandkvalitetsinstituttets rapport til Hovedstadsrådet.

Juni 1985

Forsiden viser undervandsvegetationens (rankegrødens) udbredelse i 1911.

VANDKVALITETSINSTITUTTET ATV

RAPPORT TIL:

H O V E D S T A D S R Å D E T

vedrørende

F U R E S Ø E N

1900 - 2020

KONSULENTER:

*Lic.scient. Kirsten Olrik
Cand.scient. Jesper Ansbæk*

VKI-SAGSBEHANDLERE:

*Civ.ing. Erik Aagaard Hansen
Cand.scient. Jørgen Krogsgaard Jensen*

VKI-SAG: 62.475

VKI-DATO: 1985-06-13 /DS-WF-WWT



VKI · VAND ·
KVALITETS ·
INSTITUTTET

AGERN ALLE 11 · DK-2970 HØRSHOLM
SARALYST ALLE 52 · DK-8270 HØJBJERG

☎ *02-86 52 11

☎ *06-27 42 11

I N D H O L D S F O R T E G N E L S E

0.	RESUME	I
1.	BESKRIVELSE AF FURESØEN.	1
2.	UDVIKLINGEN 1900-2020.	5
2.1.	Belastning og afstrømning.	5
2.1.1.	Ændringer 1900-1984.	5
2.1.2.	Fremtidig belastning 1985-2020	14
2.1.3.	Afstrømning.	15
2.2.	Fosforkoncentration.	17
2.3.	Kvælstofkoncentrationen.	23
2.4.	Kvælstof/fosfor forhold.	29
2.5.	Ilt.	32
2.6.	Algemængde og sigtdybde.	34
2.7.	Planteplankton (Sammensætning og begrænsende faktorer).	39
2.8.	Rankegrøden.	55
3.	MODELBEKRIVELSE	62
3.1.	Stofbalancemodel for fosfor.	63
3.1.1.	Modelstruktur.	63
3.1.2.	Kalibrering og beskrivelse af 1900-2020.	65
3.1.3.	Modelusikkerhed.	67
3.1.4.	Sedimentets rolle.	68
3.2.	Eutrofieringsmodel	70
3.2.1.	Modelstruktur.	71
3.2.2.	Kalibrering af model	74
4.	ALTERNATIVE BELASTNINGER/INDGREB	76
4.1.	Belastningsbidrag.	77
4.2.	Stofbalancemodel	78
4.2.1.	Effekt af alternative belastninger (alt. B og C)	78
4.2.2.	Nitrattilførsel til bundvandet	80
4.2.3.	Afledning af bundvand.	85
4.3.	Eutrofieringsmodel 1990-2020	86
4.4.	Planteplanktonets udvikling, 1984 - 2020	93
4.4.1.	Uændret belastning år 1995	94
4.4.2.	Reduktion af regnvandsbelastning samt etablering af	95
4.4.3.	Uændret belastning år 2020	96
4.4.4.	Reduktion af regnvandsbelastning på Stavnsholt	97

0. RESUME

Furesøen dækker et areal på 9 km² og er dermed Danmarks fjerdestørste sø, og med dybder ned til 36 meter er den Danmarks dybeste sø.

Furesøens rekreative betydning er stor. Det skyldes dels placeringen i nærheden af København, dels dens størrelse, dels dens smukke omgivelser og endelig søens rige dyre- og planteliv.

Der er også betydelige videnskabelige interesser knyttet til Furesøen. Ferskvandsbiologen C. Wesenberg-Lund (1867-1955) udførte her sine første undersøgelser og grundlagde det første ferskvandsbiologiske laboratorium ved dens bred lidt nord for Frederiksdal. Ingen anden dansk søs dyre- og planteliv er så tidligt blevet undersøgt så grundigt, som netop Furesøens.

Furesøen var oprindeligt en forholdsvis næringsrig men dog klarvandet sø. De ferskvandsbiologiske interesser omfattede i søens naturtilstand især en ualmindelig artsrig og udbredt plantevækst af undervandsplanter samt tre krebsdyrarter, der har overlevet i søen, som relikter fra istiden.

Det klare vand, den udbredte plantevækst og den dermed sammenhængende fiskerigdom har også hørt til blandt de meget væsentlige rekreative kvaliteter i Furesøen.

Søens tilstand er i dag meget stærkt forringet i forhold til den tilstand, som blev registreret ved undersøgelserne omkring århundredskiftet. Forringelsen skyldes spildevandsudledninger.

Spildevandsudledningerne startede ved århundredskiftet, da der blev indført vandskyllende klosetter.

Op gennem 20'erne og 30'erne skete der en mindre udbygning og kloakering af stadig større dele af oplandet. Hermed skete en mangedobling af belastningen af Furesøen med fosfor- og kvælstofholdige næringssalte.

Den helt store stigning i belastningen, især med fosfor, som begrænsede Furesøens planteproduktion, fandt dog sted i perioden fra 1950 til 1970, hvor fosforbelastningen blev femdoblet fra ca. 6 til ca. 30 tons pr. år.

Den øgede fosforbelastning skyldes dels en fordobling af indbyggertallet i oplandet, dels indførelsen af fosfatholdige vaskemidler, og endelig, at spildevandet fra Farum kommune blev overført til Stavnsholt renseanlæg, der udleder til Furesøen.

I midten af 70'erne blev den direkte spildevandsbelastning af Furesøen stærkt begrænset. Spildevandet fra Bistrup og Dronninggård renseanlæg blev afskåret, mens der blev indført fosforfjernelse på Stavnsholt renseanlæg. Dermed blev fosforbelastningen reduceret fra ca. 30 tons til ca. 2 tons, heraf 1 tons fra regnvandsudledninger. Udledningen i 1976 svarede herefter til belastningen ca. 1915.

Med den stigende belastning i perioden fra 1960 til 1974 fulgte et stigende næringssaltindhold i søens vandmasse. Op til slutningen af 50'erne var stigningen i søens fosforindhold forholdsvis beskedent ifølge de få målinger, der er foretaget.

Fra begyndelsen af 60'erne til midten af 70'erne skete der en markant forøgelse af vandets indhold af fosfor, således at fosfor ikke længere begrænsede planteplanktonets produktion, men i stedet blev kvælstofbegrænsende. Efter afskæringen af spildevandet i midten af 70'erne til 1984 faldt søvandets fosforindhold med 2/3.

Faldet i Furesøens indhold af fosfor gik ikke så hurtigt som reduktionen i belastningen. Dette skyldes dels, at vandets opholdstid i Furesøen er ca. 15 år, dels at der er ophobet fosfor i sedimentet, som nu gradvis frigives, samt at afstrømningen fra Furesøen nu er reduceret i forhold til tidligere. Fosforindholdet er dog faldet så meget i 1984, at fosfor igen er med til at begrænse planktonalgernes produktion.

I takt med forøgelsen af søvandets indhold af plantenæringstoffer skete der en forskydning i mængden af arter af planktonalger.

Omkring 1950 var en række rentvandsarter, som forekom i 1901, forsvundet. Til gengæld var en række arter knyttet til næringsrigt vand, bl.a. blågrøn-alger, kommet til.

I 1970'erne dominerede næringskrævende algearter specielt blågrøn-alger. Blågrøn-algerne forekom i store mængder i søen med meget uklart vand, algesamlinger på vandoverfladen og ildelugtende algeopskyl langs søens bredder som resultat.

Fra midten af 70'erne til 1984 tyder målinger af vandets klarhed på, at der er sket en reduktion af planteplanktonets produktion og biomasse.

Der er udført undersøgelser af Furesøens større undervandsplanter i 1911, 1951 og 1983.

Undersøgelserne viser en stærk tilbagegang, både hvad angår udbredelsen og artsantallet.

I 1911 forekom planterne ud til 7-8 meters dybde, i 1951 til 4-5 meters dybde og i 1983 til 3-3,5 meters dybde. Antallet af arter er reduceret fra 33 i 1911 via 19 i 1951 til 12 i 1983.

Der er således kun rester tilbage af den engang så rige undervandsvegetation, der har været en af Furesøens største videnskabelige og rekreative værdier. Forholdene må endog være forbedret noget i perioden fra 1975 til 1984, hvor vandets gennemsigtighed er steget.

For vurdering af ændringer i Furesøens tilstand, som kan forventes i perioden fra 1984 til 2020, er der opstillet en simpel (årsgennemsnits) model for vandets fosforindhold og en dynamisk (årsvariations) model for næringssalte og af planteplanktonets produktion.

Med en belastning på det nuværende niveau, vil der fortsat ske en forbedring af søens tilstand, fordi fosfor og kvælstof udvaskes fra søen og fordi sedimentets fosforpulje gradvis reduceres. Mængden af planteplankton, specielt blågrønalgerne, vil reduceres noget og undervandsvegetationen vil sandsynligvis få en forøget udbredelse.

Modellerne er også brugt til at vurdere Furesøens tilstand, hvis der indføres yderligere rensningstekniske foranstaltninger:

- etablering af et ekstra trin på Stavnsholt renseanlæg i form af sandfiltrering
- at der etableres bassiner på overløbsbygværker, således at belastningen med fosfor fra fælleskloakerede områder bringes ned til samme størrelsesorden, som belastningen fra separatkloakerede områder.

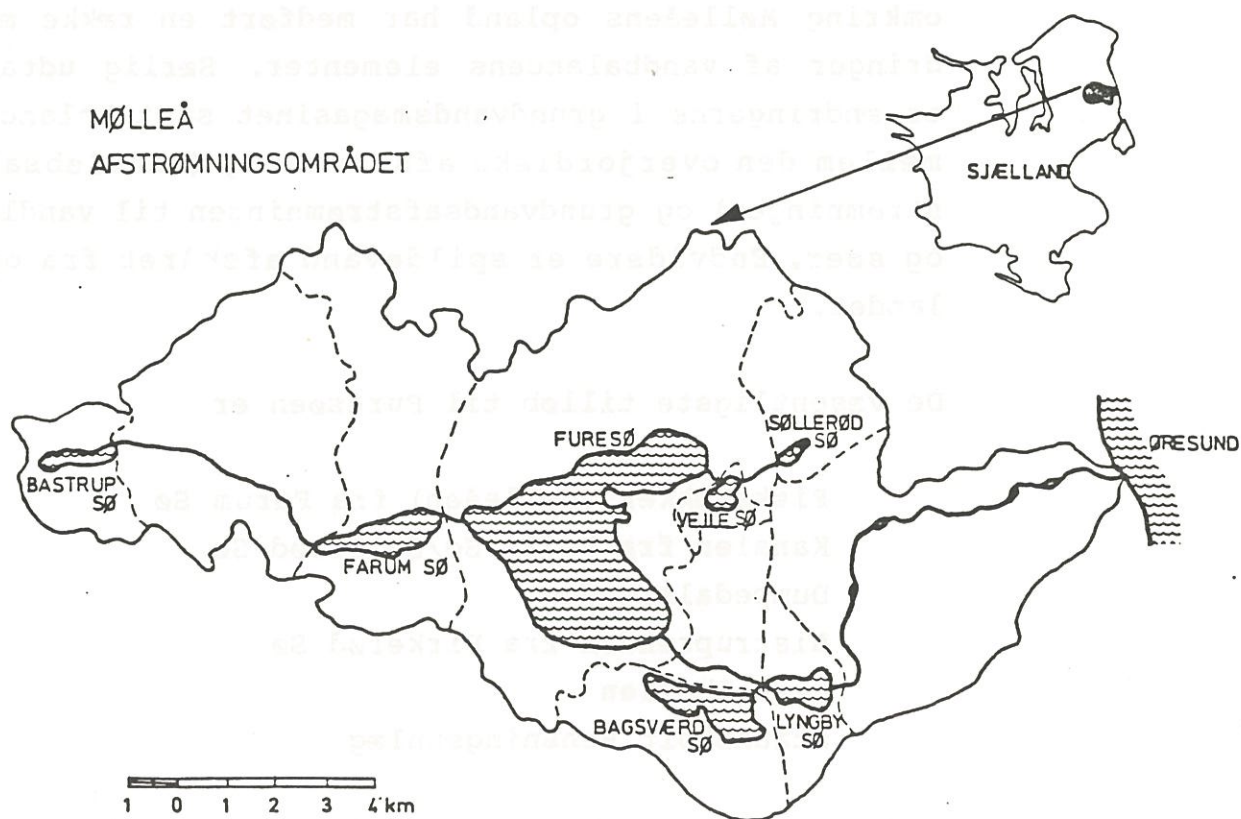
Ifølge modelberegningerne reduceres fosforkoncentrationen i Furesøen i 2020 til knap halvdelen af den nuværende belastning, hvis begge rensningstekniske indgreb realiseres.

Denne reduktion af fosforkoncentrationsniveauet fra 67 til 40 µg TP/l forventes at give mærkbare forbedringer i vandkvaliteten. Erfaringsmæssigt vil en sådan reduktion i en fosforbegrænset sø kunne betyde 50% forøget sigtdybde. Dermed vil der være skabt baggrund for en betydelig forøgelse af undervandsplanternes udbredelse.

Badeforholdene og søens rekreative værdi, herunder dens værdi som fiskevand, vil blive stærkt forbedret, dels på grund af den større gennemsigtighed, dels fordi, der ikke længere vil optræde masseforekomst af blågrønalger.

1. BESKRIVELSE AF FURESØEN

Fra sit udspring i Bastrup sø ved vandskellet mellem Roskilde fjord og Øresund bevæger Mølleåen sig ca. 40 km frem til Øresund ved Strandmøllen gennem en af istidens tunneldale og gennemstrømmer undervejs en række søer og mølledamme (jf. figur 1.1). Hver af søerne har karakteristiske træk, f.eks. vanddybden, der i de fladvandede Lyngby og Bagsværd søer maksimalt er 2-3 m, og til landets dybeste sø - Furesøen, hvor den største dybde er 36, og hvor bunden ligger i kote -16,5.



Signaturforklaring: ——— totale afstrømningsområde.
----- delafstrømningsområder.

Figur 1.1 Mølleåens afstrømningsområde.

I dag udnyttes Mølleåsystemets søer og vandløb hovedsageligt til rekreative formål. Den nære beliggenhed til København og byudviklingen i halvtredserne har medført, at naturområderne i og omkring vandsystemet er blevet en rekreativ perle for hele hovedstadsregionen. Badning, fiskeri, sejlads i og på søerne samt naturoplevelser langs bredderne stiller derfor store krav til systemets vandkvalitet, der siden 1920'erne har ændret sig betydeligt i takt med den øgede urbanisering og ændringer i afledning af spildevand, f.eks. Mølleåplanen.

Den intensive grundvandsindvinding i og umiddelbart omkring Mølleåens opland har medført en række ændringer af vandbalancens elementer. Særlig udtalt er ændringerne i grundvandsmagasinet samt balancen mellem den overjordiske afstrømning (vandløbsafstrømningen) og grundvandsafstrømningen til vandløb og søer. Endvidere er spildevand afskåret fra oplandet.

De væsentligste tilløb til Furesøen er

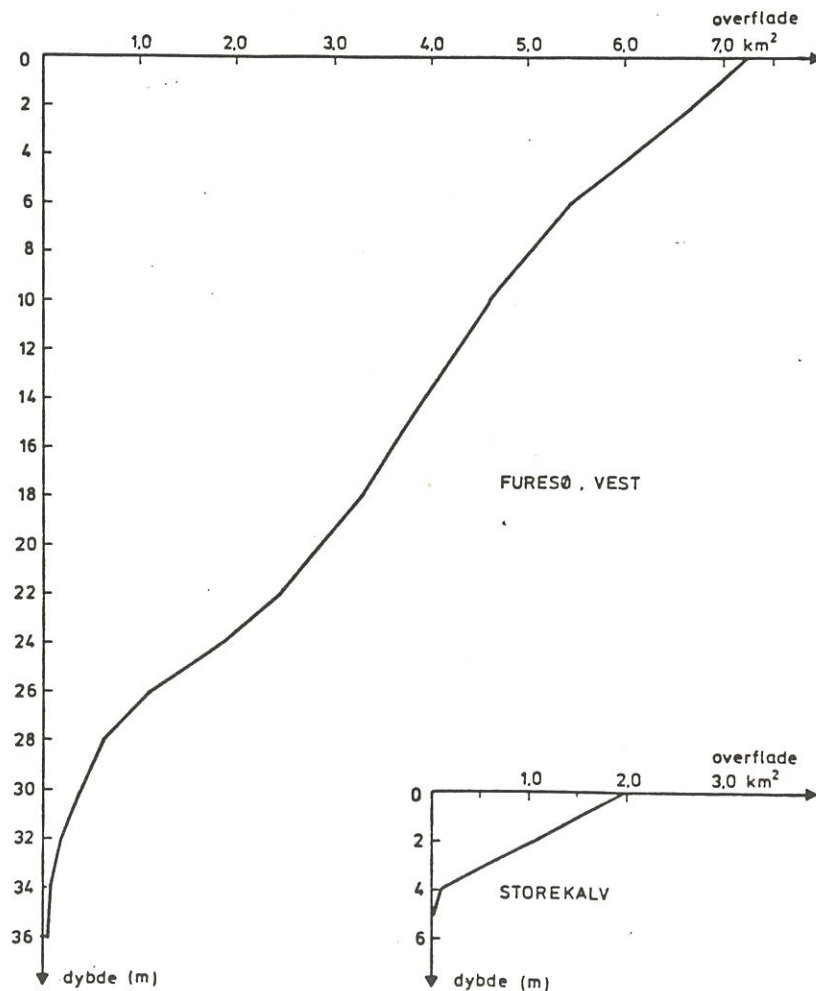
Fiskebækken (Mølleåen) fra Farum Sø
Kanalen fra Vejle Sø/Søllerød Sø
Dumpedalsrenden
Bistruprenden fra Birkerød Sø
Hesselbækken
Staunsholt Rensningsanlæg

Andre væsentlige stofkilder til Furesøen er

Atmosfærisk nedfald
Aflastning under regn fra overløbsbygværker

	Opmålt	VS-kote m DNN	Overflade areal 10^6 m^2	Volumen 10^6 m^3	Max dybde m	Middel dybde m	Direkte opl. til søerne	Opland til afløb km^2
Storsøen (vest)	1917		7,24	112,00	36,5	15,5		
Furesøen	kontrol- leret	19,9					31,7	81,0
Storekalv	1976		1,97	4,17	4,5	2,1		

Tabel 1.1 Morfometriske data.



Figur 1.2 Hypsograf for Furesøen.

I tabel 1.1 angives morfometriske data for Furesøen og i figur 1.2 er søens hypsograf vist, opdelt på Store Kalv og Storsøen (det vestlige bassin).

2. UDVIKLINGEN 1900-2020

2.1. Belastning og afstrømning

I de følgende afsnit beskrives dels udviklingen i Furesøens belastning med næringssalte (med hovedvægten på fosforbelastningen) dels udviklingen i vandafstrømningen fra søen. Beskrivelsen er uddrag/sammenfatning af bilagene 1, 2, 3, 4 og 8 til denne rapport.

2.1.1. Ændringer 1900-1984

Spildevandsbelastning

Ændringer i spildevandsbelastningen til Furesøen er den væsentligste årsag til de samlede ændringer i næringssaltbelastningen til Furesøen. Dette gælder specielt for fosfors vedkommende, men også for kvælstof.

Her spillede udbygningen af Storkøbenhavn med øget urbanisering i omegnskommunerne en stor rolle. I nedenstående tabel 2.1 er vist nogle tal til belysning af befolkningsudviklingen i Furesøens opland i dette århundrede. Det fremgår af befolkningstætheden er ottedoblet i perioden 1900-1975. Befolkningstilvæksten er dog nu stagneret/standset.

Håndteringen af det genererede affald er ændret. Ved århundredeskiftet skete en stor del af affaldsdisponeringen ved kompostering (køkkenaffald, latrin). Med øget indførelse af vandinstallationer i husene og siden med tilladelse til og indførelse af WC i perioden 1910-30 blev en stadig større del af affaldet sendt til det voksende

kloaksystem eventuelt via septictank eller lignende. Dermed endte en stadig større del af affaldet i vandløb og søer.

ÅR	BEFOLKNING I FURESØENS OPLAND			Ialt
	Søllerød Kommune	Birkerød Kommune	Farum Kommune	
1900	1300	1900	1200	4400
1930	4300	3400	1600	9300
1950	6500	4600	2500	13600
1960	9000	7100	5100	21200
1975	9800	10100	15200	35100

Tabel 2.1 Befolkningsudvikling.

Efterhånden centraliseredes rensningen af spildevand, idet septictankanlæg blev nedlagt og rensningsanlæg anlagt (Kirkeskov 1922, Ebberødgård 1933, Dronninggård 1939, Dumpedal 1942, Farum 1946). Rensningsanlæggene var mekanisk-biologiske eller mekaniske og fjernede således partikulært materiale og eventuelt organisk iltforbrugende stof. Derimod var deres effekt over for næringssalte begrænset.

I perioden 1950-55 indførtes fosfater i de fleste vaskemidler. Dermed næsten fordobledes fosforbelastningen pr. person i løbet af bare 5 år.

Sidst i 60'erne overførtes spildevandet fra Farum Rensningsanlæg til et nyt anlæg ved Staunsholt med direkte udledning til Furesøen. I 1973 blev dette anlæg udvidet med et ekstra trin til kemisk fosforfjernelse.

I foråret 1975 blev al direkte spildevandsbelastning fra Furesøens opland i Birkerød og Søllerød Kommuner afskåret og via den såkaldte Mølleåledning sendt til Øresund.

Til beregning af spildevandsbelastningens udvikling er der indhentet oplysninger om

- befolkningstal i oplandet
- antal tilsluttede personækvivalenter til kloakplande og rensningsanlæg og industriandelen
- rensningsanlæggenes opbygning

Der er herefter gjort en række forudsætninger vedrørende

- belastningen og udviklingen i denne (pr. personækvivalent)
- effektiviteten af rensning
- belastning pr. person til vandløb/søer i ikke kloakerede områder

Herefter kan spildevandsbelastningens udvikling beregnes. Beregningen er foretaget på deloplande (Farum Sø, Birkerød Sø, Søllerød Sø og direkte til Furesøen).

I tabel 2.2 og 2.3 er vist henholdsvis fosfor- og kvælstofbelastningen.

	FURESØEN		FARUM SØ		BIRKERØD SØ		SØLLERØD/VEJLE SØ	
	Fra rense- anlæg m.v.	Regnvand	Fra rense- anlæg m.v.	Regnvand	Fra rense- anlæg m.v.	Regnvand	Fra rense- anlæg m.v.	Regnvand
1901	470		210		150		120	
1911	1250		450		320		380	
1921	3410		750		730		880	
1930	3600		860		1050		1570	
1940	4270		1110		1050		2240	

1951	6360		1810		1750		3390	
1955	11630		4450		3650		6030	
1960	18010		6240			13	6400	
1971	31470		620			16	8640	
1976	810	850	600	80		19		230

1978	440	850	420	80		19		230
1980	1190	850	330	80		19		230
1983	1190	850	330	80		19		230

Tabel 2.2 Fosforbelastningen i kg i Furesøens opland fordelt på recipienter.

	FURESØEN		FARUM SØ		BIRKERØD SØ		SØLLERØD/VEJLE SØ	
	Fra rense- anlæg m.v.	Regnvand	Fra rense- anlæg m.v.	Regnvand	Fra rense- anlæg m.v.	Regnvand	Fra rense- anlæg m.v.	Regnvand
1901	3,0		1,3		1,0		0,7	
1911	8,1		2,9		2,0		2,4	
1921	18,9		4,8		4,7		5,6	
1930	23,0		5,5		6,7		9,8	
1940	27,4		7,2		6,7		16,5	
1951	32,0		9,1		9,3		24,1	
1955	36,2		14,0		11,7		27,8	
1960	53,8		19,7				28,0	
1971	77,7		4,5				34,8	
1976	50,0	2,7	4,5	0,5		0,07		0,9
1978	47,6	2,7	1,7	0,5		0,07		0,9
1980	40,6	2,7	1,4	0,5		0,07		0,9
1983	71,8	2,7	1,4	0,5		0,07		0,9

Tabel 2.3 Kvælstofbelastningen i tons i Furesøens opland fordelt på recipienter.

Regnvandsbidrag

Belastningen med forurenende stoffer fra regnvandsudledningen fra fælleskloakerede områder (overløbsbygværker) og separatkloakerede områder stiger i takt med stigningen af indbyggerantallet i de kloakerede dele af Furesøens opland.

Bidraget er beregnet for 1983 for hvert udløb og summeret op for de enkelte recipienter.

Bidraget fra regnvand ligger inden for den usikkerhed, der er på den samlede spildevandsbelastning, og det medregnes først efter at spildevandet er afskåret, eller der er indført kemisk rensning, jf. tabel 2.2 og 2.3.

