

Indikatorer for naturkvalitet i søer

Faglig rapport fra DMU, nr. 238

Jens Peder Jensen

Martin Søndergaard

Afdeling for Sø- og Fjordøkologi

Datablad

Titel:	Indikatorer for naturkvalitet i søer	
Forfattere:	Jens Peder Jensen og Martin Søndergaard	
Afdelingsnavn:	Afdeling for Sø- og Fjordøkologi	
Serietitel og nummer:	Faglig rapport fra DMU nr. 238	
Udgiver:	Miljø- og Energiministeriet Danmarks Miljøundersøgelser ©	
URL:	http://www.dmu.dk	
Udgivelsestidspunkt:	Juni 1998	
Tegninger: ETB:	Kathe Møgelvang Kathe Møgelvang & Pia Sørensen	
Faglig kommentering:	Arbejdsgruppe og Følgegruppe for projektkontrakten: Indikatorer for naturkvalitet (Repræsentanter for Miljøstyrelsen, Skov- og Naturstyrelsen, Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelser, Forskningscenter for Skov og Landskab og Danmarks Miljøundersøgelser)	
Bedes citeret:	Jensen, J.P. & Søndergaard, M. 1998. Indikatorer for miljøkvalitet i søer. Danmarks Miljøundersøgelser. 42 s. - Faglig rapport fra DMU, nr. 238.	
	Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse.	
Frie emneord:	Søer, naturkvalitet, indikatorer	
ISBN:	87-7772-398-8	
ISSN:	0905-815X	
Papirkvalitet:	Cyclus Print	
Tryk:	Silkeborg Bogtryk	
Oplag:	200	
Sideantal:	42	
Pris:	kr. 50,- (inkl. 25% moms, ekskl. forsendelse)	
Købes i boghandelen eller hos:	Danmarks Miljøundersøgelser Vejløvej 25 Postboks 314 8600 Silkeborg Tlf. 89 20 14 00 Fax 89 20 14 14	Miljøbutikken Information & Bøger Læderstræde 1 1201 København K Tlf. 33 37 92 92 Fax 33 92 76 90

Indhold

Forord 5

1 Formål 7

2 Baggrund 9

3 Datamateriale 11

4 Naturkvalitet og eutrofiering 13

- 4.1 Kvalitative og kvantitative indikatorer 13
- 4.2 Sammenhænge mellem næringsstofftilførsel, søkoncentration og biologisk struktur 15
- 4.3 Fysiske indikatorer 19
 - Sigt dybde 19
- 4.4 Kemiske indikatorer 20
- 4.5 Biologiske indikatorer 21
 - Cyanotoksiner 21
 - Planteplanktonbiomasse 22
 - Planteplanktonarter 22
 - Dyreplankton 25
 - Fisk 28
 - Bunddyr 28
 - Undervandsplanter 30
 - Fugle 32

5 Konklusioner og perspektivering 35

6 Referencer 37

Danmarks Miljøundersøgelser

Faglige rapporter fra DMU/NERI technical reports

Forord

Denne rapport er en af flere, der omhandler indikatorer for naturkvalitet. De øvrige rapporter omhandler aspekter af naturkvalitet i vandløb og vandløbsnære arealer, terrestriske samt marine naturtyper.

Rapporten er resultatet af en projektkontrakt med deltagelse af Miljø- og Energiministeriet.

1 Formål

Denne rapport har til formål at vurdere, om det eksisterende miljøkvalitetsindeks i søer kan anvendes som miljø- og naturkvalitetsindeks. Redegørelsen omfatter en oversigt over de vigtigste anvendte fysiske, kemiske og biologiske indikatorer for biologisk tilstand. Der er ikke medtaget forhold vedrørende den fysiske tilstand som eksempelvis dybdeforhold, størrelse og randzoneareal.

Naturmæssigt er de undersøgte kvalitetsindeks afgrænset til det søernes åbne vandflader. Analysen omfatter således ikke andre vigtige naturelementer tilknyttet søer, som f.eks. rørskov, kær og moser.

2 Baggrund

Gennem de sidste århundreder er der, ikke mindst i forbindelse med intensiveret landbrugsdrift og afvanding af vådområder, sket en markant nedgang i antallet af søer. Mange små, men også en del større søer, er helt eller delvist tørlagte. I de sidste 5-10 år er udviklingen i kraft af øget opmærksomhed vedr. naturgenopretning til dels vendt, men der er stadig langt færre søer og totalt set et meget mindre søareal end der var i starten af dette århundrede.

Den menneskelige påvirkning har imidlertid ikke alene resulteret i færre søer, men de tilbageblevne søer er også påvirkede af denne aktivitet. Ofte har dette ført til en mindsket naturkvalitet.

Naturkvalitet er et meget bredt og samtidigt et meget diffust begreb, der er meget vanskeligt at definere. Begrebet blev diskuteret på en workshop holdt under dette projekt. Her nåede man blandt andet frem til at naturkvalitet er forbundet med begreber som oprindelighed (i betydningen upåvirket af menneskers kultur), kontinuitet (ensartede levevilkår gennem tid) og autenticitet (ægthed). Begrebet forbindes også med, om noget er æstetisk "kønt", og om et givent område har et varieret plante- og dyreliv. Endnu et væsentligt forhold ved søerne er menneskers rekreative udnyttelse disse og deres omgivelser. Dette indgår ikke som en del af naturkvaliteten for søer, men det er et væsentligt element i den praktiske forvaltning af søerne.

Indenfor søområdet har der i den offentlige forvaltning gennem en årrække været anvendt en række kvalitetsindeks. Disse er formuleret på grundlag af de recipientkvalitetsmålsætninger, der i løbet af 80'erne blev udarbejdet for størsteparten af de (større) danske søer (Tabel 1). Målsætningerne var centreret omkring effekter af næringsstofftilførsel, idet eutrofiering (øget næringsstofindhold), dengang som nu, var det altoverskyggende problem i søer.

Som det vil fremgå af denne rapport, har øget næringsstofftilførsel en række afledede effekter, der overordnet fører til uklart vand og en generel forringet vandkvalitet. Det giver sig bl.a. udslag i en mindsket biodiversitet både mht. flora og fauna. Som eksempel kan nævnes, at undervandsplanternes udbredelse reduceres markant i takt med en øget vækst af planteplankton. I værste fald forsvinder undervandsplanterne helt.

Forvaltningsmæssigt har man derfor siden starten af 80'erne anvendt vandets gennemsigtighed (sigtdybden) som et indikatorbegreb. Sigtdybden er et simpelt og letanvendeligt mål for mængden af partikler i vandet og dermed et udtryk for mængden af planteplankton (i brunvandede søer spiller farvetallet dog også ind).

Tabel 1. Oversigt over målsætninger af søer.

Målsætning		Beskrivelse
Skærpede krav	A1, særlige naturområder A2, badevand	Søer, hvor særlige naturelementer ønskes beskyttet Søer, der skal kunne anvendes til badning og lign., hvor direkte kontakt er tilsigtet eller uundgåelig
Basismålsætning	B, upåvirket eller næsten upåvirket dyre- og planteliv	Søer, hvor spildevandstilførsel og andre kulturbetingede påvirkninger ikke eller kun svagt påvirker det naturlige og alsidige dyre- og planteliv i forhold til basistilstanden
Lempede krav	C1, sø påvirket af spildevand, vandindvinding eller andre fysiske indgreb C2, dyrkningsbelastet sø	Søer, der tillades væsentlig påvirket af spildevandstilførsel eller andre påvirkninger Søer, hvor det ikke ved rensning eller afskæring af spildevandsudledninger vil være muligt at nå basistilstanden på grund af næringsstofbelastning fra dyrkede arealer i oplandet

Eutrofiering er dog ikke den eneste problemstilling i de danske søer. Selv om vi slet ikke har samme problemer med forsurening, som i de øvrige nordiske lande, så findes der alligevel en række lav-alkaline søer, bl.a. i Vestjylland, som også har vist forsureningstendenser gennem de sidste årtier. (Rebsdorf & Nygaard, 1991).

Set i forhold til eutrofiering er indeksparametrene for forsurening helt anderledes og eksempelvis er forsurede søer ofte klarvandede, hvorfor man ikke kan anvende de samme indikatorer. Forsuringseffekter kan beskrives via en række indikatorer, som ikke nærmere skal omtales i denne rapport. Blandt kemiske indikatorer kan dog nævnes pH og alkalinitet. Blandt biologiske indikatorer kan nævnes trådalger, mosser/isoetider, planteplankton (skift i artssammensætningen), fisk (forskellig tolerance over for lav pH) og invertebrater (skift i artssammensætningen).

Endelig har der på det seneste også været en stigende debat omkring betydningen af pesticider. De største problemer i den henseende knytter sig til drikkevand, men subletale effekter på visse organismer er også registreret i vandløb (Fyns Amt, 1996). På søområdet har vi et meget begrænset kendskab til effekten af pesticider. Enkelte udenlandske undersøgelser peger på, at der under visse omstændigheder kan ses effekter på især dyreplanktonet (Galassi et al., 1992). I de fleste tilfælde vurderes effekten af pesticider i danske søer til at være af mindre betydning end effekten af næringsstoffer, og vi vil derfor ikke komme nærmere ind på dette emne her.

3 Datamateriale

Grundlaget for gennemgangen og vurderingen af de forskellige indikatorer/indeks for søers naturkvalitet er dels det datagrundlag fagdatacentret for ferskvand har opbygget for danske søer:

- Søbeskrivelser (lokalisering, morfometri (størrelse og dybde), opholdstid)
- Belastningsforhold (Fosfor, kvælstof og hydraulisk belastning)
- Fysisk/kemiske parametre i vandet (Fosfor, kvælstof, sigtdybde, klorofyl, pH)
- Sedimentets sammensætning (Fosfor, kvælstof, organisk stof)
- Planteplankton (artssammensætning og biomasse)
- Dyreplankton (artssammensætning og biomasse)
- Fisk (artssammensætning og biomasse (CPUE))
- Bunddyr (artssammensætning og biomasse)
- Undervandsplanter (artssammensætning og udbredelse)

Og dels de erfaringer der er opsamlet gennem en række projekter for søer bl.a.:

- Eutrofieringsmodeller for søer (NPO-programmet, *Kristensen et al., 1990*)
- Vandmiljøplanens overvågningsprogram for søer (*Miljøstyrelsen, 1993; Jensen et al., 1996*)
- En række projekter vedrørende sørestauration (DMU, under udarbejdelse)

Sammenstillingen i denne rapport baserer sig således alene på eksisterende data og analyser.

4 Naturkvalitet og eutrofiering

Gennem mange år er der sket en næringsstofftilførsel til vore søer som følge af menneskelig aktivitet. Processen har især været markant i dette århundrede, som følge af øget befolkningstæthed, kloakering og intensiveret landbrugsdrift. Dette har betydet, at stort set alle danske søer har fået tilført eller stadig tilføres næringsstoffer i en mængde, der ligger over den naturbetingede tilførsel.

Der er derfor sket en række ændringer i søernes kemiske og biologiske tilstand. Ændringerne har været mere eller mindre markante fra sø til sø afhængig af hvor stor næringsstofbelastningen har været/er og af hvor lang tid den har fundet sted. Generelt kan man konkludere, at der kun findes meget få upåvirkede søer i Danmark. Det betyder, at langt de fleste danske søer, med hensyn til naturindhold og kvalitet, er mere eller mindre afvigende fra den upåvirkede søtilstand.

Udviklingen i retning af en mere næringsrig tilstand kan i nogle tilfælde dokumenteres ved at sammenligne ældre tilstandsbeskrivelser. Der findes imidlertid sjældent tidsserier, som er lange nok til at give en god beskrivelse af udviklingen. Effekten af øget næringsstofftilførsel på forskellige organismetyper er dog beskrevet i talrige eksperimentelle studier. Som noget af det nyeste har palæolimnogene undersøgelser på baggrund af analyser af planterester og dyrerester i sedimentet også muliggjort en rekonstruktion af tidligere miljøtilstande (Jeppesen *et al.*, 1996). Disse undersøgelser bekræfter at der gennem de sidste 100-200 år er sket markante ændringer i den biologiske struktur i danske søer.

