

# Danske søer og deres restaurering

TEMA-rapport fra DMU  
24/1999



# Danske søer og deres restaurering

---

Martin Søndergaard  
Erik Jeppesen  
Jens Peder Jensen

TEMA-rapport fra DMU, 24/1999,  
Danske søer og deres restaurering

Forfattere: Martin Søndergaard, Erik Jeppesen og Jens Peder Jensen  
Danmarks Miljøundersøgelser, Afdeling for Sø- og Fjordøkologi

Udgiver: Miljø- og Energiministeriet, Danmarks Miljøundersøgelser®  
URL: <http://www.dmu.dk>  
Udgivelsestidspunkt: Februar 1999

Layout: Kathe Møgelvang og Juana Jacobsen  
Forsidefoto: DMU / Jane Stougaard Pedersen

Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse

Tryk: Silkeborg Bogtryk, miljøcertificeret (EMAS reg. nr. DK-S-0084)  
Papir: Cyclus Print, 100% genbrugspapir med vegetabiliske  
trykfarver uden opløsningsmidler. Omslag lakeret med vegetabilisk lak.

Sideantal: 36  
Oplag: 3.000

ISSN: 0909-8704  
ISBN: 87-7772-440-2

**PDF-udgave:**  
**ISSN: 1399-4999**  
**ISBN: 87-7772-475-5**

Pris: 50,- kr.  
Klassesæt á 10 stk.: 250,- kr.  
Abonnement (5 numre): 225,- kr.  
(Alle priser er incl. 25% moms, excl. forsendelse)

Købes i boghandelen eller hos:

Danmarks Miljøundersøgelser  
Vejsøvej 25  
Postboks 314  
8600 Silkeborg  
Tel: 89 20 14 00  
Fax: 89 20 14 14

Miljøbutikken  
Information og bøger  
Læderstræde 1  
1201 København K  
Tel: 33 95 40 00  
Fax: 33 92 76 90

Forord	5
Danmarks søer	7
Søen som økosystem	11
Restaurering af søer	19
Sammenfatning	32
Litteratur	34
Danmarks Miljøundersøgelser	35
Tidligere TEMA-rapporter fra DMU	36

FOTO: DMU / MARTIN SØNDERGAARD



# Forord

Danmark er et land med mange søer, som både rekreativt og landskabs- og naturmæssigt spiller en stor rolle. Vandkvaliteten i hovedparten af vores søer er desværre ringe. Vandet er ofte uklart og artsrigdommen blandt planter og dyr er generelt lille. I perioder optræder store mængder af blågrønner, der kan lægge sig som malinglignende lag på vandoverfladen, mens planterne på søbunden er forsvundet, eller deres udbredelse er kraftigt reduceret i mange søer. Fiskebestanden er ofte stor og domineret af fredfisk som skalle og brasen. De fleste fuglearter, som er tilknyttet søerne, findes kun fåtalligt, fordi fødemulighederne er begrænsede.

Den ringe vandkvalitet skyldes en forhøjet tilførsel af næringsstofferne fosfor og kvælstof. Især fosfor er vigtig. Med henblik på at forbedre vandkvaliteten er der derfor gennem de sidste 20-30 år foretaget store investeringer for at nedbringe næringsstofftilførslen – ikke mindst tilførslen fra byernes spildevand. En del søer har dermed gradvist fået et lavere indhold af fosfor. I nogle tilfælde har dette medført en bedre vandkvalitet, men desværre langt fra altid. Baggrunden for den ofte beskedne effekt kan være, at tilførslen ikke er reduceret tilstrækkeligt til at ændre tilstanden mærkbart.

Årsagen til en ringe vandkvalitet kan imidlertid også være, at søerne reagerer trægt efter nedsat næringsstofftilførsel – enten fordi der gennem lang tid frigives fosfor

ophobet i søbunden, eller fordi fiskebestanden er helt domineret af fredfisk, så søen fastholdes i en tilstand, hvor dyreplanktonet holdes nede af fiskene og dermed ikke er i stand til at begrænse mængden af planteplankton.

Som et middel til at forbedre vandkvaliteten i disse søer er der udviklet en række restaureringsmetoder. Nogle af disse metoder har også fundet anvendelse i Danmark og er typisk gennemført af amterne.

Denne rapport fortæller, hvordan det står til med vores søer, og hvilke erfaringer der er gjort med restaurering af søer. Den er baseret på alle de større restaureringsindgreb, der er gennemført i Danmark inden for de sidste 10-15 år. Rapporten giver også en række anvisninger på, hvordan og under hvilke forudsætninger restaurering af søer er mest anvendelig. Rapporten bygger på tre mere detaljerede rapporter, der for nylig er udarbejdet af Danmarks Miljøundersøgelser (Jensen m.fl., 1997; Jeppesen, 1998; Søndergaard m.fl., 1998).

FOTO: DMU / MARTIN SØNDERGAARD



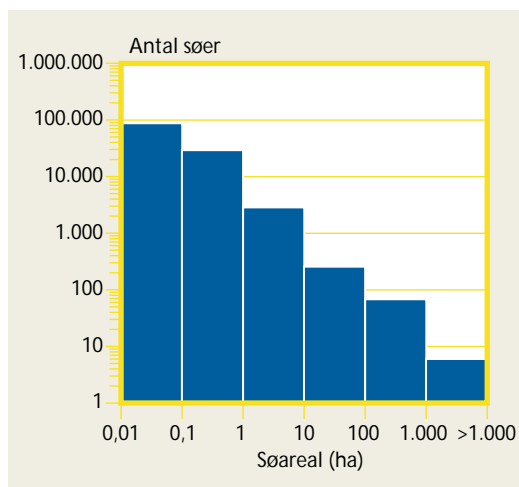


# Danmarks søer

## Antal og størrelse

I Danmark findes der omkring 120.000 søer større end 0,01 hektar (100 m<sup>2</sup>). Langt hovedparten er dog damme og småsøer, og kun 2.762 søer, eller godt 2%, er større end 1 hektar (Figur 1). De ca. 120.000 søer har et samlet areal på 58.000 hektar, hvilket svarer til 1,4% af Danmarks areal.

Amterne fører årligt tilsyn med ca. 200 søer, og i alt findes data fra ca. 700 søer. Sammenlignet med de fleste andre lande er Danmarks søer små. Kun 6 søer er større end 1.000 hektar. Danmarks største sø er Arresø på 3.987 hektar.



Figur 1. Antal og størrelse af danske søer.

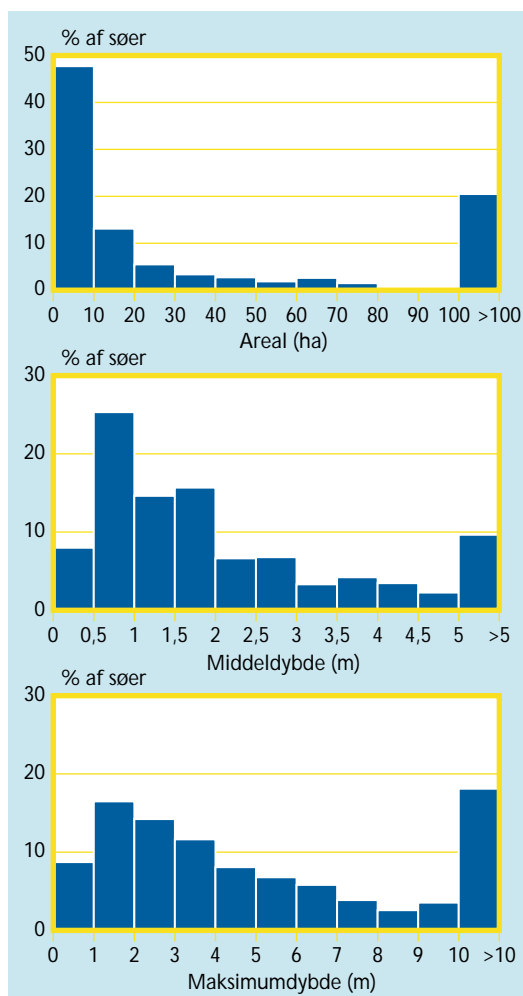
### Box 1. Udviklingen i antallet af søer i Århus Kommune

Udviklingen i antallet af søer har gennem mange år været for nedadgående som følge af landbrugets og byernes udvikling. Eksempelvis er antallet af søer i Århus Kommune siden århundredeskiftet reduceret med 70%. Det er især gået ud over de mindre søer, men også blandt de større er der sket en betydelig nedgang. På det seneste er udviklingen dog vendt, idet der efter vedtagelsen af Lov om Naturforvaltning i 1989 er igangsat en række projekter omkring naturgenopretning, som også omfatter retablering af søer (Skotte-Møller, 1995). Nedenfor er vist udviklingen i antallet af søer og damme i Århus Kommune siden år 1900 (efter Skriver, 1981).

Periode	<0,1 hektar	0,1-1 hektar	1-10 hektar	>10 hektar	Total
1900-07	2.256	405	81	20	2.752
1951-52	996	182	43	8	1.229
1980	626	173	29	7	835
Fald i %	72	57	64	65	70

## Dybdeforhold

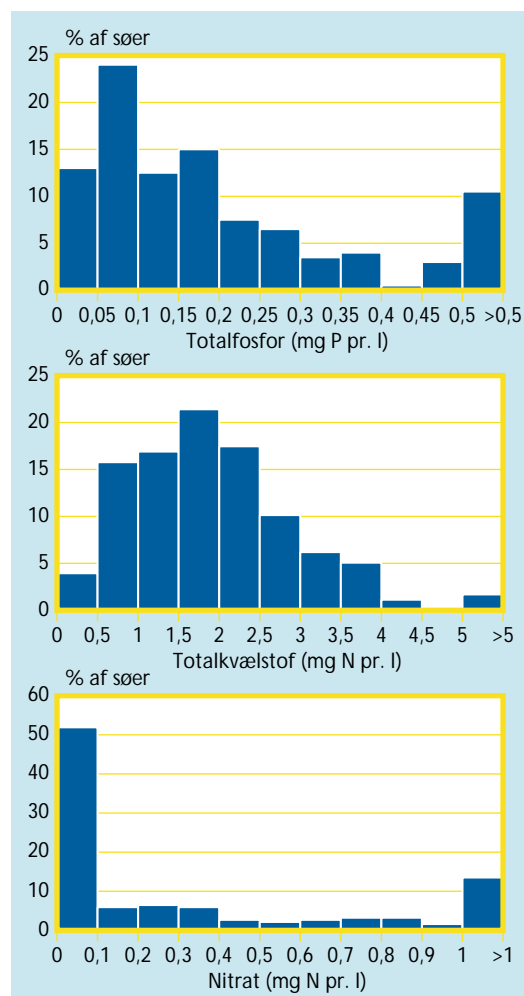
Langt de fleste danske søer er lavvandede. Halvdelen har en gennemsnitsdybde under 1,6 m og en maksimumsdybde under 4 m (Figur 2). De fleste søer er derfor ikke dybe nok til, at vandmassen om sommeren opdeles i et varmt overfladelag og et koldt bundlag. De er som regel fuldt opblandede fra top til bund. Vi har dog en del dybe søer i Danmark, hvor der udvikles en lagdeling om sommeren, f.eks. Furesøen med dybder på op til 38 m.



**Figur 2.** Fordelingen af danske søer efter areal, middeldybde og maksimumdybde (data fra 300-700 søer).

## Sigtdybde og indhold af næringsstoffer

De fleste danske søer er næringsrige. Indholdet af fosfor, der oftest er det næringsstof, som virker begrænsende for væksten af mikroskopiske alger (planteplankton), overstiger som gennemsnit for sommeren en koncentration på 0,15 mg pr. liter i halvdelen af søerne (Figur 3). Til sammenligning finder man typisk koncentrationer under 0,01-0,02 mg fosfor pr. liter i rene og upåvirkede søer. Knap 60% af fosforen og



**Figur 3.** Fordelingen af danske søer efter indhold af næringsstoffer om sommeren (data fra 180-200 søer).

godt 70% af kvælstoffet, som søerne tilføres, stammer fra det åbne land, dvs. hovedsageligt fra dyrkede arealer.

Som en konsekvens af det høje næringsstofindhold er der en stor vækst af planteplankton, hvilket giver uklart vand. Den gennemsnitlige sommersigt dybde er mindre end 85 cm i halvdelen af de danske søer, og kun 13% har en sigt dybde over 2 m (Figur 4).