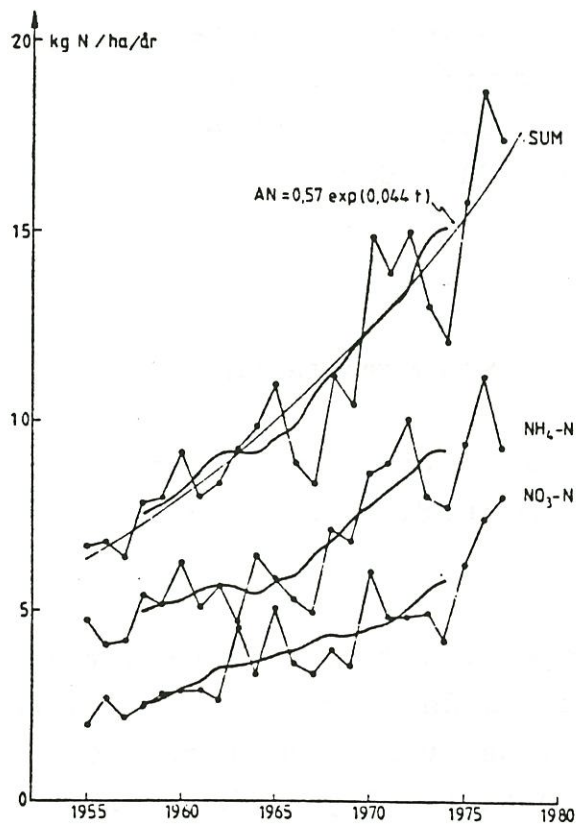
Belastning via atmosfæren

Nedfald af næringssalte fra atmosfæren som støv eller med nedbøren blev målt ved Søndersø i 1977/78.

Med hensyn til fosfornedfaldet er det foretaget meget få undersøgelser i Danmark. Udenlandske undersøgelser viser, at nedfaldet i et område stiger med urbaniseringsgraden, men at der i øvrigt er store variationer selv inden for korte afstande.

Det målte nedfald på $65 \text{ kg P/km}^2/\text{år}$ antages at være repræsentativ for den nuværende situation. Ar 1900 antages fosfor nedfaldet at have været halvt så stor.

Kvælstofnedfaldet er bedre belyst ved danske målinger. Figur 2.1 viser udviklingen i nitrat og ammoniaknedfaldet siden 1950. Målingerne ved Søndersø viste et nedfald på ca. 2000 kg N/km²/år. Dette tal lægges til grund for den nuværende belastning. Indtil år 1950 antages en værdi på 500 kg N/km²/år. Fra 1950 til nu antages en udvikling svarende til figur 2.1.



Figur 2.1 Det atmosfæriske nedfald af nitrat- og ammoniakkvælstof målt ved Askov Forsøgsstation i perioden 1955-77. De udglattede kurver er 7 års glidende middelværdier. Den tynde kurve øverst er tilpasningsfunktionens afbildning: $AN = 0,57 \exp(0,044 t)$, hvor t er årstallet minus 1900.

Belastning fra skov- og markarealer

Belastningen fra disse arealer i Furesøens direkte opland er ringe i forhold til søens samlede belastning. Dels er belastningen generelt lav fra skovarealer og dels er markarealet lille. Endvidere er den arealspecifikke afstrømning i oplandet faldet stærkt (afsnit 2.1.3), hvilket forventes at have opvejet den forøgede kvælstofbelastning fra marker, der ellers måtte ventes.

Fosforbidraget er vurderet til 170 kg P/år i 1900 faldende til 80 kg P/år i 1975-1983, medens kvælstofbidraget er vurderet til konstant 5000 kg N/år.

Indirekte belastning

Belastningen til Furesøen fra Farum Sø, Birkerød Sø og Søllerød-Vejle Søerne betegnes som indirekte belastning. Denne belastning udgjorde i 60'erne op mod en trediedel af Furesøens fosforbelastning.

Belastningerne fra disse søers oplande reduceres ved passage gennem søerne ved binding til sediment og for kvælstofs vedkommende desuden ved denitrifikation.

For fosfors vedkommende er den indirekte belastning vurderet ved beregninger for hver sø med den simple stofbalancemodell. Belastningerne til og afstrømningen fra søerne er beregnet eller skønnet, hvorefter modellen er kalibreret ind efter nogle få kendte niveauer af fosforkoncentrationerne.

Den indirekte kvælstofbelastning er i højere grad baseret på skøn, idet der dog for de senere år foreligger målinger af kvælstofkoncentration i søerne, der danner grundlag for de skønnede belastninger.

I tabel 2.4 er størrelserne af den indirekte belastning anført.

Samlet belastning

I tabellerne 2.4 og 2.5 er der for udvalgte år vist en opgørelse af den samlede fosfor henholdsvis kvælstofbelastning til Furesøen.

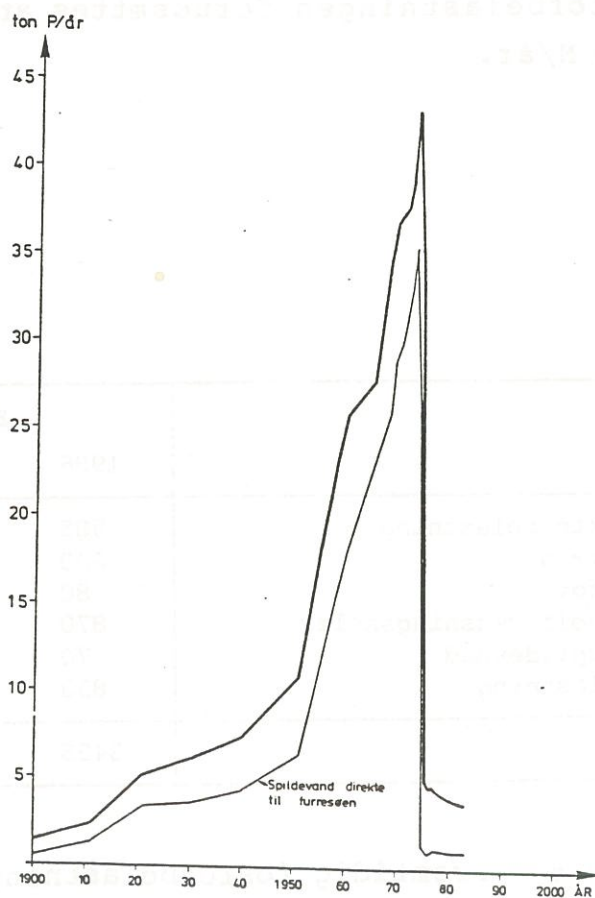
I figur 2.2 er fosforbelastningens udvikling illustreret.

	VEJLE SØ	BIRKE- RØD SØ	FARUM SØ	ATMOS- FÆRE	REGN- AFLAST.	SPILDE- VAND	DIFFUS SKOV/MARK	I ALT
1900	82	78	260	300		470	170	1360
1911	215	110	390	300		1250	170	2435
1921	500	230	580	300		3410	160	5180
1930	880	430	680	400		3600	150	6140
1940	1300	460	830	400		4270	140	7400
1951	2130	650	1220	400		6360	130	10890
1955	3100	970	2300	500		11630	120	18500
1958	3600	255	3050	500		15800	120	23325
1960	3880	130	3520	500		18010	110	26050
1965	4400	90	3910	500		18820	100	27820
1970	4950	65	700	600		30000	90	37405
1974	6000	50	970	600		26550	90	34260
1975	1377	47	880	600	850	1190	80	5024
1977	1300	43	740	600	850	1120	80	4733
1980	850	37	640	600	850	940	80	3997
1983	690	30	530	600	850	940	80	3720

Tabel 2.4 Fosforbelastning til Furesøen kg P/år.

	VEJLE SØ	BIRKE- RØD SØ	FARUM SØ	ATMOS- FÆRE	REGN- AFLAST.	SPILE- VAND	SKOV/ MARK	N ₂ - FIKSE- RING	I ALT
1900	~ 0,5	1	4	5	-	3	5	-	19
1911	~ 1	1,5	~ 5	5	-	8,1	5	-	26
1921	~ 2	4	~ 7	5	-	18,9	5	-	42
1930	~ 5	5,5	7	5	-	23,0	5	-	51
1940	~ 8	5,5	9	5	-	27,4	5	-	60
1950	~10	~ 8	~10	5	-	32,0	5	-	70
1960	~20	1,5	20	9	-	53,8	5	-	109
1970	25	0,6	~ 7	14,5	2,7	77,7	5	4	137
1976	1	0,2	~ 6	16	2,7	50,0	5	4	86
1978	1,4	0,2	4,3	18	2,7	47,6	5	4	83

Tabel 2.5 Kvalstofbelastning til Furesøen ton N/år.



Figur 2.2 Fosforbelastning til Furesøen.

2.1.2. Fremtidig belastning 1985-2020

Den fremtidige direkte belastning til Furesøen er forudsat at svare til den nuværende. Det indirekte bidrag fra de øvrige søer, regnes at være faldende som følge af udtømningen af søernes sedimentpuljer. Det direkte stofbidrag til disse øvrige søer antages konstant fremover.

Det forudsættes hermed, at spildevandsbidragene fra Søllerød og Birkerød Kommuner fortsat afskæres til Øresund. Bidragene fra Farum Kommune regnes ligeledes at være stagneret.

Af tabel 2.6 fremgår den forudsatte/beregne fremtidige fosforbelastning uden indgreb.

Kvælstofbelastningen forudsættes at være konstant 80 ton N/år.

	FOSFORBELASTNING (kg/år)			
	1986	1990	1995	2020
Indirekte belastning	985	849	741	549
Atmosfæren	600	600	600	600
Mark/skov	80	80	80	80
Staunsholt rensningsanlæg	870	870	870	870
Øvrig spildevand	70	70	70	70
Regnaflastning	850	850	850	850
I ALT	3455	3319	3211	3019

Tabel 2.6 Fremtidig fosforbelastning til Furesøen uden indgreb.

2.1.3. Afstrømning

Afstrømningen fra Furesøen er i dag langt mindre end den tidligere har været. Dette skyldes dels stigningen i grundvandsindvindingen i Hovedstadsregionen generelt og især stigningen inden for Mølleåens opland kombineret med afskæringen af spildevand fra Mølleåens opland til Øresund.

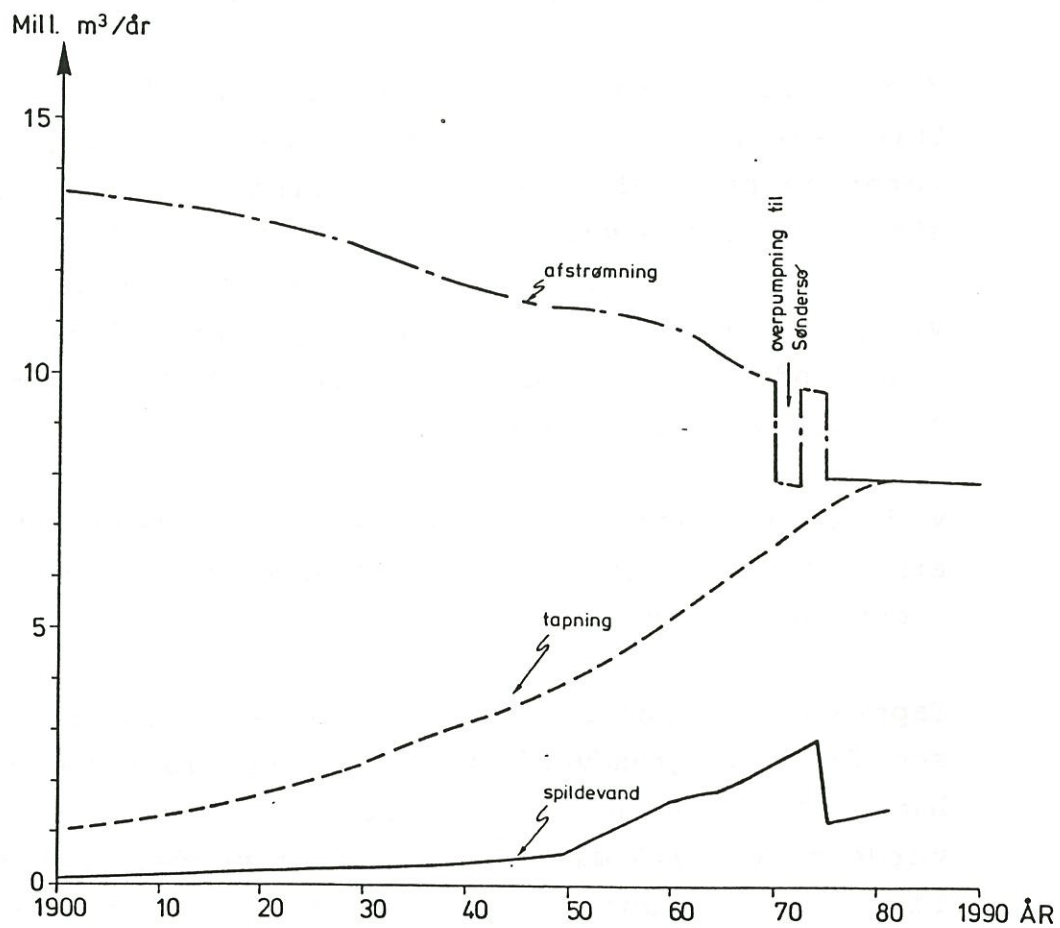
Ved opstillingen af en model for udviklingen i Furesøens vandkvalitet har det været nødvendigt at foretage en vurdering af udviklingen i søens afstrømning. Denne vurdering er foretaget på baggrund af tidligere undersøgelser samt oplysninger og vurderinger af den tidsmæssige udvikling af grundvandsindvindingens størrelse samt oplysninger om spildevandsafskæringer m.v.

Ved vurderinger er der hverken taget hensyn til årstidsvariationer i afstrømningen eller til variationer som følge af våde eller tørre år.

Tapningen fra Mølleåsystemet opstrøms Frederiksdal som følge af grundvandsoppumpning er tidligere ved hjælp af grundvandsmodellen for Hovedstadsregionen vurderet til 7,6 mio m³/år. For at vurdere udviklingen i perioden 1900-1980 er udviklingen i grundvandsindvindingen undersøgt.

En del af tapningen kompenseres af en tilsvarende spildevandsudledning.

Den af beregningerne resulterende normalafstrømning fremgår af figur 2.4.



Figur 2.4 Beregnet normal afstrømning fra Furesøen.

2.2. Fosforkoncentration

Et af de næringssalte, som kan være begrænsende for plantevæksten i Furesøen er fosfat. Derfor er det af interesse at betragte udviklingen i koncentrationen af fosfor i vandet, når udviklingen i søens forureningstilstand diskuteres.

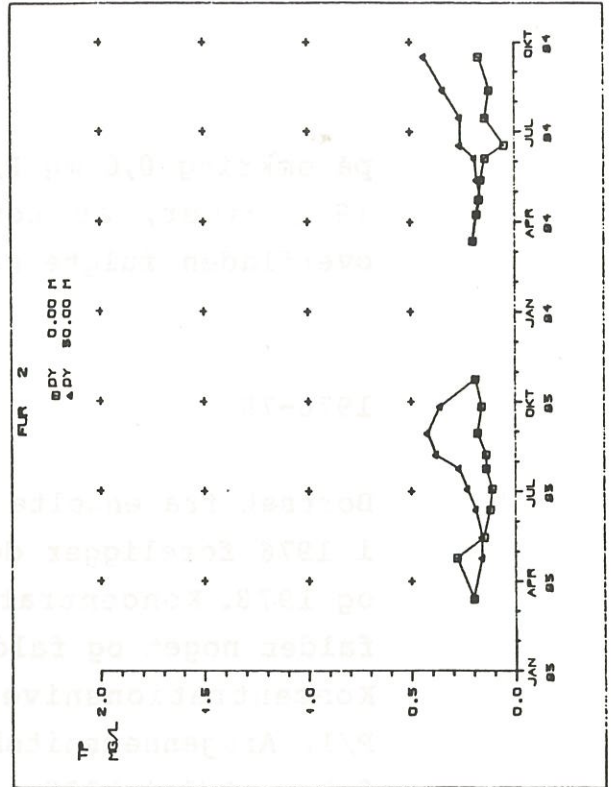
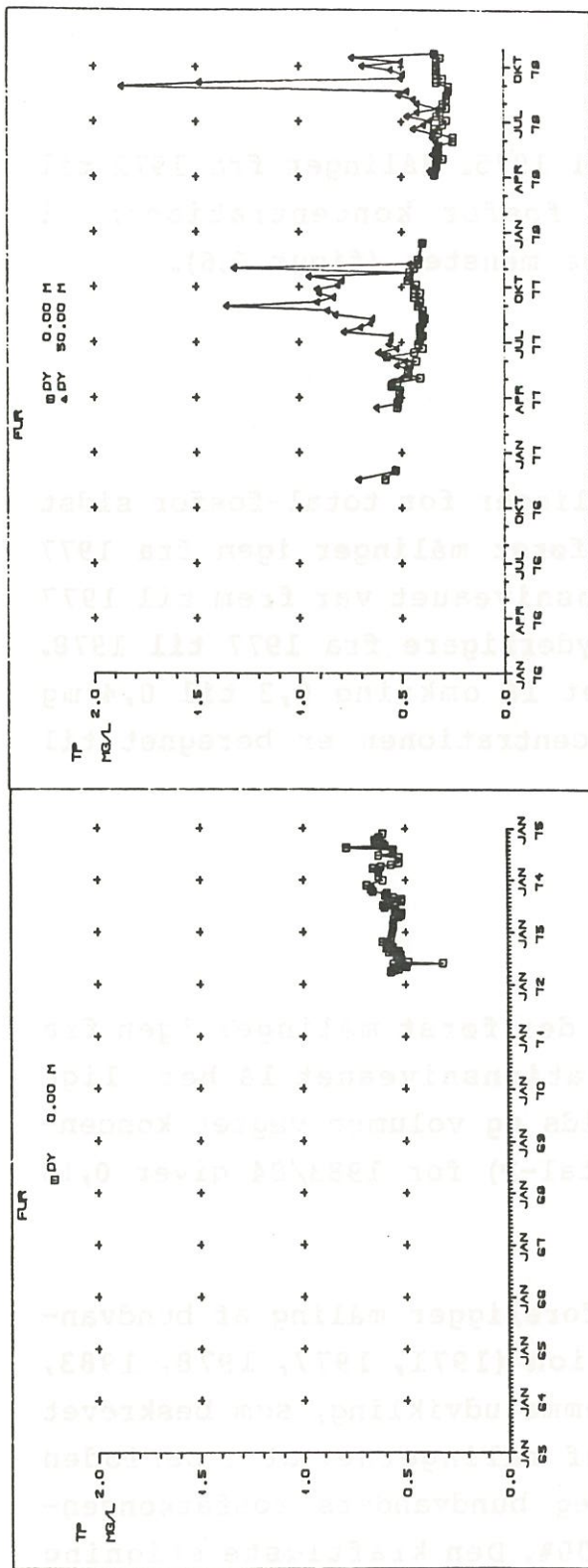
1900-1951

Fra tiden før 1951 foreligger der kun spredte målinger af uorganisk fosfat i overfladevand fra Furesøen. Målinger fra 1929 og 1951 tyder ikke på, at der er sket ændringer i koncentrationsniveauet i tiden frem til 1951. De meget få målinger der foreligger gør imidlertid denne vurdering usikker og en svag stigning, som ville være forventelig pga. udbygning i oplandet kan ikke udelukkes.

1951-75

Fra 1951 er der i Furesøen målt på en række stationer. For diskussion af udviklingstendenser er benyttet værdier fra afløb samt centralt i søen. Målte fosforkoncentrationer i perioden 1951-1984 fremgår af figur 2.5 og 2.6.

Af figur 2.5 fremgår det, at koncentrationsniveauet for uorganisk fosfor i overfladen lå lavt i perioden 1951 til 1960. Der forekom dog en stigende tendens i perioden. Herefter steg koncentrationsniveauet fra en vinterkoncentration på mellem 0,01 og 0,06 mg P/l omkring 1960 til en vinterkoncentration



Figur 2.6 Udviklingen i total-fosfor koncentration i overfladevand (DY = 0,00 M) og bundvand (DY = 30,00 M) i Furesøen, 1972-1984.

på omkring 0,6 mg P/l i 1975. Målinger fra 1972 til 1975 viser, at total-fosfor koncentrationen i overfladen fulgte samme mønster (figur 2.6).

1976-78

Bortset fra enkelte målinger for total-fosfor sidst i 1976 foreligger der først målinger igen fra 1977 og 1978. Koncentrationsniveauet var frem til 1977 faldet noget og faldt yderligere fra 1977 til 1978. Koncentrationsniveauet lå omkring 0,3 til 0,4 mg P/l. Arsgennemsnitskoncentrationen er beregnet til 0,3 mg P/l i 1978.

1979-84

Efter 1978 foreligger der først målinger igen fra 1983 og 1984. Koncentrationsniveauet lå her lige under 0,2 mg P/l. Et tids og volumen vægtet koncentrationsgennemsnit (total-P) for 1983/84 giver 0,19 mg P/l.

For alle år, hvor der foreligger måling af bundvandets fosforkoncentration (1971, 1977, 1978, 1983, 1984), kan iagttages samme udvikling, som beskrevet ovenfor. Det fremgår af målingerne, at i perioden juli til september steg bundvandets fosfatkoncentration med omkring 100%. Den kraftigste stigning forekom i august-september. Denne stigning skyldes, at bundvandet i den sidste del af lagdelingsperioden bliver iltfrit, hvorved fosfat frigives i store mængder fra sedimentet.

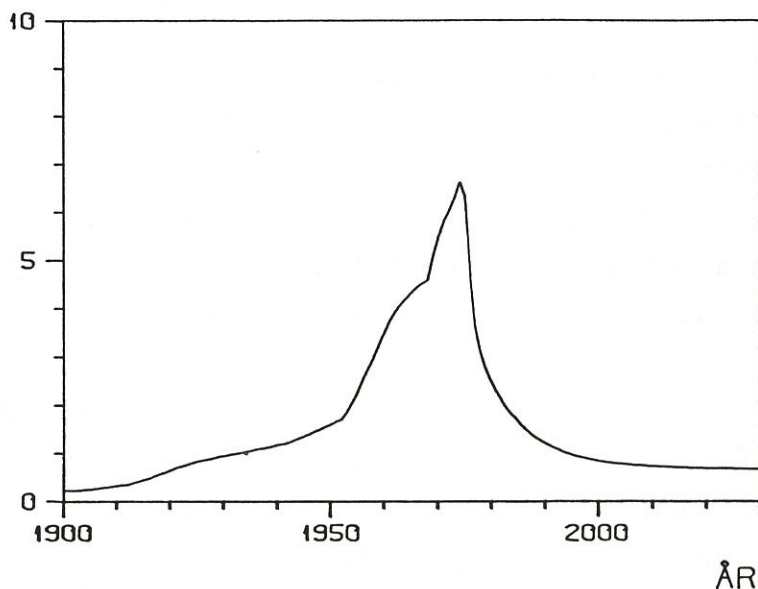
1984-2020

For beskrivelse af koncentrationsudviklingen i tiden fremover (1984-2020) er der udarbejdet en simpel massebalancemodel for totalfosforkoncentrationen i Furesøen (bilag 6). Modellen er kalibreret på udviklingsforløbet fra 1900 til 1984 med hovedvægt på perioden 1970 til 1984.

I modellen beskrives den årsgennemsnitlige totalfosfor koncentration i vandet og sedimentet. For nærmere diskussion af modellens opbygning, konstant fastsættelse og kalibrering henvises til afsnit 4 og bilag 6. Resultatet af modelsimuleringen for Furesøen fremgår af figur 2.7. Ved simuleringen er der regnet med uændrede stoftilførsler fra 1983 og frem.

Det ses af figuren, at det fald, der er sket i koncentrationsniveauet fra 1975 til 1984 forventes at fortsætte, dog mindre udtalt end i den nævnte periode. Såfremt stoftilførslen ikke ændres i forhold til 1983-84 situationen, kan det med modellen beregnes, at total-fosfor koncentrationen i 1990 vil komme til at ligge på omkring 0,13 mg P/l og i 2020 have stabiliseret sig omkring 0,06-0,07 mg P/l. Koncentrationen i 1990 beregnes således til at ville svare til koncentrationen, der forekom omkring 1965 og i 2020 at svare til koncentrationen, der forekom omkring 1961-62.

CONC. TP 100 UG/L



Figur 2.7 Simuleret udvikling i årsgennemsnitlig totalfosforkoncentration i Furesøen 1900-2030.

Konklusion

Samlet kan det konkluderes, at der i perioden 1900-1950 ikke skete målelige ændringer i fosforkoncentrationen i Furesøen. Fra 1950 til 1960 skete der en svag stigning i overfladevandets fosfatkoncentration. I perioden 1960-1975 steg fosforkoncentrationen i Furesøens vand jævnt til et relativt højt koncentrationsniveau (0,6 mg P/l). Fra 1975 til 1977/78 skete der et væsentligt fald i fosforkoncentrationen. Dette fald er fortsat frem til 1983/84, hvor koncentrationen igen lå på samme niveau (~ 0,2 mg P/l) som i 1963/64.

Koncentrationsudviklingen har nøje fulgt fosfortilførslerne til søen. Fra 1950-53 blev fosfatholdige vaskemidler introduceret på det danske marked. Fra begyndelsen af 60'erne udbygges oplandene til søen

for alvor, indbyggerantallet steg og dermed også fosforbelastningen. Fra 1975, hvor efter koncentrationen i søen faldt, blev der foretaget afskæring/rensning af spildevand til Furesøen.