Tabel 2. Oversigt over indikatorer for den biologiske tilstand i søer i relation til eutrofiering.

Indikatortype	Indikator
Fysiske indikatorer	Sigt dybde/turbiditet
Kemiske indikatorer	Klorofyl <i>a</i> koncentration Næringsstoffkoncentration (fosfor, kvælstof m.m.)
Biologiske indikatorer	Cyanotoksiner (giftstoffer fra blågrønalg) Planteplankton (biomasse, artssammensætning, Nygård-indeks) Dyreplankton (mængde, sammensætning, cladocé-indeks, græsningsindeks) Fisk (antal, "skidtfiske"-indeks) Bunddyr (biomasse, arter), benthos kvalitetsindeks, littoralzoneindeks Undervandsplanter (dybdeudbredelse, plantedækket og plantefyldt areal/volumen, plantesamfund) Fugle (planteædende, fiskeædende, antal)

I det følgende afsnit vil vi give en oversigt over de indikatorer, der anvendes for naturkvalitet i søer (Tabel 2). Vi har valgt indledningsvis kort at diskutere kvalitative kontra kvantitative miljøindikatorer i søer. Derefter gives en gennemgang af den generelle sammenhæng mellem næringsstofftilførsel, søkoncentration og biologisk struktur i danske lavvandede søer. Til slut følger en traditionel inddeling i fysiske, kemiske og biologiske indikatorer.

4.1 Kvalitative og kvantitative indikatorer

Til beskrivelse af naturkvalitet anvendes såvel kvalitative (artslister vurderet som tilstede/ikke tilstede) som kvantitative indikatorer (koncentrationer, antal, biomasse mm.). Dette gælder også for søer. Generelt er udviklingen i søerne dog gået i retning af i højere grad at anvende de kvantitative metoder. Dette hænger sammen med at disse ofte rent metodisk lettere standardiseres og normalt giver bedre sammenlignelige data fra lokalitet til lokalitet. Kvalitative data kan samtidigt være mere person-specifikke. Eksempelvis vil en artsliste over planteplankton være meget afhængig af den tællende persons artskenndskab. Endelig er vækst- og kårfaktorernes blandt mange organisme-typer meget forskellige i forhold til en eutrofieringsgradient.

Indenfor især de større organismer blandt planter og dyr findes en række indikatorarter, som mere eller mindre specifikt relaterer sig til næringsstofindhold. Dette gælder eksempelvis invertebrater, fisk, undervandsplanter og til dels plante- og dyreplankton.

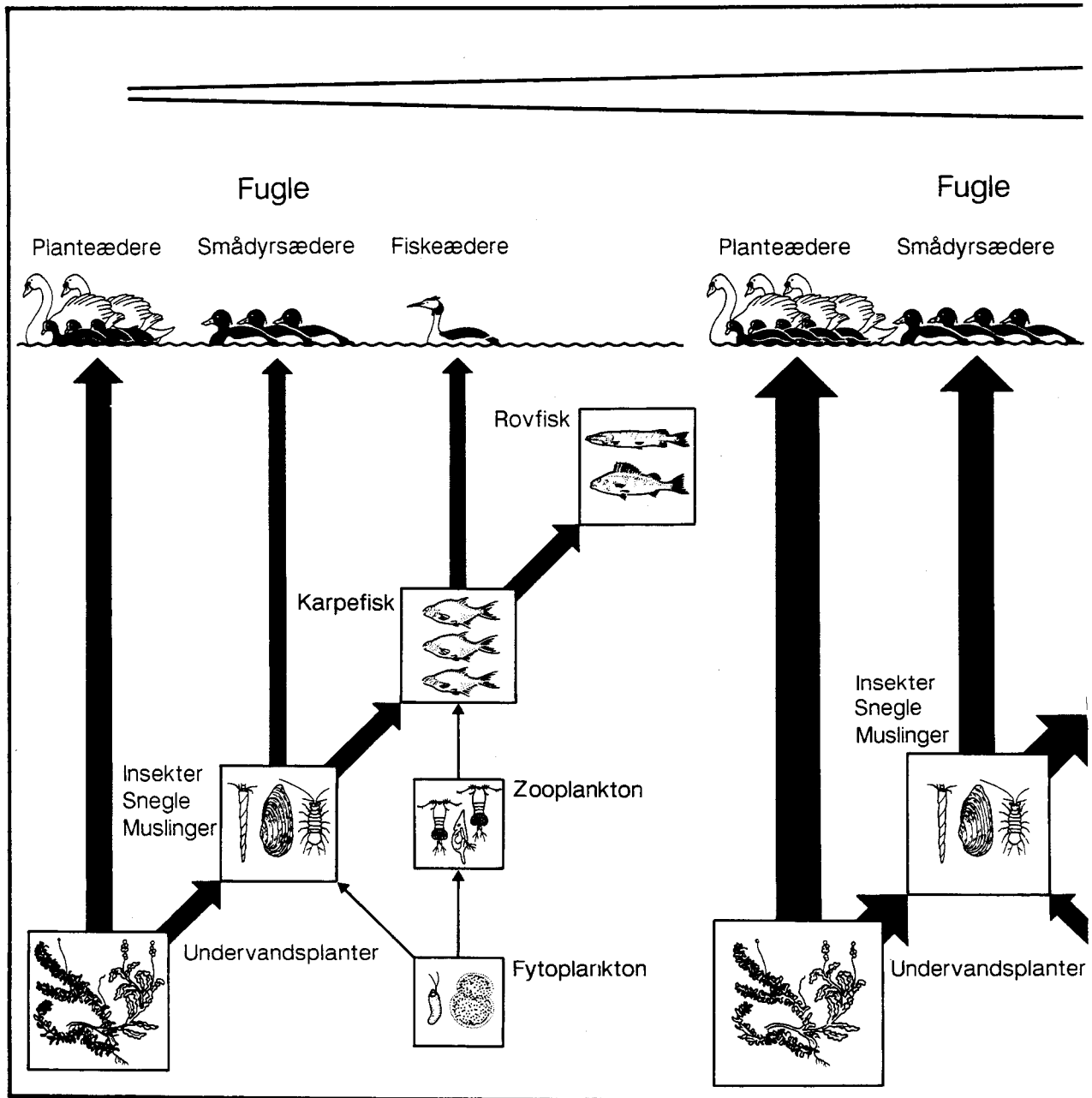
I eller i tilknytning til søer findes desuden en lang række truede planter og dyr - såkaldte rødlistearter. I forhold til deres areal omfatter søerne en relativ stor andel af disse arter (Tabel 3, *Skov og Naturstyrelsen, 1991*). En del af disse arter indgår som indikatorer (se afsnit 4.5), fordi de ofte er knyttet til forholdsvist upåvirkede forhold (ringe eutrofieringsgrad og/eller fysisk påvirkning) i søerne. Andre tilhører grupper, som sjældent undersøges rutinemæssigt i forbindelse med søundersøgelser. Specielt er billefaunaen, der procentuelt har et højt antal særligt truede arter, dårligt undersøgt.

Tabel 3. Truede planter og dyr - såkaldte rødlistearter (efter *Miljø- og energiministeriet, 1995*).

Plante- eller dyregruppe	Antal arter
Larver	3
Planter	31
Døgnfluer	4
Slørvinger	1
Vårfluer	20
Biller	95
Fisk	7
Padder	14
Krybdyr	1
Fugle	22
Pattedyr	3
I alt	201

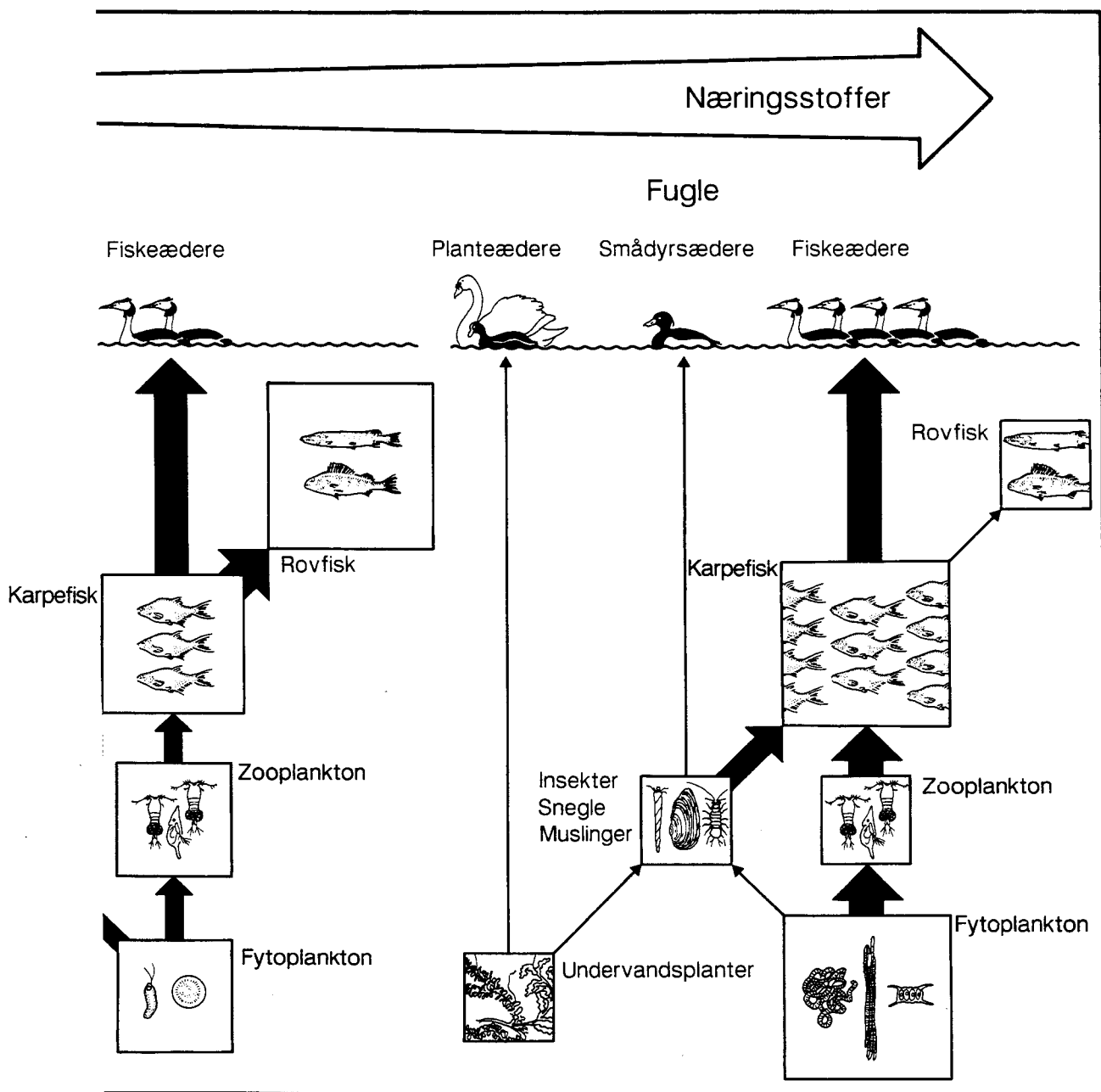
Artsovervågningen af truede planter og dyr har været betydeligt dårligere organiseret end recipientovervågningen af miljøtilstanden i søer. Således findes der ikke de samme standarder for artsovervågningen som det er tilfældet for recipientovervågningen. De arter, hvis væsentligste trussel er eutrofiering, er rimeligt dækket ind via recipientovervågningen i Danmark og flere indgår som mere eller mindre veldefinerede "indikatorer" i overvågningen. Derimod er de arter, hvis væsentligste trussel er forarmning eller ødelæggelse af levesteder, mindre godt omfattet af overvågningen og tilsvarende benyttes kun ganske få af dem som "indikatorer". Forventeligt vil der blive rettet op på disse forhold, da miljø- og naturovervågningen i disse år i højere grad integreres i blandt andet amterne. En del af de danske

søer beskyttes i øvrigt som levesteder for truede planter og dyr ved f.eks. Ramsarkonventionen og EU's fuglebeskyttelses direktiv samt nationale fredninger.