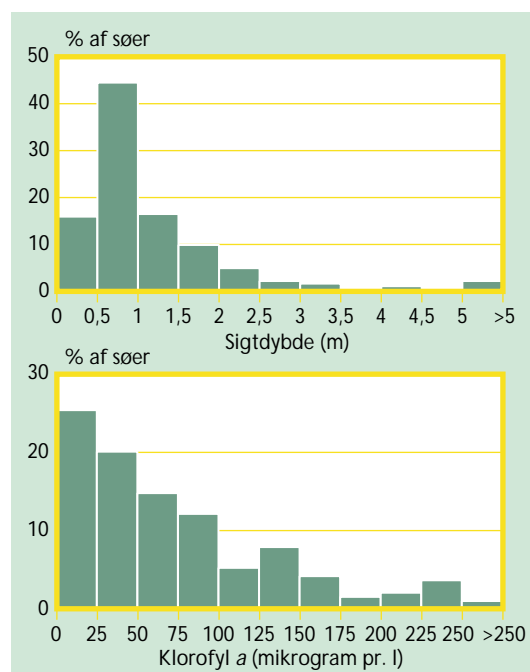
### Udviklingen i vandkvalitet siden 1970'erne

Det er meget begrænset, hvad der findes af informationer om tilstanden i de danske søer i fortiden. Før ca. 1970 findes kun fåtallige undersøgelser, som typisk beskriver enkelte dyre- eller plantegrupper, især i de dybere søer. Det samlede indtryk, man får fra disse undersøgelser, er imidlertid, at danske søer for blot 60-80 år siden var langt mere klarvandede og havde et væsentligt

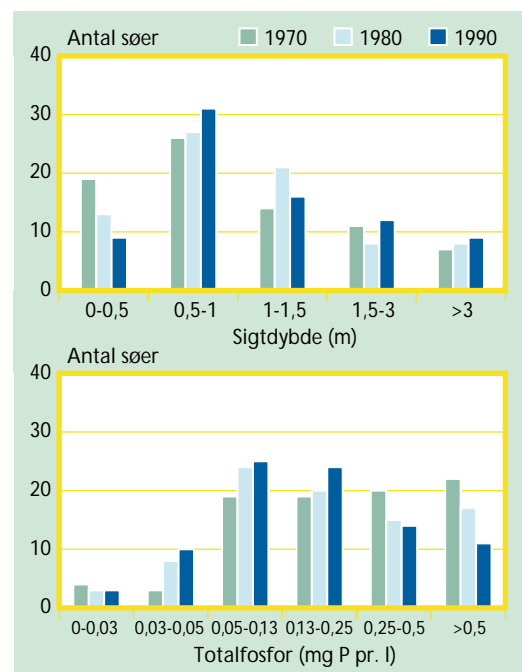
mere varieret plante- og dyreliv end i dag. Derefter øgedes næringsstofftilførslen markant fra især spildevand, hvilket medførte store ændringer i søerne.

Siden 1970'erne er udviklingen gået i retning af færre meget næringsrige og flere "middelnæringsrige" søer (Figur 5). Ud af 77 undersøgte søer siden 1970'erne er antallet af søer med fosforkoncentrationer over 0,5 mg fosfor pr. liter halveret fra 22 til 11, og antallet i gruppen med 0,03-0,05 mg fosfor pr. liter er øget med 7. Nedgangen i indholdet af fosfor skyldes især en forbedret spildevandsrensning. Antallet af de næringsfattige søer er stort set uændret.

Sigt dybden viser en tilsvarende udvikling. Af de 77 søer er antallet af søer med en sigt dybde under 0,5 m fra 1970'erne til 1990'erne reduceret fra 19 til 9, og antallet af søer med en sigt dybde mellem 0,5 og 1 m er øget med 5.

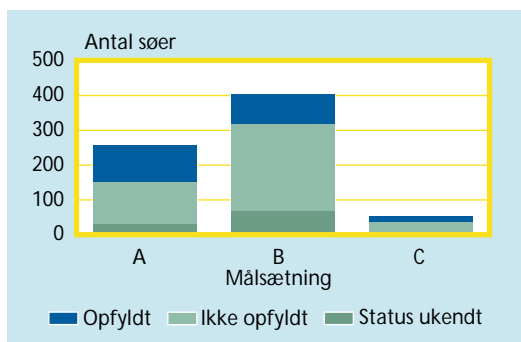


**Figur 4.** Fordelingen af danske søer efter sigt dybde og klorofyl a (plantepigment) om sommeren (data fra 180 søer).



**Figur 5.** Udvikling i sigt dybde og indhold af totalfosfor siden 1970'erne i 77 danske søer.

**Figur 6.** Antal målsatte danske søer med angivelse af hvor mange, der opfylder målsætningen. Der skelnes mellem A målsætning (skærpede krav), B målsætning (basiskrav) og C målsætning (lempede krav).



## Målsætning

Alle større danske søer er målsatte, men målsætningerne er kun opfyldt for ca. en tredjedel af søerne (Figur 6). I knap halvdelen af søerne med skærpet målsætning og omkring en fjerdedel af søerne med basismålsætning er målsætningen opfyldt. Generelt er målsætningerne dårligst opfyldt for de større søer. Blandt søerne større end 300 hektar er målsætningen kun opfyldt i 8%.

### Box 2. Målsætning for søer

Knap 700 danske søer har en specifik målsætning. Disse omfatter alle søer større end 30 hektar og halvdelen af søerne mellem 3 og 30 hektar. Målsætningen udarbejdes af amterne og indgår i amternes regionplaner, som revideres og vedtages af amtsrådene hvert fjerde år. På baggrund af de fastlagte målsætninger stilles der krav til de enkelte søers tilstand samt næringsstofftilførsel. Herved sikres en sammenhæng mellem søernes målsætning og krav til forurening-begrænsende foranstaltninger. Herudover kan der stilles krav til udnyttelse af søerne. Amternes kontrollerer efterfølgende, om de vedtagne målsætninger er opfyldte. Nedenfor er vist en oversigt over målsætningstyper (efter Miljøstyrelsen, 1983).

#### Målsætning Beskrivelse

##### Skærpede krav:

- A<sub>1</sub> Særligt naturvidenskabeligt interesseområde.
- A<sub>2</sub> Anvendes til badevand.
- A<sub>3</sub> Anvendes til drikkevand.

##### Basismålsætninger:

- B Naturligt og alsidigt dyre- og planteliv. Spildevandstilførsel og andre kulturbetingede påvirkninger må ikke eller kun svagt påvirke det naturlige dyre- og planteliv i forhold til basistilstanden.

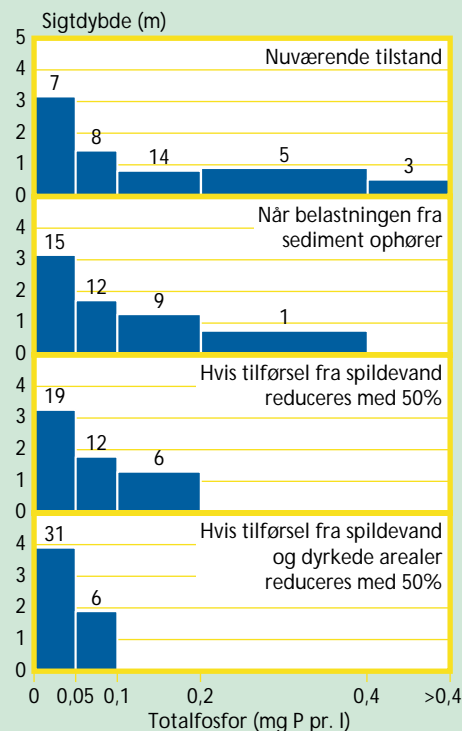
##### Lempede krav:

- C<sub>1</sub> Påvirkning af spildevand, vandindvinding eller andre fysiske indgreb tilladt.
- C<sub>2</sub> Dyrkningsbelastet sø, hvor det ikke ved rensning af spildevand eller afskæring af spildevandsudledninger i oplandet vil være muligt at nå basismålsætningen pga. næringsaltpåvirkning fra de dyrkede arealer i oplandet.

### Box 3. Fremtidig tilstand i danske søer

4 scenarieberegninger over tilstand i danske søer under forskellige forudsætninger mht. reduktion i næringsstofftilførsel.

Tallet over hver søjle angiver hvor mange af de 37 søer i det nationale overvågningsprogram, der tilhører, eller evt. vil komme til at tilhøre, denne gruppe.



# Søen som økosystem

## Vandets klarhed og indhold af fosfor

Vandkvaliteten i en sø afhænger først og fremmest af indholdet af næringsstoffer. Næringsstofferne er nødvendige for planternes vækst og afgør dermed også, hvor stor en biomasse der kan opbygges. Især er indholdet af fosfor af stor betydning (Figur 7). Årsagen er, at fosfor som regel er det begrænsende led for planteplanktonets vækst i søer, mens kvælstof ofte er i overskud. Hvis fosforindholdet i en lavvandet sø overstiger ca. 0,15 mg pr. liter, vil der næsten altid være en ringe sigtddybde. Ved så høje koncentrationer vil planteplanktonet have ideelle vækstbetingelser og opformerer sig i store mængder. Hvis fosforindholdet

derimod er under ca. 0,05 mg pr. liter, falder mængden af planteplankton, og sigtddybden vil næsten altid være relativ stor. I de dybere søer skal fosforindholdet være noget lavere for at opnå en stor sigtddybde.

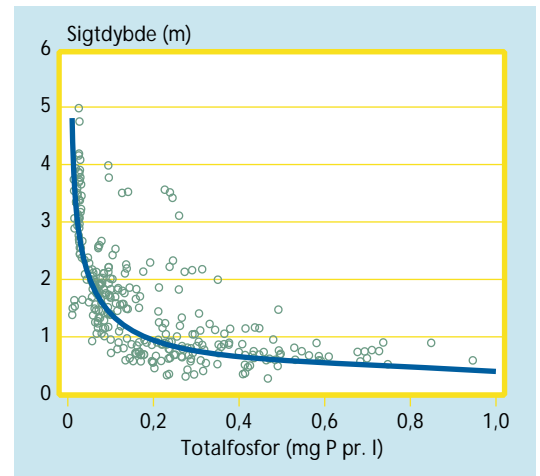
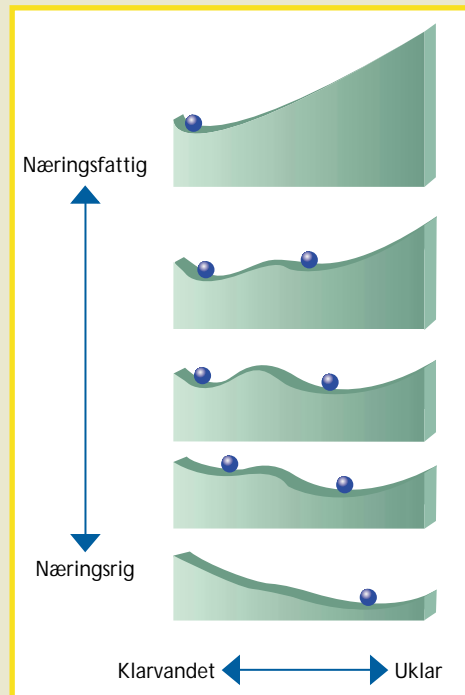
Ved et fosforindhold mellem ca. 0,05 og 0,15 mg pr. liter kan lavvandede søer være både uklare og klarvandede. Det er således ikke ualmindeligt, at søer i dette næringsstofinterval inden for få år kan skifte mellem en klarvandet tilstand med undervandsplanter og en uklar tilstand, hvor planteplankton dominerer, og undervandsplanterne skygges væk, uden at der er sket nogen ændringer i tilførslen af næringsstoffer. Næsten 40% af de danske søer befinder sig i dette interval.



FOTO: DMU / MARTIN SØNDERGAARD

**Box 4. Ligevægtstilstande i søer**

Ved lav tilførsel af næringsstoffer vil søer være klarvandede, men øges tilførslen vil to tilstande kunne forekomme. Der skal dog en større ændring i økosystemet til for at bringe søerne over i den uklare tilstand. Ved en fortsat stigning i tilførslen bringes søerne lettere over i den uklare tilstand, mens det bliver sværere og sværere at bringe dem tilbage til den klarvandede tilstand. Til sidst findes kun én stabil tilstand – den uklare sø. Tilbageturen efter en formindskelse i næringsstofftilførslen viser en tilsvarende træghed. Ligevægtstilstandene er illustreret i nedenstående figur ved placeringen af kugler i skåle under forskellige næringsstofftilførsler (efter Scheffer, 1990). Et restaureringsindgreb kan betragtes som et forsøg på at skubbe søen fra den uklare tilstand over i den klarvandede tilstand, svarende til at skubbe kuglen mod venstre fra den ene til den anden fordybning.



**Figur 7.** Sammenhæng mellem søvandets indhold af fosfor og sigtddybde.

En øget forståelse af mekanismerne bag skiftet mellem den uklare og den klarvandede tilstand og af de to tilstandes stabilitet er blandt de store udfordringer inden for søforskningen og vil danne en vigtig baggrund for vores forvaltning af søer.