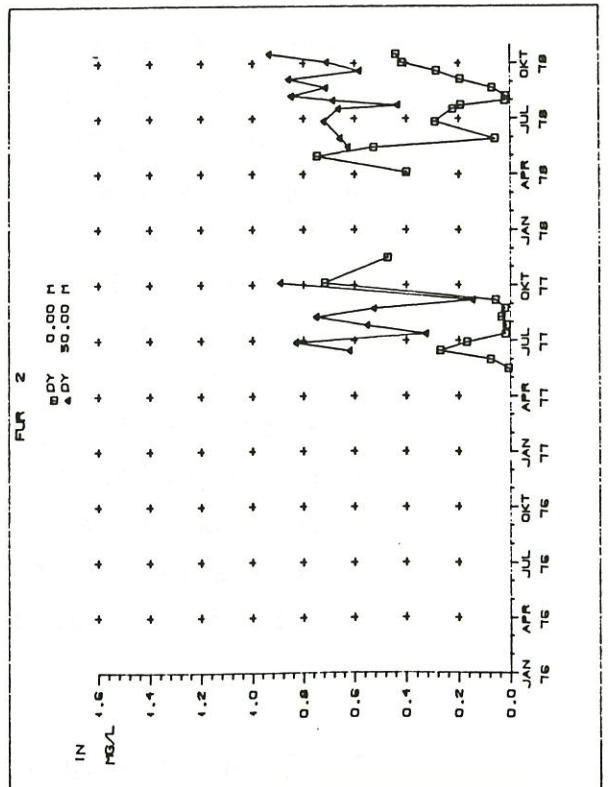
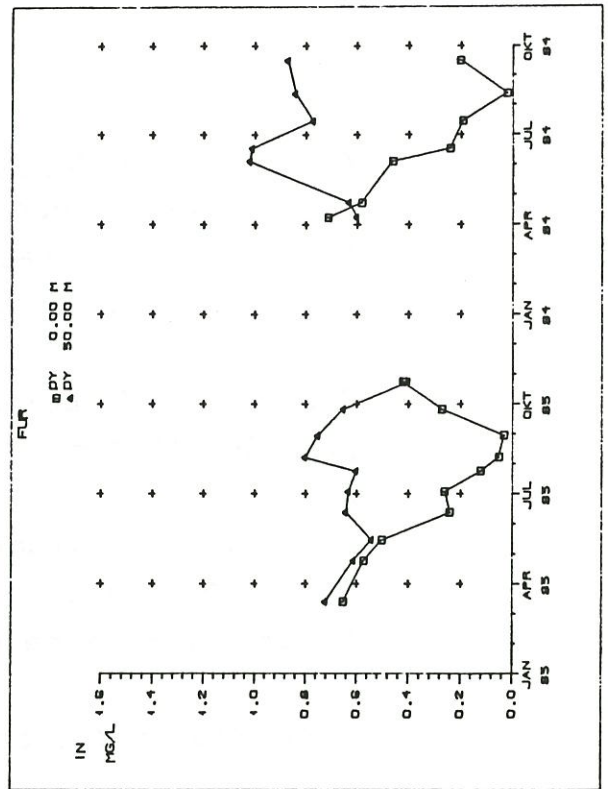
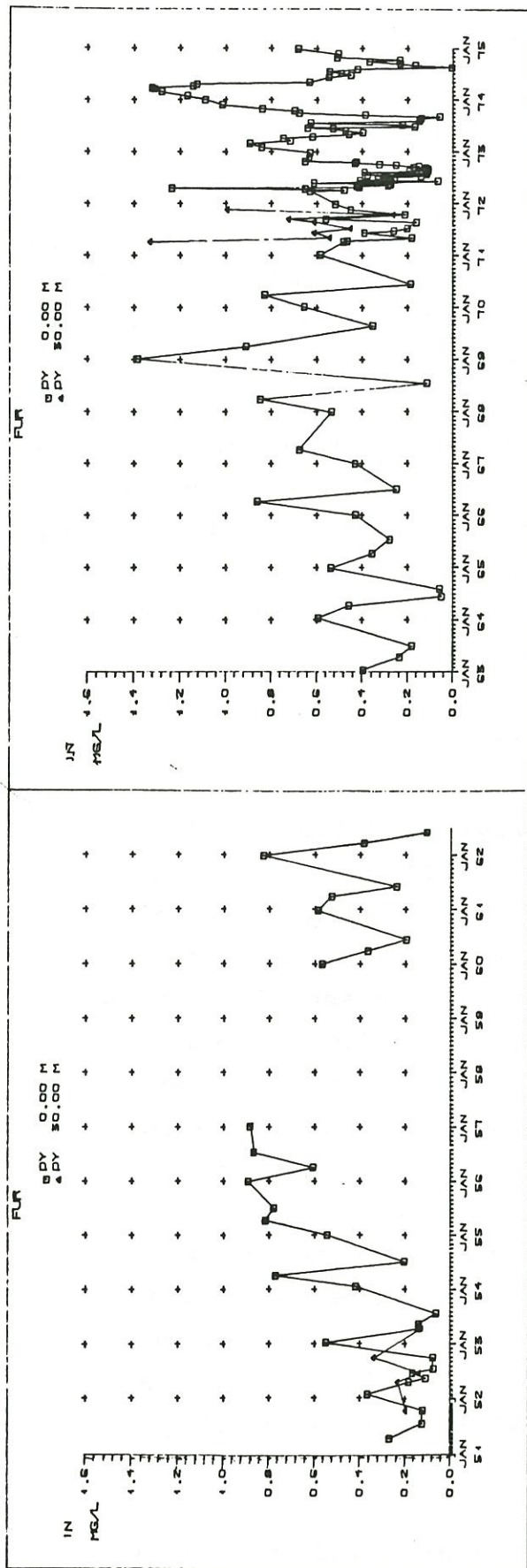
Såfremt fosforbelastningen til søen ikke ændres i perioden 1984 til 2020 kan det i 1990 forventes, at koncentrationen vil falde yderligere til et niveau svarende til situationen i 1964-66 (~ 0,13 mg P/l) og i 2020 til et niveau svarende til situationen først i 1960'erne (~ 0,065 mg P/l).

2.3. Kvælstofkoncentrationen

Kvælstof er et andet vigtigt næringsstof, der kan være begrænsende for plantevækst i Furesøen. De kvælstofforbindelser, der er umiddelbart tilgængelige for planterne, er ammoniak (NH_3), nitrit (NO_2^-) og nitrat (NO_3^-). Summen af disse udgør puljen af uorganisk kvælstof (IN). Foruden disse tre kvælstofforbindelser er der i Furesøen foretaget måling af total kvælstof (TN), som inkluderer uorganisk, dødt organisk og levende organisk kvælstof.

Som for fosfor gælder det, at der er målt på en række stationer i Furesøen. Diskusjonen i dette afsnit omhandler kun koncentrationsniveauerne i den centrale del af Furesøen, og alternativt i afløbet i perioder, hvor der kun foreligger målinger herfra.

Af figur 2.8 og 2.9 fremgår, hvilke perioder der foreligger målinger fra.



Figur 2.8 Udviklingen i koncentration af uorganisk kvælstof ($\text{NO}_3 + \text{NO}_2 + \text{NH}_3$) i overfladevand (DY = 0,00 M) og bundvand (DY = 30,00 M) i Furesøen, 1951-1984.

Der foreligger ingen kvælstofmålinger fra Furesøen før 1951. Af figur 2.8 og 2.9 fremgår, at der ikke forekom samme klare udviklingstendens i kvælstofniveauerne, som der gjorde i fosforniveauerne. Fluktuationerne har været meget større, men betragtes kurverne nøjere, kan en vis udvikling dog beskrives.

1951-75

Kurveforløbet tyder på, at der er sket en forøgelse i kvælstofniveauet efter 1953 i forhold til årene 1951-53. I årene fra 1965 til 1975 forekom der til tider meget høje koncentrationer. De høje koncentrationer forekom typisk i sommerperioden. De høje total-kvælstof koncentrationer målt i 1957 skyldes sandsynligvis analysefejl. Den generelle forøgelse af niveauet i forhold til 1951-53 kan sandsynligvis tilskrives en forøget kvælstoftilførsel. Men de høje værdier, der er målt i kortere intervaller i sommerperioden kan ikke forklares ud fra belastningsdata alene. Disse værdier kan skyldes, at algerne i søen i foråret og forsommeren er blevet kvælstofbegrænsede. Dette har favoriseret blågrønalger, som har kunne udnytte frit kvælstof fra atmosfæren. Blågrønalgerne har forekommet i meget store koncentrationer og har ved fiksering af kvælstof fra atmosfæren sandsynligvis tilført søen store kvælstofmængder, således at de specielt høje koncentrationer er blevet dannet i overfladen. At det hovedsageligt drejer sig om organisk kvælstof bekræfter denne hypotese (se endvidere afsnit 2.7 om algesammensætning).

1975-84

Fra januar 1974 til november 1976 foreligger der ikke målinger. I 1977 og 1978 er der en tendens til lidt lavere koncentrationsniveau end i 1965-75, især i overfladevandet, men mere iøjnefaldende er dog, at de meget høje kvælstofkoncentrationer i overfladevandet ikke blev registreret disse to år. Koncentrationsniveauet har ikke ændret sig væsentligt fra 1977/78 til 1983/84. Heller ikke i 1983/84 forekom de meget høje kvælstofkoncentrationer i overfladen.

1984-2020

På grund af et mere kompliceret omsætningsforløb, er der for kvælstof ikke i lighed med modellen for fosfor, udarbejdet en prognose for udviklingen af årsgennemsnitskoncentrationen af kvælstof. En egentlig eutrofieringsmodel, der beskriver såvel primærproduktion som omsætning af kvælstof og fosfor er udarbejdet og kalibreret på data hovedsageligt fra 1969 og 1978. Modellen er nærmere beskrevet i bilag 7. I modellen beskrives variation over året i de forskellige parametre. Modellen blev herefter afprøvet over for data fra 1983/84 samt oplysninger om koncentrationsniveauer før 1960 (især fra 1911 og 1951). For en nærmere diskussion heraf henvises til bilag 7. Denne model er benyttet for beskrivelse af forventelige forhold i en fremtidig situation (1990-2020). Resultaterne af disse beregninger fremgår af kapitel 3 og 4 samt bilag 7. Det fremgår heraf, at koncentrationsniveauet omkring år 2000 beregnes til at ligge på et niveau svarende til 1. halvdel af 1960'erne, såfremt der ikke foretages yderligere indgreb.

Konklusion

Samlet kan konkluderes, at kvælstofkoncentrationsniveauerne i Furesøen steg fra starten af 1950'erne til maksimal værdier i begyndelsen af 1970'erne. I perioden 1965 til 1975 forekom meget høje kvælstofkoncentrationer i overfladevandet i sommerperioden. Årsagen hertil må sandsynligvis tilskrives, at spildevandstilledningerne til søen favoriserede blågrønalger, som kan fikserer kvælstof fra atmosfæren. Disse alger optrådte i masseforekomst og forårsagede en ekstra kvælstoftilførsel til søen. Frem til 1984 er der sket et mindre fald i koncentrationsniveauet. Endvidere forekommer de meget høje koncentrationer i overfladen ikke mere.

Ud fra modelberegninger er det vurderet, at koncentrationsniveauet i en fremtidig situation (2020) vil svare til forholdene i første halvdel af 1960'erne.

2.4. Kvalstof/fosfor forhold

Plantevæksten begrænses på forskellige årstider af forskellige faktorer. De vigtigste er

- fosfor
- kvælstof
- silicium
- lys (og temperatur)

Lyset spiller hovedsagelig en rolle som begrænsende faktor i vinterhalvåret. Desuden kan der, når alger optræder i masseforekomst, være tale om en skygningseffekt således, at plantevækst på lidt større dybde (> 1-2 meter) begrænses af lyset.

Silicium er essentielt for kiselalger, der benytter dette stof til opbygning af cellevægge. Kiselalgerne vækst kan være begrænset af siliciummangel i sommerperioder. I sådanne perioder "overtager" andre algearter så blot produktionen.

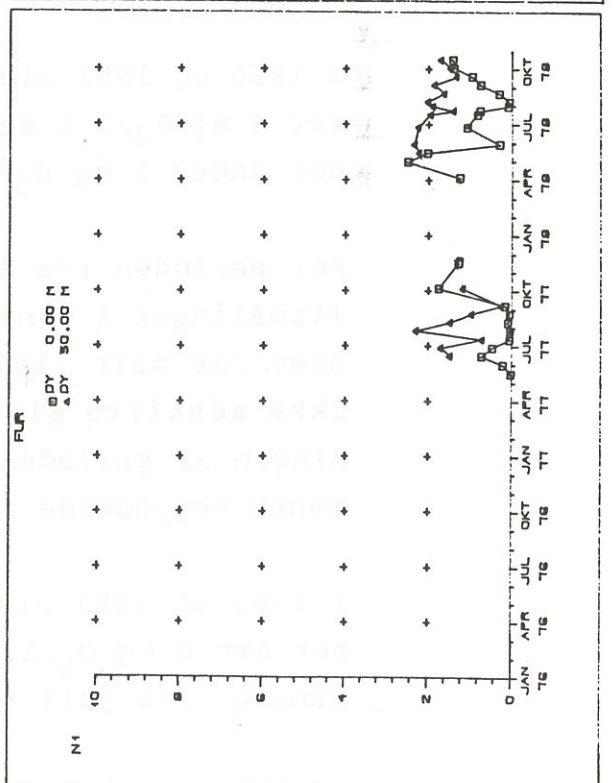
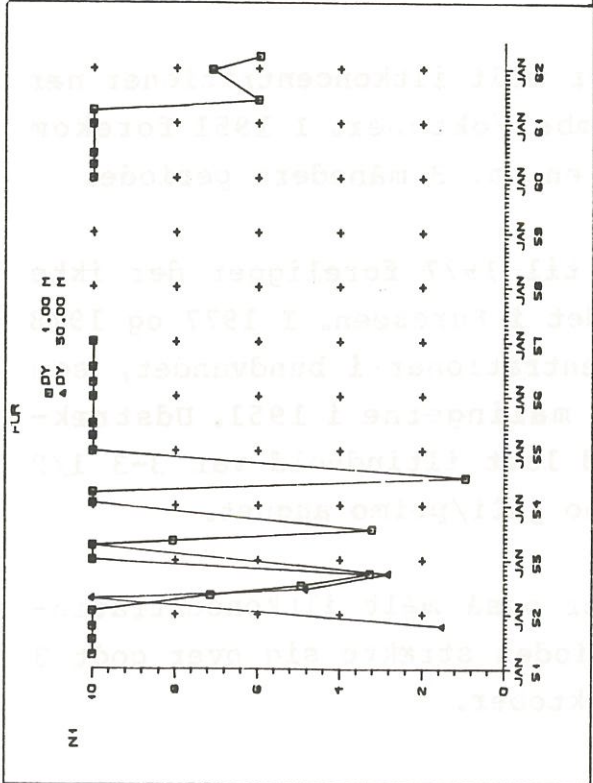
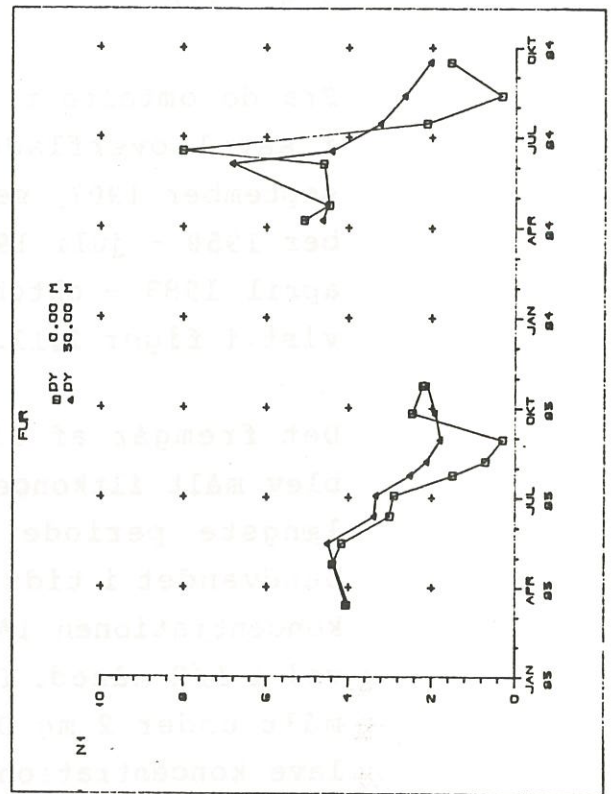
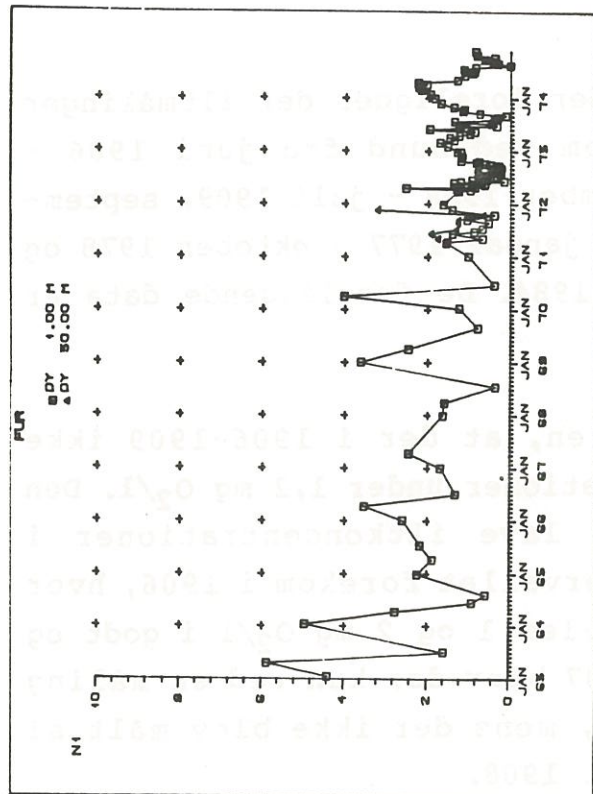
For alle planter gælder det, at kvælstof og fosfor er livsvigtige. Planterne benytter disse to næringsstoffer i forskellig mængde. Som gennemsnit regnes der med, at alger optager stoffer i et forhold $N/P = 7$ (på vægtbasis). Når det uorganiske N/P-forhold er mindre end ca. 7 regner man som hovedregel med, at algerne er kvælstofbegrænsede, mens de er fosforbegrænsede når N/P-forholdet er større end 7. Der forekommer store afvigelser fra denne hovedregel, idet forskellige arter kan optage fosfor og kvælstof i noget forskelligt forhold. Endvidere kan der ske oplagring af næringsstoffer i planterne, hvorfor der ikke direkte kan sluttes fra koncentrationer i vandet til planternes aktuelle vækstvilkår. Udover N/P-forholdet skal endvidere

næringssaltes absolutte koncentrationer tages i betragtning.

Når det uorganiske N/P-forhold i vandet på trods af ovenstående alligevel benyttes til vurdering af Furesøens algers kvælstof henholdsvis fosforbegrænsning skyldes det, at dette sammen med beskrivelsen af algesammensætningen (afsnit 2.7) er det bedst tilgængelige grundlag.

Af figur 2.6 fremgår, at ved langt de fleste målinger i perioden 1951-1960 lå N/P-forholdet væsentligt over 7, ud fra hvilket algerne skønnes hovedsageligt at have været fosforbegrænset. Fra 1961 og frem til og med 1983 er der ikke blevet registreret N/P-forhold væsentlig over 4 og i store dele af perioden lå forholdet under 2. Målingerne tyder således på, at algerne i perioden hovedsageligt har været kvælstofbegrænset. Fra 1978 til 1983/84 tyder målingerne på, at N/P-forholdet er steget og i 1984 lå det ved en enkelt måling på 8. Tendensen har således været, at forholdene har nærmet sig en fosforbegrænsende situation, som eksisterede periodevis før 1961.

På baggrund af modelberegningerne omtalt i afsnit 3 og 4 vurderes det, at såfremt der ikke sker ændringer i belastningsforholdene fremover, vil der forekomme fosforbegrænsning i ca. 50% af året og ca. 30-35% af den produktive periode i 1995-2020. I afsnit 4 er det desuden omtalt hvilken effekt yderligere indgreb over for kilderne vil kunne have.



Figur 2.10 Udvikling i uorganisk N/P-forhold i overfladevand (DY = 0,00 M) og bundvand (DY = 30,00 M) i Furesøen, 1951-1984.

2.5. Ilt

Fra de omtalte perioder foreligger der iltmålinger i såvel overflade som ved bund fra juni 1906 - september 1907, september 1908 - juli 1909, september 1950 - juli 1952, januar 1977 - oktober 1978 og april 1983 - oktober 1984. De foreliggende data er vist i figur 2.11.

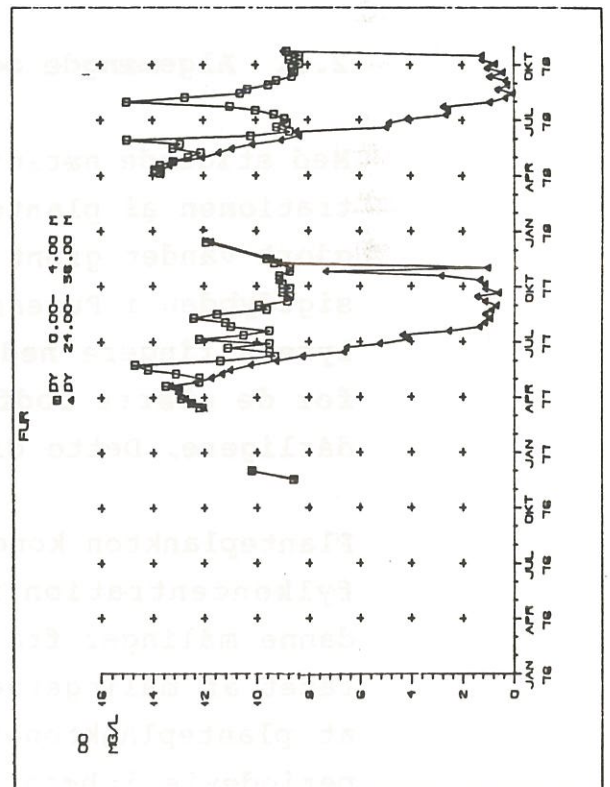
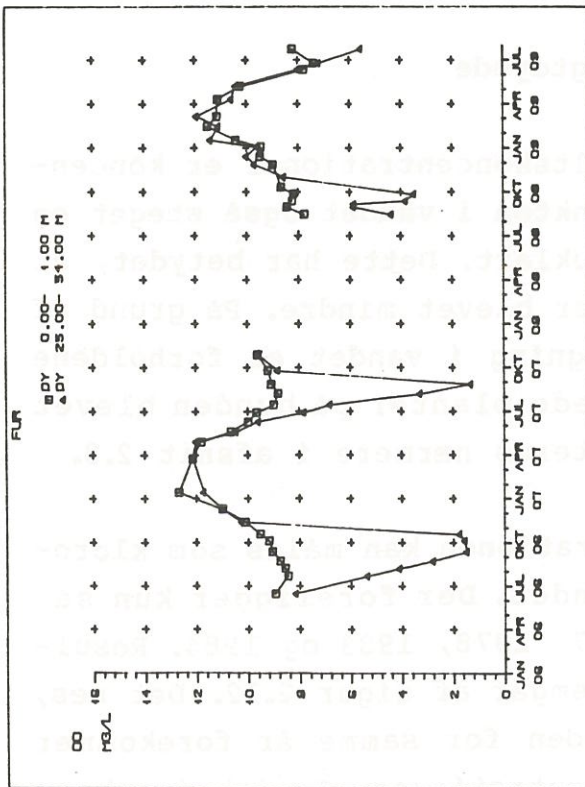
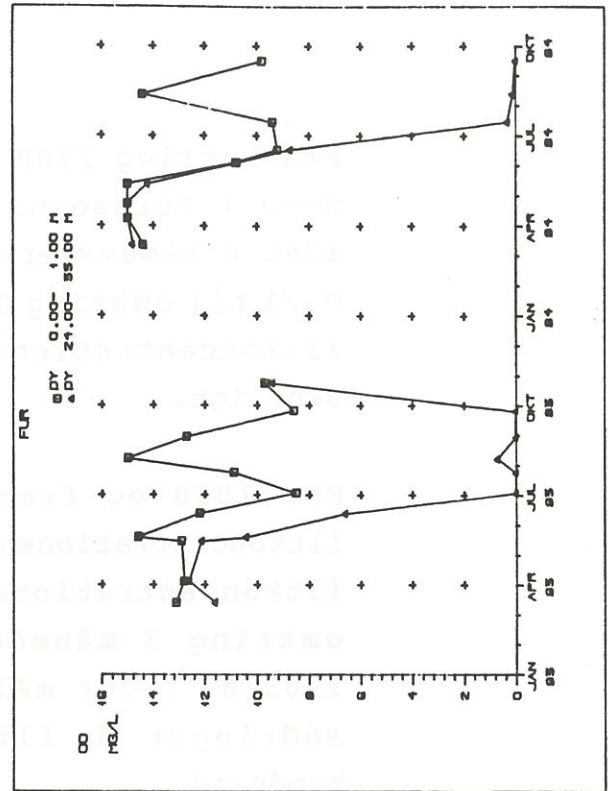
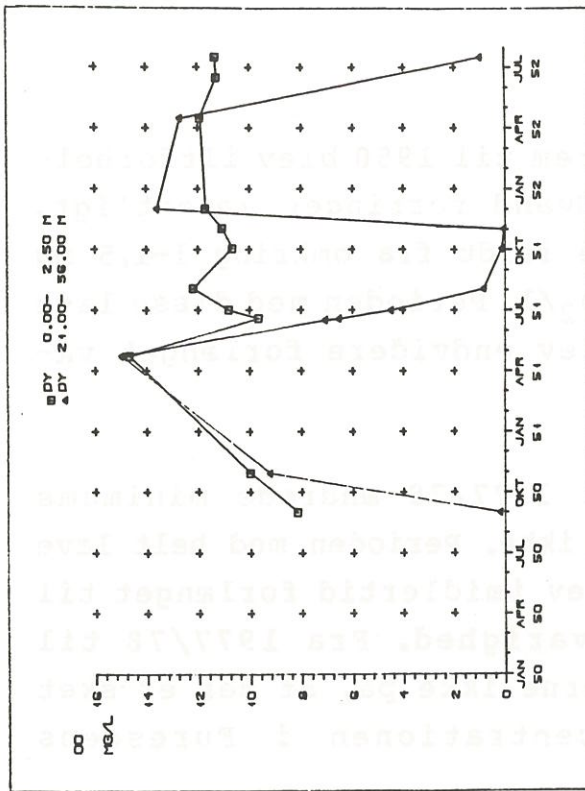
Det fremgår af figuren, at der i 1906-1909 ikke blev målt iltkoncentrationer under 1,2 mg O₂/l. Den længste periode med lave iltkoncentrationer i bundvandet i tidsintervallet forekom i 1906, hvor koncentrationen lå mellem 1 og 2 mg O₂/l i godt og vel 1 1/2 måned. I 1907 blev der kun ved en måling målt under 2 mg O₂/l, mens der ikke blev målt så lave koncentrationer i 1908.