4.2 Sammenhænge mellem næringsstofftilførsel, søkoncentration og biologisk struktur

Søers næringsstofindhold (de vigtigste for vandkvaliteten er fosfor og kvælstof) er nøje knyttet til næringsstofftilførsel. Der er udviklet en række modeller, som beskriver sammenhænge mellem søkoncentration og næringsstofftilførsel. Nogle af de mest anvendte er modeller af Vollenweider typen (Vollenweider, 1976), der ved en given indløbskoncentration af fosfor (P_i) og opholdstid i søen (t_w) beregner en søkoncentration af fosfor (P_{se}): $P_{se} = P_i / (1 + \sqrt{t_w})$. Tilsvarende relationer eksisterer for kvælstof se f.eks. Jensen *et al.* (1990).



Figur 1. Skitse af hvordan den biologiske struktur og betydningen af nogle procesveje ændres, når tilførslen af næringsstof øges (fra venstre mod højre. Delvis efter G. Andersson (personlig kommunikation).

I andre sammenhænge er man gået et skridt videre. Via simple empiriske eller mere komplekse dynamiske modeller forsøger man direkte at vurdere den økologiske kvalitet i søer ved en given næringsstofbelastning og søkoncentration (*Jeppesen og Jensen, i trykken*).

Det er vigtigt at pointere, at modellerne til beregning af søkoncentration er udviklet til søer i ligevægt med den eksterne næringsstofftilførsel. De kan hermed ikke bruges til at beskrive overgangsfasen efter en reduceret næringsstofftilførsel. I overgangsfasen frigives ofte fosfor fra en pulje ophobet i søbunden. Denne interne belastning kan strække sig over årtier og kan betyde, at søkoncentrationen bliver højere end beregnet ud fra indløbskoncentrationen, hvorfor eventuelle forbedringer i det tilstrømmende vand ikke umiddelbart slår igennem på søens vandkvalitet.

Der er en tæt kobling mellem næringsstofindhold og biologisk struktur i søer. Det betyder, at en række af de biologiske nøgleelementer ændres mere eller mindre samtidigt ved ændret næringsstofkoncentration. Mange af de nævnte parametre i dette afsnit er således i kraft af deres kobling til næringsstofkoncentration også tæt knyttet til hinanden. Nogle af de vigtigste organismetyper og deres relative betydning langs en næringsstofgradient er vist i Fig. 1 (*Jeppesen et al., 1991*).

Figuren viser, at den lavvandede rene sø med lav koncentration af næringsstoffer er karakteriseret ved en stor udbredelsen af bundplanter. Primærproduktionen foregår primært i tilknytning til bundplanterne og til mikroskopiske alger på planternes og søbundens overflade. Mængden af planktonalger er lav og oftest domineret af gulalger. Søen er klarvandet. Fiskebestanden er domineret af rovfiskene gedde og aborre, mens mængden af planktivore fisk, som skalle og brasen, er lav. Fuglebestanden er domineret af planteædere, som blishøns og knopsvaner og af smådyrsædere, bl.a. dykænder.

Med stigende tilførsel af næringsstoffer produceres der flere bundplanter, smådyr og fisk. Samtidigt sker der et skift i artssammensætningen uden, at søen nødvendigvis dermed skifter karakter. Den kan forsat være klarvandet. Den ekstra produktion kanaliseres op gennem fødekæden og resulterer i flere fugle og flere rovfisk uden, at balancen i fødekæden derved forskydes væsentligt.

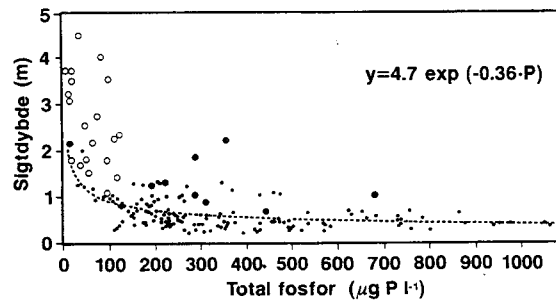
Hvis tilførslen af næringsstoffer øges yderligere, vil der på et tidspunkt ske et markant og selvforstærkende skift i den biologiske struktur. Således øges mængden af alger på planternes overflade og siden også mængden af planktonalger i søvandet. Dermed svækkes lystilgangen til bundplanterne, hvorved deres udbredelse mindskes.

For en række danske søer er der således fundet en eksponentielt aftagende dybdegrænse for bundplanterne med stigende fosforkoncentration i søvandet. Bundplanterne når i gennemsnit kun ud på ca. 1 m's vanddybde ved en fosforkoncentration på $0,15 \text{ mg P l}^{-1}$, og de forsvinder helt ved højere koncentrationer.

Tilbagegangen i bundplanternes udbredelse er alvorlig, fordi en del af stabiliteten i økosystemet dermed fjernes. Bundplanterne har således stor betydning for næringsstoffrigivelsen til søvandet. Planterne

stabiliserer bundmaterialet, som derved ikke så let ophvirvles med fosforfrigivelse til følge. Planterne optager næringsstoffer, som derved ikke er tilgængelige for planteplanktonet. Endelig er bundplanterne attraktive som fasthæftningssubstrat og skjul for en række filtratorer, bl.a. dyreplankton.

Dermed øges antallet af filtratorer og følgelig også græsningstrykket på planteplanktonet. Det er således konstateret at søer med udbredt bundvegetation har en højere sigtddybde ved en given fosforkoncentration end søer uden eller med få bundplanter (Fig. 2).



Figur 2. Sammenhængen mellem gennemsnitlig sigtddybde og gennemsnitlig total fosforkoncentration (maj/september). •: Søer mindre end 3 ha og stor dækningsgrad af bundplanter. ○: Søer større end 3 ha og stor dækningsgrad af bundplanter. ∴: Søer uden bundplanter eller med ukendt antal bundplanter.

4.3 Fysiske indikatorer

Sigtddybde

Siden starten af 70'erne har amterne anvendt sigtddybden som et indeks for miljøkvalitet i søer. Søerne er typisk inddelt i tre kategorier (Tabel 3). Sigtdybden måles ved at nedsænke en hvid skive i vandet og aflæse den dybde, hvor skiven netop stadig er synlig. Vandets turbiditet kan også måles optisk ved at måle lysmængden i forskellige dybder. Sigtdybden svarer ca. til den dybde, hvor lysindfaldet er 10% af søoverfladens.

Tabel 3. Sigtdybdeindeks. Baseret på middelsommersigtddybde.

Søtype	Sigtddybdeindeks
A	> 3 m
B	1-3 m
C	< 1m

Ud over krav til sigtddybden stilles der til tider også krav til klorofylmængden og planteplanktonsammensætningen (ingen blågrønaler).

En række sammenhænge mellem sigtddybde og næringsstofkoncentration er udviklet gennem tiden, hvoraf et par er vist i Tabel 4 (se også Fig. 2). Sigtdybde er dog ikke kun et spørgsmål om planteplanktonmængde. Eksempelvis kan resuspension have stor indfly-

delse på sigtddybden i lavvandede og vindpåvirkede søer (Kristensen et al., 1992).

Tabel 4. Sigtddybe (sigt) som funktion af total fosfor koncentration i søvandet (TP) og middelvanddybde (z).

sigt	=	$1,0 * TP^{0,39}$	(OECD, 1982)
\log_e sigt	=	$-1,36 - 0,41 * \log_e TP - 0,50 \log_e z$	(Zdanowski, 1982)
\log_e sigt	=	$-1,23 - 0,45 * \log_e TP - 0,42 \log_e z$	(Jeppesen et al, 1997)
sigt	=	$0,40 * TP^{0,54}$	(Jensen et al., 1997)
sigt	=	$0,33 * TP^{0,53} * z^{0,20}$	(Jensen et al., 1997)

4.4 Kemiske indikatorer

OECD har ud fra en lang række søers data indført en klassifikation af søer i trofigrader baseret på koncentrationen af henholdsvis total fosfor, total kvælstof og klorofyl *a*. Denne inddeling er anvendt i danske søer, da de stort set alle ville blive karakteriseret som eutrofe/hypereutrofe. EU/ECE er i færd med at udarbejde en tilsvarende klassifikation tilpasset europæiske forhold (Tabel 5). Denne inddeling er noget mere operationel i forhold til danske søer, om end mere end 50% af de danske søer klassificeres i den "ringeste" kategori.

Tabel 5 Forslag til europæiske standard klassifikation for overfladevand (DG XI, 1996).

	Klasse				
	I	II	III	IV	V
Total P ($\mu\text{g l}^{-1}$)	<10	10-25	25-50	50-125	>125
Total N ($\mu\text{g l}^{-1}$)	<300	300-750	750-1500	1500-2500	>2500
Klorofyl <i>a</i> ($\mu\text{g l}^{-1}$)	<2.5	2.5-10	10-30	30-110	>110

I danske søer giver en loglineær skala med hensyn til total fosfor, en fornuftig inddeling (Tabel 6), såvel kvantitativt som kvalitativt. Den tilsvarende skala vil ganget med 10 være gældende for total kvælstof, mens den uændret kan bruges for klorofyl.

Tabel 6. Inddeling af de danske søer efter total fosfor koncentration på en logaritmisk skala, der giver en såvel kvantitativ som kvalitativ inddeling af søerne.

Total fosfor ($\mu\text{g l}^{-1}$)	Trofigrad	Biologisk struktur
< 1	Ultra Oligotrof	Meget lavproduktiv udelukkende med rentvandsarter
1-10	Oligotrof	Lavproduktiv med "normal" artsrigdom
10-100	Mesotrof	Produktiv med høj artsrigdom
100-1000	Eutrof	Højproduktiv med ringe artsrigdom
>1000	Hypereutrof	Sammenbrudssystem med meget ringe artsrigdom

En del af den afvigelse, der findes imellem inddelingerne på globalt (OECD) og Europæisk (EU/ECE) plan i forhold til de aktuelle danske forhold hænger sammen med forskelle i befolkningstætheder og belastningsforhold samt forskelle i søtyper. Som følge af regionale (recipientkvalitetsplaner m.v.) og nationale tiltag (især Vandmiljøplanen) er belastningen fra punktkilder dog med held begrænset via en øget rensningsindsats.

Typisk er de danske søer meget små (lavvandede og med et lille areal) i forhold til europæiske søer (Kristensen et al., 1990). Således er

40% af de danske søer mindre end 10 ha og kun 15% er større end 1 km². Tilsvarende har 52% en middeldybde mindre end 2 m og kun 3% en middeldybde større end 10 m. Samtidig er vandets opholdstid i danske søer kort; mindre end 1 år i 75% og mindre end 1 måned i 33% af søerne. Den lille opholdstid betyder at den hydrauliske belastning (vandtilførslen) er tilsvarende høj.

De danske søers ringe størrelse betyder bl.a., at de fleste søer ikke er lagdelt om sommeren (vandet er termisk opdelt i koldt bundvand og varmt overfladevand). Det betyder, at næringsstofferne kan recirkuleres i modsætning til dybe lagdelte søer, hvor næringsstofferne fra vandet isoleres i bundvandet/sedimentet, når planteplanktonet sedimenterer.

4.5 Biologiske indikatorer

En række af de biologiske komponenter i søer har været anvendt som indikatorer for søernes tilstand: bl.a. biomasse og artssammensætning af planteplankton, dyreplankton, fisk, bunddyr og undervandsplanter.