**Fosforfrigivelse fra søbunden**

Man ser ofte en betydelig frigivelse af fosfor fra søbunden (sedimentet) i en årrække, efter at tilførslen af fosfor er blevet reduceret. Det tager nemlig tid, før bindingen af fosfor i sedimentet har indstillet sig på en ny ligevægt, der er tilpasset den mindskede tilførsel af fosfor.

I mange søer er denne frigivelse af fosfor fra søbunden afgørende for søvandets indhold af fosfor. Ikke mindst om sommeren, hvor det ikke er ualmindeligt, at koncentrationen af fosfor øges til det dobbelte eller mere på grund af frigivelse fra søbunden.

Frigivelse af fosfor fra søbunden ses både i ikke-lagdelte og i lagdelte søer. I lagdelte søer, hvor fosfor om sommeren ophobes i det kolde og ofte iltfattige vandlag ved bunden og ikke umiddelbart frigives til overfladevandet, kan der være tale om en

FOTO: DMU / MARTIN SØNDERGAARD



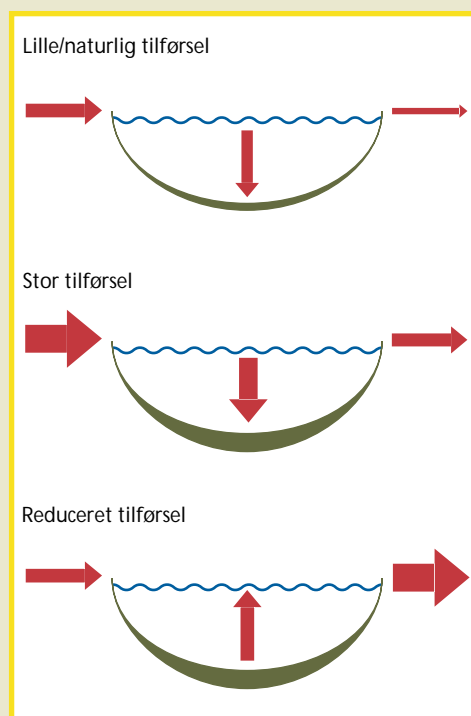
mangedobling af fosforkoncentrationen. Der kan især ophobes store mængder fosfor, hvis ilten i bundvandet hurtigt bliver brugt op. Dette hænger sammen med, at en betydelig del af sedimentets fosforindhold er bundet i eller til jernminerale. Disse jernminerale har nemlig kun en god evne til at binde fosfor, så længe iltforholdene er tilstrækkeligt gode.

I de ikke-lagdelt søer er der næsten altid gode iltforhold, og det øverste sedimentlag er iltet. I de næringsrige søer, hvor der hele tiden sker en stor bundfældning af organisk stof med et efterfølgende iltforbrug, er dette iltholdige lag imidlertid kun få millimeter tykt. Derfor er der en grænse for, hvor meget fosfor der kan bindes. Om sommeren, hvor der især bundfældes mange alger, sker der derfor en frigivelse fra den pulje af fosfor, der ligger lidt dybere i sedimentet. Samtidig betyder de lavvandede forhold, at bunden generelt spiller en større rolle end i de dybe søer, fordi der er et større bundareal pr. liter søvand.

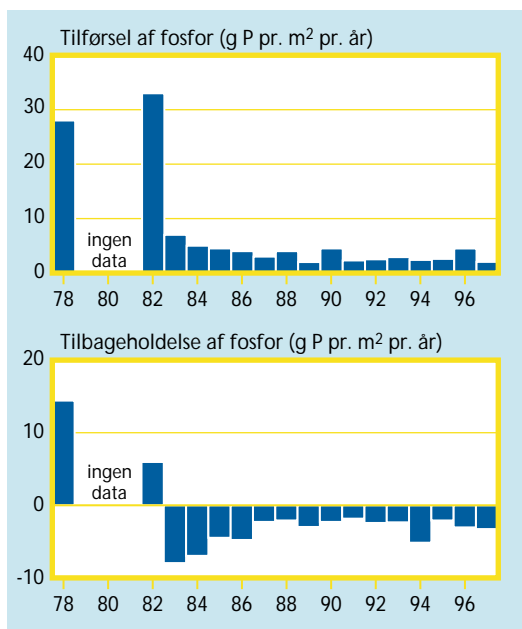
Frigivelsen af fosfor fra sedimentet vil afhænge af mange forhold. Jo længere tid tilførslen har været, og jo større tilførslen har været, jo længere tid må der også forventes

### Box 5. Tilførsel og tilbageholdelse af fosfor i søer

Søer vil under normale forhold tilbageholde en vis mængde af den fosfor, der tilføres udefra. Dette sker, når planteplankton og andre partikler, der indeholder fosfor, bundfældes i søen. Jo større tilførslen og jo større sedimentets evne til at binde fosfor er (dvs. ved højt jernindhold), desto større mængder tilbageholdes. Hvis tilførslen reduceres, vil der gå en periode, før sedimentet igen er i ligevægt med koncentrationerne i søvandet, fordi der frigives fosfor fra søbunden. Der vil derfor være en periode, hvor der løber mere fosfor ud af søen, end der løber ind i søen. Forholdene er illustreret i nedenstående diagram, hvor pilenes tykkelse viser størrelsen af ekstern fosfortilførsel, tilbageholdelse i søen og fraførsel fra søen.

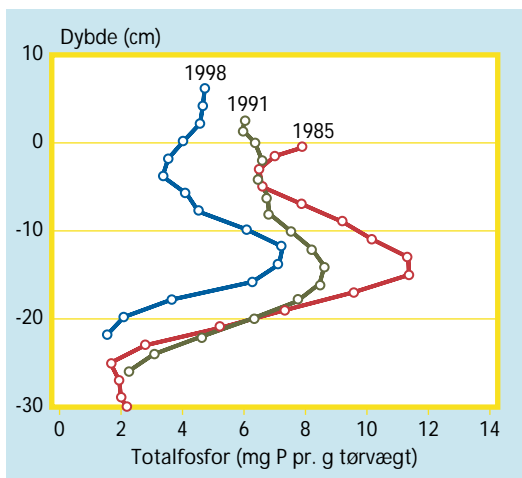


**Figur 8.** Tilførsel og tilbageholdelse af fosfor til Søbygård Sø ved Hammel i Midtjylland. I slutningen af 1982 blev der indført kemisk fosforfældning af spildevand til søen.

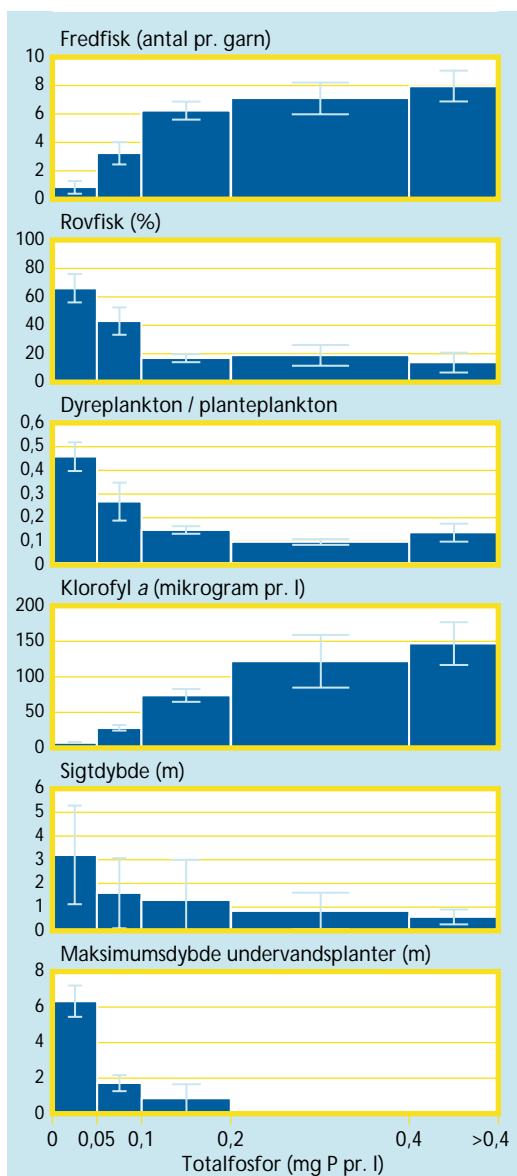


at gå, før der ikke længere frigives fosfor fra søbunden. Der er søer, hvor der nu 15 år i træk er løbet mere fosfor ud af søen end ind i søen, efter at den eksterne tilførsel er reduceret (Figur 8). Fosfor ser ud til at kunne frigøres til vandet helt nede fra en sedimentdybde på 20-25 cm (Figur 9). I mange søer ligger der i dag i sedimentet en potentiel tilgængelig pulje af fosfor, som er mange gange større end den årlige tilførsel til søen.

**Figur 9.** Mindsket indhold af fosfor i sedimentet fra Søbygård Sø efter at spildevandstilførslen blev reduceret i 1982. Grunden til at kurverne ikke starter ved 0 i 1991 og 1998 skyldes at sedimenttykkelsen øges med ca. 1/2 cm hvert år.







**Figur 10.** Betydningen af øget fosforindhold for en række biologiske forhold i 65 danske søer.

Antallet af fredfisk er vist som det gennemsnitlige antal, der fanges pr. standardiseret garn (42 m langt, 1,5 m højt og besående af 14 forskellige maskevidder fra 6,25 til 75 mm). Rovfiskeprocenten er rovfishenes andel af den samlede fangst af fisk i garnene. Dyreplankton/planteplankton er forholdet mellem vægten af dyreplankton og vægten af planteplankton. Klorofyl *a* er indholdet af plantepigment og er et udtryk for mængden af alger. Sigtdybden er også et udtryk for mængden af alger og måler vandets klarhed. Planternes maksimumsdybde er det dybeste sted, hvor der er fundet undervandsplanter.

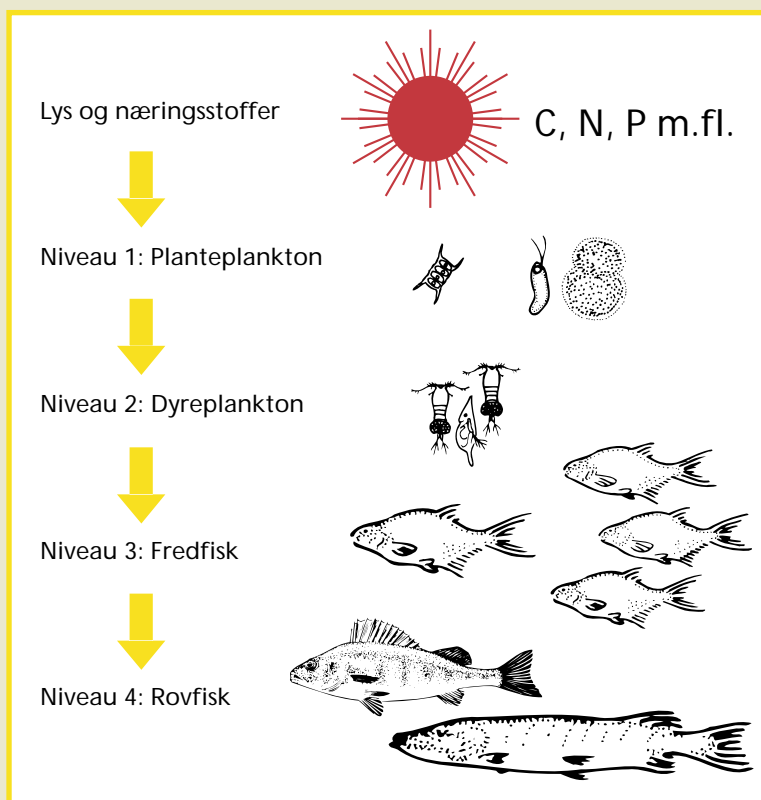
### Biologiske samfund og samspil

Ikke kun sigtdybden og mængden af planteplankton er nøje forbundet med indholdet af fosfor, det samme gælder en række biologiske forhold. Blandt de vigtigste er, at øget fosforindhold fører til en mindsket andel af rovfisk, en mindsket mængde af dyreplankton i forhold til mængden af planteplankton og en mindsket udbredelse af planter på søbunden (Figur 10).

### Box 6. Fødekedden i søernes åbne vand

Græsningsfødekæden i søernes åbne vand omfatter i forenklet form fire hovedniveauer. Planteplanktonet er det første niveau, hvor organisk materiale opbygges vha. lys og næringsstoffer. Andet led er dyreplanktonet, der mest lever af planteplanktonet. Tredje led er de dyreplanktonædende fredfisk (skalle, brasen mm.), mens det sidste og fjerde led udgøres af rovfisk. Dertil kommer forskellige andre organismetyper, som indgår i fødekæden på forskellige niveauer og med varierende betydning: bakterier, ciliater, rovlevende invertebrater mm. I næringsrige søer dominerer planteplankton- og fredfiske-niveauet, mens biomassen af dyreplankton og rovfisk er lille. I disse søer begrænses mængden af planteplankton derfor kun i ringe grad af dyreplankton.