I 1950 og 1951 blev der målt iltkoncentrationer nær ved 0 mg O₂/l i september/oktober. I 1951 forekom der under 1 mg O₂/l i en ca. 3 måneders periode.

For perioden fra 1951 til 1977 foreligger der ikke iltmålinger i bundvandet i Furesøen. I 1977 og 1978 blev der målt iltkoncentrationer i bundvandet, som ikke adskilte sig fra målingerne i 1951. Udstrækningen af perioden med lavt iltindhold var 3-3 1/2 måned begyndende ultimo juli/primo august.

I 1983 og 1984 blev der også målt iltkoncentrationer nær 0 mg O₂/l. Perioden strakte sig over godt 3 måneder fra juli til oktober.

Udviklingen i iltkoncentrationen kan kort resumeres som følger.



Figur 2.11 Udviklingen i iltkoncentrationen i overflade og bundvand i Furesøen, 1900-1984. DY angiver dybdeinterval i meter.

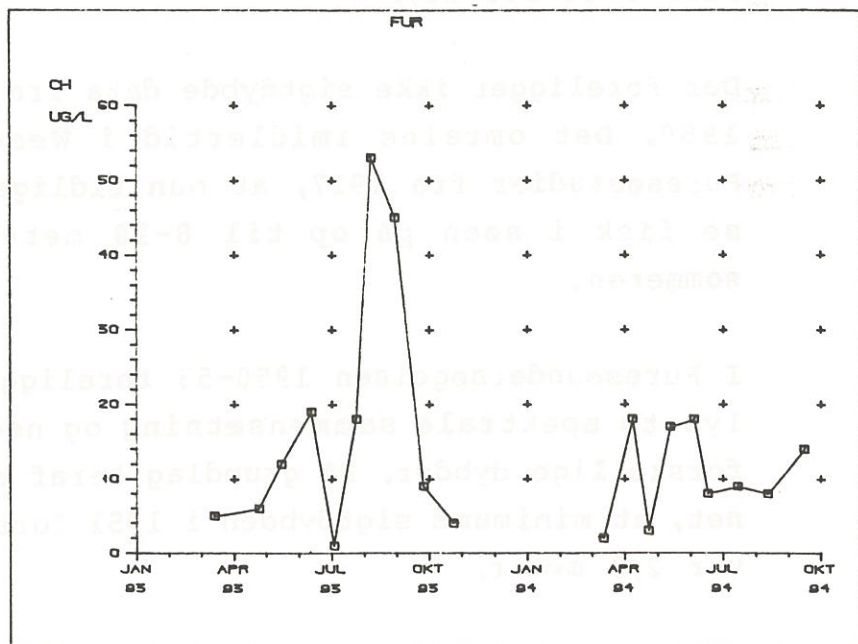
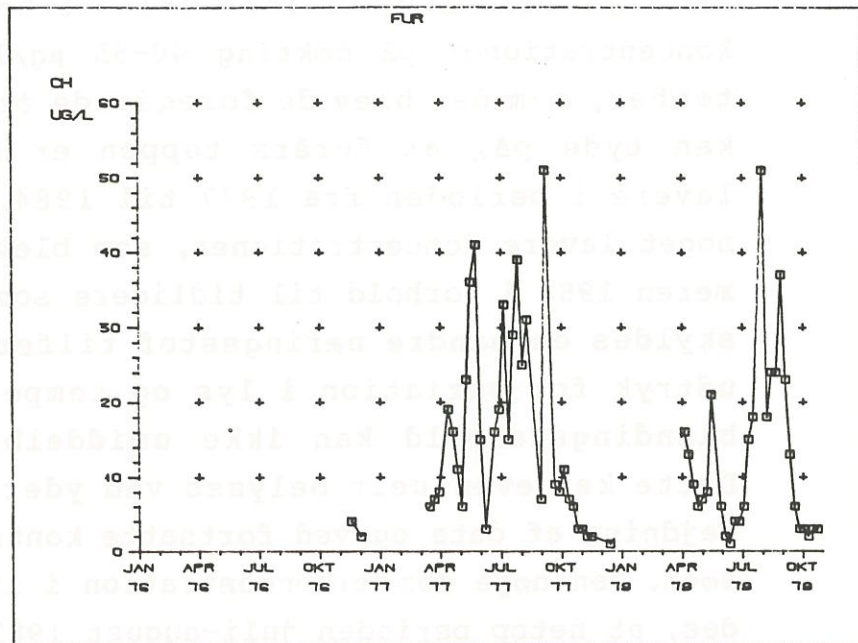
Fra omkring 1900 og frem til 1950 blev iltforholdene i Furesøens bundvand forringet væsentligt, idet minimumsværdierne faldt fra omkring 1-1,5 mg O₂/l til omkring 0 mg O₂/l. Perioden med disse lave iltkoncentrationer blev endvidere forlænget væsentligt.

Fra 1950 og frem til 1977/78 ændrede minimums iltkoncentrationen sig ikke. Perioden med helt lave iltkoncentrationer blev imidlertid forlænget til omkring 3 måneders varighed. Fra 1977/78 til 1983/84 tyder målingerne ikke på, at der er sket ændringer i iltkoncentrationen i Furesøens bundvand.

2.6. Algemængde og sigtddybde

Med stigende næringsssaltskoncentrationer er koncentrationen af planteplankton i vandet også steget og gjort vandet grønt og uklart. Dette har betydet, at sigtddybden i Furesøen er blevet mindre. På grund af lysets ringere nedtrængning i vandet er forholdene for de større rodfæstede planter på bunden blevet dårligere. Dette diskuteres nærmere i afsnit 2.8.

Planteplankton koncentrationen kan måles som klorofylkoncentration i vandet. Der foreligger kun sådanne målinger fra 1977, 1978, 1983 og 1984. Resultatet af målingerne fremgår af figur 2.12. Det ses, at planteplanktonet inden for samme år forekommer periodevis i høje koncentrationer. Typisk forekommer der en forårs top i maj, en sommer og eventuelt en sensommer top i henholdsvis juli og september. Af figuren fremgår, at der i 1977 forekom meget høje koncentrationer i såvel maj, juli, august som september. I 1978 var maj toppen noget mindre.



Figur 2.12 Variationen i målte klorofylkoncentrationer i Furesøen, 1977, 1978, 1983 og 1984.

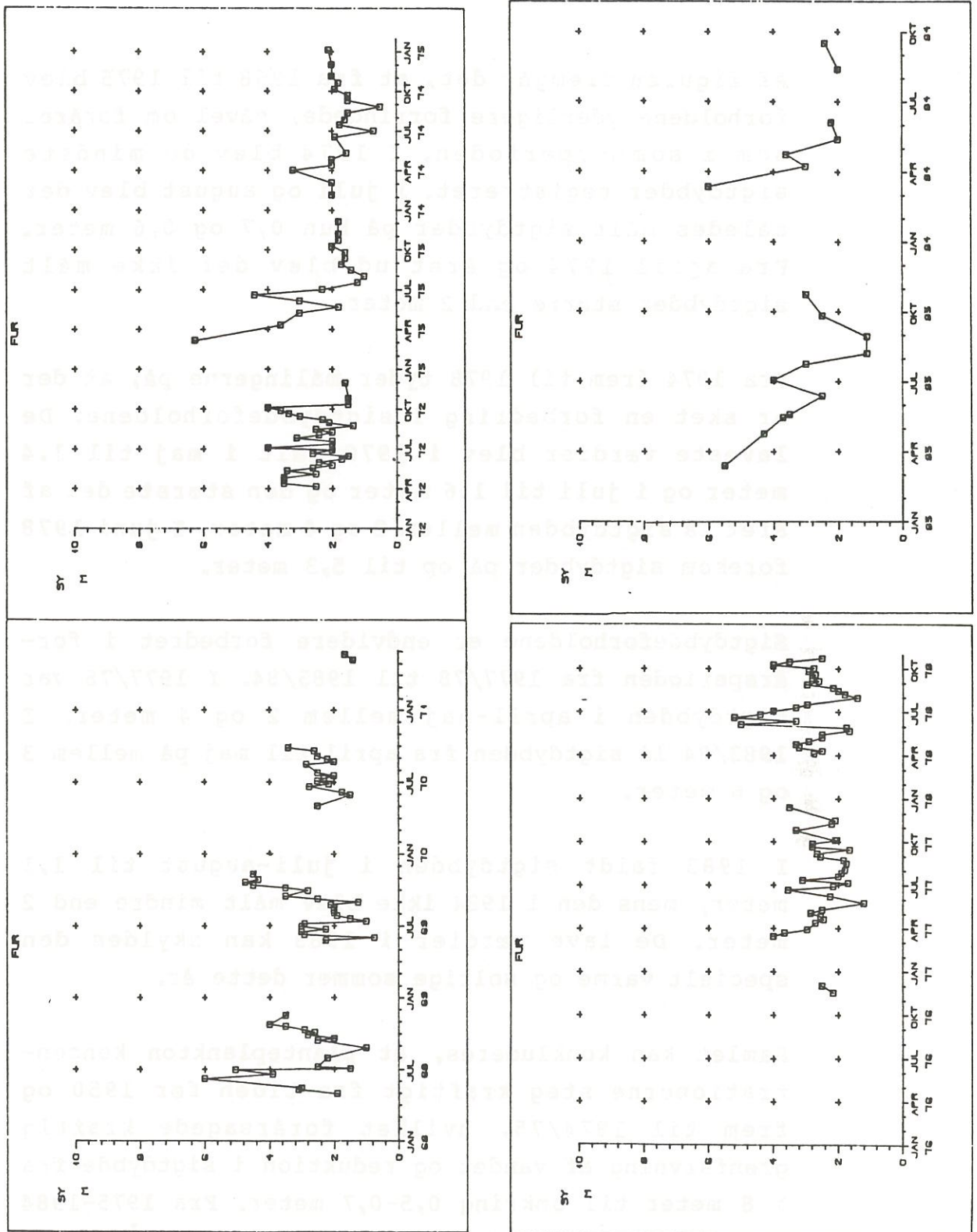
I 1983 var billedet ikke væsentligt forskellig fra 1978. I 1984 blev der ikke målt de høje klorofyl-koncentrationer på omkring 40-55 $\mu\text{g/l}$ i juli-september, som der blev de foregående år. Målingerne kan tyde på, at forårs toppen er blevet noget lavere i perioden fra 1977 til 1984. Hvorvidt de noget lavere koncentrationer, som blev målt i sommeren 1984 i forhold til tidligere sommer målinger skyldes en mindre næringsstof tilførsel eller er udtryk for variation i lys og temperatur og opblandingsforhold kan ikke umiddelbart afgøres. Dette kan eventuelt belyses ved yderligere bearbejdning af data og ved fortsatte kontrolmålinger i søen. Den høje sommerkoncentration i 1983 kan skyldes, at netop perioden juli-august 1983 var ekstrem varm og solrig (den mest tørre og varme sommer i de sidste 50-100 år).

Der foreligger ikke sigtddybde data fra perioden før 1950. Det omtales imidlertid i Wesenberg-Lunds Furesøstudier fra 1917, at man tidligere har kunne se fisk i søen på op til 8-10 meters dybde om sommeren.

I Furesøundersøgelsen 1950-53 foreligger måling af lysets spektrale sammensætning og nedtrængning i forskellige dybder. På grundlag heraf er det beregnet, at minimums sigtddybden i 1951 forekom i maj og var 2,3 meter.

Fra 1968 til 1984 foreligger der regelmæssige sigtddybdemålinger fra Furesøen. De i figur 2.13 repræsenterer den centrale del af søen.

Det fremgår af de ovennævnte oplysninger og figur 2.13, at sigtddybdeforholdene blev forringede væsentlig fra perioden før 1950 og frem til 1968.



Figur 2.13 Sigtdybde målinger i Furesøen, 1968-1984.

Af figuren fremgår det, at fra 1968 til 1975 blev forholdene yderligere forringede, såvel om foråret som i sommerperioden. I 1974 blev de mindste sigtddybder registreret. I juli og august blev der således målt sigtddybder på kun 0,7 og 0,6 meter. Fra april 1974 og året ud blev der ikke målt sigtddybder større end 2 meter.

Fra 1974 frem til 1978 tyder målingerne på, at der er sket en forbedring i sigtddybdeforholdene. De laveste værdier blev i 1978 målt i maj til 1,4 meter og i juli til 1,6 meter og den største del af året lå sigtddybden mellem 2 og 4 meter. I juni 1978 forekom sigtddybder på op til 5,3 meter.

Sigtddybdeforholdene er endvidere forbedret i forårsperioden fra 1977/78 til 1983/84. I 1977/78 var sigtddybden i april-maj mellem 2 og 4 meter. I 1983/84 lå sigtddybden fra april til maj på mellem 3 og 6 meter.

I 1983 faldt sigtddybden i juli-august til 1,1 meter, mens den i 1984 ikke blev målt mindre end 2 meter. De lave værdier i 1983 kan skyldes den specielt varme og solrige sommer dette år.

Samlet kan konkluderes, at planteplankton koncentrationerne steg kraftigt fra tiden før 1950 og frem til 1974/75, hvilket forårsagede kraftig grønfarvning af vandet og reduktion i sigtddybde fra > 8 meter til omkring 0,5-0,7 meter. Fra 1975-1984 er planteplankton koncentrationen faldet noget, hvilket har betydet, at sigtddybden igen er blevet større. I 1984 blev der således ikke målt sigtddybder mindre end 2 meter og fra marts til juni blev den målt til at variere fra 6 meter til ca. 2 meter.

2.7. Planteplankton (Sammensætning og begrænsende torer)

Baggrundsmaterialet for denne redegørelse om planteplanktonets sammensætning i perioderne 1901-02, 1947-52, 1969-70, 1973-74 og 1978 findes i bilag 5.1 - 5.7.

Her skal gives en oversigt over denne redegørelse.

1901-02

Arstidsvariationen af de dominerende arter i 1901-02 var følgende:

Vinter:

Kiselalger:

Melosira italica (rentvandsindikator)

Asterionella formosa (mesotrof)

Forår:

Blågrønalger:

Oscillatoria rubescens (mesotrof, evne til dybderegulering)

Gulalger:

Dinobryon sertularia (rentvandsindikator, evne til dybderegulering)

Kiselalger:

Tabellaria fenestrata (rentvandsindikator, for stor til med lethed at blive græsset af zooplanktonet)

Sommer:

Dominans af arter, der er så store, at de vanskeligt kan græsses af zooplankton.

Kvælstoffikserende blågrønalg:

Anabaena flos-aquae (kommer ved kvælstofmangel i søen, evne til dybderegulering)

Furealger:

Ceratium hirundinella (aktiv svømmer, kan hente næring omkring springlaget)

Kiselalger:

Tabellaria fenestrata
Fragilaria crotonensis

Efterår:

Trådformet blågrønalg:

Lyngbya limnetica

Kiselalger:

Melosira italica
Asterionella formosa

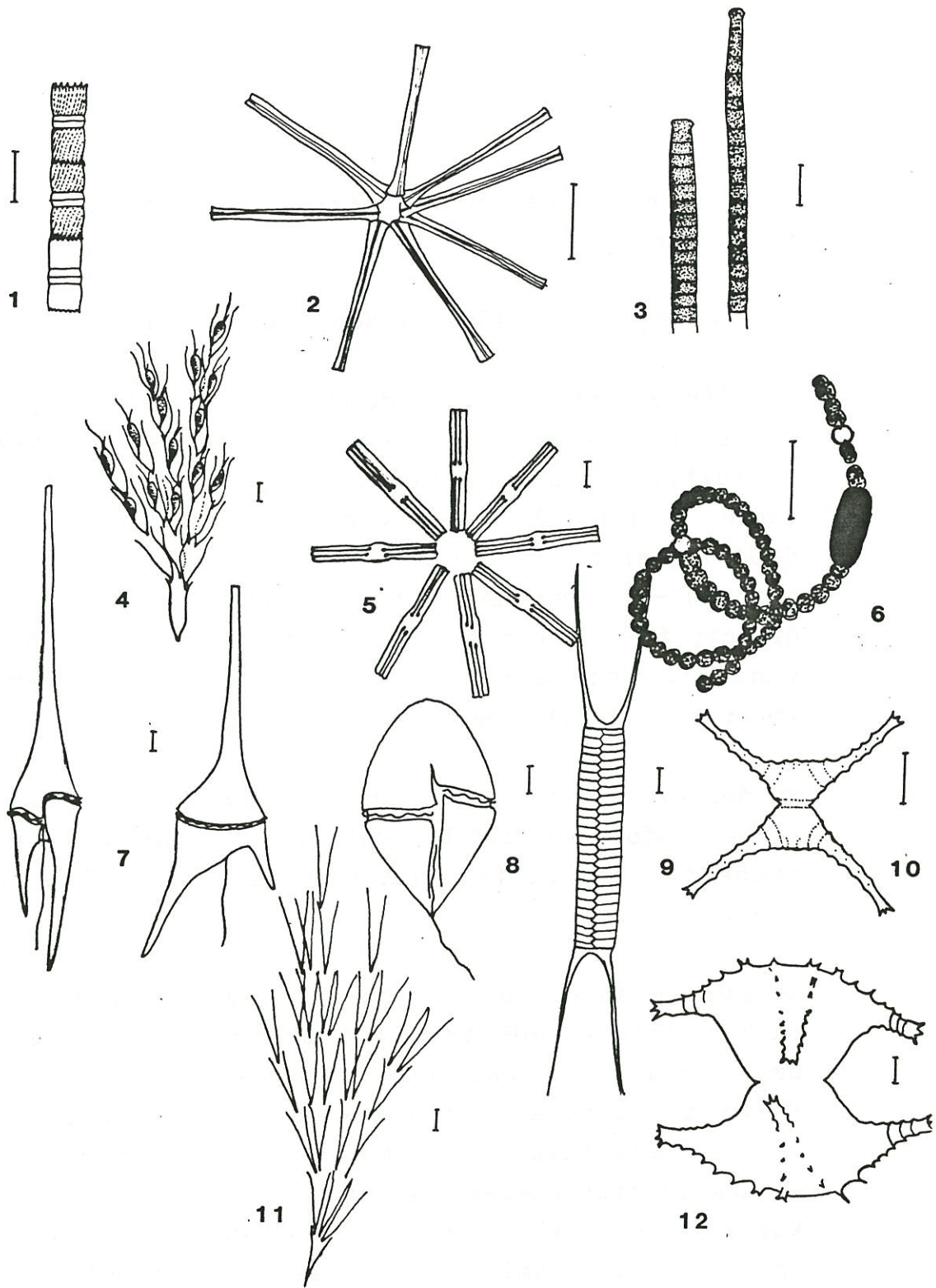
Endvidere fandtes en lang række rentvandsarter i mindre mængde.

Vigtige arter fra 1901-02 ses i figur 2.14.

Der findes ingen sigtdybdemålinger fra denne periode, men ud fra andre iagttagelser kan det med sikkerhed siges, at søen har været særdeles klarvandet (i 1911-13 fandtes bundplanter på 7-8 meters dybde). Der findes heller ingen kemiske målinger fra 1901-02, men søen har givetvis været fosforbe-grænset i længere perioder, i det mindste i de øvre vandlag, mens der i de dybere vandlag kan have været fosfor til stede.

En del af de arter, der fandtes i søen, er i stand til at udføre vertikalbevægelser eller synke ned på dybdere vand, hente næring og derefter stige op igen.

De øvrige arter, der fandtes i 1901-1902, er for størstedelens vedkommende i stand til at optage næring i lave koncentrationer, som bliver udkonkurreret af hurtigere voksende arter, når nærings-saltkoncentrationen stiger. Det er de arter, der kaldes rentvandsarter. De, der fandtes i Furesøen, karakteriserer klarvandede, alkaliske søer. Det er især arter af desmidiaceer, kiselalger og gualalger.



1. *Melosira italica*. Efter Pascher.

2. *Asterionella formosa*. K10 orig.

3. *Oscillatoria rubescens*. Efter Huber-Pestalozzi.

4. *Dinobryon sertularia*. Efter Krieger.

5. *Tabellaria fenestrata*. Efter Nygaard.

6. *Anabaena flos-aquae*. K10 orig.

7. *Ceratium hirundinella*, f. *furcoides* og f. *silesiacum*. K10 orig.

8. *Gymnodinium fuscum*. Efter Nygaard.

9. *Attheya zachariasii*. Efter Pascher.

10. *Staurastrum cingulum*. Efter Nygaard.

11. *Dinobryon sociale*. Efter Huber-Pestalozzi.

12. *Staurastrum sebalzii*. Efter West&West.

Figur 2.14 Vigtige planteplanktonarter fra Furesøen 1901-02.

1947-52

Planteplanktonet bestod i denne periode af en blanding af eutrofe-, mesotrofe- og rentvandsarter. Det var den artsrigeste af undersøgelsesperioderne.

I alt blev 78 planteplanktonarter fundet.

De dominerende arter var følgende.

Vinter:

Kiselalger:

Stephanodiscus astraea, *S. hantzschii* (eutrofe, hurtigtvoksende)

Forår:

Kiselalger:

Stephanodiscus astraea
Asterionella formosa (mesotrof)

Sommer:

Blågrønalger:

Lyngbya limnetica, *Microcystis incerta*,
Gomphosphaeria naegeliana (meso- til eutrofe),
evne til dybderegulering)
Aphanizomenon flos-aquae (kvælstoffikserende,
i øvrigt som de andre)

Furealger:

Ceratium hirundinella (meso- til eutrof, udfører vertikal vandring, hvorved den, så vidt det vides, kan hente næring fra dybere vandlag)

Gulalger:

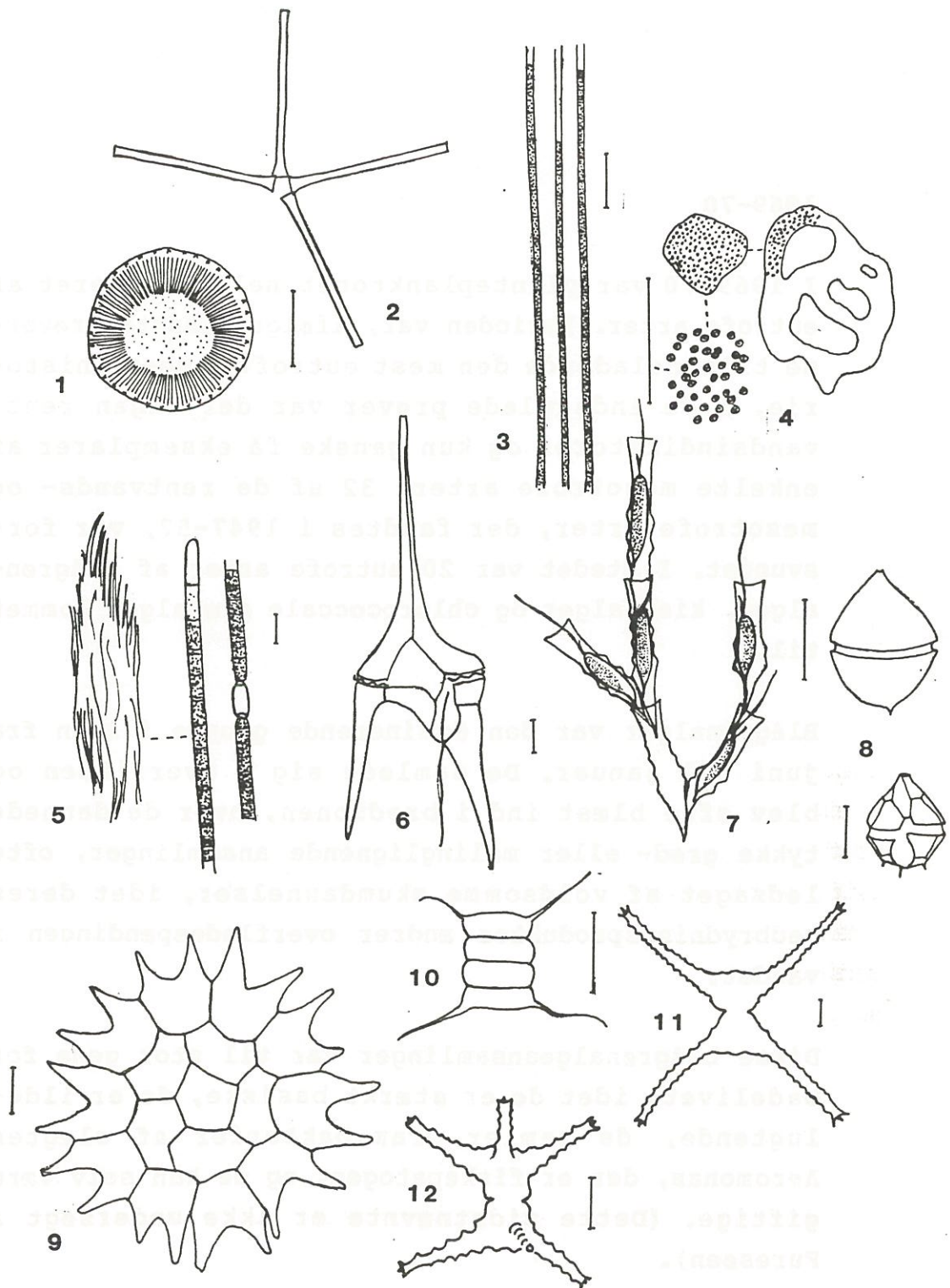
Dinobryon divergens (mesotrof, evne til dybde-
regulering)

22 af de rentvandsarter, der fandtes i søen i 1901-02 var forsvundet. I stedet var 11 mesotrofe arter af furealger og gulalger og 21 eutrofe arter af blågrønalger, kiselalger og chlorococcale grønalger kommet til.