Cyanotoksiner

På overgangen mellem kemiske og biologiske indikatorer finder man cyanotoksiner, der er giftstoffer produceret af blågrønalger (*Cyanophyceae*). En række af de blågrønalger, der er almindeligt forekommende i danske søer er potentielt giftige (Tabel 7). Toksiciteten kan måles ved forskellige tests: musetests, HPLC-analyse, antistofanalyse mv. . Det er dog først i de senere år, at disse analyser har kunnet anvendes mere rutinemæssigt. Derfor er erfaringerne på dette felt endnu beskedne (*Miljøstyrelsen, i trykken*). I praksis betyder tilstedeværelsen af giftige blågrønalger, at den rekreative udnyttelse af søerne begrænses. Ved masseforekomst (vandblomst) af disse arter indføres badeforbud i søerne og der advares mod at lade dyr drikke vandet.

Tabel 7. Oversigt over potentielt giftige blågrønalgeslægter og arter forekommende i danske søer.

<i>Coelosphaerium</i> Herunder specielt arten: <i>C. kutzingianum</i> Näg.	<i>Anabaeana</i> Herunder specielt arterne: <i>A. circinalis</i> Rab. <i>A. flos-aquae</i> (Lyngb.) Breb. <i>A. lemmermanii</i> P.Richter <i>A. solitaria</i> Kleb. <i>A. spiroides</i> Kleb.
<i>Gomphosphaeria</i> Herunder specielt arterne: <i>G. lacustris</i> Chod. <i>G. naegeliana</i> (Ung.) Lemm.	<i>Aphanizomenon</i> Herunder specielt arten: <i>A. flos-aquae</i> (L.) Ralfs
<i>Microcystis</i> Herunder specielt arterne: <i>M. aeruginosa</i> (Kütz.) Kütz. <i>M. incerta</i> (Lemm.) Lemm. <i>M. viridis</i> (A.Braun.) Lemm. <i>M. wesenbergii</i> (Kom.) Starm.	<i>Oscillatoria</i> Herunder specielt arterne: <i>O. agardii</i> Gom. <i>O. rubescens</i> De Candolle

Den massive vandblomst sker primært i eutrofe søer med en fosforkoncentration mellem 100 og 500 µg P l⁻¹ og er tæt relateret til den

høje fosforkoncentration (*Miljøstyrelsen, i trykken*). I dybe søer kan blågrønalger optræde ved lavere koncentrationer. For eksempel har der i den forholdsvis rene, men dybe Knud sø i Midtjylland været en række tilfælde, hvor amt og kommune er skredet ind med badeforbud ved kraftige vandblomstdannelser af giftige blågrønalger.

Herudover foretages der undersøgelser af de enkelte arters giftstoffer blive registreret potentielt giftige planteplanktonarter ved de egentlige planteplanktonundersøgelser.

Planteplanktonbiomasse

Mængden af planteplankton kan indirekte bestemmes ved enten en måling af pigmentmængden i vandet (klorofyl, behandlet ovenfor) eller ved pigmenternes lysabsorption (sigtdybden, behandlet ovenfor). I mange tilfælde bestemmes biomassen direkte sammen med opgørelsen af artssammensætningen. I en sø afspejler biomassen og primærproduktionen af planteplankton i den produktive periode (1/5-1/10) i en sø afspejler i høj grad mængden af tilgængelige næringsstoffer. En høj dyreplankton biomasse kan via deres græsning reducere mængden af planteplankton væsentligt. Både biomassen og primærproduktionen stiger dog generelt med stigende næringsstofniveau og bliver også udnyttet som en slags trofiindikator for søer. I danske søer findes der dog ikke nogen brugbar inddeling i forhold til planteplanktonbiomasse og primærproduktion.

Planteplanktonarter

Artssammensætningen af planteplankton er koblet til det trofiske niveau i søer. Reynolds (1984) inddelte planteplankton i en række samfund efter årstid og trofigrad (Fig. 3).

Inddelingen er primært baseret på en teori om de forskellige arters strategi med hensyn til næringsstofoptagelse og produktion. Denne inddeling er med held anvendt på en række danske søer (*Olrik, 1993*).

På baggrund af data fra et stort antal danske søer har det tilsvarende kunnet vises, at total fosfor koncentrationen er en af de vigtigste faktorer for planteplanktonets dominansforhold i søerne (Fig. 4, *Jensen et al., 1994*).

Rentvands-planteplankton som gulalger dominerer kun ved de laveste total fosforniveauer, mens blågrønalgerne øger deres dominans med øget total fosforniveau. Ved de højeste fosforkoncentrationer kan opportunist-arter (bl.a. grønalgen *Scenedesmus*) typisk være dominerende. De enkelte arter forekomst og dominans har ligeledes kunnet relateres til bl.a. næringsstofniveau og morfometriske forhold (*Windolf et al., 1993*).

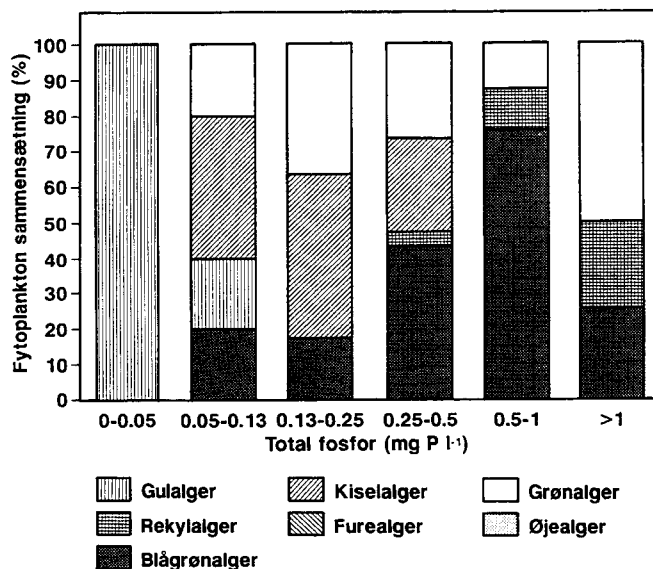
Gunnar Nygaard udarbejdede et sæt indeks efter undersøgelser af planteplanktonet i mange danske søer (*Nygaard, 1949*). Disse indeks baserer sig alle på antallet af arter af forskellige planteplanktongrupper. Indeksene består af et antal eutrofieringsindikatorer i forhold til antal rentvandsindikatorer (Tabel 8).

I 1980'erne har Nygaards sammensatte indeks har anvendt ved flere planteplanktonundersøgelser, hvor man især anvendte semikvantitative planteplanktonundersøger. De øvrige indeks har stort set ikke fundet nogen praktisk anvendelse. Nygaards sammensatte indeks antager en værdi under 1 i rene søer, mellem 1 og 3 i mesotrofe søer

	Senvinter	Forår	Forsommer	Sensommer/efterår
Oligotrofi		Chrysooccus CR1 Rhizosolenia Peridinium inconspicuum Chromulina	Dinobryon RS1 Mallomonas Synura	Peridinium willei S1 Closterium Staurodesmus S2
	Ubest. flagellater < 5µm			
Mesotrofi	Gymnodinium C1 Rhodomonas Cryptomonas Chrysochromulina Peridinium inconspicuum/pusillum	Chrysooccus CR1 Rhizosolenia Peridinium inconspicuum Chromulina	Dinobryon RS2 Mallomonas Uroglena Synura	Asterionella Fragilaria crotonensis Attheya R2 Aphanizomenon S3 Tabellaria RS3 Staurodesmus Botryococcus Snowella rosea SR1 Woronichinia naegliana Peridinium spp. S4 Ceratium Cosmarium RS4 Closterium Staurostrum
		Cyclotella CR2 Asterionella	Sphaerocystis RC1 Oocystis	Asterionella R3 Fragilaria Stephanodiscus astraea Aulacoseira granulata R4 Aulacoseira islandica Aphanizomenon S5 Anabaena Pseudanabaena limnetica Microcystis S7 Ceratium S4
		Aulacoseira italica R1 Aulacoseira binderana		
			Ankyra C5 Sphaerocystis RC1 Oocystis Eudorina CS1 Pandorina Volvox	
Eutrofi	Chlamydomonas Peridinium aciculiferum Gymnodinium Rhodomonas Cryptomonas Chrysochromulina		Rhodomonas CR51 Cryptomonas Ochromonas Chromulina	
		Aulacoseira italica R2 Aulacoseira islandica Asterionella CR3 Stephanodiscus Monoraphidium C4 Scenedesmus Tetrastrum Elakatothrix		
Hypertrofi (incl. brakvand < 12 0/00) * kun i brakvand	Chlamydomonas C3 Chrysochromulina Rhodomonas Prymnesium*	Stephanodiscus hantz. CR4 Diatoma Nitzschia Synedra acus	Aphanothece RS5 Gomphosphaeria pusilia Pediastrum RC2 Coelastrum Oocystis	Aulacoseira granulata R4 Aulacoseira islandica Anabaenopsis* S6 Cylindrospermopsis* Nodularia Anabaena Microcystis S7
		Monoraphidium C6 Chlorella Scenedesmus Crucigenia Actinastrum		
		Katodinium* CRS2 Ebria tripartita*	Skeletonema* RC3	
		Rhodomonas CRS1 Cryptomonas		
		Planktothrix agardhii R5 Limnothrix redekei Pseudanabaena limnetica		

Figur 3. Reynold's system til beskrivelse af planteplanktonsamfund ved forskellig trofegrad og på forskellig årstid (Efter Reynolds, 1984 og Olrik, 1993).

og værdier over 3 i eutrofe søer. I de senere år har brugen af det sammensatte indeks dog været ringe, da det har vist sig ikke at være et tilstrækkelig godt mål i eutrofe søer.



Figur 4. Sammenhængen mellem den procentvise fordeling af dominante planteplanktonklasser i forhold til sommermiddelmekcentrationen af total fosfor i danske søer.

Tabel 8. Oversigt over Nygaards planteplanktonindeks for søer (Nygaard, 1949).

Indeks	Beregning
Myxophyceaeindeks	<u>antal arter Cyanophyceae</u>
Chlorophyceaeindeks	<u>antal arter Desmidiiales</u>
Diatoméindeks	<u>antal arter centrales</u>
Euglenophyceaeindeks	<u>antal arter Euglenophyceae</u>
Nygaards sammensatte indeks	<u>antal arter Cyano- og Chlorophyceae</u>
	<u>antal arter Cyanophyceae+Chlorococcales+Centrales+Euglenophyceae</u>
	<u>antal arter Desmidiiales</u>

En yderligere grund til at indeksene stort set ikke anvendes mere er, at antallet af planteplanktonarter i en sø i nogen grad hænger sammen med den arbejdsindsats, der bruges ved prøveopbejldningen. Desuden er rutinen hos de personer, der udfører artsbestemmelsen, af stor betydning.

I EU-regi er der foreslået en fælles klassifikation af økologisk kvalitet i søer baseret på planteplanktons sammensætning, diversitet, produktion og biomasse (Tabel 9). Klassifikationen stemmer stort set overens med danske forhold (Kristensen et al., 1990, Jensen et al., 1994), hvorfor den umiddelbart er brugbar i Danmark.

Tabel 9. Klassifikation af økologisk kvalitet i ikke-forsurede søer baseret på planteplankton (DG XI, 1996).