Nedenstående figur viser en forenklet illustration af græsningsfødekæden i søernes åbne vand. De enkelte organismer er ikke tegnet i samme målestok. Hvis eksempelvis en planteplanktoncelle blev tegnet på størrelse med et sandkorn skulle dafnien være på størrelse med et æble og fisken på størrelse med en elefant.



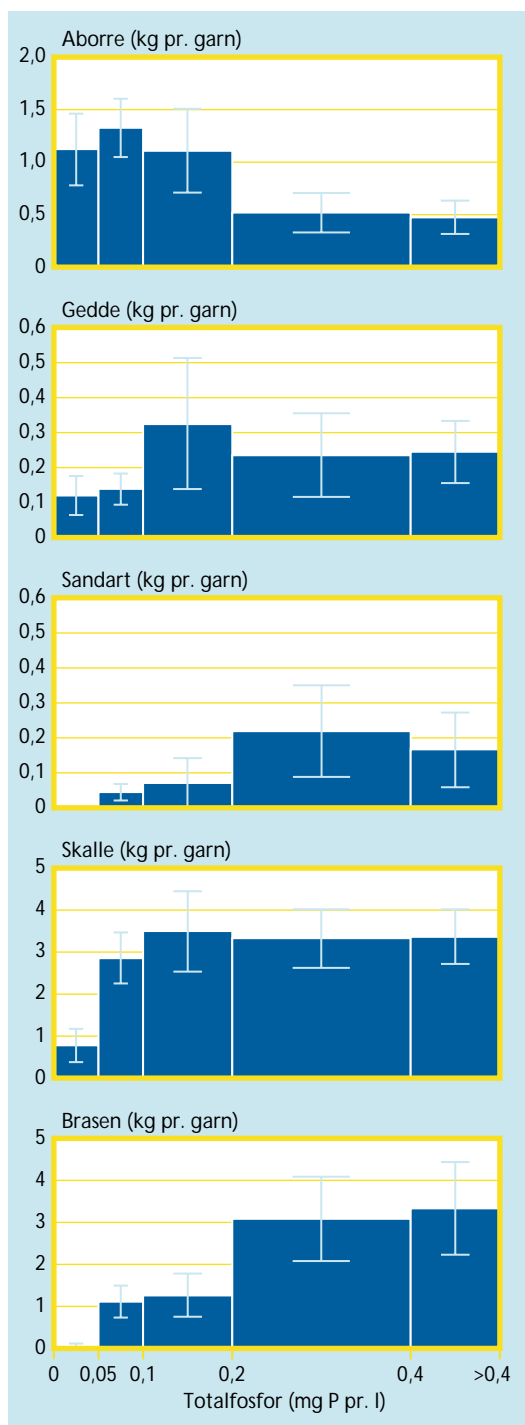
### Fisk

Sammensætningen af fisk ændres markant ved øget indhold af fosfor. Aborre dominerer i de næringsfattige søer, mens skalle og brasen (fredfisk) dominerer ved højt indhold af fosfor (Figur 11).

En af grundene til aborrers dominans i de næringsfattige søer er, at disse søer ofte har mange planter på søbunden. Aborre er bedre tilpasset livet mellem planterne end skalle og brasen. Dertil kommer, at unge aborrer, skaller og brasen konkurrerer om føde, og her er aborre de andre overlegen blandt planterne, mens det er lige omvendt på åbent vand. I søer med mange planter på bunden har aborren derfor gode muligheder for at nå rovfiskestadiet, der typisk opnås i 2-3 års alderen ved en længde over 12-15 cm. Indtil da lever den af smådyr i vandet og på søbunden.

I de næringsrige søer er mængden af planter på bunden lille, og det samme er rovaborrernes andel (< 5-10% af den totale fiskebiomasse). I stedet bliver gedde og i nogle søer sandart de dominerende rovfisk, men de er ikke så effektive til at kontrollere fredfiskene som aborre. Sandart fanger sit bytte ved lugte- og sidelinjesansning, hvilket giver den gode muligheder i uklare søer. Sandart har dog ofte en uheldig virkning på fiskebestanden, idet den fremmer brasen på bekostning af skalle, fordi sandart har et snævert svælg og derfor ikke er så effektiv til at æde den højryggede brasen. Det uheldige består i, at brasen har større negativ indvirkning på vandets klarhed end skalle, især i lavvandede søer. Når brasen søger føde på bunden, hvirvles materiale nemlig op i vandet. Dermed øges indholdet af partikler i vandet og frigivelsen af næringsstoffer.

Den sidste almindelige rovfisk, gedde, trives bedst i små, næringsrige søer med en veludviklet rørskov. Rørskoven giver dem gode opvækstmuligheder i de første leveår og mindsker graden af kannibalisme.



**Figur 11.** Fiskesammensætning ved forskellige fosforindhold i 65 danske søer. Bemærk forskellig skala.

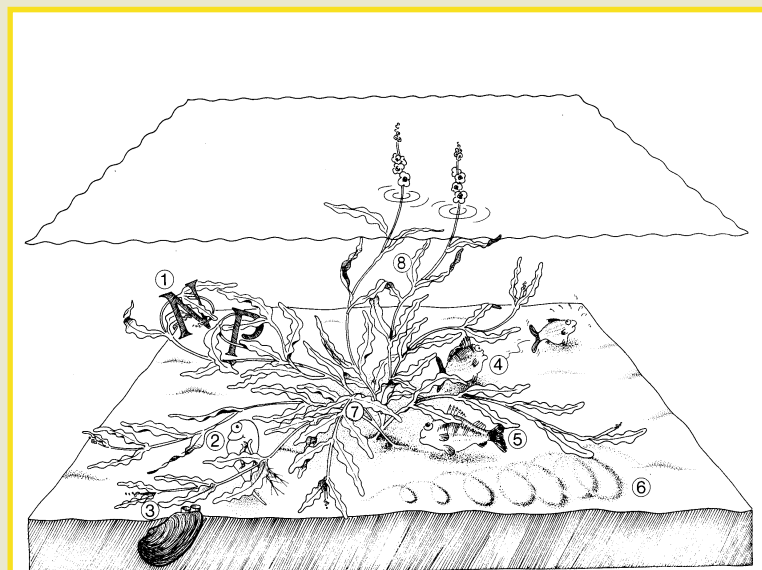
### Box 7. Undervandsplanters rolle for søers vandkvalitet

Tilstedeværelsen af undervandsplanter i en sø er med til at stabilisere den klarvandede tilstand. Sammenlignes således søer med samme næringsstofindhold, vil søer med undervandsplanter generelt have en bedre sigtddybde end søer uden undervandsplanter.

Det ser ud til, at omkring 30% eller mere af søbunden skal være dækket af planter, før denne effekt opnås. Det er en fordel for vandkvaliteten, hvis undervandsplanterne er spredt over hele søens areal.

Den stabiliserende effekt kan opnås ved at planterne:

1. Holder på næringsstoffer (især fosfor og kvælstof), som så ikke kan bruges af planteplanktonet.
2. Giver skjul for dyreplankton, så de ikke så let fanges af fisk.
3. Medfører større tæthed af muslinger og andre filtratorer, som fjerner alger fra vandet.
4. Favoriserer små aborrrer i fødekongurrence med små skaller.
5. Giver skjul for små aborrrer og små gedder.
6. Stabiliserer bundmaterialet, reducerer sedimentophvirvling og øger bundfældningen af partikler og planteplankton.
7. Øger den bakterielle omsætning af kvælstof.
8. Kan udskille kampstoffer, som hæmmer planteplanktonets vækst.



TEGNING: BJØRN BACHMANN

Almindelige forekommende former af planteplankton.

Højre: Arter af grønalgen *Scenedesmus*.

Nedenunder: Kiselalgen *Asterionella*.

Nederst: Grønalgen *Pediastrum*.

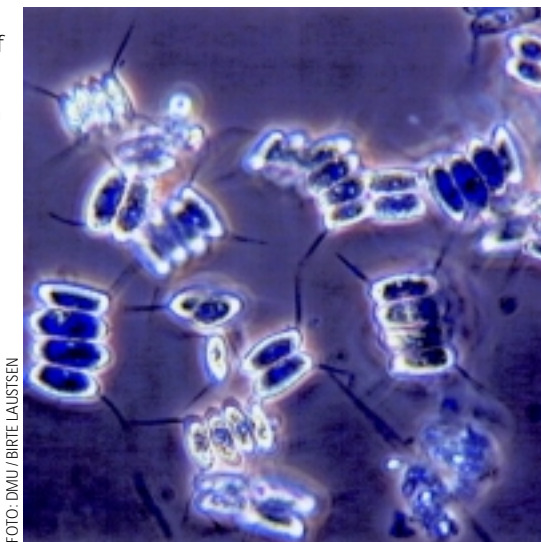
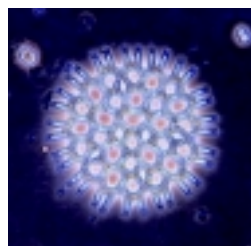
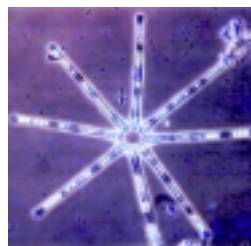


FOTO: DMU / BIRTE LAUSTSEN



### Plankton

Dyreplanktonet omfatter meget forskellige grupper af organismer både mht. størrelse og funktion. De tæller især arter, som filtrerer vandet for planteplankton og bakterier, men også rovdyr, der æder andre dyreplanktonarter. Dyreplanktonets mængde er reguleret af, hvor meget føde der er til rådighed, og af i hvor høj grad de selv bliver spist af fisk.

Ved stigende fosforindhold øges dyreplanktonets biomasse, samtidig med at sammensætningen ændres. Antallet og størrelsen af slægten *Daphnia* mindskes, mens antallet af små dafnier øges (bl.a. snabeldafnien *Bosmina*). Samtidig reduceres de enkelte

individets størrelse af både *Daphnia* og *Bosmina*. De dramatiske ændringer, der ses i dyreplanktonets sammensætning og størrelse ved øget fosforindhold, skyldes især fiskene. Fiskene foretrækker nemlig de store former.

På trods af den øgede mængde af dyreplankton ved øget fosforindhold øges deres evne til at holde mængden af planteplankton nede ikke – tværtimod. Mens der kun sker en mindre stigning i dyreplanktonets mængde, mangedobles nemlig mængden af planteplankton. Forholdet mellem biomasse af dyreplankton og planteplankton ændres derfor fra omkring 1:2 i de næringsfattige søer til 1:10, eller mindre, i de næringsrige søer.

Som konsekvens af den lave græsning og de store mængder af næringsstoffer dannes der store mængder af planteplankton. Vandet bliver derfor uklart i de næringsrige og skalle-brasen dominerede søer. Typisk ses en dominans af grønalger ved de meget høje næringsstofkoncentrationer (en fosforkoncentration større end ca. 0,5 mg fosfor pr. liter), mens blågrønalger dominerer ved det middelhøje næringsstofniveau (en fosforkoncentration på ca. 0,2-0,5 mg fosfor pr. liter). Først når fosforindholdet når ned under 0,05-0,15 mg fosfor pr. liter, ses faldende biomasse af planteplankton og en øget forekomst af andre algegrupper (kiselalger, gulalger mm.).

Almindelige forekommende former af dyreplankton.

Venstre: *Daphnia*.

Højre: *Bosmina*.

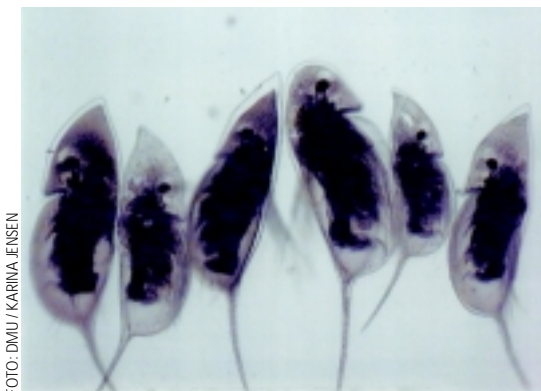


FOTO: DMU / KARINA JENSEN



# Restaurering af søer

Inden for de sidste 20-50 år er der over hele verden udviklet og eksperimenteret med mange forskellige metoder til restaurering af søer (Cook m.fl., 1993). I de fleste tilfælde har formålet været at skabe mere klart vand, men der kan også være andre mål, som f.eks. at hindre forsuring eller tilgroning.