Dominerende og karakteristiske arter fra 1947-52 ses af figur 2.15.

I 1952-53 var søens planteplankton vækstbegrænset af lav fosforkoncentration i forårsperioden og af lav kvælstofkoncentration i efterårsperioden. Men på trods af fosforbegrænsningen var der sket et markant artsskifte hos forårskiselalgerne siden 1901-02 fra rentvandsarter til eutrofe arter. Det tyder på en generel stigning i fosforniveauet søen.

Det store artsantal og skiftet mellem eutrofe-, mesotrofe- og rentvandsarter tyder på, at der i 1952-53 var ved at ske ændringer i søens økosystem. Det kan tolkes som en gradvis tilpasning til et højere næringssaltniveau i søen.



1. *Stephanodiscus astraea*. K10 orig.

2. *Asterionella formosa*. K10 orig.

3. *Lyngbya limnetica*. Efter G.M. Smith i Huber-Pest.

4. *Microcystis incerta*. Efter Komárek.

5. *Aphanizomenon flos-aquae*. Efter Komárek.

6. *Ceratium hirundinella f. austriacum*. K10 orig.

7. *Dinobryon divergens*. K10 orig.

8. *Peridinium aciculiferum*. K10 orig.

9. *Pediatrum boryanum*. K10 orig.

10. *Scenedesmus quadricauda*. K10 orig.

11. *Staurastrum chaetoceros*. K10 orig.

12. *Staurastrum pingue*. K10 orig.

Figur 2.15 Vigtige planteplanktonarter fra Furesøen 1947-52

1969-70

I 1969-70 var planteplanktonet helt domineret af eutrofe arter. Perioden var, ifølge planktonprøverne tilsyneladende den mest eutrofe i søens historie. I de indsamlede prøver var der ingen rentvandsindikatorer og kun ganske få eksemplarer af enkelte mesotrofe arter. 32 af de rentvands- og mesotrofe arter, der fandtes i 1947-52, var forsvundet. I stedet var 20 eutrofe arter af blågrøn-alger, kiselalger og chlorococcale grøn-alger kommet til.

Blågrøn-alger var den dominerende gruppe i søen fra juni til januar. De samlede sig i overfladen og blev ofte blæst ind i bredzonen, hvor de dannede tykke grød- eller malinglignende ansamlinger, ofte ledsaget af voldsomme skumdannelser, idet deres nedbrydningsprodukter ændrer overfladespændingen i vandet.

Disse blågrøn-algeansamlinger var til stor gene for badelivet, idet de er stærkt basiske, de er ilde-lugtende, de samler Gram-bakterier af slægten *Aeromonas*, der er fiskepatogen, og de kan selv være giftige. (Dette sidstnævnte er ikke undersøgt i Furesøen).

Livsvilkårene for de fisk, der jager med synet, som Gedde og Aborre, blev desuden væsentligt forringet, idet sigtdybden under blågrøn-algevandblomst er meget ringe. I 1969-70 var minimum sigtdybde 1,3 meter i juli, i 1951 var minimum sigtdybden 2,3 meter i maj.

Blågrøn-alger er generelt vanskeligt tilgængelige for zooplankton, fordi de er for store. Under blå-

grønalgemaksima består zooplanktonet derfor af ganske få arter.

Arstidsvariationen af de dominerende planteplanktonarter i 1969-70 var følgende:

Vinter:

Volvocale grønalger:

Chlamydomonas sp. (under isen i marts, lille, selvbevægelig, hurtigvoksende, gsn. 0,92 mg/l)

Forår:

Kiselalger:

Stephanodiscus hantzschii (lille, hurtigvoksende, eutrof, gsn. 2,7 mg/l, max. 7,7 mg/l)

Asterionella formosa (større, mesotrof, gsn. 0,51 mg/l)

Furealger:

Peridinium aciculiferum (mesotrof, gsn. 0,15 mg/l)

Sommer:

Blågrønalger:

Microcystis aeruginosa (eutrof, stor, kolonidannende, evne til dybde^eregulering, gsn. 8,6 mg/l, max. 13,5 mg/l)

Anabaena spiroides (kvælstoffikserende, i øvrigt som *M. aeruginosa*, gsn. 0,7 mg/l)

Efterår:

Blågrønalger:

Microcystis aeruginosa (gsn. 0,3 mg/l)

Kiselalger:

Melosira granulata var. *angustissima* (eutrof, tråd-
formet, gsn. 0,32 mg/l)

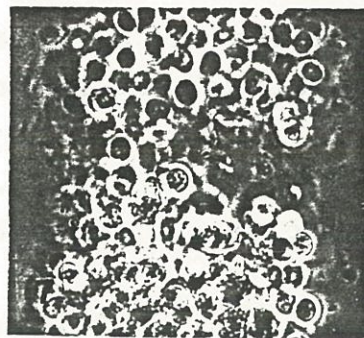
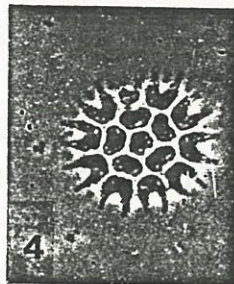
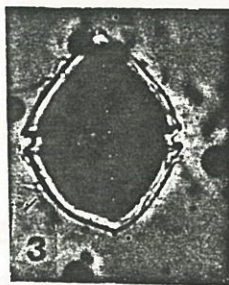
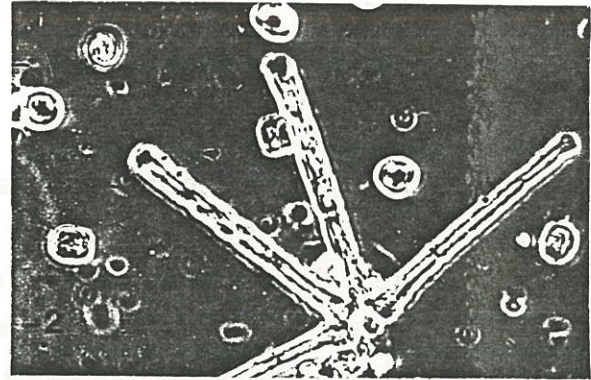
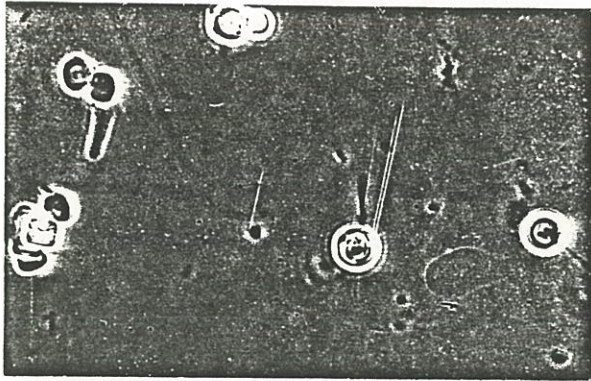
Stephanodiscus hantzschii (gsn. 0,14 mg/l)

De vigtigste arter fra 1969-70 ses af figur 2.16.

Fosforniveauet i søen i 1969-70 var særdeles højt og planteplanktonets vækst begrænset af tilgængeligt kvælstof.

I 1951-52 var niveauet for uorganisk fosfor 0-20 µg/l i overfladevandet. I begyndelsen af 1970'erne var det 300-600 µg/l (og total fosfor 500-800 µg/l). Det giver i 1970'erne store muligheder for de arter, der enten kan hente kvælstof på dybere vand eller optage frit kvælstof fra luften.

Blågrønalgerne, der dominerede i 1969-70, kan alle foretage dybderegulering ved hjælp af et luftvakuolesystem, der tømmes og fyldes efter om algerne er i næringsmangel eller ej. Enkelte af dem kan derudover fikserer frit kvælstof fra luften.



1. *Chlamydomonas* sp. (med svingtråde) og *Stephanodiscus hantzschii* (hatteæskeformet). Furesøen marts 1970. KiO foto. 1500 x.
2. *Stephanodiscus hantzschii* og *Asterionella formosa* (stjerneformet). Furesøen maj, 1970. KiO foto. 1500 x.
3. *Peridinium aciculiferum*. Furesøen april 1970. KiO foto. 1500 x.
4. *Pediastrum boryanum*. Furå juni 1970. KiO foto. 1500 x.

5. *Scenedesmus quadricauda*. Furå juni 1970. KiO foto. 1500 x.
6. *Microcystis aeruginosa*. Koloni bestående af mange celler sammenholdt af en gelé. Furesøen juli 1970. KiO foto. 375 x.
7. Samme art. Furesøen juli 1970. KiO foto. 1500 x.
8. *Anabaena spiroides*. Furesøen august 1969. KiO foto. 1500 x.

Figur 2.16 Vigtigste planteplanktonarter fra Furesøen, 1969-70.

1973-74

I 1973-74 toppedede søens fosforniveau og planteplanktonets vækst var kvælstofbegrænset. Blågrønalger dominerede fra juli til november. På grundlag af de indsamlede prøver var der tilsyneladende sket ændringer i planteplanktonsammensætningen siden 1969-70, som kunne tydes som en forbedring i søens tilstand. Der målttes kun omkring halvdelen af den blågrøinalgemængde, der blev fundet i 1969-70. Denne tilsyneladende nedgang må betragtes som fiktiv, idet prøvetagningsproceduren var forskellig i de to prøvetagningsperioder: I 1969-70 blev udelukkende benyttet prøver fra 0,3 meters dybde, i 1973-74 blev benyttet blandingsprøver fra 0,5, 1,5, 2,0 og 3,0 meters dybde. Denne ændrede prøvetagningsprocedure kan forklare nedgangen i blågrøinalgemængden i prøverne. Furealgen *Ceratium hirundinella* var relativ almindelig, men der forekom ikke nogen af de tidligere rentvands- eller mesotrofe arter. Artslisten var væsentlig kortere end i 1969-70, på trods af, at der i begge undersøgelser er benyttet både vand- og netprøver. Det tyder på en fortsats forarmning af økosystemet i Furesøen.

Følgende arter dominerede planteplanktonets års-cyklus:

Vinter:

Blågrønalger: *Microcystis aeruginosa*

Furealger: *Gymnodinium helveticum*

Forår:

Kiselalger: *Stephanodiscus hantzschii*

Sommer:

Blågrønalg: *Microcystis aeruginosa* (gsn. 3,6
mg/l)

Furealger: *Ceratium hirundinella* (gsn. 0,22 mg/l)

Efterår:

Blågrønalg: *Microcystis aeruginosa* (gsn. 0,3
mg/l)

Kiselalger: *Stephanodiscus hantzschii*, *Melosira*
granulata var. *angustissima*

1978

I 1978 var der sket en reduktion i blågrønalmængden og en stigning i mængden af den store, selvbevægelige furealge, *Ceratium hirundinella* i forhold til 1973-74. I denne undersøgelse var prøvetagningsproceduren identisk med den, der blev benyttet i 1973-74, så forskydningerne må betragtes som reelle. Blågrønalmængden var i sommerperioden af samme størrelsesorden, som i 1973-74 (3,6 mg/l), men den periode, hvor blågrønalgene dominerede, var indsnævret til kun at omfatte juli-september.

Ceratium hirundinellas biomasse var derimod steget ca. 20 gange, fra gsn. 0,22 mg/l i 1973-74 til gsn. 4,54 mg/l i 1978 i sommerperioden.

Kiselalger var mere betydende i efterårsperioden end de havde været i 1969-70 og 1973-74. Det skyldes sandsynligvis, at blågrønalgerne var forsvundet allerede ved udgangen af september.

Artslisten var kort, 40 arter. Men den kan nok ikke sammenlignes med de tidligere, fordi der ved bestemmelsen kun er benyttet vandprøver mod tidligere vand- og netprøver. I netprøverne vil man få koncentreret de sjældnere arter.

Arscyklus af dominerende arter var i øvrigt som i 1973-74.

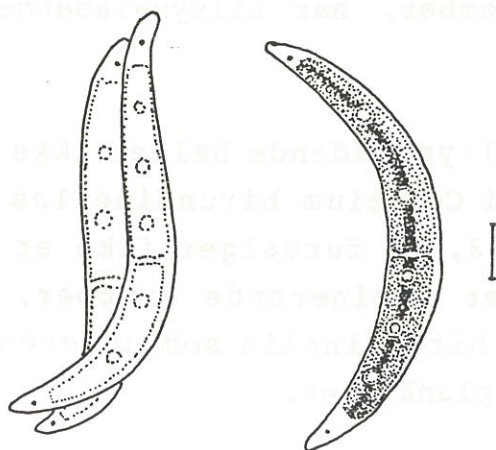
I 1978 var planteplanktonet stadig vækstbegrænset af tilgængeligt kvælstof, men søens fosforniveau var faldende. I overfladen var koncentrationen af uorganisk fosfor 200-400 µg/l og af total fosfor 300-500 µg/l.

Tilsyneladende var furealgen *Ceratium hirundinella* mere konkurrencedygtig ved disse koncentrationer end ved de højere, som fandtes tidligere i 1970'erne. Over halvdelen af planteplanktonets biomasse i sommerperioden bestod af denne art.

Man kunne frygte, at der skulle ske en udvikling med *Ceratium hirundinella*, som den, der er sket i Farum Sø, hvor denne art nærmest har været enerådende i søen fra maj til oktober og i 1978 forårsagede en meget høj primærproduktion, der kun blev overgået af primærproduktionen i Vejle Sø. Dette på trods af, at der var næringssaltbegrænsning i den fotiske zone. Men temperaturspringlaget, der holder

på det næringsrige bundvand, ligger kun på 7-8 meters dybde i Farum Sø, mens det i Furesøen ligger på 14-15 meters dybde. Alene af den grund må man forvente, at *Ceratium hirundinella* ikke kommer til at spille samme rolle i Furesøen som i Farum Sø, idet den skal bruge megen energi på at hente næring op fra vandmasserne under det dybtliggende springlag.

Rigelig forekomst i sommeren 1978 af desmidiaceen *Closterium parvulum* tyder ligeledes på en ændring af søens tilstand i gunstig retning.



Figur 2.17 *Closterium parvulum*. Furesøen juli 1978. KiO orig.

1983

Fra 1983 findes en meget summarisk gennemgang af planteplanktonets årstidsvariation foretaget af Kirk & Kirk (1984) i forbindelse med et specialearbejde om bundlevende krebsdyr i Furesøen:

Medio marts - medio maj: kiselalger
- maj - - juli: grønalger
- juli - - sept: blågrønalger
- sept - - nov: kiselalger

Til sammenligning med de tidligere undersøgelser havde det været nyttigt med en grundig bearbejdning af prøverne fra 1983 og de følgende konklusioner kan kun drages med forsigtighed:

Den tendens i udviklingen i perioden fra 1973/74 til 1978, der blev iagttaget, hvor blågrønalgedominansen fra at strække sig til omtrent hele året blev afkortet til kun at omfatte sommerperioden juli-september, har tilsyneladende holdt frem til 1983.

Der er tilsyneladende heller ikke sket yderligere tilvækst i *Ceratium hirundinellas* sommerbiomasse siden 1978, da furealger ikke er nævnt af Kirk & Kirk under dominerende grupper. De omtaler dog *Ceratium hirundinella* som udgørende "en stor del" af sommerplanktonet.

Kemiske målinger fra 1984 viser, at søens planteplankton atter i løbet af sommeren kan være fosforbegrænset, selvom det kun er i en kortere periode. Resten af året er det stadig kvælstofbegrænset. Det burde betyde, at der er sket en reduktion af sommerbiomassen af bl.a. blågrønalger, der har udgjort

det alvorligste problem for søen, både for det øvrige økosystem og for den rekreative udnyttelse af søen.

2.8. Rankegrøden

1911

En af Furesøens største biologiske og rekreative kvaliteter har tidligere været den meget veludviklede og artsrige undervandsvegetation (submers vegetation).

Så da en række forskere i begyndelsen af dette århundrede iværksatte en større undersøgelse af søen, indgik den submerse vegetation som et væsentligt element i undersøgelsen.

Der fandtes på dette tidspunkt et plantebælte på fra 50 til 500 m langs hele Furesøens kyst, med undtagelse af Store Kalv, hvis bund var dækket af plantevækst.

Følgende citat fra Wesenberg Lund's Furesø Studier fra 1917 giver et indtryk af Furesøens rige submerse vegetation.

"Intet Steds i Furesø er Vegetationen rigere end i Store Kalven. Indrandet af sit ovenfor omtalte brede Scirpus-Phragmites-Bælte ligger paa en Dybde af 3-4 m Bugtens store, undersøiske Slette, i Sommerhalvaaret er den dækket af et mægtigt, næsten uafbrudt Plantetæppe. En efteraarssdag efter en længere Stilleperiode er en Baadfart henover Bugten for enhver Naturelsker, men mest for Botanikeren, en sjælden Nydelse. Gennem det klare Vand ser man

tydeligere Plantedækkets enkelte Komponenter. Næsten alle Søens Plantearter, Fanerogamer saavel som Kryptogamer, vokser her. Den eneste Art, der ikke er fundet i Store Kalven, er *Chara jubata*. Ikke alene er Vegetationen her i Kalven saa mærkelig rig, men Individierne selv er kraftige og prægtigt udviklede.

Om en Bæltedannelse er der, saavidt vi hidtil har kunnet se, egentlig ikke Tale. Grunden hertil er vel nok, at Dybden næsten overalt er den samme. Dog kan man vistnok fremhæve, at *Stratiotes*, der ikke er fundet udenfor Store Kalven, er alm. i Bugtens inderste Del, men næppe gaar ud over 3 m, og at Kalven udad mod Dybet paa Skraaningen nedad mod denne ender med en mægtig, fuldkommen ensartet, *Tolypellopsis*-Bevoksning, der paa klare Solskinsdage som et eneste lysegrønt Tæppe er synligt gennem Vandspejlet. Iøvrigt er over hele Store Kalven *Tolypellopsis* den dominerende Plante. Dens lysegrønne Bevoksninger brydes nu og da af store, ofte pudeformede, mere i det rødlige faldende Partier af *Chara ceratophylla*, ogsaa *Nitella*, baade *N. syncarpa* og den mere robuste *N. opaca*, vokser over store Strækninger. *Chara dissoluta* er hyppig. *Chara contraria* og *fragilis* optræder hist og her mellem de dominerende Arter. Inde paa noget lavere Vand dominerer *C. aspera* og *rudis*, skønt den sidste ogsaa kan leve ude paa større Dybder. Gennem disse frodige, snart tæppe-, snart pudeformede Bevoksninger af *Characeer*, hvis Tykkelse, særlig hvor *Tolypellopsis* er eneraadende, er over ca. en Meter, bryder Søens Fanerogramflora sig Vej op til Overfladen, som lange gullige Traade, fornedensvagt besat med Blade, søger *P. lucens* og *P. perfoliatus* og deres Krydsninger op mod Overfladen, hvor de udfolder deres store Bladduske. Spredt over Bugten danner de store lysegrønne Pletter. Brunlige Farve-

toner angiver Voksepladserne for Myriophyllum, mørkegrønne for Elodea og Ceratophyllum og hvidlige (i Juli) for Batrachium. Hvad der bidrager til at øge Farvepragten, der os bekendt er større end i nogen anden dansk Sø, er Planternes forskellige kalkinkrusterende Evne."

(Scriptus = søkogleaks, Pragmites = tagrør, Fanerograner = blomsterplanter, Kryptogamer = sporeplanter, Chara jubata = en kransnålalge, Stratiodes = krebseklo, Tylopellopsis (= Nitellopsis) = kransnålalge, Chara og Nitella = kransnålalger, P. luceus = glinsende vandaks, P. perfolialus = hjertebladet vandaks, Myriophyllum = tusindblad, Elodea = vandpest, Ceratophyllum = hornblad, Batrachium = vandranunkel).

Der blev fundet i alt 33 submerse (dvs. lever under vandoverfladen) plantearter, heraf 18 arter af blomsterplanter, 5 mosarter og 10 arter af kransnålalger.

De fleste arter var udbredt fra 1 til 2 meters dybde ud til 7 til 8 meters dybde.

1951

Med henblik på en sammenligning med undersøgelsen fra 1911, blev der i 1951 igen udført en større undersøgelse af Furesøens submerse vegetation.

Undersøgelsen fra 1951 viste at:

- den dybde som de enkelte arter var udbredt til var langt mindre, således at den del af Furesøens bund, der var dækket af submers vegetation må være blevet stærkt mindsket i forhold til 1911,
- der var sket en ændring af artssammensætningen og den kvantitative fordeling mellem arterne, således at de arter, der er mest følsomme overfor nedsat vandgennemslæbning var gået stærkt tilbage eller helt forsvundet, mens nogle få arter, der er mindre følsomme overfor vandets gennemslæbning var gået frem i perioden fra 1911 til 1951.

Dybdegrænserne for de enkelte plantearter havde ændret sig fra 7-8 meter til 3,5 til 6 meter.

Den dybde, hvor arterne havde deres største udbredelse, var også ændret, f.eks. havde hjertebladet vandaks sin største udbredelse på 3,5-4 meters dybde i 1911, mens hyppigheden var størst på 2,5-3 meters dybde i 1951.

Antallet af de forureningsfølsomme arter var gået tilbage.

I 1951 blev der således fundet 4 arter af kransnålsalger mod 10 i 1911 og 2 arter af mosser mod 5 i 1911. Der blev fundet 13 arter af blomsterplanter i 1951 mod 18 i 1911.

Kransnålsalgen *Nitellopsis* (= *Tolypellopsis*), der i 1911 var Furesøens mest almindelige plante udbredt ud til 8 meters dybde, blev kun fundet i få prøver i 1951, og var udbredt til 3,5 meters dybde. Nitel-

loppis er en sjælden kransnålealge, der kun er fundet i få søer. Den massive forekomst i Furesøen var derfor bemærkelsesværdig.

Nogle få arter, der foretrækker næringsrigt vand, var taget til i mængde på lavere dybder i perioden fra 1911 til 1951. Det drejede sig om kredsbladet vandranunkel, akstusindblad og tornet hornblad.

Grønalggen *Rhizoclonium*, der ikke blev fundet i 1911, var ret hyppig i 1951.

1983

Med henblik på en sammenligning med undersøgelserne fra 1911 og 1951 blev der i 1983 udført en undersøgelse af Furesøens submerse vegetation i forbindelse med Hovedstadsrådets recipienttilsyn.

Undersøgelsen viste, at ændringerne i perioden 1911-51 var forstærket i perioden 1951-83.

- Dybdegrænserne for de enkelt arter var rykket endnu et stykke opad.
- Antallet af arter var blevet yderligere begrænset.