	Høj	God	Rimelig	Ringe	Dårlig
Tilstede/ikke tilstede	Tilstede	Tilstede	Tilstede	Tilstede	Tilst./ikke tilstede.
Diversitet	Medium	Høj	Medium	Lav	(Lav)
Total biomasse	Lav	Medium	Høj	Høj	(Lav/høj)
Toksiske planktonalger	Ingen	Ingen	Sjældne	Periodisk	(Lav/høj)
Primærproduktion	Lav	Medium	Høj	Lav/høj	Periodisk (Lav/høj)
Relative sammensætning (% af sommerbiomasse)					
Gulalger + furealger	Høj	Medium	Lav	Lav	(Lav)
Kiselalger	Høj	Medium	Høj	Lav	(Lav)
Blågrønalger/Grønalger	Lav	Lav	Medium	Høj	(Høj)

Det første kriterium til stede/ikke til stede er medtaget for at kunne karakterisere søer, hvor planktonets væsentligste element er bakterier (svarende til "til stede"). Disse søer (den ringe gruppe) opdeles i 2 grupper: 1. En "Dårlig" gruppe med plante- og bakterioplankton til stede, lav diversitet, meget høj biomasse, periodisk toksiske alger, høj primærproduktion, få gul- og furealger, få kiselalger og dominans af grønalger og blågrønalger. og 2. En "Ekstrem dårlig" gruppe med planktonet domineret af bakterier: planteplankton ikke tilstede (sjældent), lav diversitet og biomasse af planteplankton.

Planteplanktonarternes indikatorværdi udnyttes ved palæolimnologiske undersøgelser. Her kan man ud fra sedimentets kvantitative indhold af forskellige kiselalgearter i de enkelte sedimentlag rekonstruere total fosfor niveau og pH for søerne tilbage i tid (Anderson *et al.*, 1994). Metoden bygger på, at man i et aldersdateret sediment kender de enkelte kiselalgearters præferens for total fosfor koncentration og pH.

Dyreplankton

Det større dyreplankton er sjældent fødebegrænset i de danske næringsrige søer, men den ofte store bestand af dyreplanktonædende fisk betyder, at der er et stort prædationstryk på dyreplanktonet. Generelt foretrækker fiskene de store arter (*Daphnia* mm.), hvilket betyder, at mængden af store arter er negativt relateret til fisketætheden.

Internationalt har dyreplankton kun i ringe grad været tillagt en indikatorværdi i søer. Men bl.a. har danske sammenstillinger (Kristensen *et al.*, 1990, Jeppesen *et al.*, 1991) af fiskenes rolle for dyreplanktonet og dermed dyreplanktonets betydning som indikator betydet en revurdering. Således er dyreplanktonet medtaget i EU-forslaget til økologisk klassifikation af søer (Tabel 10).

Tabel 10. Klassifikation af økologisk kvalitet i ikke-forsurede søer baseret på dyreplankton (DG XI, 1996).

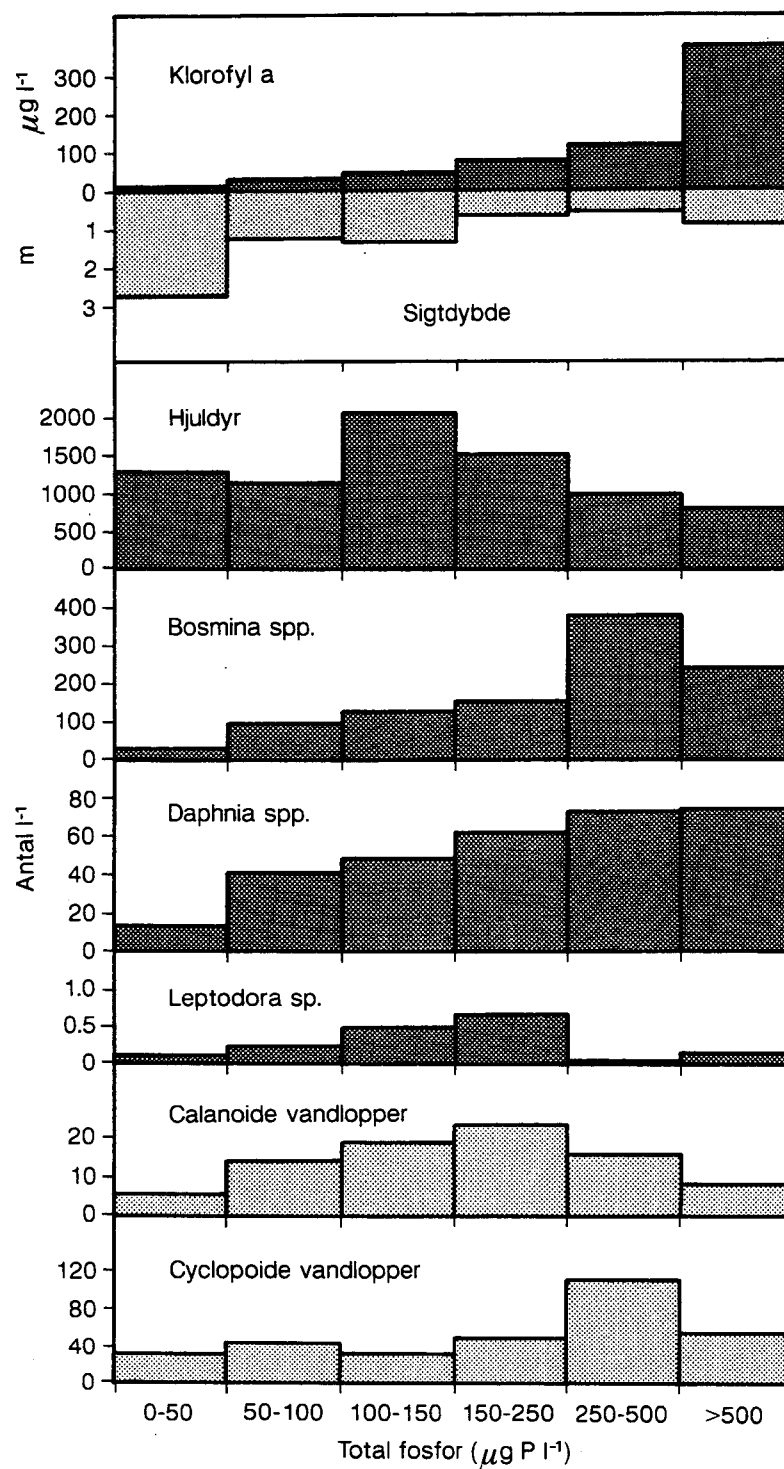
	Høj	God	Rimelig	Ringe	Dårlig
Tilstede/ikke tilstede	Tilstede	Tilstede	Tilstede	Tilstede	Tilst./ikke tilste.
Diversitet	Medium	Høj	Medium	Lav	(Lav)
Gns. størrelse (ekskl. cyclopoide vandlopper)	Høj	Høj	Medium	Lav	(Lav)
Dyre:planteplanktonratio	Høj	Høj	Medium	Lav	(Lav)
Relative sammensætning (% af sommerbiomasse)					
Calanoide vandlopper	Høj	Medium	Lav	Lav	(Lav)
<i>Daphnia</i> spp.	Høj	Høj	Medium	Lav	(Lav)
Små cladoceer	Lav-Høj	Medium	Høj	Medium	(Lav)
Cyclopoide vandlopper	Lav	Lav	Medium	Høj	(Høj)
Hjuldyr	Lav	Lav	Lav	Medium	(Høj)

Sammensætningen af dyreplanktonet ændres væsentligt ved en ændret trofegrad (Fig. 5). Mængden af cladoceer (*Daphnia* spp. og *Bosmina* spp.) stiger med stigende total fosforkoncentration i søerne. Dog sker der i søerne med den højeste fosforkoncentration og fødemængde (klorofyl) en stagnering på grund af at fiskene her udøver et højt predationstryk på dyreplanktonet. Calanoide vandlopper (copepoder) og *Leptodora* (rovdafnier) er mest talrige ved de intermediære næringsstofniveauer, mens de cyclopoide vandlopper og hjuldyr ikke udviser nogen entydig relation til næringsstofniveauet.

Som indeks for dyreplanktonsammensætningen anvendes det såkaldte "cladocé-indeks" (Windolf et al, 1993). Indekset beregnes som den procentandel, som store dafnier (*Daphnia* spp.) udgør af alle cladoceer. Dette indeks har vist sig velegnet, da det ud over næringsstofniveau og så integrerer informationer om fiskene.

Et andet dyreplanktonindeks, der ofte anvendes ved karakterisering af søer, er græsningsindekset. Det er et udtryk for styrken af dyreplanktonets regulering af planteplankton. Indekset beregnes som biomassen af "100*(biomassen af cladoceer+biomassen af vandlopper+ 2*biomassen af hjuldyr)/biomassen af planteplankton", og er et estimat for hvor mange procent af planteplanktonbiomassen dyreplanktonet kan græsse i den givne tidsperiode.

Dyreplanktonarters indikatorværdi udnyttes ved palæolimnologiske undersøgelser. Ud fra sedimentets kvantitative indhold af forskellige dyreplanktonarters rester kan man rekonstruere forekomsten af undervandsplanter, fiskesammensætning og total fosfor niveau tilbage i tid (Jeppesen et al., 1996). Dette er et væsentligt fremskridt, da man nu ud over eutrofieringsniveau også kan rekonstruere søernes biologiske struktur tilbage i tid.



Figur 5. Klorofyl a, sigtdybde og antallet af en række dyreplankton slægter og grupper i 42 danske søer i relation til sommermiddelkoncentrationen af totalfosfor.

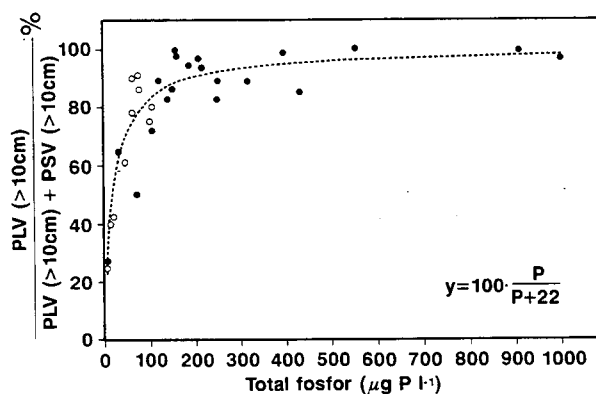
Tabel 11. Klassifikation af økologisk kvalitet i ikke-forsurede søer baseret på fisk (DG XI, 1996), gældende for lavvandede søer.

	Høj	God	Rimelig	Ringe	Dårlig
Tilstede/ikke tilstede	Tilstede	Tilstede	Tilstede	Tilstede	Tilst./ikke tilstede
Diversitet	Medium	Høj	Medium	Lav	(Lav)
Total biomasse	Lav	Medium	Høj	Høj	(Lav)
Relative sammensætning (% af sommerbiomasse)					
Aborre	Høj	Høj	Medium	Lav	(Lav)
Skalle + Brasen	Lav	Medium	Medium	Høj	(Høj)
Rovfisk	Høj	Medium	Medium	Lav	Lav

Fisk

Fiskesammensætningen ændrer sig generelt fra rovfiskedomineret til planktivore-domineret (dyreplanktonædende) ved stigende næringsstofniveau. På den baggrund er der udviklet et "skidtfiskeindeks" til at beskrive fiskesammensætningen i danske søer (Kristensen *et al.*, 1990).

Skidtfiskeindekset beregnes som forholdet mellem alle planktivore fisk (skalle, rudskalle og brasen) og planktivore fisk plus rovfisk (aborre, gedde og sandart, alle større end 10 cm). Indekset er lavt i de rene søer (Fig. 6).



Figur 6. Forholdet mellem planktivore fisk (PLV) (skalle, rudskalle og brasen) og planktivore fisk plus rovfisk (PSV) (aborre, gedde og sandart) (alle større end 10 cm) i relation til sommermiddelkoncentrationen af total fosfor i danske søer.

I de næringsrige søer nærmer det sig de 100%, svarende til, at prædationstrykket fra fisk her er meget højt på dyreplankton.

De samme ændringer i fiskesammensætningen ved stigende eutrofiering ligger til grund for EU-forslaget til et økologisk indeks for søer baseret på fisk (Tabel 11).

Bunddyr

Biomassen af bunddyr (zooben, g ww m⁻²) stiger med øget fosforkoncentration (TP, µg l⁻¹) (Jeppesen og Jensen, i trykken), men aftager med stigende middeldybde (z, m).