Restaurering for at opnå mere klart vand kan være aktuel i de situationer, hvor en sø trods nedsat næringsstofftilførsel stadig har en dårlig vandkvalitet. Det drejer sig især om de tilfælde, hvor tilførslen af næringsstoffer er bragt så langt ned, at man skulle forvente en forbedret vandkvalitet, men hvor søen ikke desto mindre reagerer trægt, og vandkvaliteten ikke forbedres væsentligt.

En trægt reaktion efter reduceret ekstern næringsstofftilførsel skyldes især to forhold: En **kemisk træghed**, hvor der over en årrække frigives fosfor fra en pulje, der er ophobet i bunden af søen, så fosforindholdet i søvandet ikke ændres før efter mange år. Eller en **biologisk træghed**, hvor årsagen er, at fiskebestanden domineres af arter, der æder dyreplankton. Dyreplanktonets mulighed for at begrænse mængden af planteplankton er derfor begrænset.

Frigivelsen af fosfor fra søbunden kan mindskes ved at fjerne eller lægge lag på det øverste, næringsrige bundlag. Den biologiske træghed har først og fremmest været forsøgt overvundet ved at gribe ind i fiskebestanden ved enten at fjerne fredfiskene og nogle gange også ved at udsætte rovfisk.

Langt de fleste danske restaureringer er gennemført inden for de seneste år. Erfaringer fra de første restaureringer peger imidlertid på, at der kan gå en længere årrække, før en sø fuldt ud har indstillet sig efter de ændrede forhold. Vi kender derfor endnu ikke helt langtidseffekterne, og følgelig er stabiliteten efter et indgreb indtil videre mangelfuldt belyst.

Danske restaureringer har især omfattet indgreb i fiskebestanden. Vi har dog også set indgreb over for den kemiske træghed i form af opgravning af sediment og iltning af bundvand.

## Opgravning af sediment

En stor fosforbelastning kan i lavvandede søer begrænses ved at fjerne det øverste, næringsrige sediment. Formålet kan også være at uddybe søen og forhindre tilgroning. Det opgravede sediment kan evt. anvendes til gødskning af landbrugsarealer, men sedimentet kan også være så forurenet med bl.a. tungmetaller, at det må deponeres andetsteds. Andre gange hindrer store afstande til brugbare landbrugsarealer en økonomisk rentabel udnyttelse af det næringsrige sediment.

I de lidt større søer, hvor opgravningen ikke kan foretages fra bredden af søen, anvendes som regel en eller anden form for grave- og pumpefartøj på søen, og det næringsrige sediment pumpes herfra ind til land. Brabrand Sø ved Århus er indtil videre den eneste større sø i Danmark, hvor det øverste, næringsrige lag af sediment er fjernet.

### Box 8. Sedimentfjernelse i Brabrand Sø

I den 150 hektar store Brabrand Sø blev der over en 7-års periode fra 1988 til 1995 fjernet omkring 500.000 m<sup>3</sup> slam fra bunden (Århus Kommune, 1996, Jørgensen, 1998). Formålet var at reducere frigivelsen af fosfor fra søbunden og dermed mængden af fosfor i søvandet, men også at hindre den lavvandede sø i at gro helt til i tagrør. Samtidig med at sedimentet blev fjernet, blev der indført fosforfjernelse på alle større rensningsanlæg i oplandet til søen.

Sedimentet blev fjernet vha. et specialdesignet fartøj (Mudcat, se foto), der sejlede/blev trukket i baner hen over de dele af søen, hvorfra der skulle fjernes sediment. Sedimentet blev suget op via en roterende snegl, monteret i et skærebør, og derefter pumpet ind til nogle deponeringsarealer tæt ved søen (se foto). Dybden, hvortil sedimentet blev fjernet, varierede mellem 0 og 90 cm.



FOTO: ÅRHUS KOMMUNE / NATURFORVALTNINGEN

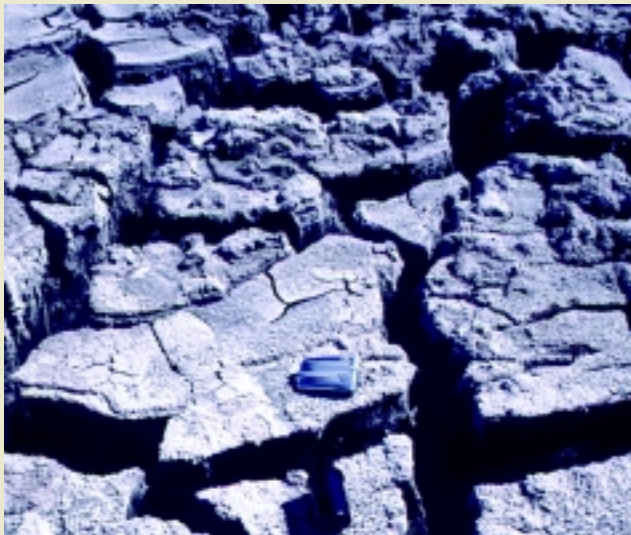


FOTO: ÅRHUS KOMMUNE / NATURFORVALTNINGEN

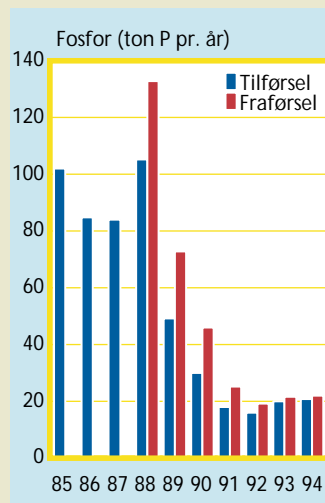


FOTO: ÅRHUS KOMMUNE / NATURFORVALTNINGEN

Den umiddelbare effekt af sedimentfjernelsen i Brabrand Sø har indtil videre først og fremmest været en uddybning af søen. Gennemsnitsdybden er øget fra 0,8 til 1,1 m og maksimumdybden fra 1,8 til 2,7 m. Der er også sket et betydelig fald i søens fosforkoncentration, men dette skal dog primært tillægges den reducerede eksterne tilførsel. Netto frigiver sedimentet stadig fosfor, men nettofrigivelsen er dog betydelig mindre end tidligere, samtidig med at nedgangen i frigivelsen fra bunden ser ud til at ske væsentligt hurtigere, end det ellers ville være tilfældet.

Effekten på sigtdybden og de øvrige biologiske forhold i søen har indtil videre været begrænset. Selvom fosforindholdet er reduceret betydeligt, er indholdet stadigvæk så højt, at søen fastholdes i den uklare tilstand.

Sammenlignet med andre restaureringsindgreb er sedimentfjernelse ofte en bekostelig affære. I Brabrand Sø beløb selve restaureringen sig til 23 mio. kr. Til sammenligning skal dog nævnes, at udbygningen af renseanlæg i oplandet til søen har kostet omkring 250 mio. kr.

### Box 10. Iltning af bundvand i Hald Sø

I den 340 hektar store og 31 m dybe Hald Sø ved Viborg blev der i perioden 1985 til 1997 tilført ilt via 8 diffusorer (se foto) på bunden af søen til fire dybe områder (Rasmussen, 1998). Iltten blev ledt til diffusorerne fra en tank med flydende ilt, der stod inde på land (se foto). Fra diffusorerne blev ilten blæst ud som små gasbobler, der opløstes i bundvandet. Iltningen foregik kontinuerligt i dele af den lagdelte periode. I gennemsnit blev der tilført 210 tons ilt pr. år.

Sideløbende med iltningen blev den eksterne næringsstofftilførsel reduceret ved bl.a. at nedlægge fire dambrug. Herved blev den eksterne fosfortilførsel ca. halveret.

I Hald Sø medførte iltningen et fald i netto*frigivelsen* af fosfor fra 1,5-3,7 tons pr. år til ca. 1 ton de første 6-7 år under indgrebet og til en netto*tilbageholdelse* på omkring 0,5 ton fosfor pr. år efter 8-10 års ilt dosering.

Iltningen og den reducerede tilførsel af næringsstoffer til Hald Sø har haft en god effekt på vandkvaliteten. Sigtdybden er øget fra omkring 2,8 til 3,7 m, og samtidig er der sket en meget stor fremgang i antallet af bunddyr på søens dybeste steder.

Omkostningerne i forbindelse med etableringen af iltningssystemet androg ca. 0,5 mio. med en årlig driftsudgift på 0,3 mio. Hertil kommer udgifter til opkøb af dambrug, etablering af spildevandsledning samt overvågning af miljøforholdene.



FOTO: VIBORG AMT / KNUD RASMUSSEN

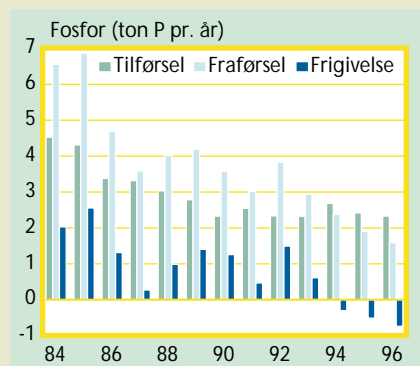


FOTO: VIBORG AMT / LEO M. NIELSEN



## Iltning af bundvand

I dybe og lagdelte søer er en af de hyppigst anvendte restaureringsmetoder iltning af bundvand og evt. også af sedimentet for at øge sedimentets evne til at binde fosfor. Iltningen kan også have til formål at øge overlevelsesmulighederne for de dyr, der lever på det dybe vand. Iltningen foretages ved at pumpe ilt ned til det iltfattige bundvand i den periode om sommeren, hvor søen er lagdelt.

Bindingen af fosfor kan også øges ved tilsætning af andre stoffer, der ilter jern, som eksempelvis kalksalpeter (Ripl, 1976). Kalksalpeter indeholder nitrat, der ud over at være et vigtigt næringssalt for planteplanktonet også virker iltende. Ved at tilsætte kalksalpeter til det dybe vand, hvor det ikke kan virke som næringssalt, fordi der ikke er noget planteplankton, kan man opnå, at det øverste lag sediment iltes, så frigivelsen af fosfor mindskes.

Det er også muligt at øge fosfortilbageholdelsen ved tilsætning af aluminiumsulfat. Fosfors binding til aluminium er i modsætning til bindingen til jern uafhængig af iltningforholdene. Til gengæld kan aluminium under visse forhold være giftig for dyrelivet. Erfaringerne med denne metode er i Danmark beskedne, og metoden er indtil videre kun anvendt i Lyngby Sø tilbage i 1970'erne (Palmark, 1975).

Endelig kan reducerede fosforkoncentrationer og øget iltindhold i bundvandet også opnås, ved at afløbsvandet via en rørledning tages fra det næringsrige bundvand og erstattes med iltigt overfladevand. Herved øges nettotransporten af fosfor ud af søen, og samtidig kan der tilføres nyt iltigt vand til bunden af søen. Denne metode er anvendt med begrænset succes i Søllerød Sø tilbage i 1970'erne (Søllerød Kommune, 1977).

I Danmark er erfaringer med direkte iltning af bundvand indtil videre opnået i to søer: Hald Sø (340 hektar) ved Viborg og Vedsted Sø (8 hektar) i Sønderjylland. Iltningen i Hald Sø har været langt det mest omfattende og langvarige indgreb (12 år), mens iltningen i Vedsted Sø indtil videre kun er foretaget i tre år. Derudover er der i to somre eksperimenteret med anvendelsen af kalksalpeter som et alternativt iltningmiddel i Lyngsø (10 hektar) ved Silkeborg. I alle tre søer blev der under iltningen registreret en markant reduktion af bundvandets ophobning af fosfor under lagdelingen.

## Indgreb i fiskebestanden

De biologiske metoder omfatter især indgreb i fiskebestanden ved at reducere antallet af fredfisk, som æder dyreplanktonet (især skalle og brasen). Dette kan ske i form af en selektiv opfiskning ved anvendelse af forskellige fiskeredskaber eller ved udsætning af rovfisk.



FOTO: DMU / MARTIN SØNDERGAARD



FOTO: DMU / MARTIN SØNDERGAARD



FOTO: DMU / MARTIN SØNDERGAARD

Skaller fjernet ved elektrofiskeri.

Ideen er at øge dyreplanktonets mulighed for at holde mængden af planteplankton nede. Samtidig mindskes også ophvirvlingen af bundmateriale i forbindelse med fiskenes fødesøgning på bunden. Herved kan opnås mere klarvandede forhold, hvilket kan forbedre lysforholdene og bane vejen for en øget udbredelse af undervandsplanter. Disse metoder er anvendt i mere end 20 større danske søer.

### Hvordan foretages indgrebet?

En række redskaber bruges til opfiskning af skalle og brasen. Blandt de hyppigst anvendte er bundgarn og landdragningsvod, men også ruser, gællenet, trawl og elektrofiskeri har



FOTO: DMU / MARTIN SØNDERGAARD

Skalle og brasen på målebræt.

været anvendt. Valget af metode afhænger af flere forhold, herunder søens størrelse, dybdeforhold, og hvilke fisk der ønskes fjernet. Opfiskningen kan finde sted over hele året, men ofte kan indsatsen med fordel koncentreres om bestemte perioder, eksempelvis omkring fiskenes gydning i foråret.