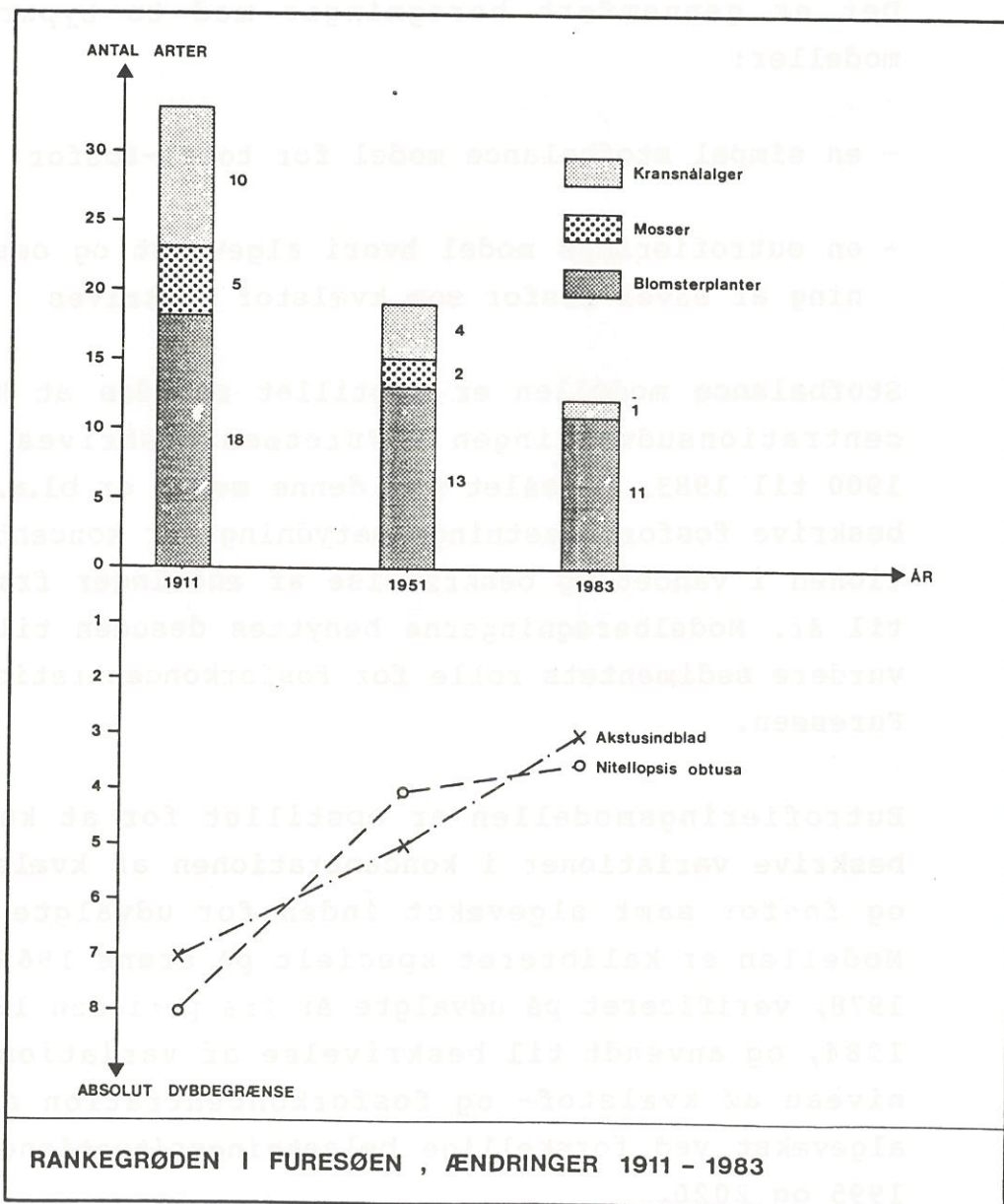
Dybdegrænserne for de enkelte plantearter var gået yderligere op fra 3,5 til 6 meter i 1951 op til 1 til 4,5 meter i 1983.

Den dybde hvor arterne havde deres største udbredelse var også hævet yderligere f.eks. havde hjer-tebladet vandaks sin største udbredelse i 2,5-3 meters dybde i 1951 og i 0,5-1,5 meters dybde i 1983.

Antallet af arter var gået yderligere tilbage, idet der i 1983 blev fundet 1 kransnålalgeart, mod 4 i 1951 ingen mosarter mod 2 i 1951 og 11 submerse blomsterplanter mod 13 i 1951. Den ene kransnålealge var Nitellopsis - Furesøens karakterplante fra 1911. Denne blev fundet som et enkelt skud i en ud af 15 prøver.

Grønalgen Rhizoclonium var taget yderligere til i hyppighed.

I figur 2.18 er ændringerne Furesøens undervandsvegetation (rankegrøden) fra 1911 over 1951 frem til 1983 skitseret i hovedtrækkene i form af artsantal og dybdeudbredelse.



Figur 2.18 Rankegrøde i Furesøen, ændringer 1911-1983.

3. MODELBESKRIVELSE

For at vurdere den fremtidige udvikling i Furesøens tilstand med forskellige belastninger og for at beskrive betydningen af stofomsætningen i søer er der gennemført modelberegninger for perioden 1900-2030.

Der er gennemført beregninger med to typer af modeller:

- en simpel stofbalance model for total-fosfor
- en eutrofierings model hvori algevækst og omsætning af såvel fosfor som kvælstof beskrives

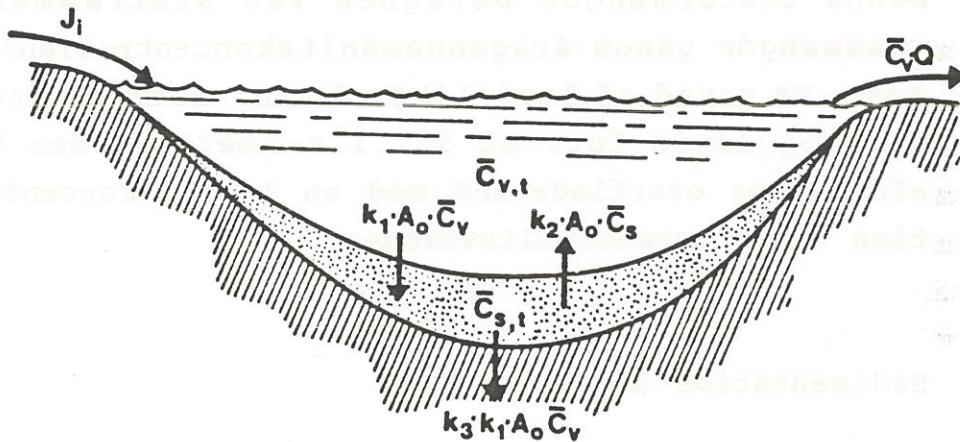
Stofbalance modellen er opstillet således at koncentrationsudviklingen i Furesøen beskrives fra 1900 til 1983. Formålet med denne model er bl.a. at beskrive fosforbelastnings betydning for koncentrationen i vandet og beskrivelse af ændringer fra år til år. Modelberegningerne benyttes desuden til at vurdere sedimentets rolle for fosforkoncentration i Furesøen.

Eutrofieringsmodellen er opstillet for at kunne beskrive variationer i koncentrationen af kvælstof og fosfor samt algevækst inden for udvalgte år. Modellen er kalibreret specielt på årene 1969 og 1978, verificeret på udvalgte år fra perioden 1900-1984, og anvendt til beskrivelse af variation og niveau af kvælstof- og fosforkoncentration samt algevækst ved forskellige belastningssituationer i 1995 og 2020.

3.1. Stofbalancemodel for fosfor

3.1.1. Modelstruktur

I den opstillede stofbalancemodel beskrives koncentrationen af total fosfor i vandet, samt den fosforpulje i sedimentet, som kan frigives til andet (den udvekslelige pulje), For en nærmere beskrivelse af modellen henvises til bilag 6 og Miljøprojekt 16 fra Miljøstyrelsen. I figur 3.1 er gengivet en illustration af koncentrationer, puljer samt processer, som indgår i modellen.



Figur 3.1 Principskitse for stofbalance model. J_i : stoftilførsel, $C_{v,t}$: stofkoncentration i vandet, Q : afstrømmende vandmængde, A_0 : søens areal, C_s : sedimentets stofindhold, K_1 : sedimentationskonstant, K_2 : sedimentfrigivelseskonstant, K_3 : ikke udvekslelig sedimentationsfraktion (irreversibel bindingskonstant).

De processer og stoffluxer som indgår i modellen kan kort beskrives som følger:

Tilført fosformængde (J_i):

Heri indgår bidrag fra spildevand udledt direkte i Furesøen, spildevand tilført via Farum Sø, Birkerød Sø, Søllerød Sø og Vejle Sø, samt diffus belastning med nedbør på søen og afstrømning fra oplandet.

Afstrømmende fosformængde ($C_v \times Q$):

Denne fosformængde beregnes ved afstrømmende vandmængde gange årsgennemsnitskoncentrationen i søen. På grund af lavdeling af vandmasserne tages der dog højde for, at der i sommerperioden kun afstrømmer overfladevand med en lavere koncentration end årsgennemsnitsværdien.

Sedimentation ($K_1 \times A \times C_v$):

Den totale stoftilførsel til sedimentet pr. år (brutto sedimentationen) beskrives proportionalt med årsgennemsnitskoncentrationen.

Irreversibel binding af fosfor i sediment ($K_3 \times K_1 \times A \times C_v$):

En brøkdel af det sedimenterede fosfor bindes irreversibelt i sedimentet. Processen virker i modellen som et dræn for fosfor.

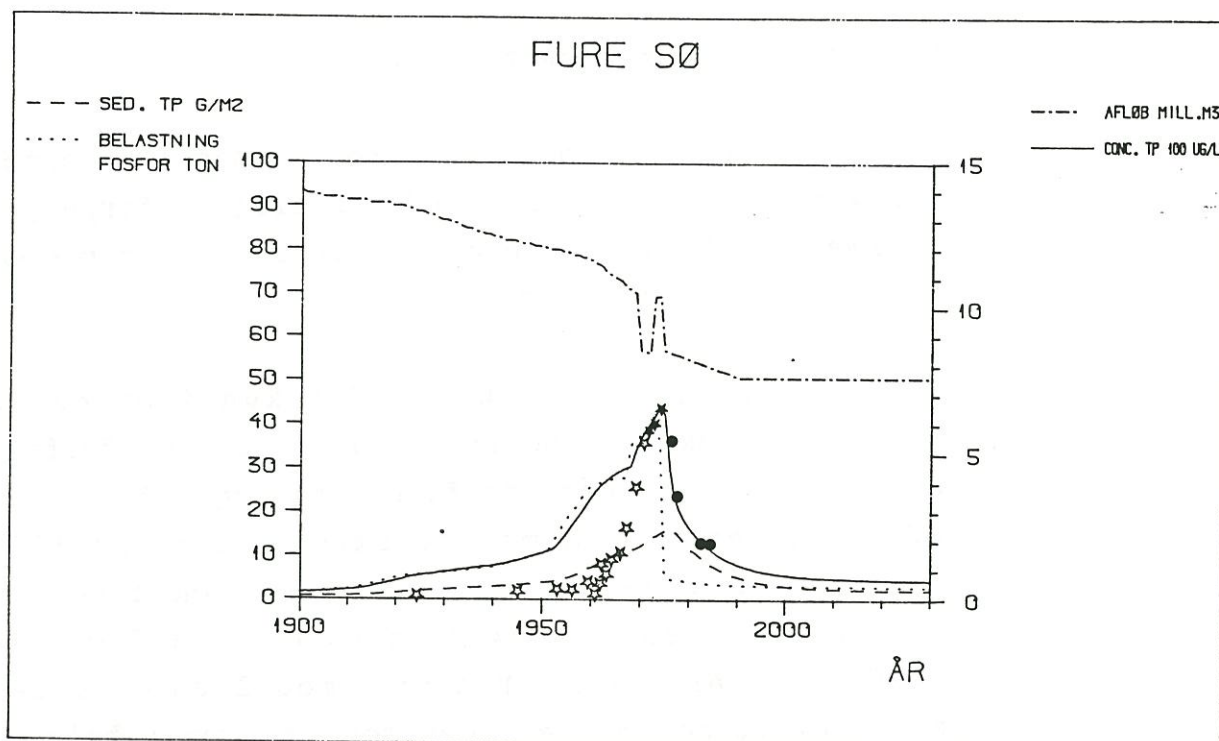
Frigivelse fra sediment:

Den del af det sedimenterede fosfor som ikke bindes irreversibelt indgår i en udvekslelig fosforpulje i sedimentet. Frigivelsen af fosfor beskrives proportionalt med denne pulje.

I modellen antages det, at der kun i en del af Furesøen er sket ophobning af udveksleligt fosfor i perioden med stigende fosforbelastning. På baggrund af registrerede sedimentstrukturer i forskellige dybder antages det, at kun sedimenter under sommer-springlagsdybden (ca. 14 m) fungerer som lager for fosfor fra år til år. Det er i modellen endvidere antaget, at sedimentationen som sker over hele den centrale del af Furesøen ved en tragteffekt samles på dybder større end 14 meter. Det antages desuden, at der fra sedimentet i Store Kalv årligt frigives en fosformængde svarende til den mængde, der sedimenterer i Store Kalv, minus den del, der bindes irreversibelt.

3.1.2. Kalibrering og beskrivelse af 1900-2020

De konstanter, som indgår i modellen, er fastlagt i bilag 6, dels ud fra tidligere gennemførte målinger og forsøg, dels ved kalibrering af modellen på fosforkoncentrationsmålinger fra perioden 1900-1984. Ved kalibreringer er der lagt størst vægt på at beskrive perioden 1965-84. Resultatet af kalibreringen fremgår af figur 3.2, hvor det simulerede koncentrationsforløb er sammenlignet med målte fosforkoncentrationer.



Figur 3.2 Simulerede værdier samt målte fosfor-koncentrationer i Furesøen 1900-2030.
 vinter overfladekonc. af PO_4 -P
 vinter overfladekonc. af total-P
 årsgennemsnitss total-P konc.

Det fremgår af figuren, at frem til 1968 er de simulerede værdier væsentlig højere end de målte. En del af forklaringen herpå er, at de målte værdier er vinterkoncentrationer af uorganisk fosfor, mens de simulerede er årsgennemsnitlige total fosfor værdier. Vurderet ud fra de perioder, hvor der foreligger begge typer af måling skønnes dette dog kun at kunne forklare 5-10% højere værdier end de målte. De simulerede værdier er ca. dobbelt så høje som de målte (figur 3.2). Den resterende del af forskellen kan sandsynligvis alene forklares ved at modellens struktur enten ikke er god nok til at beskrive hele forløbet, eller at konstanterne er ændret i perioden efter 1968 i forhold til perioden før 1968. Der har ikke været mulighed for inden for

rammerne af denne rapport at belyse dette forhold nærmere. Fra 1968 til 1984 er der rimelig god overensstemmelse mellem målte og simulerede værdier.

Med modellen beregnes det, at ved den nuværende belastning vil fosforkoncentrationen omkring 2020 have nået et ligevægtsniveau omkring 0,8 mg TP/l. Dette koncentrationsniveau svarer til det målte koncentrationsniveau omkring 1962-63.

3.1.3. Modelusikkerhed

Ved følsomhedsanalyse er det i bilag 6 beskrevet hvilken betydning variation i fastlæggelse af modellens konstanter har for beregnede koncentrationsniveauer. Af denne analyse fremgår det, at fastlæggelse af sedimentationen (K_1) samt den brøkdæl, der bindes irreversibelt i sedimentet (K_3) er af stor betydning for de beregnede koncentrationer i vandet.

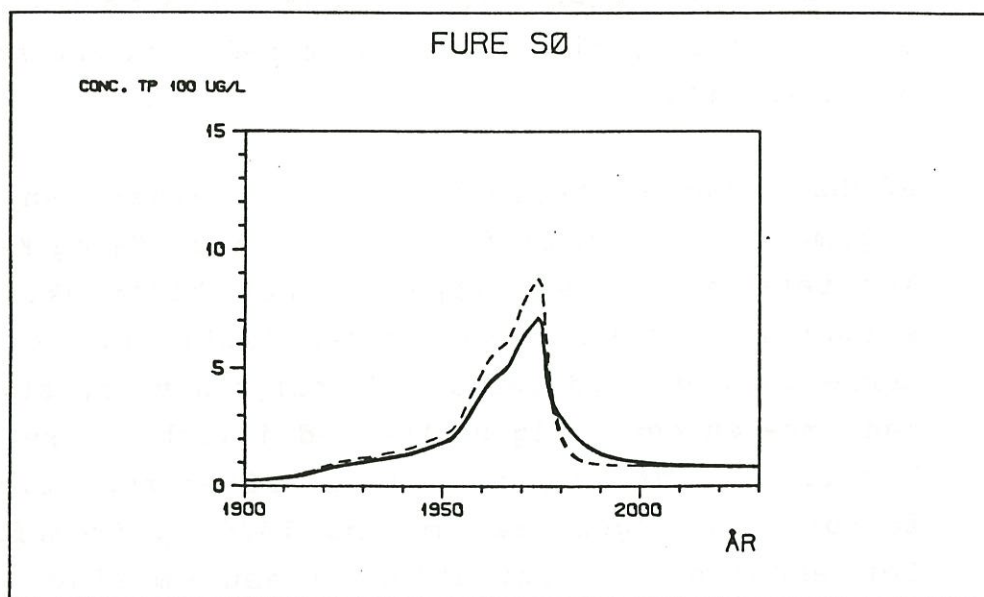
På baggrund af teoretiske overvejelser kan der argumenteres for, at forholdet mellem K_1 og K_3 er konstant efter 1975 (fra hvilket tidspunkt afstrømningen ikke ændres væsentligt). Det er på denne baggrund ved følsomhedsanalysen vist, at der kan være en betydelig usikkerhed i forbindelse med beskrivelse af responsforløbet efter reduktion i fosforbelastningen fra omkring 1975 og fremefter. Det endelige koncentrationsniveau omkring 2020 forrykkes derimod ikke ved de forskellige beregninger.

Da responsforløbet fra 1975 til 1983 imidlertid beskrives i god overensstemmelse med de målte værdier vurderes det, at den opstillede og kalibrerede model kan benyttes for diskussionen af såvel sedimentets rolle som alternative belastningers betydning for koncentrationsforløbet i søen.

Betydningen af alternative belastninger for koncentrationsforløbet og vandkvaliteten i Furesøen diskuteres i næste kapitel. I det følgende gives en omtale af sedimentets betydning for den observerede og fremtidige koncentrationsudvikling for total fosfor i Furesøens vand.

3.1.4. Sedimentets rolle

Til belysning af sedimentets rolle er der gennemført to typer af beregninger med stofbalancemodellen (figur 3.3)



Figur 3.3 Sedimentets rolle for beregnede fosforkoncentrationer i vandet.
— med fosforpulje i sedimentet
--- uden fosforpulje i sediment

Ved den ene type opbygges ved stigende belastning en fosforpulje i sedimentet. En del af denne pulje frigives ved faldende belastning. Denne beregning fremgår af den fuldt optrukne linje i figur 3.3.

I den anden type beregning regnes der med, at en del af det sedimenterede fosfor bindes irreversibelt i sedimentet, mens en mængde svarende til resten af det sedimenterede fosfor frigives fra sedimentet inden for samme år. Denne beregning fremgår af den stiplede linje i figur 3.3.

Det fremgår af figur 3.3, at såfremt sedimentet ikke havde fungeret som pulje for fosfor, ville den maksimale gennemsnitskoncentration sandsynligvis have nået op på ca. 0,9 i forhold til de målte ca. 0,7 mg TP/l. I forbindelse med reetableringen af tidligere tiders koncentrationsniveau i Furesøen betyder den opbygning af en fosforpulje, som er sket, at responstiden forlænges noget. Det kan således ifølge beregningerne forventes, at et ligevægtsniveau med den nuværende belastning nås omkring 2000-2020 og vil ligge på ca. 0,8 mg TP/l. Såfremt der ikke var opbygget en fosforpulje i sedimentet ville dette niveau være nået allerede i 1985-90. Dvs. at fosforpuljen forsinker reetableringen med ca. 20 år.

3.2. Eutrofieringsmodel

Ved en vurdering af en sø's fremtidige forureningsmæssige tilstand er kendskab til den gennemsnitlige koncentration af total-fosfor alene utilstrækkelig.

Furesøens kommende biologiske tilstand - f.eks. mængde og sammensætning af plante- og dyreplankton, sigtdybde og bundvegetation - vil afhænge af søens kemiske tilstand. Heri indgår selvfølgelig fosforkoncentrationen, men også kvælstofkoncentrationen og især disse næringsstoffers mængder og fordeling på organiske og uorganiske fraktioner i det produktive sommerhalvår.

Dette er baggrunden for anvendelsen af en årsvariationsmodel til vurderingen af Furesøens fremtidige tilstand med eller uden indgreb i fosforbelastningen.

I forbindelse med undersøgelsen i 1977-78 blev en sådan model opstillet for Furesøen.

Sedimentpuljen af N og P indgår ikke i denne model. Fosforudvekslingen mellem vand og sediment beskrives alt andet lige ved at fosforfrigivelsen regnes proportional med sedimentationen under aerobe forhold. Under anaerobe forhold regnes fosforfrigivelsen konstant.

Dette betyder, at modellen er bedst egnet til at beskrive forhold i nærheden af steady-state tilstanden. For perioder hvor der sker en kraftig udvikling i fosforkoncentrationen som følge af udtømming af sedimentpuljen er modellen således mindre velegnet.

Som det fremgår af resultaterne fra den simple stofbalancemodel blev undersøgelserne i 1977-78 netop udført i en sådan periode. De parametre vedrørende sedimentudvekslingen, der er opnået ved kalibreringen af modellen for dette år, afspejler derfor sedimentforholdene netop da.

Ved anvendelsen af årsvariationsmodellen har det derfor været nødvendigt at ændre på disse parametre. Herunder er der foretaget ene indirekte kobling til den simple model, idet denne forudsiger dels gennemsnitsværdier af total-fosfor og dels fosforudvekslingen med sedimentet.

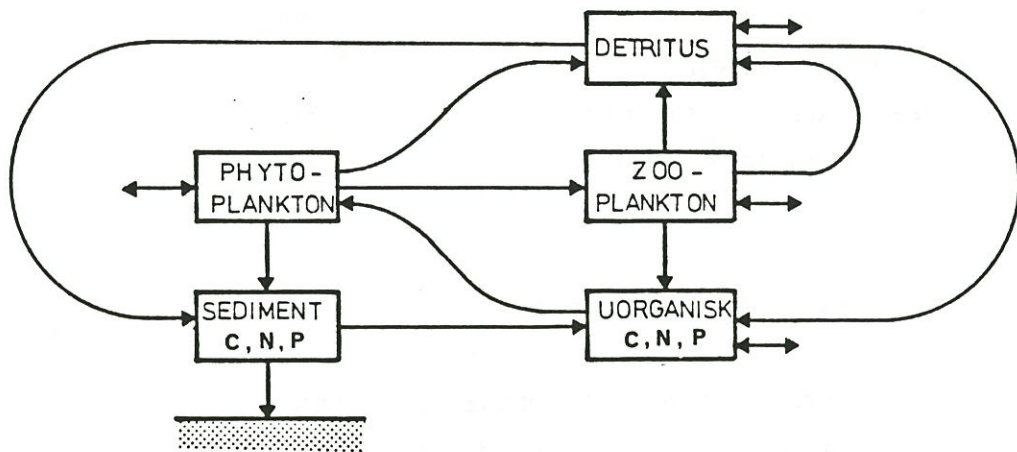
3.2.1. Modelstruktur

Furesømodellens struktur omtales her ganske kort. Der henvises i øvrigt til bilag 7 og de der anførte referencer for en nærmere beskrivelse.

I modellen indgår en beskrivelse af tilstandsvariable og tilhørende processer. Tilstandsvariable er følgende:

Phytoplankton,	kulstof
Phytoplankton,	kvælstof
Phytoplankton,	fosfor
Zooplankton,	kulstof
"Detritus",	kulstof
"Detritus",	kvælstof
"Detritus",	fosfor
Uorganisk kvælstof	
Uorganisk fosfor	
Opløst ilt	
Sediment,	kulstof

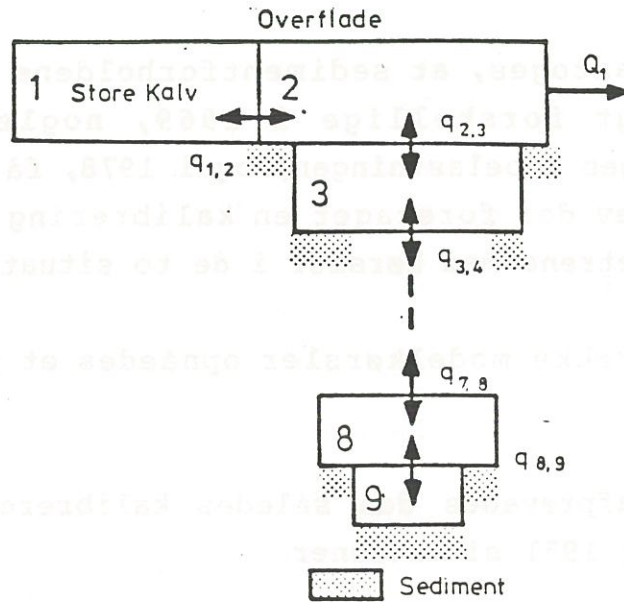
Relationerne i modellen er sammenfattet i figur 3.4, hvor tilstandsvariabler er afbildet som kasser og processer som pile. Det fremgår af tilstandsvariablerne og figuren, at modellen behandler systemets stofomsætning af kulstof, kvælstof og fosfor.



Figur 3.4 Processer og tilstandsvariabler.

Modelteknisk er Furesøen opdelt i 9 bokse, som angivet i figur 3.5.

Ligningssættene for de oven for nævnte processer løses sammen med ligningssættene for vand- og stoftransporterne internt og eksternt til og fra søen ved hjælp af EDB.



Figur 3.5 Skitse af modellens opbygning for Furesøen med beskrivelse af opblandingsforhold.

3.2.2. Kalibrering af model

Sømodellen for Furesøen blev i forbindelse med opbygningen af denne kalibreret i 1979. Kalibreringen er siden blevet forbedret i 1983.

Den således foreliggende model dannede udgangspunkt for de indledende modelkørsler.

Idet det antoges, at sedimentforholdene ikke var væsentligt forskellige i 1969, nogle år før mindskningen i belastningen, og i 1978, få år efter denne, blev der foretaget en kalibrering på sedimentparametrene med kørsler i de to situationer.

Efter en række modelkørsler opnåedes et rimeligt resultat.

Herefter afprøvedes den således kalibrerede model på 1911 og 1951 situationer.

Resultatet heraf var for høje næringssaltkoncentrationer.

Af ressourcemæssige årsager måtte den sædvanlige kalibrering standses på dette niveau.

Sømodellens formål i denne sammenhæng er at beskrive forholdet mellem N- og P-fraktioner i fremtiden under givne forudsætninger. Det valgtes derfor at kalibrere sømodellen efter de med den simple stofbalancemodel fundne sedimentationer og sedimentfrigivelser af fosfor.