Tabel 12. Regressionsanalyser mellem zoobenthos biomasse (zooben, g ww m⁻³) and søkoncentration af total fosfor (TP, µg l⁻¹) and middeldybde (z, m).

$$\log_{10} \text{zooben} = 0,38 + 0,65 * \log_{10} \text{TP} - 0,22 * \log_{10} z$$

Samtidigt med et stigende eutrofieringsniveau sker der også et skift i sammensætningen. Diversiteten reduceres ved de højeste fosforkoncentrationer og andelen af eutrofierings-tolerante børsteorme øges (Wiederholm, 1980).

Dette sker som følge af en øget sedimentation af organisk stof, hvilket fører til øget ilforbrug i sedimentet. Herved kan kun hårdføre arter overleve, og der sker et fald i biodiversiteten. Hvis iltvindperioden strækker sig over en længere periode kan det medføre at alle bundinvertebrater dør.

Wiederholm har også udviklet det benthiske kvalitetindeks: BQI.

$$\text{BQI} = \sum k_i n_i / N$$

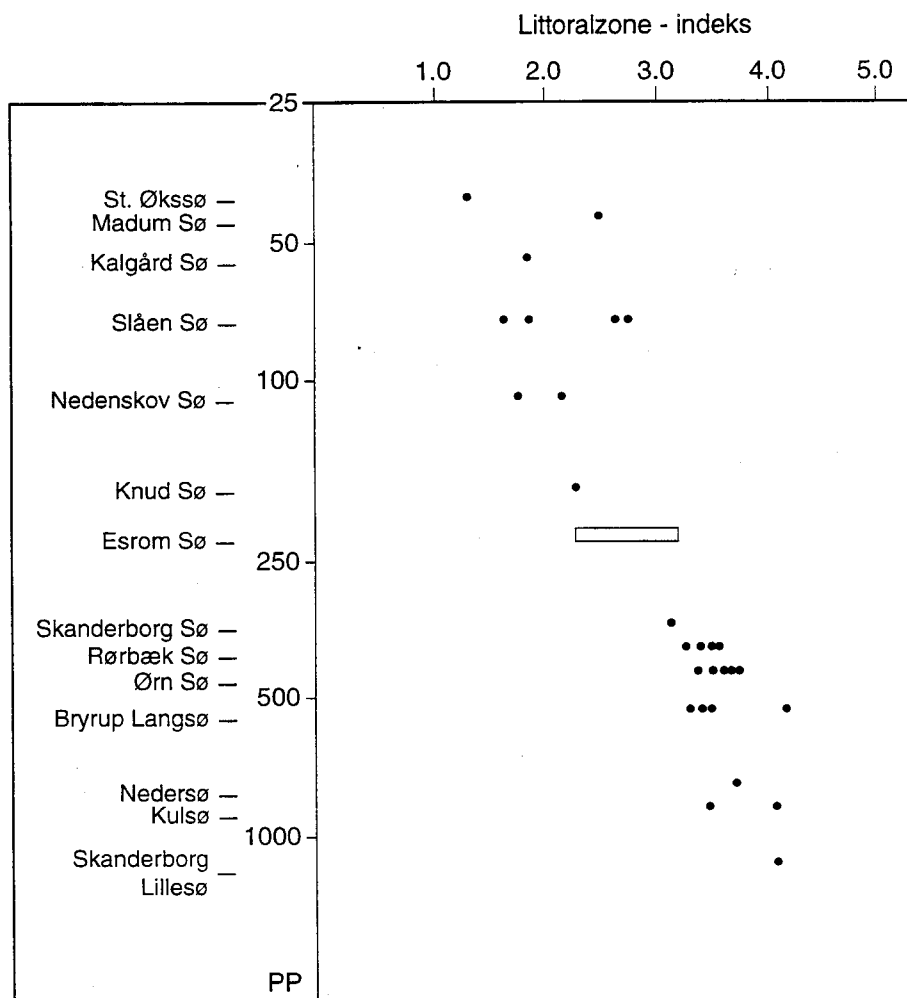
hvor k_i er udtryk for art i 's indikatorværdi (værdier mellem 1 og 5) og n_i er den givne arts antal, og N er det totale antal. Indekset blev med held benyttet af Wiederholm (1980), som på baggrund af 7 oligochaet-arter anvendte indekset til at beskrive trofi-gradienter i svenske søer. I forbindelse med finske søundersøgelser blev indekset udvidet til 22 indikatorarter (Kansanen, 1990).

Sammenlignet med det øvrige Norden har vi i Danmark kun i mindre grad udnyttet bunddyrene som egentlige indikatororganismer. Bundfaunaundersøgelser har mere været anvendt til at give en generel karakteristik af søernes tilstand. Den begrænsede anvendelse i danske søer hænger i nogen grad sammen med søernes ringe dybde.

Iltvind forekommer således ikke så hyppigt som i dybe søer. Dette medfører, at indikatororganismerne, hvis udbredelse er styret bl.a. af deres ilttolerance, ikke reagerer på samme måde overfor en høj primærproduktion som i de dybe søer.

I slutningen af 1970'erne blev et littoralzoneindeks baseret på søernes bredfaunaen introduceret i Danmark (Dall *et al.*, 1983). Dette indeks klassificerede på tilfredsstillende vis en række søer med primærproduktionsmålinger (Fig. 7). Littoralzoneindekset beregnes tilsvarende BQI ud fra en række arters og grupperes indikatorværdi vægtet med den givne arts antal. Indekset anvendes i dag ikke i særlig udbredt grad, dels fordi data fra flere søer viste en ringe opløsning, og dels fordi bredfaunaen ikke undersøges rutinemæssigt i forbindelse med amtskommunernes recipienttilsyn.

Bundlevende invertebrater er ikke kun følsomme over iltkoncentrationer, også mængden af benthivore fisk (fisk, der søger føde på bunden) har vist sig at have stor betydning. Især brasen har vist sig at have en markant negativ effekt (Søndergaard, Jeppesen & Jensen, 1998).



Figur 7. Littoralzone-indeks mod den årlige primærproduktion i en række danske søer (Efter Dall et al., 1983).

Undervandsplanter

Undervandsplanternes udbredelse er meget følsom overfor lysforhold. Tre års resultater fra 17 overvågningsøer viser at undervandsplanternes dybdegrænse er tæt knyttet til middel sommersigtdybden:

$$\text{maxdybde} = -0,2 \text{ m} + 1,8 * \text{sigt dybden} \text{ (Jensen et al., 1996).}$$

Ud over at være et mål for mængden af undervandsplanter er dybdeudbredelsen et integreret mål for vandets turbiditet. De forskellige plantegrupper er ikke lige følsomme over for dårlige lysforhold.

En række sammenhænge mellem sigt dybde og max dybdeudbredelsen er udviklet. Blindow (1992) fandt eksempelvis følgende sammenhænge mellem maksimumdybden (max-dyb) og sigt dybde (sigt):

$$\begin{array}{l} \text{kransnålalger:} \quad \text{max-dyb} = 0,18 * \text{sigt}^{1,03} \\ \text{frøplanter:} \quad \text{max-dyb} = 0,32 * \text{sigt}^{0,55} \end{array}$$

Udbredelsesmæssigt udtrykkes undervandsplanternes dækningsgrad ofte som "det relative plantedækkede areal" (RPA), defineret som: det samlede plantedækkede areal/søareal. På basis af de danske overvågningssøer er der udviklet en sammenhæng mellem RPA (%), sigtdybde (sigt) og vanddybde (z):

$$RPA = 8,8 + 1,40 * \text{sigt} - 3,3 * z \text{ (Jensen et al., 1996).}$$

Det plantedækkede areal er naturligvis også afhængig af søens dybdeforhold. Hvis man kun betragter lavvandede søer eller lavvandede dele af søer, er RPA et brugbart indeks til beskrivelse af vækstvilkårene for undervandsplanter jvf. Tabel 12.

Tabel 12. Relativ plantedækket areal, RPA-klasse. Denne klassificering er især relevant for lavvandede søer eller lavvandede dele af søer.

RPA%	Klasse	Beskrivelse
<1	I	Meget ringe eller ingen dække af undervandsplanter
1-5	II	Ringede dække af undervandsplanter
5-20	III	Nogen dække af undervandsplanter
20-50	IV	God dække af undervandsplanter
>50	V	Kraftigt eller fuldt dække af undervandsplanter

Også mængdemæssigt i forhold til det totale vandvolumen er der udviklet en beskrivende parametre i forbindelse med overvågningsprogrammet for søer. Denne udtrykkes som det relative plantefyldte volumen (RPV) og defineres som $RPA * \text{plantehøjde} / \text{vanddybde}$. Hvis planterne når helt op til søoverfladen er RPV således lig RPA.

Ligesom RPA kan søerne klassificeres efter RPV. Hvis søen er dyb, kan RPV dog ikke blive særlig høj, og indekset er derfor mest relevant for lavvandede søer eller lavvandede dele af søer (Tabel 13).

Tabel 13. Relativ plantefyldt volumen, RPV-klasse. Denne klassificering er især relevant for lavvandede søer eller lavvandede dele af søer.

RPV (%)	Klasse	Beskrivelse
< 0,2	I	Meget eller ingen vandfylde af undervandsplanter
0,2-2	II	Ringede vandfylde af undervandsplanter
2-10	III	Nogen vandfylde af undervandsplanter
10-40	IV	God vandfylde af undervandsplanter
>40	V	Kraftig vandfylde af undervandsplanter

Afhængig af søens næringsstofindhold findes der forskellige plantesamfund. Dette er bl.a. beskrevet af Mathiesen (1980) (Fig. 8). En række af undervandsplanterne er omfattet af listen over truede planter og dyr (se afsnit 4.1).

Alm. karakteristik	Rene søer						Forurening →			
	Brunt vand		Klart vand				Uklart vand m. plankton			
	intet vedv. sure		lavt → middel		neutrale		middel vedv. basiske			
Indhold af bikarbonat-ion Surhedsgrad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sø-nummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I 1. Langbladet ranunkel					•	•	•	•	•	•
2. Sø-kogleaks					•	•	•	•	•	•
3. Dynd-padderokke				•	•	•	•	•	•	•
4. Tagrør	•		•	•	•	•	•	•	•	•
5. Næb-star	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
6. Smalbladet kæruld	•		•							
II 7. Svømmende vandaks				•	•	•	•	•	•	•
8. Vand-pileurt				•	•	•	•	•	•	•
9. Gul åkande		•		•	•	•	•	•	•	•
10. Hvid åkande				•	•	•	•	•	•	•
11. Frøbid					•	•	•	•	•	•
12. Liden andemad					•	•	•	•	•	•
III 13. Kors-andemad					•	•	•	•	•	•
14. Slank blærerod	•		•	•	•	•	•	•	•	•
15. Liden blærerod				•	•	•	•	•	•	•
16. Tråd-vandaks						•	•	•	•	•
17. Børstebladet vandaks						•	•	•	•	•
18. Kruset vandaks				•	•	•	•	•	•	•
19. Hjertebladet vandaks				•	•	•	•	•	•	•
20. Glinsende vandaks				•	•	•	•	•	•	•
21. Butbladet vandaks				•	•	•	•	•	•	•
22. Vandpest				•	•	•	•	•	•	•
23. Tornet hornblad				•	•	•	•	•	•	•
24. Kredsbladet vandranunkel				•	•	•	•	•	•	•
25. Aks-tusindblad				•	•	•	•	•	•	•
26. Hår-tusindblad				•	•	•	•	•	•	•
IV 27. Strandbo			•	•	•	•	•	•	•	•
28. Tvepibet lobelie			•	•	•	•	•	•	•	•
29. Sortgrøn brasenføde			•	•	•	•	•	•	•	•
30. Nedbøjet ranunkel			•	•	•	•	•	•	•	•
31. Liden siv			•	•	•	•	•	•	•	•
32. Sekshannet bækarve			•	•	•	•	•	•	•	•
V 33. Arter af Spagnum	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
34. Arter af Drepanocladus	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
35. Arter af Nitella			•	•	•	•	•	•	•	•
36. Arter af Chara			•	•	•	•	•	•	•	•
37. Fontinalis antipyretica			•	•	•	•	•	•	•	•
38. Cladophora aegagropila			•	•	•	•	•	•	•	•

Figur 8. Oversigt over forekomsten af forskellige planter i forekomst i 10 midtjyske søer grupperet efter surheds- og eutrofieringsgrad (Efter Mathiesen, 1980).