Udsætning af rovfisk har primært omfattet udsætning af geddeyngel samt i enkelte tilfælde aborrer. Aborre er imidlertid vanskelig at opformere i større mængder, samtidig med at den skal være så stor, at den har nået rovfiskestadiet. Gedde er derfor den mest anvendte rovfisk til udsætning. Udsætningstidspunktet afhænger af vejret og svinger fra midt i maj til midt i juni. Udsætningen foretages traditionelt ved, at ynglen spredes så meget som muligt i bredzonen, som er geddernes naturlige levested.

Såvel opfiskning som udsætning af fisk kræver tilladelse fra alle lodsejere samt involverede myndigheder.

### Ændringer i bestanden af fisk

Da man normalt går efter at fjerne så mange fisk som muligt, har opfiskningen i mange søer været ret omfattende. Typisk ønsker

man at fjerne 80-90% af fredfiskene, svarende til at der skal fjernes adskillige hundrede kg pr. hektar sø. I den 269 hektar store Haderslev Dam i Sønderjyllands Amt blev der således over en 5-års periode fjernet i alt 235 tons fisk (Mæhl, 1998).

Store mængder fjernede fisk betyder dog ikke nødvendigvis, at indgrebet har været effektivt i forhold til at forbedre vandkvaliteten. Tidsfaktoren spiller også en rolle. Hvis indgrebet gennemføres over en lang periode, men med en forholdsvis ringe effektivitet i det enkelte år, vil de tilbageværende fisk i høj grad kompensere for opfiskningen ved øget vækst og formering. Ved opfiskningen i Haderslev Dam endte det

således med, at der blev fjernet ca. dobbelt så mange fisk, som fiskebestanden var beregnet til fra starten, uden at der dog blev opnået en længerevarende effekt på søens miljøtilstand. Effekten på fiskebestanden i en sø efter opfiskning afhænger derfor i høj grad af, hvor omfattende og intensiv opfiskningen er.

#### Flere dafnier

I søer, hvor man griber kraftigt ind i fiskebestanden, er det karakteristisk, at andelen af de store dyreplanktonformer som *Daphnia* øges på bekostning af mindre arter som *Bosmina*, *Chydorus* og *Diaphanosoma*. Årsagen er, at de store dyr nu er mindre udsatte for at blive ædt af fisk.

#### Box 11. Effekter på fiskebestanden efter opfiskning

Effekten på den tilbageværende fiskebestand efter en opfiskning af fredfisk følger et typisk mønster, der i høj grad afhænger af indgrebets omfang. Størst effekt fås ved det mest omfattende og intensive indgreb. Effekterne er skitseret i nedenstående tabel.

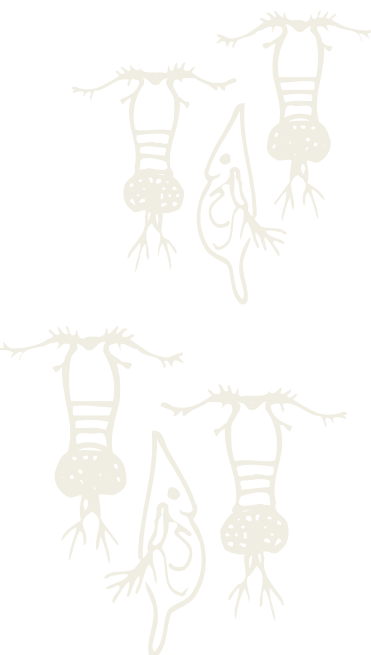
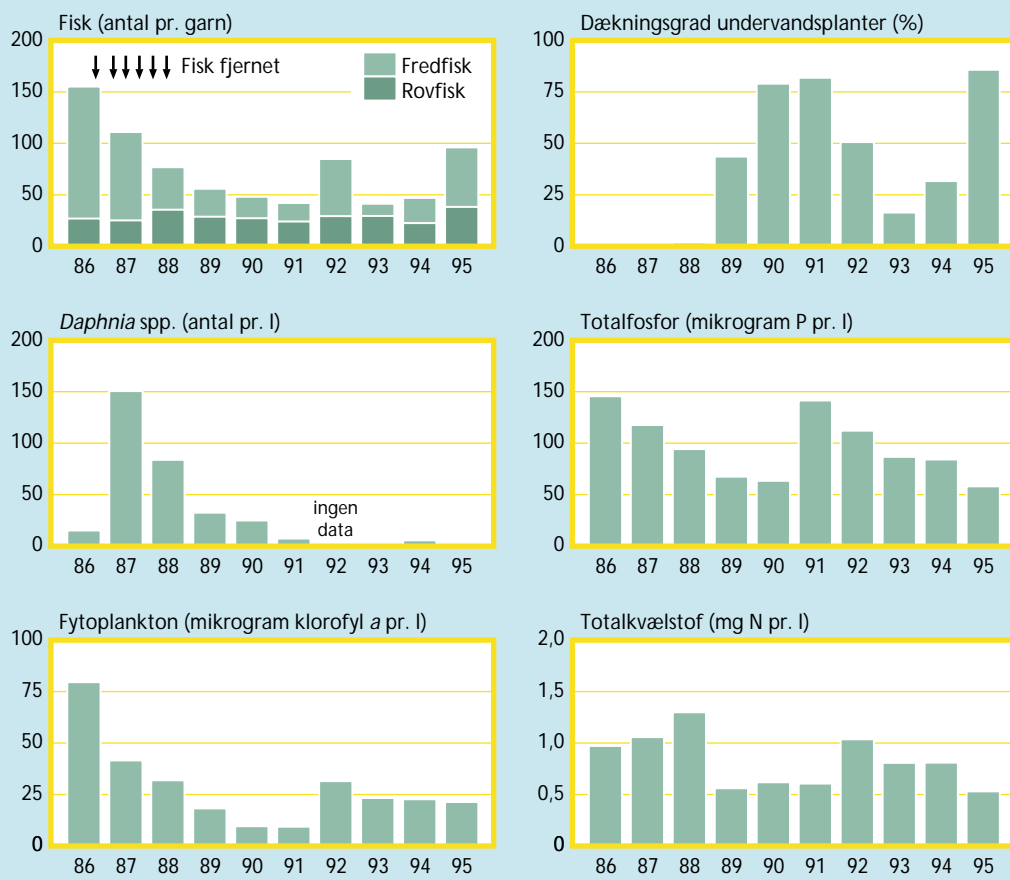
Søer, hvor der er foretaget en massiv opfiskning af fredfisk (mest skaller og brasen) over en kort periode	Søer, hvor der er foretaget opfiskning over en længere periode, men med lav intensitet	Søer, hvor fiskeindgrebet har været beskedent
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ De tilbageværende fisk, men især aborren, har ofte en betydelig øget væksthastighed. På bare to år kan aborre her nå samme individvægt som 5-årige aborrer i den typiske danske sø. Vækstforbedringen sker først, når vandet er blevet mere klart.</li> <li>■ Aborrer bliver oftest den dominerende rovfisk, mens geddens respons er mindre klart.</li> <li>■ Andelen af rovfisk øges markant i de første 1-2 år efter indgrebet især på grund af stigningen i mængden af aborrer.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Brasens andel af biomassen reduceres gradvist, men biomassen er efter 5-6 års opfiskning fortsat høj sammenlignet med de intensivt befiskede søer.</li> <li>■ Rovfiskeprocenten øges i nogle tilfælde, især på grund af øget aborrebiomasse, men andelen af rovfisk forbliver dog som regel under 20%.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Ringe eller manglende effekt.</li> </ul>



## Box 12. Opfiskning af fredfisk i Væng Sø

Fra oktober 1986 til juli 1988 blev 50% af fredfiskebiomassen fjernet i Væng Sø, der ligger ved Brædstrup i Midtjylland (Jeppesen m.fl., 1998). Væng Sø har et overfladeareal på 16 hektar, en middeldybde på 1,2 m, en maksimumdybde på 1,8 m og en hydraulisk opholdstid på 15-25 dage. 95% af tilstrømningen kommer fra grundvand, og indtil 1981 var søen belastet af biologisk rensset spildevand fra en mindre landsby. I de første fem år efter afskæringen af spildevand blev der ikke observeret ændringer i vandkvaliteten. Fiskebestanden var domineret af fredfisk som skalle og brasen, hvorfor dyreplanktonbiomassen var lav, og planteplanktonbiomassen høj og domineret af blågrønlager.

Efter indgrebet øgedes sigtddybden betydeligt fra et sommergennemsnit på ca. 0,6 m og toppede i 1989-90 med sigt til bunden det meste af sommeren. Efter en indledende træghed, der formentlig kan tilskrives græssende vandfugle, koloniserede undervandsplanter søen, og koncentrationen af kvælstof, og i de fleste år også af fosfor, faldt. Forholdet mellem rovfisk og fredfisk steg til 50% og har derefter varieret mellem 30 og 60%.



**Box 13. Udsætning af geddeyngel i Lyngsø**

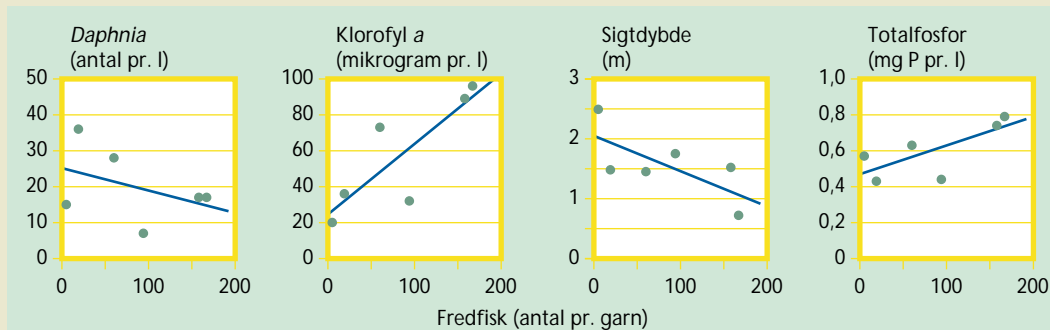
I den 10 hektar store Lyngsø ved Silkeborg blev der over en 4-års periode udsat geddeyngel (se foto) i forskellige mængder (Berg m.fl., 1997; Søndergaard m.fl., 1996) med det formål at vurdere effekten på vandkvaliteten. Geddeynglen blev udsat i tætheder på mellem 500 og 3.600 stk. pr. hektar årligt. Gedderne var ved udsætningen kun få måneder gamle og havde en længde på 2-6 cm.

Den udsatte geddeyngel havde en klar effekt på mængden af små skaller. I år med en stor udsætning var der således færre små skaller i søen. Den mindskede mængde af skaller forplantede sig til dyreplanktonet, hvor de store dafnier især var talrige i år med en stor udsætning af gedder og lav forekomst af små skaller. Det store antal dyreplankton forplantede sig videre til mængden af planteplankton og førte til en bedre sigtddybde i år med en stor udsætning af geddeyngel. Endelig blev der i år med en stor udsætning registreret lavere næringsstofkoncentrationer i søvandet, svarende til at søens interne næringsstoffdynamik også blev påvirket.



FOTO: DMU / MARTIN SØNDERGAARD

Forsøget i Lyngsø viste også, at udsætningen af geddeyngel kun havde en effekt det år, hvor udsætningen fandt sted. En søs bærekapacitet mht. gedder er nemlig i høj grad afhængig af randzonens areal og egnede levesteder. Overskydende gedder bliver simpelt hen spist af andre gedder. Restaurering ved udsætning af gedder er derfor især aktuel i søer, hvor man kan forvente, at få års udsætninger fører til ændringer i andre af de biologiske forhold i søen, der kan fastholde den klarvandede tilstand. Dette kunne f.eks. være indvandring af undervandsplanter.



Skiftet i retning af store arter øger dyreplanktonets muligheder for at kontrollere mængden af planteplankton, fordi de små arter normalt kun kan græsse på små arter af planteplankton, mens de store også er i stand til at græsse på forholdsvis store arter af planteplankton. Samtidig øges også forholdet mellem biomassen af dyreplankton og planteplankton og dermed også græsningsstrykket på planteplanktonet.

### Færre planteplankton

Som et resultat af det forøgede græsningstryk fra dyreplanktonet i søer ses en mindsket mængde af planteplankton. Hermed øges sigtddybden. Især er det vigtigt, at mængden af brasen mindskes ved opfiskningen, fordi brasen via fødesøgning på bunden er med til at ophvirvle bundmateriale og skabe uklart vand.