Ved denne kalibrering er der opnået et sæt parametre, der rimeligt beskriver koncentrationsniveauer af næringssalte og sedimentudvekslingen af fosfor sammenlignet med den simple model. De anvendte parametre og resultaterne af modelkørslerne fremgår af bilag 7 og af afsnit 4.3.

4. ALTERNATIVE BELASTNINGER/INDGREB

Der er til en vurdering af Furesøens fremtidige tilstand foretaget en vurdering af følgende situationer:

- A: der foretages ingen indgreb i den eksterne belastning til søen
- B: der etableres en række regnvandsbassiner med henblik på at mindske næringssaltbelastningen under regn, jf. bilag 8. Samtidig overføres spildevandet fra Farum Kasernes rensningsanlæg til yderligere rensning på Staunsholt anlægget
- C: regnvandsbassiner etableres (som under B), desuden etableres der et ekstra trin på Staunsholt Rensningsanlæg bestående af sandfiltreringsanlæg
- D: spildevandet (fuldt nitrificeret) fra Staunsholt Rensningsanlæg ledes til Furesøens bund. Det antages her, at dette ikke vil ændre opblandingsforholdene af nogen betydning
- E: der afledes bundvand med høj fosforkoncentration i sommerperioden

4.1. Belastningsbidrag

De nævnte alternative situationer vil medføre forskellige udviklinger i belastningen til Furesøen.

De foreslåede regnvandsbassiner (situation B) vil reducere fosforbidraget til Furesøen fra 850 kg P/år til 300 kg P/år. Overførslen af spildevand fra Farum Kaserne til Staunsholt vil øge belastningen herfra fra 870 kg P/år til 960 kg P/år.

Yderligere rensning på Staunsholt Rensningsanlæg (situation C) antages at reducere fosforbelastningen fra anlægget fra 960 kg P/år til 500 kg P/år.

Idet reduktion af regnbelastningen også mindsker den indirekte belastning fra de øvrige søer beregnes den fremtidige belastning til værdierne anført i tabel 4.1.

Å R	A L T E R N A T I V		
	A og D INGEN INDGREB	B MINDSKET REGN- BELASTNING	C B + SANDFILTRE- RING
1986	3455	2960	2500
1990	3319	2662	2202
1995	3211	2517	2057
2020	3019	2292	1832
2050	2958	2256	1796

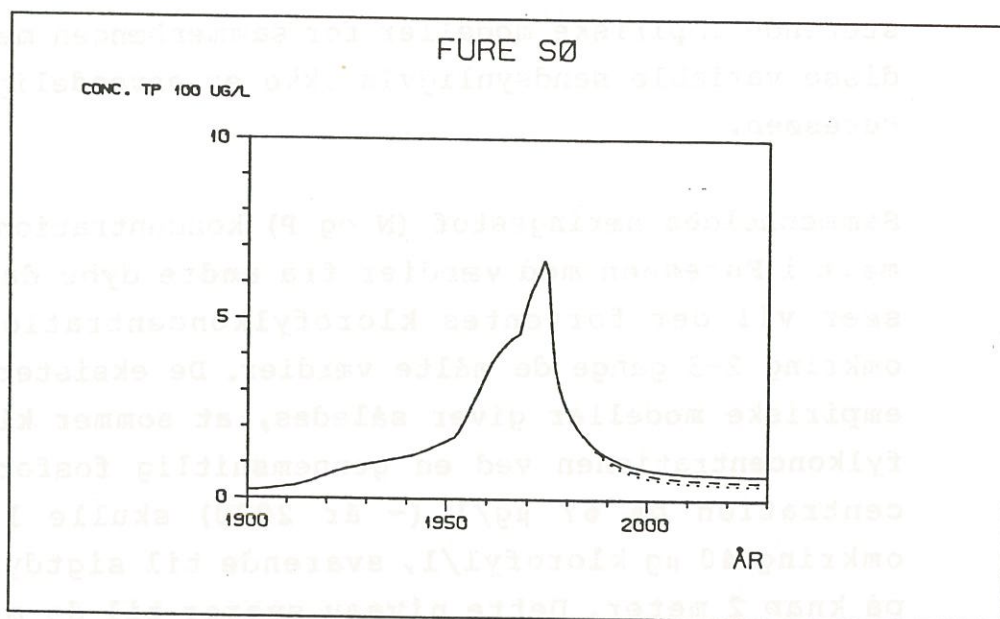
Tabel 4.1 Alternative fosforbelastninger til Furesøen.

4.2. Stofbalancemodel

Et af målene med modelopstilling og beregning har været at bidrage til vurdering af konsekvenserne af såvel ændrede belastningsbidrag til søen som eventuelle andre restaurerende indgreb. I det følgende er der ved hjælp af stofbalancemodellen foretaget vurdering af fosforkoncentrationen i Furesøen ved de alternative indgreb B - E beskrevet først i dette kapitel.

4.2.1. Effekt af alternative belastninger (alt. B og C)

For vurdering af betydningen af ændrede belastninger ved afskæring af regnvandsbelastning samt sandfiltrering af spildevandet ved Stavnsholt Renseanlæg er der gennemført to alternative beregninger med stofbalance modellen (alt. B og C). De resulterende fosforkoncentrationer fremgår af figur 4.1 Beregningerne viser, at der opnås en positiv effekt på det resulterende koncentrationsniveau ved de nævnte indgreb. Uden de nævnte indgreb beregnes der en koncentration på 67 µg TP/l i år 2020, svarende til niveauet først i 1960'erne. Ved afskæring af regnvandsbelastning (alt. B) reduceres denne koncentration til 50 µg TP/l og ved yderligere at gennemføre sandfiltrering på Stavnsholt Renseanlæg (alt. C) beregnes koncentrationen til 42 µg TP/l. Dette koncentrationsniveau svarer til niveauet fra sidste halvdel af 1950'erne. Indgrebene medfører ifølge dette hver for sig henholdsvis 25% og 16% reduktion i koncentrationsniveauet. Tilsammen beregnes reduktionen til 37%. Ud fra beregningerne vurderes det, at den positive effekt vil begynde at kunne observeres fra omkring 1990.



Figur 4.1 Beregnede fosforkoncentrationer (årgennemsnit) i Furesøen ved uændrede belastningsforhold fra 1984 og fremefter (alt. A, fuld optrukken kurve), afskæring af regnvandsbelastning (alt. B, stiptet kurve) og afskæring af regnvandsbelastning + sandfiltrering ved Stavnsholt (alt. C, prikket kurve).

Der foreligger empiriske modeller ved hvilke den årgennemsnitlige fosforkoncentration kan relateres til klorofylkoncentrationen og sigtddybden i søer, hvor planteplankton produktionen er fosforbegrænsende. Ifølge afsnit 2.4 er det vurderet, at planteproduktionen frem til 1984 fra at have været næsten udelukkende kvælstofbegrænset er kommet nærmere en fosforbegrænset situation. Endvidere er det på grundlag af eutrofieringsmodellen (afsnit 3.2) vurderet, at planteproduktion kan gøres fosforbegrænset i en fremtidig situation (omkring år 2020). Hidtidige målinger af næringsstof- og klorofylkoncentrationer tyder imidlertid på, at de eksi-

sterende empiriske modeller for sammenhængen mellem disse variable sandsynligvis ikke er anvendelig for Furesøen.

Sammenholdes næringsstof (N og P) koncentrationerne målt i Furesøen med værdier fra andre dybe danske søer vil der forventes klorofylkoncentration på omkring 2-3 gange de målte værdier. De eksisterende empiriske modeller giver således, at sommer klorofylkoncentrationen ved en gennemsnitlig fosforkoncentration på 67 $\mu\text{g/l}$ (\sim år 2020) skulle ligge omkring 40 μg klorofyl/l, svarende til sigtdybden på knap 2 meter. Dette niveau svarer til de målte klorofylkoncentrationstoppe i 1977, 1978 og 1983. På disse tidspunkter har planteproduktionen været kvælstofbegrænset, og ved introduktion af fosforbegrænsning gennem reduktion af fosfortilledningerne, må det forventes, at planteproduktionen og dermed også klorofylkoncentrationen (biomasse) vil komme til at ligge på et lavere niveau end i 1977-1983.

En reduktion af fosforkoncentrationsniveauet fra 67 til 40 $\mu\text{g TP/l}$ forventes at give mærkbare forbedringer i vandkvaliteten. Erfaringsmæssigt vil en sådan reduktion i en fosforbegrænset sø kunne betyde 50% forøget sigtdybde. Hertil kommer den betydning en sådan reduktion vil have for planteplankton sammensætningen i søen. Dette omtales nærmere i afsnit 4.4.

4.2.2. Nitrattilførsel til bundvandet

Da fosforfrigivelsen fra sedimentet er større under anaerobe (iltfrie) end under aerobe (iltede) forhold, vil en iltning af bundvandet kunne betyde, at

I fosforfrigivelsen fra sedimentet reduceres. En iltning af bundvandet kan ske ved tilførelse af O_2 og/eller andre oxiderede forbindelser som f.eks. NO_3 .

I det følgende gennemføres en overslagsberegning for iltvindsraten i bundvandet i Furesøen i perioden med lagdeling af vandsøjlen. Formålet med beregningerne er at give et grundlag for vurdering af hvilken effekt tilledning af NO_3 til bundvandet vil have over for oxidations-(iltning) forholdene her og dermed over for fosforfrigivelsen fra sedimentet.

I perioden fra maj/juni til august/september er bundvandet (vandmassen under ca. 14 meters dybde) aflukket fra de øvre vandlag. I denne periode tilføres der kun ilt til denne vandmasse ved diffusion. På grund af at algers, dyrs og bakteriers respiration er større end diffusionen falder iltkoncentrationen i bundvandet. Det gælder, at ændringen i iltkoncentrationen pr. tidsenhed

$$\frac{dc}{dt} = K \frac{dc}{dz} - R$$

hvor C er iltkoncentration
 k er diffusionskonstanten for O_2 i Furesøen
 R er respiration i bundvandet og sedimentet
 $\frac{dc}{dz}$ er iltgradienten over dybden (z)

$k \frac{dc}{dz} = J$ er diffusionsleddet ifølge Fick's
1. lov

I de følgende beregninger sættes dette diffusionsled lig nul, og der beregnes en iltvindsrate

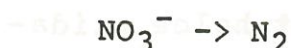
(R') der er mindre end den egentlige respiration i systemet.

På grundlag af iltprofilmålinger fra 1983 er der foretaget beregning af iltsvindsraten i 5 perioder fra 25. maj til 30. august (tabel 4.3).

DATO	ILT I VAND- SØJLEN FRA 14 m til 34 m g O ₂ /m ²	>	ANTAL DAGE.	ILT- DIFFE- RENS		R'
				g O ₂	g O ₂ /døgn	mg O ₂ /døgn/m ³
25/5	213,6	>	24	54,5	2,3	114
13/6	159,1	>	28	54,6	2,0	100
4/7	104,5	>	21	31,8	1,5	75
25/7	72,7	>	14	9,1	0,7	35
8/8	63,6	>	22	(38,6)	(1,8)	(90)
30/8	(25)					

Tabel 4.3 Iltsvindsrater beregnet i 5 perioder fra 1983.

Af tabel 6.1 fremgår, at iltforbrugsraten falder med faldende iltkoncentration. Det er et velkendt fænomen, at iltforbruget bl.a. er afhængigt af iltkoncentrationen. For at få et estimat for den potentielle iltsvindsrate, skal benyttes de første sæt af målinger, hvor iltkoncentrationen i vandsøjlen stadig er forholdsvis høj. Det fremgår af tabel 4.3, at denne ligger omkring 115 mg O₂/dag/m³, som gennemsnit for vandmassen fra 14 til 34 meters dybde (centralt i Furesøen). Antages det, at alt nitrat omsættes til frit N₂ efter



vil omsætningen af et mol NO₃ give 5 oxidationsækvivalenter i forhold til 1 mol O₂'s 4 oxidationsækvivalenter. Dette betyder, at 1 mol O₂ svarer til 4/5 mol NO₃ med hensyn til oxidationsækvivalenter, dvs. 32 g O₂ ~ 36,8 g NO₃ eller 11,2 g NO₃-N.

Det kan herefter beregnes, at et iltsvind på 115 mg O₂/dg/m³ svarer til 40 mg NO₃-N/dg/m³ i gennemsnit på dybder større end 14 meter. Volumet under 14 meters dybde i Furesøen er 3,5 x 10⁷ m³. Såfremt hele iltforbruget skal erstattes med nitrattilførsel viser denne overslagsberegning, at der skal tilføres 1,4 ton NO₃-N til søens bundvand pr. dag. Regnes der som tidligere med, at der er anaerobe forhold i 75 dage, betyder dette, at der skal tilføres 105 ton NO₃-N i lagdelingsperioden. Til sammenligning hermed kan nævnes, at der i hele 1983 blev tilført ca. 44 ton TN til Furesøen fra Stavnsholt Renseanlæg.

For beregning af hvilken effekt disse 44 ton kvælstof ville have, såfremt tilledningen skete i form af NO₃-N til bundvandet gøres den antagelse, at

kvælstofmængderne tilledes jævnt fordelt over året. Vandmasserne er lagdelt i ca. 100 døgn, hvilket betyder, at der i lagdelingsperioden maksimalt vil kunne tilledes ca. 12 ton $\text{NO}_3\text{-N}$ til bundvandet. 12 ton $\text{NO}_3\text{-N}$ svarer til 32 ton ilt i hele bundvandmassen og til ca. $1 \text{ g O}_2/\text{m}^3$. Med en potentiel iltsvindsrate på $0,115 \text{ g O}_2/\text{m}^3/\text{dg}$ svarer dette til ca. 8-9 dages iltforbrug.

Den her beregnede effekt af nitrattilledning til bundvandet må betragtes som en maksimal effekt, idet der regnes med at tilført nitrat alene omsættes til N_2 og herved bidrager til at holde oxidationsniveauet højt i vandet og ved sedimentets overflade. Hvis nitrattilførslen skal have en umiddelbar effekt på fosforfrigivelsen skal sedimentet sandsynligvis behandles således, at et eventuelt reducerende potentiale i dette først elimineres. Om dette er en realistisk mulighed for en sø som Furesøen må først vurderes nærmere.

På grundlag af de i afsnit 6.2.3 angivende fosforfrigivelser kan det beregnes, at en ændring fra anaerobe til aerobe forhold i bundvandet i 9 døgn betyder 4-8% reduktion i den årlige fosforfrigivelse.

Effekten af en nitrattilførsel som den oven for nævnte kan således simuleres ved at reducere fosforfrigivelseskonstanten (K_2) i modellen med 4-8%. For simulering af effekten af NO_3 -tilledning til bundvandet kan K_2 derfor ændres fra 0,3 til 0,28.

Dette ligger imidlertid inden for det variationsområde som ved følsomhedsanalyser (bilag 6) for modellen blev fundet ikke at have væsentlig betydning for de beregnede fosforkoncentrationer i vandet.

Det konkluderes på denne baggrund, at en tilledning af nitrat til bundvandet i sommerperioden i en mængde svarende til den samlede kvælstoftilførsel til Furesøen i perioden kun vil have en marginal reducerende effekt over for fosforkoncentrationen i vandet.

4.2.3. Afledning af bundvand

På grund af lagdelingen af vandmaseen i sommerperioden og dårlige iltforhold i bundvandet stiger fosforkoncentrationen i det nederste vandlag. I bilag 6 (afsnit 6.2.5) er for massebalancemodellen beregnet en udvaskningsfaktor (α) som tager hensyn til at der i sommerperioden kun afledes vand fra overfladelaget i hvilket fosforkoncentrationen er relativ lav.

En udvaskningsfaktor, i tilfælde hvor der i stedet i sommerperioden kun afledes bundvand med en relativ højere fosforkoncentration, kan beregnes. Dette kan ud fra ligningsudtrykket for α i bilag 6 (afsnit 3.5) beregnes ved at indsætte hypolimnionkoncentrationen (bundvandets koncentration) i perioden maj - september i stedet for epilimnionkoncentration (overfladevandets koncentration) fra samme periode.

For årene 1977, 1978 og 1983/84 er i tabel 4.2 angivet beregnede α -værdier ved afledning af bundvand.

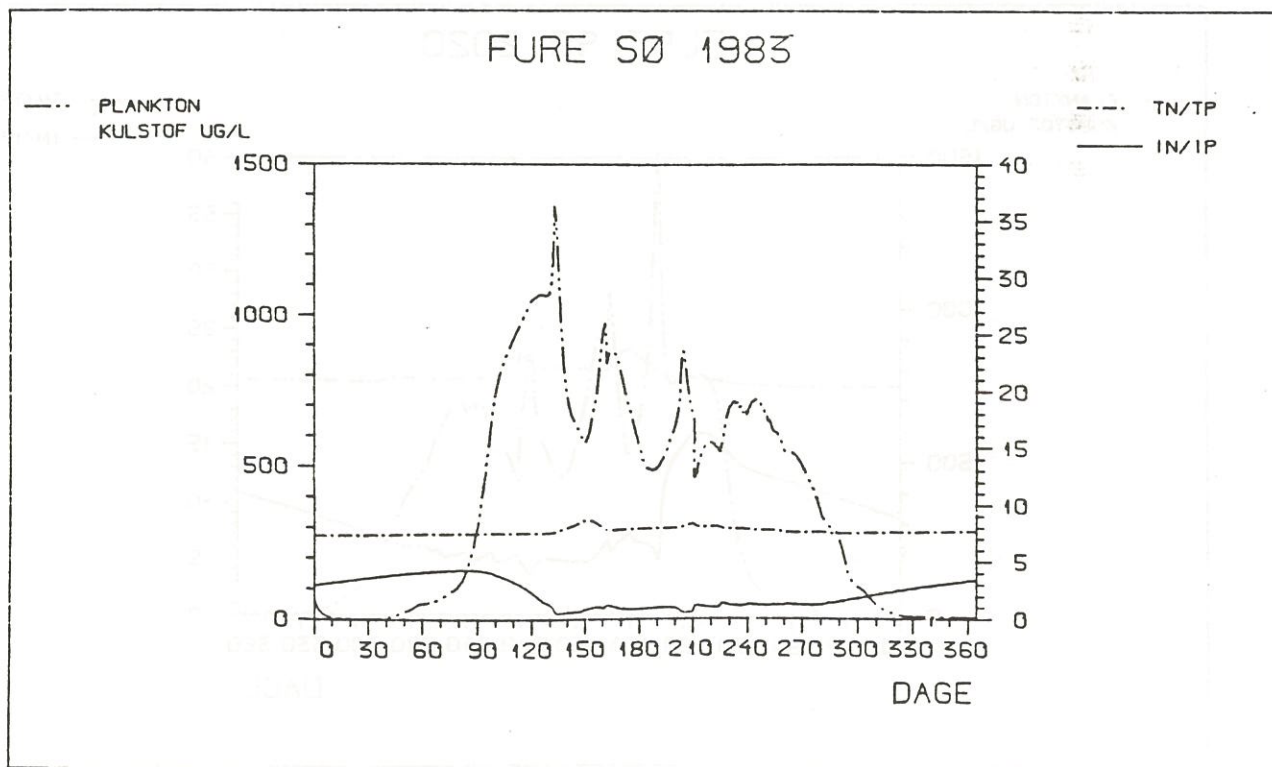
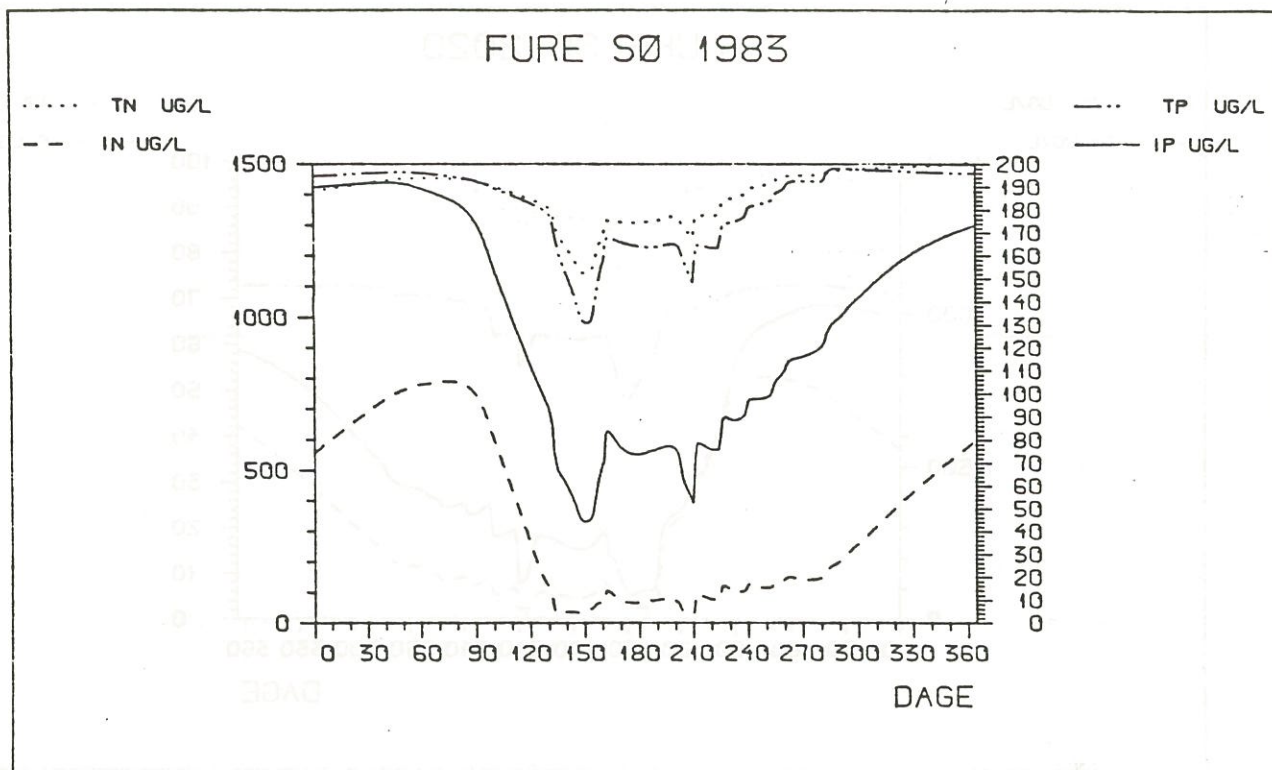
AR	1977	1978	1983/84
α	1,19	1,10	1,08

Tabel 4.2 Beregnede udvaskningskoefficienter for simulering af afledning af bundvand.