Fugle

Utschick (1976; 1981) fandt i sydtyske søer en positiv sammenhæng mellem overvintrende vandfugle (biomasse og tæthed) og stigende eutrofieringsgrad.

Dette skyldes formentlig stigende produktivitet i søerne. Han fandt samtidig også en faldende diversitet med stigende eutrofiering, med et optimum i mesotrofe søer.

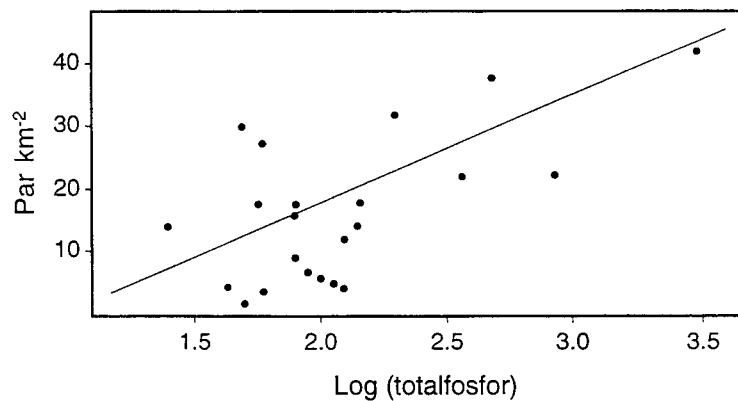
Set i relation til eutrofiering er mængde og artssammensætningen af fugle relevant i forhold til det fødeudbud, som er tilstede i søerne.

Eksempelvis udtrykker planteædere som blichøns og knopsvaner til en vis grad udtrykker mængden af undervandsplanter. Det skal dog tages med et vist forbehold, da der også kan forekomme klimatisk betingede svingninger i fuglebestanden. Resultater fra bl.a. danske søer har vist en tydelig positiv sammenhæng mellem mængden af undervandsplanter og de planteædende fugle (Tabel 14, Brøgger-Jensen & Jørgensen 1992; Søndergaard et al., 1993).

Ligeledes kan der findes signifikante sammenhænge mellem de fiskeædende fugle, eksempelvis toppet lappedykker og eutrofiering (Tabel 14 og Fig. 9, Nilsson, 1978; Brøgger-Jensen & Jørgensen, 1992).

Tabel 14. Korrelation mellem bestandstæthed hos toppet lappedykker og blichøne og total fosfor koncentration og klorofyl *a* (Brøgger-Jensen & Jørgensen, 1992). Antal anført dels som par pr. km² og dels som par pr. km bredlængde.

	Toppet lappedykker		Blichøne	
	par km ²	par km ⁻¹	par km ²	par km ⁻¹
log total P	0,50	0,37	0,20	0,13
log klorofyl <i>a</i>	0,27	0,52	-0,03	-0,01

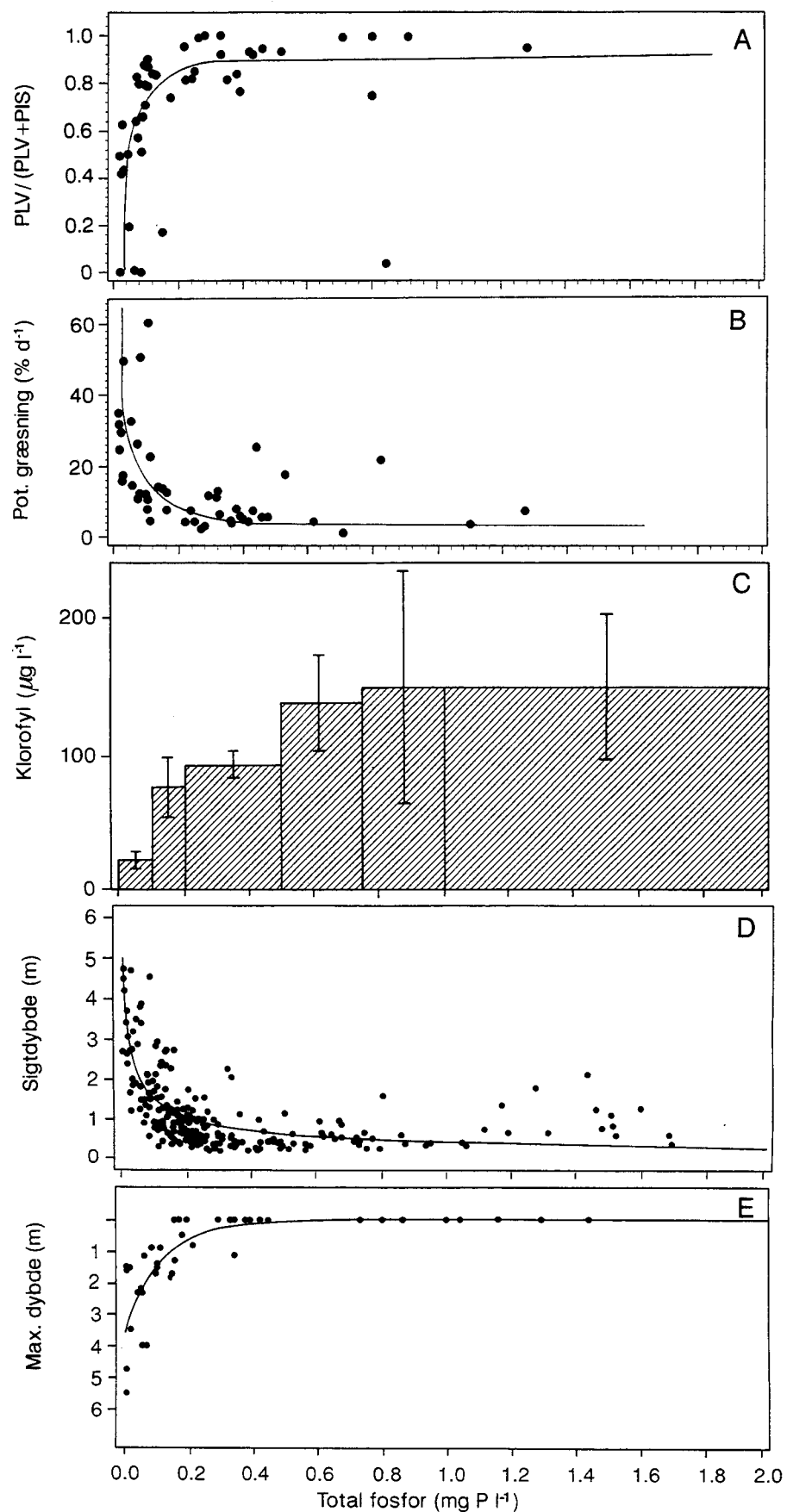


Figur 9. Sammenhængen mellem antal par af toppet lappedykker i relation til logaritmen i sammemiddelkoncentrationen af total fosfor i søer.

5 Konklusioner og perspektivering

Hovedkonklusionerne vedr. anvendelsen af natur- og miljøindikatorer i søer er følgende:

- Der eksisterer i dag en række kvalitative og ikke mindst kvantitative indikatorer for miljøkvalitet i søer. Langt de fleste knytter sig til effekter af eutrofiering.
- De mest almindeligt anvendte indikatorer grupperer søerne i næringsstoffkatagorier i forhold til indhold af fosfor og kvælstof.
- Almindeligt anvendt er også sigtddybden, der på en metodisk måde giver et rimeligt billede af søens eutrofiniveau og indhold af planteplankton.
- En række biologiske parametre og indices giver et godt, og hvis de kombineres, et mere nuanceret billede af miljøtilstanden. Eksempelvis kan nævnes den relative fiskesammensætning, andelen af store dyreplanktonarter, mængden af blågrønalger og udbredelsen af undervandsplanter.
- Til forskel fra de fysisk-kemiske målinger giver de biologiske indikatorer i højere grad et billede af den økologiske kvalitet og den biologiske struktur og deres interaktioner. Fig. 10 sammenfatter de vigtigste biologiske sammenhænge i forhold til en fosforgradient.



Figur 10. Sammenhængen mellem skidtfiskeindeks (A), dyreplanktonets græsningstryk på planteplankton (B), klorofyl a (C), sigtdybden (D) samt undervandsplanternes maksimaldybde (E) og sommermiddelmekcentrationen af total fosfor i danske søer.

6 Referencer

Anderson, N.J., Odgård, B.V. & Jeppesen, E. (1994): Søernes tilstand før og nu. - Miljøforskning 12: 16-17.

Blindow, I. (1992): Decline of charophytes during eutrophication: comparison with angiosperms. Freshw. Biol. 28: 9-13.

Brøgger-Jensen, S. & Jørgensen, H.E. (1992): Vandfugle og søers miljøtilstand. Miljøprojekt 200. Miljøstyrelsen. 68 pp.

Dall, P.C., Lindegaard, C & Kirkegaard, J. (1983): Søernes littoralfauna afspejler eutrofigraden. Stads- og havneingeniøren 2: 43-48.

DG XI (1990): The harmonized monitoring and classification of ecological quality of surface waters in the european union. Udarbejdet af Nixon, S.C., Mainstone, C.P. Iversen, T.M, Kristensen, P., Jeppesen, E., Friberg, N., Papathanassiou, E., Jensen, A. & F. Pedersen. 293 pp.

DMU, under udarbejdelse. Sørestaurering. Del 1: Case-studies. Del 2: Syntese.

Fyns Amt (1996): Fyns vandmiljø 1976-95/96. 60 pp

Galassi, S., Guzzella, L., Mingazzini, M., Vigano, L., Capri, S. & Sora, S. (1992): Toxicological and chemical characterisation of organic micropollutants in river Po waters (Italy). Wat. Res. 26: 19-27.

Jensen, J.P., Kristensen, P. & Jeppesen, E. (1990): Relationships between N loading and in-lake N concentrations in shallow Danish lakes. - Verh. Int. Verein. Limnol. 24: 201-204.

Jensen, J.P., Jeppesen, E., Olrik, K. & Kristensen, P. (1994): Impact of nutrients and physical factors on the shift from cyanobacterial to chlorococcal green algal dominance in shallow Danish lakes. - Can. J. Fish. Aquat. Sci. 51: 1692-1699.

Jensen, J.P., Lauridsen, T., Søndergaard, M., Jeppesen, E., Agerbo, E. & Sortkjær, L. (1996): Ferske vandområder - søer. Vandmiljøplanens Overvågningsprogram 1995. Danmarks Miljøundersøgelser. - Faglig rapport fra DMU nr. 176. 96 s.

Jensen, J.P., Søndergaard, M., Jeppesen, Lauridsen, T.L. & Sortkjær, L. (1997): Ferske vandområder - søer. Vandmiljøplanens overvågningsprogram 1995. Danmarks Miljøundersøgelser. - Faglig rapport fra DMU nr. 211. 103 s.

Jensen, J.P., Lauridsen, T., Søndergaard, M., Jeppesen, E., Agerbo, E. & Sortkjær, L. (1996): Ferske vandområder - søer. Vandmiljøplanens Overvågningsprogram 1995. Danmarks Miljøundersøgelser.. - Faglig rapport fra DMU nr. 176. 96 s.

Jeppesen, E., Mortensen, E., Søndergaard, M., Hansen, A.-M. & Jensen, J.P. (1991): Dyreplanktonet som miljøindikator. - Vand & Miljø 8:394-398.

Jeppesen, E., Jensen, K., Agerbo Madsen, E. & Jensen, J.P. (1996): Fiskebestanden i gamle dage vurderet ud fra fossiler af dyreplankton i søbunden. - Vand & Jord 1: 40-42.