Nedgangen i mængden af alger ses blandt alle former, inklusive blågrønalger, som kan være giftige. Mange blågrønalger danner store kolonier og er derfor ofte blevet betragtet som uspiselige for dyreplanktonet. Effekterne, opnået efter indgreb i fiskebestanden i danske søer, peger imidlertid på, at det godt kan lade sig gøre at reducere mængden af blågrønalger.

### Flere bunddyr

Mængden af bunddyr øges markant i de søer, hvor opfiskningen er intensiv. Dette skyldes, at især brasen, og til dels også skalle, er i stand til at gøre et stort indhug i bestanden af bunddyr. Når disse fiskearter reduceres, forbedres bunddyrenes vækstforhold. Derudover kan fødegrundlaget også forbedres, idet produktionen af bundlevende alger øges, når lysforholdene i vandet forbedres.

I Arreskov Sø var der før indgrebet en tæthed af dansemyggelarver og børsteorme på 400-1.200 stk. pr. m<sup>2</sup>. Efter indgrebet sås op til 30.000 stk. pr. m<sup>2</sup> (Fyns Amt, 1997).

### Flere undervandsplanter

Det er ofte ønskeligt så hurtigt som muligt at få etableret en god bestand af undervandsplanter efter indgreb i fiskebestanden, fordi undervandsplanterne, som nævnt tidligere, har en række positive og stabiliserende effekter på søens miljøtilstand.

Undervandsplanterne breder sig dog først ordentligt, hvis det lykkes at skabe tilstrækkeligt gode lysforhold ved bunden. Til gengæld er der eksempler på, at når først undervandsplanterne har fået fat, så kan de i løbet af få år dække store dele af de lavvandede arealer.

### Flere fugle

Antallet af vandfugle er først og fremmest bestemt af fødemængden, men også territoriøsmæssige og klimatiske forhold kan have stor betydning. Den tætte kobling til mængden af føde betyder f.eks., at der ofte ses en tæt sammenhæng mellem mængden af undervandsplanter og antallet af de planteædende blichøns og knopsvaner. Også antallet af vandfugle, der lever af smådyr knyttet til vandplanterne, øges markant, når planterne er etablerede.

Fra den 15 hektar store Væng Sø, hvor planternes dækningsgrad steg fra 0 til næsten 100% i løbet af få år efter et indgreb i fiskebiomassen, skete der i isfrie år en forøgelse i vinterbestanden fra næsten ingen og op til 800 blichøns og 300 knopsvaner (Jeppesen m.fl., 1998).

### Indholdet af næringsstoffer mindskes

En vigtig sidegevinst efter et effektivt indgreb i fiskebestanden er, at søvandet indhold af fosfor og kvælstof reduceres. Dette fald ses også, selv om tilførslen er uændret, og må altså betyde, at tilbageholdelsen øges efter et indgreb. Reduktionen i fosfor og kvælstof kan være ret markant, og det er ikke ualmindeligt, at koncentrationerne næsten halveres.

Årsagen til den øgede tilbageholdelse af fosfor og kvælstof er ikke fuldt ud afklaret. Den kan formentlig tilskrives flere faktorer, herunder at bedre lysforhold ved søbunden fører til øget mængde af undervandsplanter og bundlevende alger, som begge kan påvirke tilbageholdelsen og fjernelsen af næringsstoffer.

Restaurering ved indgreb i fiskebestanden kan derfor også være med til at mindske tilførslen af fosfor og kvælstof til nedstrømsbeliggende vandområder. En bedre forståelse af disse sammenhænge er et vigtigt fremtidigt forskningstema.

### Udplantning af undervandsplanter

Udplantning af undervandsplanter kan være et supplement til en restaurering, hvis der er forventning om, at undervandsplanternes naturlige indvandring og spredning i søen vil være for langsom. Årsagen kan være, at søen ikke har eller får tilført spiredygtigt plantemateriale i tilstrækkelige mængder.

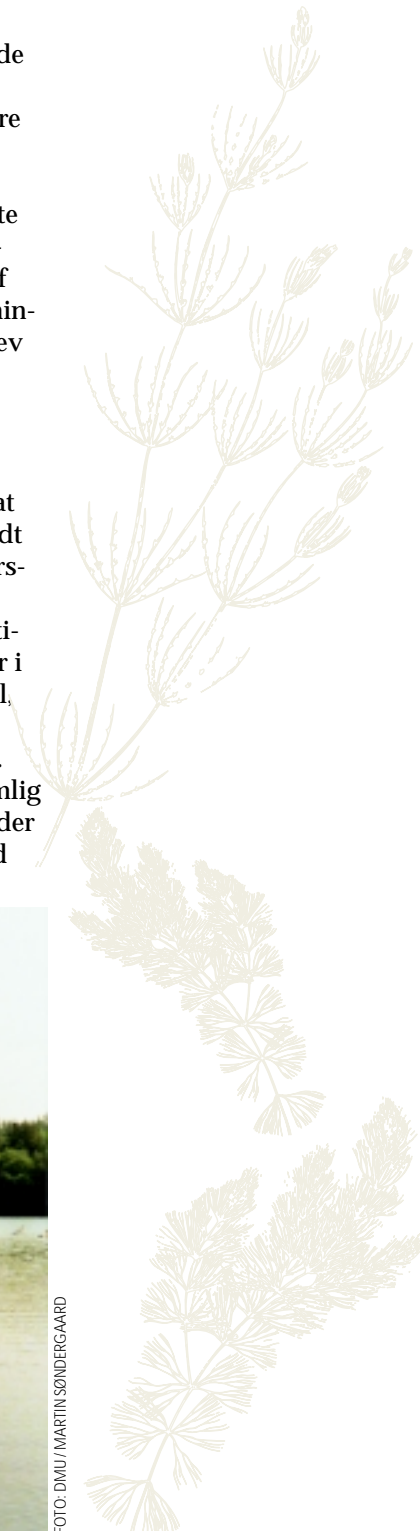
En anden årsag kan være, at planteædende fugle (blishøns og knopsvaner) æder de fremspirende planter. Det kan derfor være nødvendigt at beskytte planterne mod græsning fra planteædende fugle for at sikre en god vækst. Effekten af at beskytte planterne er bl.a. set ved forsøg i Engesholm Sø, hvor der var en kraftig vækst af udplantede planter i beskyttede indhegninger, mens ubeskyttede planter hurtigt blev ædt (Lauridsen m.fl., 1997).

### Hvilke søer kan restaureres?

For at kunne afgøre om det er realistisk at restaurere en sø, er det vigtigt med et godt kendskab til søen og især viden om tilførslen af næringsstoffer. Hvis søens fosforkoncentration i snit for sommeren overstiger ca. 0,15 mg fosfor pr. liter, når søen er i ligevægt med den eksterne fosfortilførsel, vil det være vanskeligt at opnå nogen vedvarende forbedring ved restaurering. Ved så høje koncentrationer må man nemlig forvente, at søen før eller siden igen vender tilbage til den uklare tilstand. Det er med



FOTO: DMU / MARTIN SØNDERGAARD



andre ord nødvendigt først at få styr på den eksterne tilførsel for at kunne opnå en bedre og vedvarende vandkvalitet. Hvis søen er dyb, skal man helst helt ned under en ligevægtskoncentration på 0,02-0,05 mg fosfor pr. liter.

Sandsynligheden for at få succes ved et indgreb øges, jo mere næringsstofindholdet er reduceret. Det anbefales derfor at restaureringer først og fremmest gennemføres i søer, hvor fosforkoncentrationen i en fremtidig ligevægtssituation er mindre end

0,05-0,10 mg fosfor pr. liter og i dybe søer lavere end 0,02-0,05 mg fosfor pr. liter. Det betyder, at mellem 25-30% af de danske søer er egnede til restaurering, og at formentlig helt op til 50% vil være det, når de nuværende indgreb over for eksterne næringsstofkilder er gennemført.

En tidsbegrænset effekt kan dog godt opnås selv ved høje næringsstofkoncentrationer. Blot må man her forvente, at søen i løbet af få år vil vende tilbage til tilstanden før indgrebet.

Der gøres klar til prøvetagning.



FOTO: DMU / MARTIN SØNDERGAARD



**Box 14. Danske erfaringer vedr. valg af restaureringsmetode**

For at opnå varige effekter af et restaureringsindgreb skal den eksterne fosfortilførsel være bragt ned under, hvad der svarer til en søkoncentration på 0,05-0,10 mg fosfor pr. liter i lavvandede søer og i dybe søer 0,02-0,05 mg fosfor pr. liter.

Problemstilling	Restaureringsmuligheder	Bemærkninger
Fosforkoncentrationen er meget højere end den beregnede ligevægtskoncentration <sup>1)</sup> : Fosforindhold reduceres kun langsomt.	I dybe søer: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Iltning af bundvand.</li> <li>■ Tilsætning af aluminiumsulfat.</li> </ul> I lavvandede søer: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Fjernelse af sediment.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Iltning af bundvand skal gennemføres over en årrække for at opnå varige effekter.</li> <li>■ Tilsætning af aluminiumsulfat skal evt. gentages efter en årrække.</li> <li>• Sedimentfjernelse relativ dyr.</li> </ul>
Fosforkoncentrationen er tæt på ligevægtskoncentrationen: Fiskebestanden domineres af fredfisk (dvs. skalle, brasen mm. udgør mere end ca. 80% af fiskebiomassen).	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Opfiskning af fredfisk.</li> <li>■ Udsætning af rovfisk (gedde, aborre).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Mindst 70% af fredfiskene skal fjernes over højst 1-2 år. Bestanden skal ned under ca. 100 kg pr. hektar.</li> <li>■ Udsætning af geddeyngel skal være massiv (&gt;1.000 stk. pr. hektar) og har kun virkning det år, udsætningen foretages.</li> </ul>
Fosforkoncentrationen er tæt på ligevægtskoncentrationen: Ringe eller manglende indvandring og udbredelse af undervandsplanter på trods af gode lysforhold ved bunden.	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Udplantning af undervandsplanter.</li> <li>■ Beskyttelse af undervandsplanter.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Det er nødvendigt at opnå en forholdsvis stor udbredelse af undervandsplanter.</li> </ul>

<sup>1)</sup> Ligevægtskoncentrationen er den fosforkoncentration som vil være i en sø, hvor indløbskoncentrationen er uændret gennem lang tid, dvs. søen er i ligevægt med den eksterne fosforbelastning. Beregnes normalt som  $P_{s0} = P_{ind} / (1 + \sqrt{T_w})$  (Vollenweider, 1976), hvor  $P_{s0}$  er fosforkoncentrationen i søvandet,  $P_{ind}$  er den vandføringsvægtede årsmiddelkoncentration af fosfor i tilløb til søen og  $T_w$  er vandets opholdstid i søen.

# Sammenfatning

De danske søer har generelt en dårlig vandkvalitet. Hovedproblemet er en for stor tilførsel af fosfor, der skaber gode vækstbetingelser for planteplankton og dermed uklart vand. Selv når det er lykkedes at reducere næringsstofftilførslen, ses der ofte ikke nogen umiddelbare effekter på vandkvaliteten. Årsagen kan være, at tilførslen

ikke er reduceret tilstrækkeligt, men i mange tilfælde har søerne en indbygget træghed, som gør, at der ikke sker forbedringer – trods reducerede tilførsler.

Der er typisk to årsager til denne træghed. Den ene er en **kemisk træghed**: Efter at den eksterne tilførsel er reduceret over en lang



FOTO: DMU / MARTIN SØNDERGAARD

årrække, vil søvandet blive tilført næringsstoffer fra søbunden, hvor der ofte har ophobet sig en stor fosforpulje. Den anden er en **biologisk træghed**: Fiskebestanden vil, efter en reduktion i tilførsel af næringsstoffer, forblive uændret. Dette betyder, at der fortsat er stor jagt (et stort prædationstryk) på dyreplanktonet, som dermed vil være ude af stand til at begrænse mængden af planteplankton. Resultatet er, at søen forbliver grøn.

For at fremskynde forbedringen er der udviklet forskellige metoder til restaurering af søer. Nogle af disse har også fundet anvendelse i Danmark, i de fleste tilfælde gennemført af amterne.

I nogle få dybe søer har man søgt at begrænse fosforfrigivelsen fra søbunden ved iltning af bundvandet. Effekterne på bundvandets indhold af fosfor har været markante, men iltningen skal foretages i en årrække, før der opnås en permanent forbedring af søernes tilstand.

I lavvandede søer er frigivelsen af fosfor fra bunden kun søgt begrænset i én større sø i Danmark. I Brabrand Sø blev der over en 7-års periode fjernet 500.000 m<sup>3</sup> fosforholdigt sediment, samtidig med at den eksterne tilførsel blev reduceret markant. Som følge af disse indgreb er indholdet af fosfor i søvandet i dag reduceret væsentligt, men indholdet er dog endnu så højt, at der indtil videre kun er set marginale ændringer i vandets sigtbarhed.