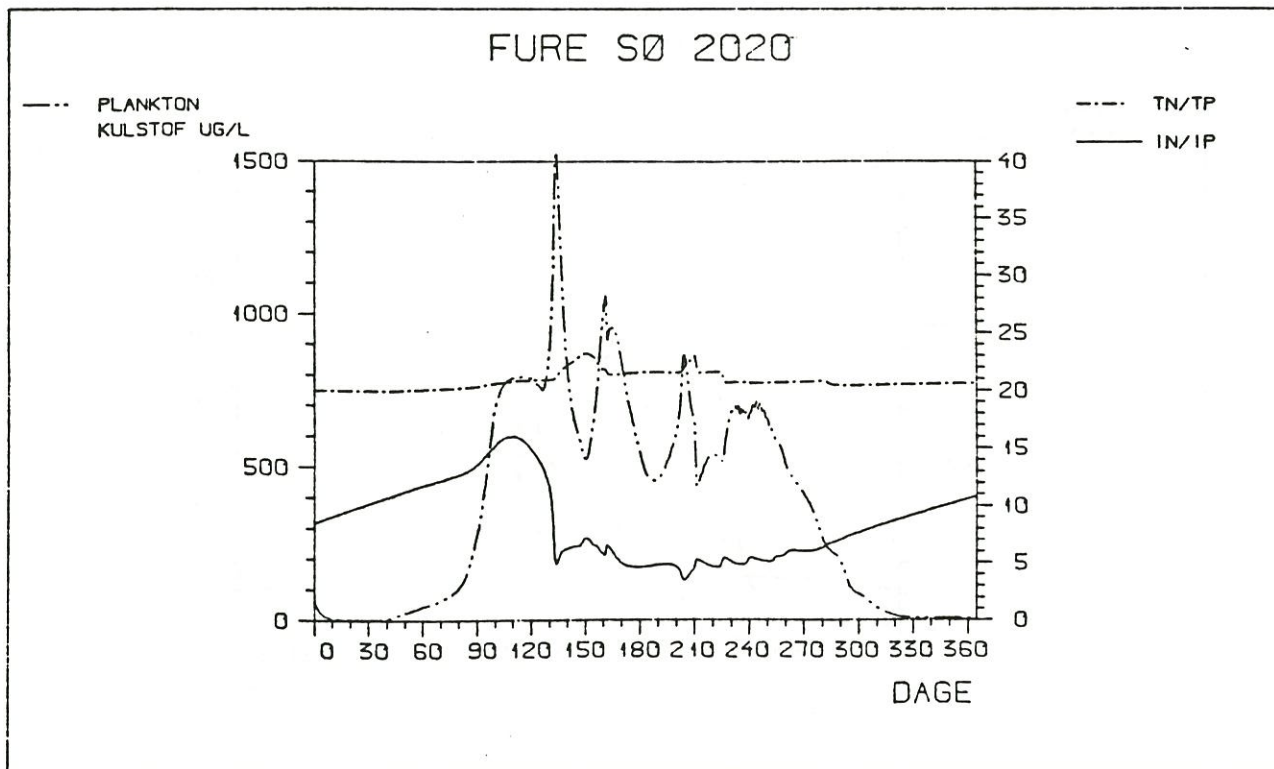
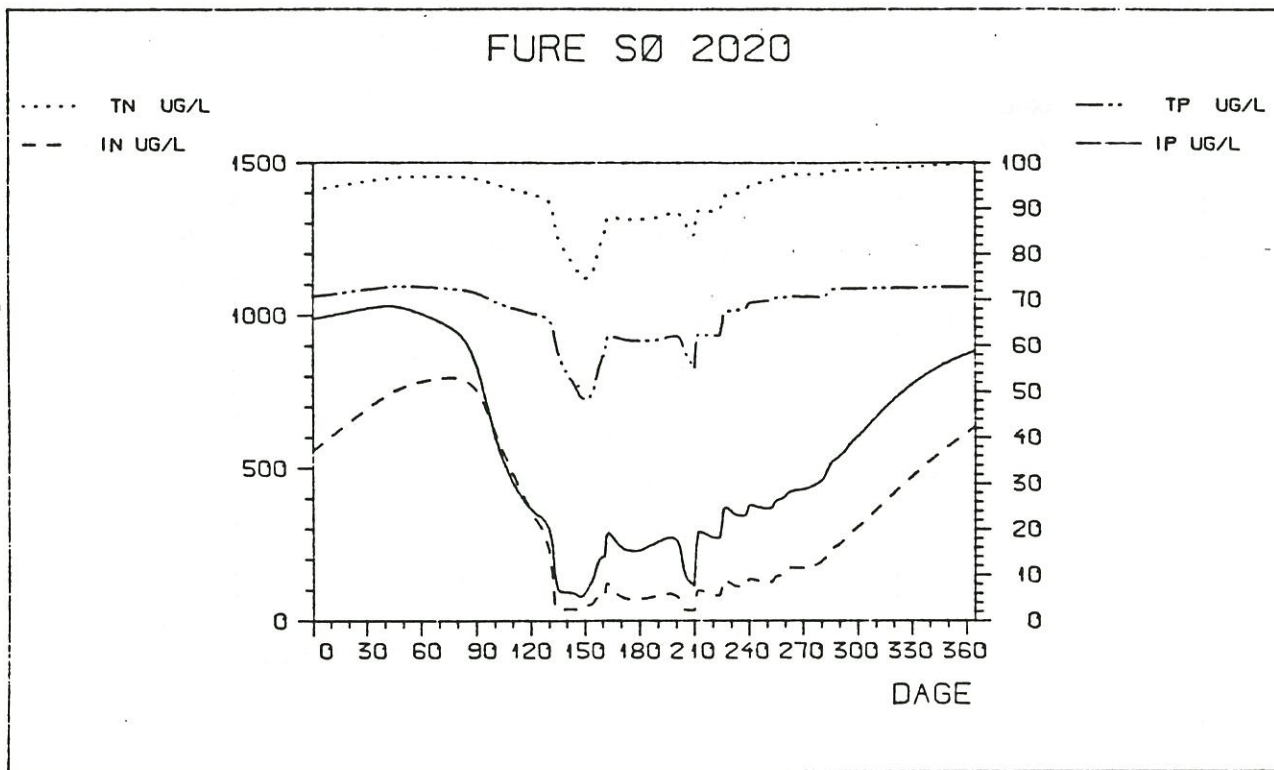
I grundkørslen med stofbalance modellen er benyttet $\alpha = 0,9$. Ved følsomhedsanalysen i bilag 6 (afsnit 6.4.4) blev det fundet, at en variation i α fra 0,8 til 1,0 ingen betydning havde for de beregnede koncentrationer. På dette grundlag må det konkluderes, at en afledning af bundvand fra Furesøen i sommerperioden kun vil have en marginal forbedrende effekt på det resulterende fosforkoncentrationsniveau i søen.

4.3. Eutrofieringsmodel 1990-2020

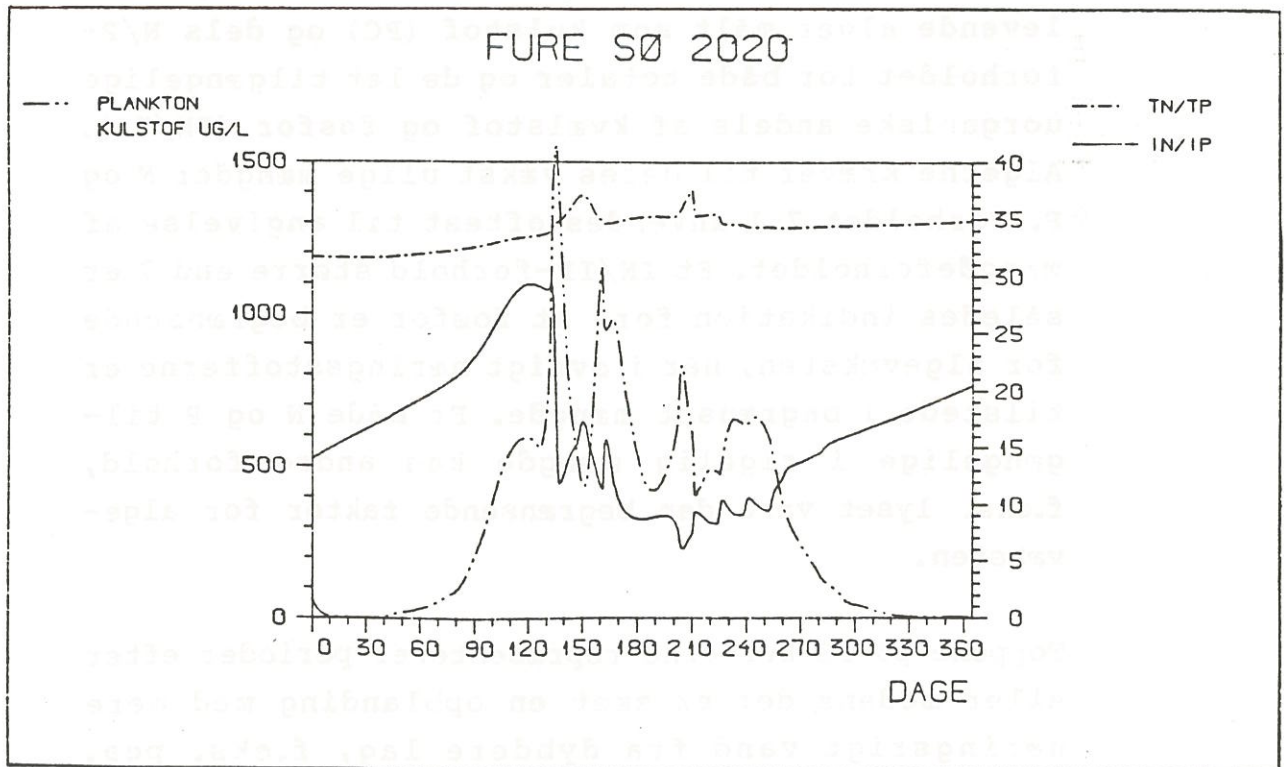
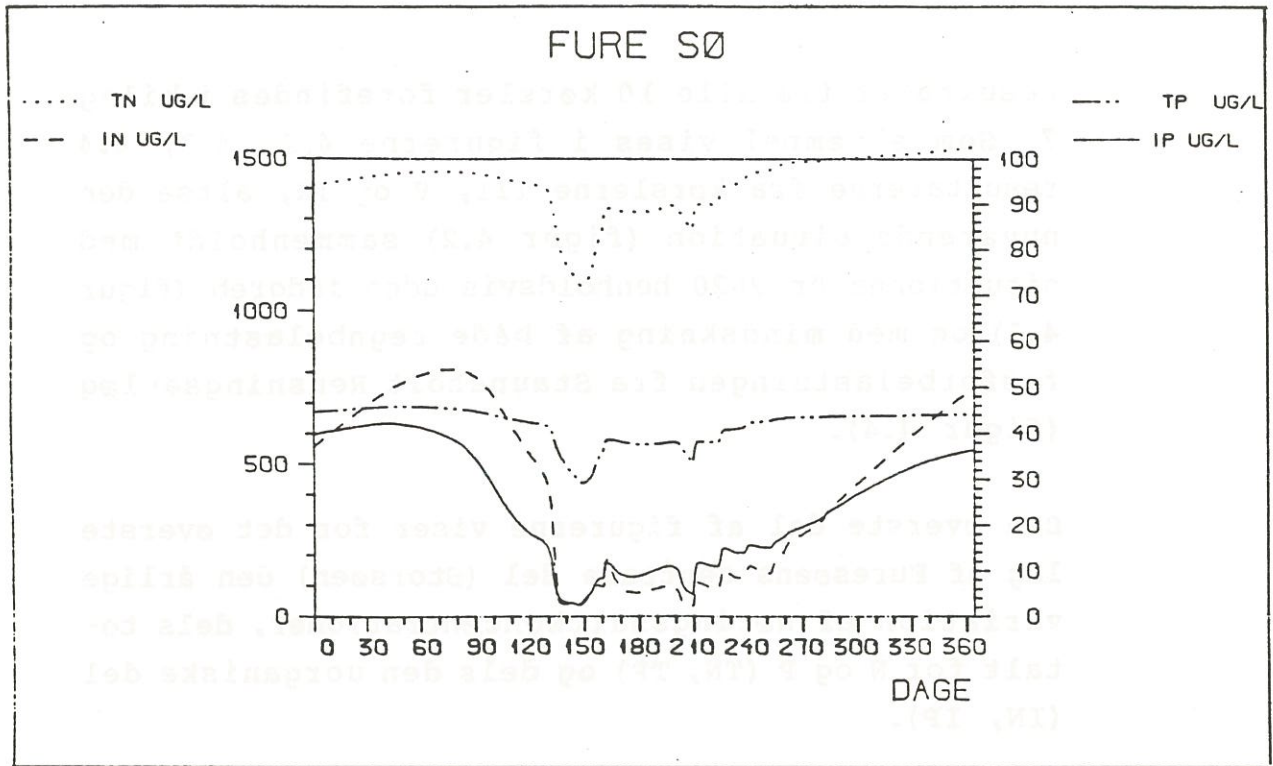
Den i afsnit 3.2 omtalte årsvariationsmodel for Furesøen, der beskriver den årlige variation af algemængde, næringssaltfraktioner, iltforhold m.v. er gennemregnet for følgende 10 situationer



Figur 4.2 Eutrofieringsmodellens simulering af 1983-situationen.



Figur 4.3 Eutrofieringsmodellens simulering af forholdene år 2020 uden ændringer i belastningsforhold i forhold til 1983/84.



Figur 4.4 Eutrofieringsmodellens simulering af forholdene år 2020 såfremt der foretages sandfiltrering på Stavnsholt Renseanlæg samt reduktion i regnvandsbelastningen.

Resultater fra alle 10 kørsler forefindes i bilag 7. Som eksempel vises i figurerne 4.2, 4.3, 4.4 resultaterne fra kørslerne III, V og IX, altså den nuværende situation (figur 4.2) sammenholdt med situationen år 2020 henholdsvis uden indgreb (figur 4.3) og med mindskning af både regnbelastning og fosforbelastningen fra Staunsholt Rensningsanlæg (figur 4.4).

Den øverste del af figurerne viser for det øverste lag af Furesøens centrale del (Storsøen) den årlige variation af næringssaltkoncentrationer, dels totalt for N og P (TN, TP) og dels den uorganiske del (IN, IP).

Den nederste del af figurerne viser dels mængden af levende alger målt som kulstof (PC) og dels N/P-forholdet for både totaler og de let tilgængelige uorganiske andele af kvælstof og fosfor (IN/IP). Algerne kræver til deres vækst ulige mængder N og P. Forholdet 7:1 anvendes oftest til angivelse af mængdeforholdet. Et IN/IP-forhold større end 7 er således indikation for, at fosfor er begrænsende for algevæksten, når i øvrigt næringsstofferne er tilstede i begrænset mængde. Er både N og P tilgængelige i rigelig mængde kan andre forhold, f.eks. lyset være den begrænsende faktor for algevæksten.

Toppene på PC-kurverne repræsenterer perioder efter eller medens der er sket en opblanding med mere næringsrigt vand fra dybdere lag, f.eks. pga. vindforhold. I perioder efter en top kan N eller P blive begrænsende for væksten og algemængden falder. De anvendte opblandingsforhold svarer til de i 1977/78 målte. Reelt vil disse være forskellige fra år til år.

Sammenlignes figurerne ses algermængden at falde frem til år 2020 både med og uden indgreb, dog kraftigst med indgreb over for fosforbelastningen. Når antallet af opblandingsperioder er mindre slår denne effekt kraftigere igennem.

IN/IP-forholdene er i 1983 mindre end 7 hele året, svarende til den registrerede kvælstofbegrænsning. Uden indgreb vil IN/IP-forholdet i 2020 være større end 7 fra november til maj, svarende til fosforbegrænsning i denne periode. Med de pågældende indgreb vil der i 2020 være fosforbegrænsning stort set hele året. Modellen beregner, at der i en ganske kort periode sidst på sommeren kan optræde kvælstofbegrænsning.

Den beregnede årsproduktion er anført i tabel 4.4. Produktionen i Storsøen er ikke faldet væsentligt i perioden 1978-83, på trods af en næsten halvering af fosforkoncentrationen i søen. Søen var i 1983 stadig kvælstofbegrænset. Uden indgreb i fosforbelastningen (kørsel IV og V) vil produktionen i søen falde med ca. 5% indtil 1995 og yderligere ca. 5% i perioden 1995-2020.

Ved indgreb over for regnaflastning (kørsel VI og III) vil produktionen falde med ca. 20% i perioden 1983-2020.

Foretages yderligere en fosforfjernelse på Stavnsholt Rensningsanlæg (kørsel VIII og IX) vil produktionen falde med ca. 10% frem til 1995 og yderligere ca. 20% i perioden 1995-2020. I 1995 vil produktionen således være nede på samme niveau som i år 2020, når der ikke foretages indgreb.

Modelkørsel nr.	år	Belastning ton/år				Afstømning mio. m ³ /år	Arsvariationsmodel				Stofbalancemodel			
		Store Kalv		Storsø			Sediment- tilførsel ton P/år	frigivelse ton P/år	Produktion g Store Kalv	² C/m ² x år Storsø	Koncentration mg P/l	Sediment- tilførsel ton P/år	frigivelse ton P/år	
I	1969	96	26,97	43	12,0	10,4	38,5	15,3	624	264	0,51	39,8	13,6	
II	1978	15	2,25	65	2,10	7,9	19,5	10,0	342	232	0,36	28,0	18,1	
III	1983	15	1,32	65	2,40	7,9	12,0	9,81	276	230	0,20	15,6	11,0	
IV	1995	15	1,01	65	2,20	7,9	8,10	5,88	262	222	0,093	7,25	4,33	
V	2020	15	0,86	65	2,14	7,9	6,24	3,93	253	210	0,068	5,30	2,70	
VI	1995	15	0,70	65	1,82	7,9	6,99	4,81	256	217	0,082	6,40	3,98	
VII	2020	15	0,55	65	1,74	7,9	4,67	2,68	239	193	0,052	4,06	2,09	
VIII	1995	15	0,70	65	1,36	7,9	6,24	3,95	252	211	0,074	5,77	3,74	
IX	2020	15	0,532	65	1,30	7,9	3,78	2,15	226	175	0,052	3,28	1,70	
X	1995	15	1,01	20	1,30	7,9	7,97	5,34	256	211	0,093	-	-	
				+45*	+0,90*									

* til bund

Tabel 4.4 Arsvariationsmodel. Belastningsforudsætninger. Beregnede sedimentudvekslinger m.v. og sammenligning med den simple stofbalancemodel.

I tabel 4.5 er der for hver kørsel angivet dels hvor stor del af året og dels hvor stor del af perioden 1/3-31/10 IN/IP forholdet overstiger 7.

KØRSEL	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
ÅR	1969	1978	1983	1995	2020	1995	2020	1995	2020	1995
Antal dage med IN/IP > 7	0	0	0	140	200	180	330	230	360	165
% Årsbasis	0	0	0	40	55	50	90	65	~100	45
% dage med IN/IP > 7 1/3 - 31/10	0	0	0	30	35	30	85	40	~100	30

Tabel 4.5 Perioder med fosforbegrænsning.

Det skal til slut bemærkes, at eftersom kvælstof med et nuværende belastningsforhold er begrænsende for algeproduktionen kan en formindskelse af kvælstofbelastningen til søen forventes at have en umiddelbar effekt.

Dette fremgår også af kørsel X (alternativ D), der reelt svarer til, at der i den produktive sommerperiode tilføres mindre N til overfladelaget.

4.4. Planteplanktonets udvikling, 1984 - 2020

Det er forventeligt, at planteplanktonets sammensætning og biomasse i de kommende år fortsat vil svinge noget fra år til år. I nogle år vil blågrønalger have bedre vækstbetingelser end i andre, selvom fosforkoncentrationen er på vej ned.

Det vil bl.a. afhænge af, hvordan kiselalgerne er kommet i gang om foråret, hvordan udviklingen i zooplanktonpopulationen har været, om der er lange perioder med varmt og vindstille vejr. Ar, hvor der

af den ene eller den anden grund opstår fødemangel for zooplanktonet før der opstår fosforbegrænsning for planteplanktonet i de øvre vandlag og længere perioder med varmt og vindstille vejr i løbet af sommeren, vil efter al sandsynlighed have de største blågrønalgemængder.

Selvom der sker en nedgang i fosforkoncentrationen i søen, er der altså ingen sikkerhed for, at der ikke i de kommende år kan opstå omstændigheder, der kan forårsage større opblomstringer af blågrønalger, men det vil sikkert ikke ske hvert år.

4.4.1. Uændret belastning år 1995

Ved uændret belastning viser eutrofieringsmodellen for Furesøen, at total-P i 1995 vil nå under 100 µg/l og i perioden maj - juli under 80 µg/l. Uorganisk P vil i maj - juli være mellem 10 og 30 µg/l. Betragtes de uorganiske N og P fraktioner, vil der være fosforbegrænsning fra januar til midt i maj og kvælstofbegrænsning resten af året. Kvælstof- og fosforkoncentrationerne vil svinge noget i sommerens løb afhængig af opblanding med bundvand og vand fra Storekalv.

De ændringer, man kan forestille sig, der vil ske med planteplanktonets sammensætning og biomasse, når søen har nået denne tilstand, vil især berøre størrelsen af forårskiselalgemaksimum og blågrønalgerne. I perioder med lave fosforkoncentrationer og fosforbegrænsning vil blågrønalgerne generelt være hæmmede i deres vækst og under alle omstændigheder vil de ikke kunne danne langvarige masseopblomstringer af det omfang, der har været i søen i slutningen af 1960'erne og i 1970'erne.

Både de kvælstoffikserende og de ikke kvælstoffikserende arter vil givetvis stadig findes i søen og danne opblomstringer. De kvælstoffikserende arter vil især forekomme i begyndelsen af sommeren, hvor der er indtrådt kvælstofbegrænsning. Men blågrønalgerne vil være underlagt konkurrence med bl.a. furealger og gulalger, hvoraf de førstnævnte har bedre egenskaber til vertikalvandring og de sidstnævnte både kan foretage en vis vertikalvandring og er i stand til at optage næringssalte ved lavere koncentrationer. Furealgen *Ceratium hirundinella* vil sandsynligvis have omtrent den samme biomasse, som den har i øjeblikket.

Artsdiversiteten vil sandsynligvis være steget.

4.4.2. Reduktion af regnvandsbelastning samt etablering af sandfiltrering på Stavnsholt Renseanlæg, situation i 1995

I denne situation vil, ifølge modelberegningerne, total-P nå under 80 µg/l og i perioden maj - august ligge mellem 10 og 30 µg/l. De uorganiske fraktioner af fosfor og kvælstof viser, at fosfor vil være det mest begrænsende næringssalt fra januar til først i maj og at der vil forekomme kvælstofbegrænsning resten af året.

Forskellen med de to situationer, med eller uden sandfiltrering på Stavnsholt Renseanlæg, giver sig i 1995 altså hovedsagelig udslag på niveauet af tilgængeligt fosfor med en reduktion på 20 µg/l.

En reduktion af denne størrelsesorden vil, når niveauet er under 100 µg/l få ret store konsekvenser for økosystemet i søen, idet planteplanktonet

reagerer eksponentielt på en nedgang i nærings-saltkoncentrationen. Det vil give sig udslag i en eksponentiel nedgang i planteplanktonets biomasse, både af forårskiselalgemaksimum og af blågrønalgerne i sommerperioden. Sommerplanktonet vil blive mere artsrigt og bl.a. bestå af arter, der kan udnytte de lave uorganiske fosforkoncentrationer. Det er forventeligt, at furealgen *Ceratium hirundinella* også vil gå ned i biomasse.

Den nedsatte blågrønalgebiomasse vil forårsage en øget sigtddybde i sommerperioden, og det er sandsynligt, at en del af bundvegetationen vil kunne genetablere sig på dybere vand.

Ved en relativ lille nedgang i fosforniveau vil man, altså når koncentrationen er under 100 µg/l, give ret væsentlige forbedringer i form af nedgang i blågrønalgebiomassen i badesæsonen, forbedring i sigtddybde og bedre muligheder for genetablering af bundvegetation på dybere vand. En genetablering af bundvegetationen vil også få en vis accelererende virkning på fosforfældning i bredzonen, idet bundplanterne ved fotosyntese udfælder kalk, der bevirker en binding af fosfor.

4.4.3. Uændret belastning år 2020

I denne situation vil kvælstof/fosforforholdene og fosforkoncentrationen være omtrent som beskrevet for år 1995 ved fosforreduktion på Stavnsholt Renseanlæg.

Vurderet ud fra de uorganiske N og P fraktioner vil fosfor være det mest begrænsende næringssalt fra november til maj og der vil forekomme kvælstofbegrænsning resten af året. Total-P koncentration vil være under 75 µg/l og lavere i perioden maj - august. Reaktionen i økosystemet vil derfor med stor sandsynlighed være som beskrevet i afsnit 4.4.2, blot 25 år forsinket.

4.4.4. Reduktion af regnvandsbelastning på Stavnsholt Renseanlæg, situation i år 2020

Ved fosforreduktion på Stavnsholt Renseanlæg vil der ifølge beregningerne i år 2020 være opnået fosforbegrænsning stort set hele året.

Total-P vil være reduceret til under 50 µg/l og være omkring 30 - 50 µg/l i perioden maj - august. Koncentrationen af uorganisk P vil være helt i bund flere gange i løbet af sommerperioden.

Disse forhold er mindst lige så gode, som dem, der fandtes i begyndelsen af 1950'erne og bedre end dem, der fandtes i Buresø i 1973-74. Med disse begrænsninger kan Furesøen sammenlignes med Buresø.

De er begge alkaliske søer med temperaturspringlag i sommerperioden og en opholdstid på vandet på adskillige år. Begge har, inden de blev kulturpåvirkede, været klarvandede med en rig bundvegetation.

Af forskelle kan fremhæves, at Buresø's bund er en jævn slette på ca. 10 meters dybde, hvor Furesøens bund er ujævn med en middeldybde på ca. 20 meter. Det har bl.a. betydning for temperaturspringlagets

beliggenhed og stabilitet. I Furesøen ligger det dybere og er mere stabilt end i Buresø. Plankton-sammensætningen under ens næringssaltforhold vil derfor nok være mere divers i Buresø end i Furesøens frie vandmasse, fordi der i Buresø vil ske en større udveksling mellem epilimnion, hypolimnion og bredzone end der vil i Furesøens frie vandmasse.

Der er dog alligevel mange ligheder mellem Buresø's planteplankton i 1973-74 og Furesøens i 1947-52: I sommerperioden fandtes et blandingssamfund af blågrønalger, visse chlorococcale grønalger, furealger, gulalger, visse rentvands kiselalger og desmidiaceer og biomassen var relativ lav. Under de givne forudsætninger kan man regne med, at Furesøen i år 2020 vil være nået tilbage til dette stadium, måske længere endnu.

RAPPORTDATABLAD

<p>1. Sag nr: 62.475</p> <p>Dato: 1985-06-13</p>	<p>6. Titel FURESØEN 1900 - 2020</p> <p>HOVEDDEL: 102 Antal sider: BILAGSDEL: 182</p>
<p>2. Sagsbeh. - Sekr. - Afd. - cand.scient. Jørgen Krogsgaard Jensen - civ.ing. Erik Aagaard Hansen - DS - WF - WWT - Økologisk & Teknisk afdeling</p>	<p>7. Nøgleord på dansk: Udvikling Forurening Næringsstof Fytoplankton Sediment</p> <p>Keywords in English: Evolution Pollution Nutrient Phytoplankton Sediment</p>
<p>3. Rekvirent: HOVEDSTADSRÅDET</p>	<p>Abstract in English: The report gives a description of the evolution in the nutrient load of lake Furesø and the biological state of the lake from 1900 to 1984. On the basis of lake models prognosis of the evolution from 1984 to 2020 is given a different loadings and management activities.</p>
<p>4. Evt. geografisk område: SJÆLLAND</p>	
<p>5. Rekvireret rapport: X Forskningsrapport: Rapporten forhandles af: HOVEDSTADSRÅDET Pris: _____</p>	

YOU MAY REACH US BY FONOTELEX. CALL TELEX 16600. FOTEX DK, ATTN: WATERQUALITY HØRSHOLM

ES/ok dult