Jeppesen, E & Jensen, J.P. (i trykken): Relationship between nutrient loading and ecological quality of lakes and reservoirs. In Iversen *et al.* (eds.) "Integrated Environmental Assessment on Eutrophication: A Pilot Study". Report to EEA by National Environmental Research Institute, National Institute of Public Health and Environmental Protection, Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment RIZA and Water Research Centre.

Kasanen, P.H., Paasivirta, L. & T Värynen (1990): Ordination analysis and bioindices based on zoobenthos communities used to assess pollution of a lake in southern Finland. *Hydrobiologia* 202: 153-170.

Kristensen, P., Jensen, J.P. & Jeppesen, E. (1990): Eutrofieringsmodeller for søer. NPO-forskningsprogram fra Miljøstyrelsen. Nr. C9 1990. Miljøstyrelsen. 120 pp.

Kristensen, P., Søndergaard, M. & Jeppesen, E. (1992): Resuspension in a shallow eutrophic lake. *Hydrobiologia* 228: 101-109.

Mathiesen, H. (1980): Søernes planter. p. 237-280 i Danmarks Natur. Danmarks natur. Bind 5. 3. udg. Nørvang, A. & J. Lindø (eds.). Politikens forlag. 492 pp.

Miljø- og Energiministeriet (1995): Miljøindikatorer 1995 - Hvordan står det til med miljøet. Miljø- og Energiministeriet. 68 pp.

Miljøstyrelsen (1993): Vandmiljøplanens overvågningsprogram 1993-1997. Redegørelse nr. 2 fra Miljøstyrelsen. 169 pp.

Miljøstyrelsen (i trykken): Algetoksiner i søer anvendt til drikkevand eller badning.

Nilsson, L. (1978): Breeding waterfowl in eutrophicated lakes in south Sweden. *Wildfowl* 29: 101-110.

Nygaard, G. (1949): Hydrobiological studies on some Danish ponds and lakes II. The quotient hypothesis and some little known or new phytoplankton organisms. *Kgl. Danske Vidensk. Selskab.* 7: 1-242.

OECD (1982): Eutrophication of waters. Monitoring assessment and control. OECD, Paris. 210 pp.

Olrik, K. (1993): Planteplankton - økologi. Miljøprojekt nr. 243. Miljøstyrelsen. 165 pp.

Rebsdorf, Aa. & Nygaard, E. (1991): Danske sure og forsurede søer. Miljøprojekt nr. 184. Miljøstyrelsen. 106 pp.

Reynolds, C.S. (1984): The ecology of freshwater phytoplankton. Cambridge University Press, Cambridge. 384 pp.

Skov og Naturstyrelsen (1991): Rødliste '90. Særligt beskyttelseskrævende planter og dyr i Danmark. Asbirk, S & S. Søgaard (eds.). Skov og Naturstyrelsen. 222 pp.

Søndergaard, M., Bøgestrand, J., Schriver, P., Lauridsen, T., Jeppesen, E., Berg, S. & Hald, P. (1993): Betydningen af fisk, fugle og undervandsplanter for vandkvalitet: biomanipulationsforsøg i Stigsholm Sø. Faglig rapport fra DMU nr. 77. 68 pp.

Søndergaard, M., Jeppesen, E. & Jensen, J.P. (1998): Sørestaurering i Danmark - Metoder, erfaringer og anbefalinger. Rapport fra Miljøstyrelsen. 289 pp.

Utschick, H. (1976): Die Wasservögel als Indikatoren für den ökologischen Zustand von Seen. Verh. Orn. Ges. Bayern 23: 273-345.

Utschick, H. (1981): Wasservögel als Indikatoren für die ökologische Stabilität südbayerischer Stauseen. Verh. Orn. Ges. Bayern 22: 395-438.

Vollenweider, R.A. (1976): Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. Mem. Ist. Idrobiol. 33: 53-84.

Wiederholm, T. (1980): Use of lake benthos in lake monitoring. J. Wat. Pollut. Control. Fed. 52: 537-547.

Windolf, J., Jeppesen, E., Søndergaard, M., Jensen, J.P. & Sortkjær, L. (1993): Vandmiljøplanens Overvågningsprogram 1992. Ferske vandområder - Søer. Faglig rapport fra DMU, nr. 90. 129 pp.

Zdanowski, B. (1982): Variability of nitrogen and phosphorus contents and lake eutrophication. Pol. Arch. Hydrobiol. 29: 3-4.

Danmarks Miljøundersøgelser

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

Henvendelser kan rettes til:

Danmarks Miljøundersøgelser *Direktion og Sekretariat*
Postboks 358 *Forsknings- og Udviklingssekretariat*
Frederiksborgvej 399 *Afd. for Atmosfærisk Miljø*
4000 Roskilde *Afd. for Havmiljø og Mikrobiologi*
Afd. for Miljøkemi
Tlf. 46 30 12 00 *Afd. for Systemanalyse*
Fax 46 30 11 14

Danmarks Miljøundersøgelser *Afd. for Sø- og Fjordøkologi*
Postboks 314 *Afd. for Vandløbsøkologi*
Vejløvej 25 *Afd. for Terrestrisk Økologi*
8600 Silkeborg

Tlf. 89 20 14 00
Fax 89 20 14 14

Danmarks Miljøundersøgelser *Afd. for Kystzoneøkologi*
Grenåvej 12, Kalø *Afd. for Landskabsøkologi*
8410 Rønde

Tlf. 89 20 17 00
Fax 89 20 15 14

Danmarks Miljøundersøgelser *Afd. for Arktisk Miljø*
Tagensvej 135, 4.
2200 København N

Tlf. 35 82 14 15
Fax 35 82 14 20

Publikationer:

DMU udgiver faglige rapporter, tekniske anvisninger, arbejdsrapporter, temarapporter, særtryk af videnskabelige og faglige artikler, samt årsberetninger.

I årsberetningen findes en oversigt over det pågældende års publikationer. Årsberetning samt en opdateret oversigt over årets publikationer fås ved henvendelse til telefon: 46 30 12 00.

Faglige rapporter fra DMU/NERI Technical Reports

1997

- Nr. 203: Rådyr, mus og selvforyngelse af bøg ved naturnær skovdrift. Af Olesen, C.R., Andersen, A.H. & Hansen, T.S. 60 s., 80,00 kr.
- Nr. 204: Spring Migration Strategies and Stopover Ecology of Pink-Footed Geese. Results of Field Work in Norway 1996. By Madsen, J. et al. 29 pp., 45,00 DKK.
- Nr. 205: Effects of Experimental Spills of Crude and Diesel Oil on Arctic Vegetation. A Long-Term Study on High Arctic Terrestrial Plant Communities in Jameson Land, Central East Greenland. By Bay, C. 44 pp., 100,00 DKK.
- Nr. 206: Pesticider i drikkevand 1. Præstationsprøvning. Af Spliid, N.H. & Nyeland, B.A. 273 pp., 80,00 kr.
- Nr. 207: Integrated Environmental Assessment on Eutrophication. A Pilot Study. Af Iversen, T.M., Kjeldsen, K., Kristensen, P., de Haan, B., Oirschot, M. van, Parr, W. & Lack, T. 100 pp., 150,00 kr.
- Nr. 208: Markskader forvoldt af gæs og svaner - en litteraturudredning. Af Madsen, J. & Laubek, B. 28 s., 45,00 kr.
- Nr. 209: Effekt af Tunø Knob vindmøllepark på fuglelivet. Af Guillemette, M., Kyed Larsen, J. & Clausager, I. 31 s., 45,00 kr.
- Nr. 210: Landovervågningsoplande. Vandmiljøplanens Overvågningsprogram 1996. Af Grant, R., Blicher-Mathiesen, G., Andersen, H.E., Laubel, A.R., Grevy Jensen, P. & Rasmussen, P. 141 s., 150,00 kr.
- Nr. 211: Ferske vandområder - Søer. Vandmiljøplanens Overvågningsprogram 1996. Af Jensen, J.P., Søndergaard, M., Jeppesen, E., Lauridsen, T.L. & Sortkjær, L. 103 s., 125,00 kr.
- Nr. 212: Atmosfærisk deposition af kvælstof. Vandmiljøplanens Overvågningsprogram 1996. Af Ellermann, T., Hertel, O., Kemp, K., Mancher, O.H. & Skov, H. 88 s., 100,00 kr.
- Nr. 213: Marine områder - Fjorde, kyster og åbent hav. Vandmiljøplanens Overvågningsprogram 1996. Af Jensen, J.N. et al. 124 s., 125,00 kr.
- Nr. 214: Ferske vandområder - Vandløb og kilder. Vandmiljøplanens Overvågningsprogram 1996. Af Windolf, J., Svendsen, L.M., Kronvang, B., Skriver, J., Olesen, N.B., Larsen, S.E., Baattrup-Pedersen, A., Iversen, H.L., Erfurt, J., Müller-Wohlfeil, D.-I. & Jensen, J.P. 109 s., 150,00 kr.
- Nr. 215: Nitrogen Deposition to Danish Waters 1989 to 1995. Estimation of the Contribution from Danish Sources. By Hertel, O. & Frohn, L. 53 pp., 70,00 DKK.
- Nr. 216: The Danish Air Quality Monitoring Programme. Annual Report for 1996. By Kemp, K., Palmgren, F. & Mancher, O.H. 61 pp., 80,00 DKK.
- Nr. 217: Indhold af organiske opløsningsmidler og phthalater i legetøj. Analytisk-kemisk kontrol af kemiske stoffer og produkter. Af Rastogi, S.C., Worsøe, I.M., Køppen, B., Hansen, A.B. & Avnskjold, J. 34 s., 40,00 kr.
- Nr. 218: Vandføringsevne i danske vandløb 1976-1995. Af Iversen, H.L. & Ovesen, N.B. 2. udg. 55 s., 50,00 kr.
- Nr. 219: Kragefuglejagt i Danmark. Reguleringen af krage, husskade, skovskade, råge og allike i sæsonen 1990/91 og jagtudbyttet i perioden 1943-1993. Af Asferg, T. & Prang, A. 58 s., 80,00 kr.
- Nr. 220: Interkalibrering af bundvegetationsundersøgelser. Af Middelboe, A.L., Krause-Jensen, D., Nielsen, K. & Sand-Jensen, K. 34 s., 100,00 kr.

1998

- Nr. 221: Pollution of the Arctic Troposphere. Northeast Greenland 1990-1996. By Heidam, N.Z., Christensen, J., Wählin, P. & Skov, H. 58 pp., 80,00 DKK.
- Nr. 222: Sustainable Agriculture and Nature Values - using Vejle County as a Study Area. By Hald, A.B. 93 pp., 100,00 DKK.
- Nr. 223: Ændringer i bekæmpelsesmidlernes egenskaber fra 1981-1985 frem til 1996. Af Clausen, H. 61 s., 45,00 kr.
- Nr. 224: Natur og Miljø 1997. Påvirkninger og tilstand. Red. Holten-Andersen, J., Christensen, N., Kristiansen, L.W., Kristensen, P. & Emborg, L. 288 s., 190,00 kr.
- Nr. 225: Sources of Phthalates and Nonylphenoles in Municipal Waste Water. A Study in a Local Environment. By Vikelsøe, J., Thomsen, M. & Johansen, E. 50 pp., 45,00 kr.
- Nr. 226: Miljøundersøgelser ved Maarmorilik 1997. Af Johansen, P., Riget, F. & Asmund, G. 35 s., 50,00 kr.
- Nr. 227: Impact Assessment of an Off-Shore Wind Park on Sea Ducks. By Guillemette, M., Kyed Larsen, J. & Clausager, I. 61 pp., 60,00 kr.
- Nr. 228: Trafikdræbte dyr i landskabsøkologisk planlægning og forskning. Af Madsen, A.B., Fyhn, H.W. & Prang, A. 40 s., 60,00 kr.