Den mest udbredte form for sørestaurering i Danmark er opfiskning af fredfisk, især skaller og brasen. Disse fisk virker bl.a. begrænsende på mængden af dyreplankton og især på mængden af de store og effektivt filtrerende *Daphnia*-arter. Denne metode er anvendt i mere end 20 danske søer. Effekten af disse opfiskninger har generelt været god, dog først og fremmest i søer, hvor opfiskningen har omfattet en stor del af

fiskebestanden og samtidig er gennemført over få år. Fiskebestanden skal helst bringes ned under 100 kg pr. hektar over 1-2 år. Det skal dog understreges, at langtidseffekterne af de hidtil gennemførte indgreb endnu ikke er særligt veldokumenterede, idet hovedparten af indgrebene er gennemført inden for de seneste 4-6 år.

Som et alternativ eller supplement til opfiskning af fredfisk er der i en del søer udsat rovfisk, især geddeyngel. Formålet er at mindske mængden af skalle- og brasenyngel for igen at forbedre dyreplanktonets vilkår. Effekterne af udsætning af gedder er ikke altid lige tydelige. Det ser ud til at være nødvendigt at udsætte mindst 1.000 stk. geddeyngel pr. hektar for at opnå en effekt på vandkvaliteten. Samtidig opnås effekterne kun det år, udsætningen foretages, medmindre søen bringes over i en mere stabil klarvandet tilstand, f.eks. som følge af genetablering af undervandsplanter.

Det kan konkluderes, at restaurering af søer kan være en god metode til at opnå en bedre vandkvalitet, men at en vigtig forudsætning for at opnå gode og vedvarende effekter er, at den eksterne næringsstofftilførsel er reduceret tilstrækkeligt. Det vil i de lavvandede søer sige helst ned under en ligevægtskoncentration af fosfor på 0,05-0,10 mg fosfor pr. liter og i dybe søer helst ned under 0,02-0,05 mg fosfor pr. liter.

# Litteratur

- Berg, S., Jeppesen, E. og Søndergaard, M., 1997:* Pike stocking as a biomanipulation tool 1: Effects on the fish population in Lake Lyng, Denmark. *Hydrobiologia* 275/276: 71-79.
- Cook, G.D., Welch, E.B., Peterson, S.A. & Newroth, P.R., 1993:* Restoration and management of lakes and reservoirs (2<sup>nd</sup> ed.). Lewis Publishers, Boca Raton, FL. 548 s.
- Fyns Amt (Hansen, K.S., m.fl.), 1997:* Vandmiljøovervågning – Søer. Tema: Ferskvand. Natur- og Vandmiljøafdelingen. 159 s.
- Jensen, J.P., Søndergaard, M., Jeppesen, E., Lauridsen, T.L. og Sortkjær, L., 1997:* Ferske vandområder – Søer. Vandmiljøplanens Overvågningsprogram 1996. Faglig rapport fra DMU, nr. 211. 106 s.
- Jeppesen, E., 1998:* Lavvandede søers økologi – biologiske samspil i de frie vandmasser. Doktor-disputats. Faglig rapport fra DMU, nr. 248. 60 s.
- Jeppesen, E., Søndergaard M., Dall, E., Rasmussen, A., Lauridsen, L. og Mortensen E., 1998:* Væng Sø. I: Søndergaard, M., Jeppesen, E. og Jensen, J.P. [eds]: Sørestaurering i Danmark: metoder, erfaringer og anbefalinger. *Miljønyt* 28: 245-258.
- Jørgensen T.B., 1998:* Brabrand Sø. I: Søndergaard, M., Jeppesen, E. og Jensen, J.P. [eds]: Sørestaurering i Danmark: metoder, erfaringer og anbefalinger. *Miljønyt* 28: 281-289.
- Lauridsen, T., Hald Møller, P. og Delphin, P., 1997:* Genetablering af undervandsvegetation. *Vand og Jord* 3: 97-100.
- Miljøstyrelsen, 1983:* Vejledning i recipient-kvalitetsplanlægning. Del I. Vandløb og Søer. Vejledning nr. 1/1983. 89 s.
- Mæhl, P., 1998:* Haderslev Dam. I: Søndergaard, M., Jeppesen, E. og Jensen, J.P. [eds]: Sørestaurering i Danmark: metoder, erfaringer og anbefalinger. *Miljønyt* 28: 173-181.
- Palmark, M., 1975:* Fosfatfældning i Lyngby Sø, sommeren 1974. *Vand og Jord* 2: 28-34.
- Rasmussen K., 1998:* Hald Sø. I: Søndergaard, M., Jeppesen, E. og Jensen, J.P. [eds]: Sørestaurering i Danmark: metoder, erfaringer og anbefalinger. *Miljønyt* 28: 259-268.
- Ripl, W., 1976:* Biochemical oxidation of polluted lake sediment with nitrate – a new lake restoration method. *Ambio* 5: 132-135.
- Scheffer, M., 1990:* Multiplicity of stable states in freshwater systems. *Hydrobiologia* 200/201: 475-486.
- Skotte-Møller, H. [ed], 1995:* Nature restoration in the European Union. Proceedings from a seminar in Denmark 29-31 May 1995. Ministry of Environment and Energy, The National Forest and Nature Agency: 62-69.
- Skriver, J., 1981:* Vandhuller, moser og søer i Århus Kommune. Eget forlag.
- Søllerød Kommune, 1977:* Søllerød Sø 1976-1977. Søllerød Kommune, teknisk forvaltning.
- Søndergaard, M., Berg, S. og Jeppesen, E., 1996:* Sørestaurering ved udsætning af geddeyngel. *Vand og Jord* 2: 74-77.
- Søndergaard, M., Jeppesen, E. og Jensen, J.P. [eds], 1998:* Sørestaurering i Danmark: metoder, erfaringer og anbefalinger. *Miljønyt* 28. Miljøstyrelsen. 289 s.
- Vollenweider, R.A., 1976:* Advance in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. *Mem. Ist. Ital. Idrobiol.* 33: 53-83.
- Århus Kommune, 1996:* Restaurering af Brabrand Sø – resultater og fremtid. Århus Kommunes Naturforvaltning. 12 s.

## Danmarks Miljøundersøgelser

Danmarks Miljøundersøgelser – DMU – er en forskningsinstitution i Miljø- og Energi- ministeriet. DMU's opgaver omfatter forskning, overvågning og faglig rådgivning inden for natur og miljø.

Henvendelse kan rettes til:      *URL: <http://www.dmu.dk>*

Danmarks Miljøundersøgelser      *Direktion*  
Postboks 358                              *Personale- og Økonomisekretariat*  
Frederiksborgvej 399                  *Forsknings- og Udviklingssektion*  
4000 Roskilde                              *Afd. for Systemanalyse*  
Tel: 46 30 12 00                          *Afd. for Atmosfærisk Miljø*  
Fax: 46 30 11 14                          *Afd. for Miljøkemi*  
   *Afd. for Havmiljø og Mikrobiologi*

Danmarks Miljøundersøgelser      *Afd. for Terrestrisk Økologi*  
Postboks 314                              *Afd. for Sø- og Fjordøkologi*  
Vejlsovej 25                              *Afd. for Vandløbsøkologi*  
8600 Silkeborg  
Tel: 89 20 14 00  
Fax: 89 20 14 14

Danmarks Miljøundersøgelser      *Afd. for Landskabsøkologi*  
Grenåvej 12, Kalø                      *Afd. for Kystzoneøkologi*  
8410 Rønde  
Tel: 89 20 17 00  
Fax: 89 20 15 14

Danmarks Miljøundersøgelser      *Afd. for Arktisk Miljø*  
Tagensvej 135, 4. sal  
2200 København N  
Tel: 35 82 14 15  
Fax: 35 82 14 20

### Publikationer:

DMU udgiver temarapporter, faglige rapporter, arbejdsrapporter, tekniske anvisninger, årsberetninger samt et kvartalsvis nyhedsbrev, DMU Nyt. Et katalog over DMU's aktuelle forsknings- og udviklingsprojekter er tilgængeligt via World Wide Web.

I årsberetningen findes en oversigt over årets publikationer. Årsberetning og DMU Nyt fås gratis ved henvendelse på telefon 46 30 12 00.

## Tidligere TEMA-rapporter fra DMU

- Nr. 1/1994: **Kvælstoftilførsel til Limfjorden**  
Brian Kronvang m.fl., 16 sider, Kr. 50,-.
- Nr. 2/1994: **Luftforurening i danske byer**  
Kåre Kemp og Finn Palmgren, 42 sider, Kr. 100,-.
- Nr. 3/1995: **Ozon som luftforurening**  
Jes Fenger, 48 sider, Kr. 80,-.
- Nr. 4/1996: **Tungmetaller i danske jorder**  
John Jensen m.fl., 40 sider, Kr. 100,-.
- Nr. 5/1996: **Forureningsbekæmpelse med mikroorganismer**  
Ulrich Karlson m.fl., 32 sider, Kr. 30,-.
- Nr. 6/1996: **Status og jagttider for danske vildtarter**  
Jesper Madsen m.fl., 112 sider, Kr. 110,-.
- Nr. 7/1996: **Naturens tålegrænser for luftforurening**  
Morten Strandbjerg og Lisbeth Mortensen, 40 sider, Kr. 60,-.
- Nr. 8/1996: **Anskydning af vildt**  
Henning Noer m.fl., 52 sider, Kr. 80,-.
- Nr. 9/1996: **Kvælstofbelastning af havmiljøet**  
Henrik Paaby og Flemming Møhlenberg, 40 sider, Kr. 60,-.
- Nr. 10/1996: **Havets usynlige liv**  
Åke Hagström m.fl., 33 sider, Kr. 50,-.
- Nr. 11/1997: **En atmosfære med voksende problemer..., luftforureningens historie**  
Jes Fenger, 64 sider, Kr. 90,-.
- Nr. 12/1997: **Reservatnetværk for vandfugle**  
Preben Clausen m.fl., 52 sider, Kr. 80,-.
- Nr. 13/1997: **Næringsstoffer – arealanvendelse og naturgenopretning**  
Brian Kronvang m.fl., 40 sider, Kr. 60,-.
- Nr. 14/1997: **Mikrobiologiske bekæmpelsesmidler i planteproduktion – muligheder og risici**  
Niels Bohse Hendriksen m.fl., 28 sider, Kr. 40,-.
- Nr. 15/1997: **Kemikalier i hverdagen**  
Suresh C. Rastogi m.fl., 40 sider, Kr. 60,-.
- Nr. 16/1997: **Luftkvalitet i danske byer**  
Finn Palmgren m.fl., 64 sider, Kr. 90,-.
- Nr. 17/1998: **Olieeftersforskning og miljø i Vestgrønland**  
David Boertmann m.fl., 56 sider, Kr. 80,-.
- Nr. 18/1998: **Bilisme og miljø – en svær balance**  
Mette Jensen m.fl., 48 sider, Kr. 60,-.
- Nr. 19/1998: **Kemiske stoffer i landbruget**  
John Jensen m.fl., 32 sider, Kr. 40,-.
- Nr. 20/1998: **Naturen og landbruget**  
Rasmus Ejrnæs m.fl., 76 sider, Kr. 100,-.
- Nr. 21/1998: **Skov og skovvandløb**  
Nikolai Friberg, 32 sider, Kr. 40,-.
- Nr. 22/1998: **Hvordan står det til med naturen?**  
Michael Stoltze, 76 sider, Kr. 100,-.
- Nr. 23/1998: **Gensplejsede planter**  
Christian Damgaard m.fl., 40 sider, Kr. 60,-.

De enkelte hæfter i serien "TEMA-rapport fra DMU" beskriver resultaterne af DMU's forskning inden for et afgrænset område. Rapporterne er skrevet på letforståeligt dansk og henvender sig til alle, der er interesseret i miljø og natur. Serien er udformet så den kan bruges i undervisningen i folkeskolens ældste klasser og i gymnasiet.

De fleste danske søer er i dag uklare på grund af en stor næringsstoffertilførsel, der giver det mikroskopiske planteplankton gode vilkår. Selv efter at tilførslen af næringsstoffer er reduceret, fastholdes ofte en ringe vandkvalitet.

For at råde bod på dette er en del danske søer indenfor de sidste 5-10 år blevet restaurerede. I denne rapport giver vi et overblik over de anvendte metoder. Disse har bl.a. omfattet fjernelse af næringsrigt søbund og iltning af bundvand, men især indgreb i fiskebestanden, der nu er gennemført i mere end 20 søer.

En vigtig forudsætning for at opnå en tilstrækkelig og vedvarende effekt er, at tilførslen af næringsstoffer er bragt ned til et lavt niveau. Ved indgreb i fiskebestanden er det nødvendigt at reducere mængden af fredfisk (skalle, brasen, m.fl.) med mindst 70%, og samtidigt skal indgrebet helst gennemføres indenfor 1-2 år.

