

Klorofyl a i søer

Klorofyl a er et let og enkelt mål for mængden af fytoplankton. I forbindelse med Vandrammedirektivets implementering bruges det til at vurdere, om søer har en tilstrækkelig god vandkvalitet og hvilken indsats, der eventuel skal sættes i værk for at mindske næringsstofførslen. Spørgsmålet er, hvor godt og præcis et mål, klorofylindholdet faktisk er.

MARTIN SØNDERGAARD
SØREN E. LARSEN
TORBEN B. JØRGENSEN
ERIK JEPPESEN

Koncentrationen af klorofyl a i en vandprøve har sammen med sigtddyden gennem årtier været anvendt som et simpelt mål for mængden af fytoplankton i søer. Disse to variable har derfor været vigtige styringsredskaber til at karakterisere de større danske søers eutrofieringsgrad og har siden 1970'erne indgået som et centralt element ved udarbejdelsen af mange målsætninger og handleplaner.

Klorofyl har i dag en endnu mere central rolle i forbindelse med implementeringen af EU's Vandrammedirektiv og udarbejdelsen af de såkaldte vandplaner. Vandplanerne skal lægge rammerne for de reduktioner i næringsstofførslen, der måtte være nødvendige for at kunne opnå mindst en god økologisk tilstand jf. Vandrammedirektivet. Klorofyl a er nemlig indtil videre den eneste variabel, der fra dansk side er udmeldt til at adskille god og moderat økologisk tilstand, se tabel 1.

Ud over at det kan være vanskeligt overhovedet at definere grænsen mellem god og moderat økologisk tilstand, idet Vandrammedirektivet blot beskriver, at de to klasser må afvige i henholdsvis ringe ("only slightly") eller moderat ("moderately") grad fra den menneskelige upåvirkede tilstand, er der også en række andre usikkerheder forbundet med anvendelsen af klorofyl a. Det er dem, vi prøver at beskrive lidt nærmere i denne artikel. Hvor præcis et mål er klorofyl egentlig til at vurdere en eutrofieringspåvirkning, hvor store variationer er der i søernes klorofylindhold, og med hvilken sikkerhed kan man forvente at

kunne adskille søerne i forskellige økologiske klasser på baggrund af de prøvetagningsfrekvenser, som i dag anvendes ved monitoreringen af søer?

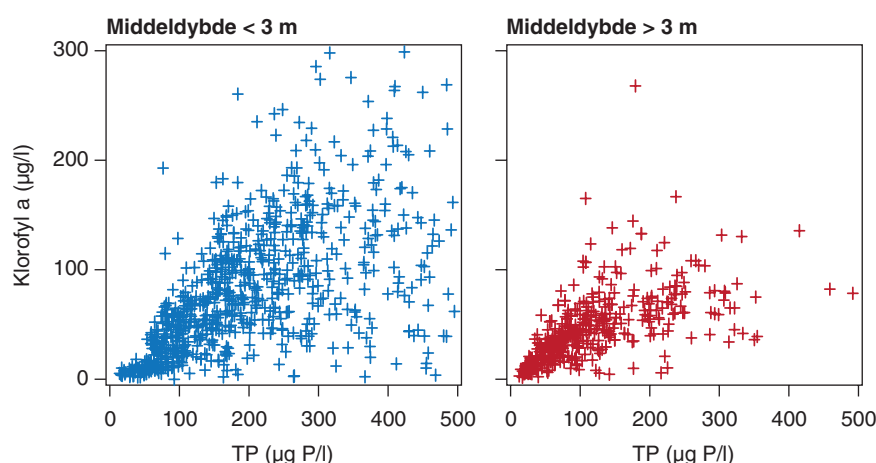
Sammenhænge mellem søers indhold af totalfosfor og klorofyl a

Med fosfor som den hyppigste vækstbegrænsende faktor for fytoplanktonet forventer man en god sammenhæng mellem søernes indhold af klorofyl a og totalfosfor. I den ideelle verden kan indholdet af klorofyl a via denne relation derfor omregnes til en fosforkoncentration, som efterfølgende eventuelt kan udmunde i en plan for, hvor stor fosfortilførsel til en given sø må være for at opfylde kravet om mindst en god økologisk tilstand. Ud fra denne betragtning får indholdet af klorofyl a en stor betydning for søernes forvaltning.

Som det fremgår af figur 1, der repræsenterer et stort antal samholdende målinger af totalfosfor og klorofyl a fra kalkrige danske

søer, er der også en sammenhæng, men som det ses, er det en sammenhæng med stor variation. Ved et fosforindhold på 100 $\mu\text{g P/l}$ varierer indholdet af klorofyl typisk fra omkring 10 til 70 $\mu\text{g/l}$ i både de lavvandede og dybe søer. For de lavvandede søer sker der et markant skift i relationen ved omkring 50 $\mu\text{g P/l}$, hvor der ved højere koncentrationer er væsentlige mere variable klorofylkoncentrationer, se fig. 1. Denne forskel er betinget af, at de lavvandede søer ved TP koncentrationer under ca. 50 $\mu\text{g P/l}$ som regel er klarvandede og med et betydeligt dække af undervandsplanter og en bentisk primærproduktion. Derfor vil mængden af klorofyl a per fosforenhed i det åbne vand være mindre her. Ved lidt højere TP koncentrationer derimod skifter de lavvandede søer mellem en klarvandet og uklar tilstand, hvilket giver sig udslag i et meget varierende indhold af klorofyl a.

Årsagen til, at sammenhængen mellem totalfosfor og klorofyl a ikke er bedre, skyldes også, at der er en række andre forhold, som påvirker mængden af fytoplankton. Andre næringsstoffer end fosfor kan være begrænsende for væksten, herunder ikke mindst kvælstof og for kiselalgerne vedkommende silicium. Fytoplanktonet kan også være begrænset via græsning fra zooplanktonet og andre filtratorer. Et eksempel er her effekten opnået via restaureringsindgreb i fiskebestanden og zooplanktonets øgede filtrering af vandet. Et andet eksempel den opklaring af



Figur 1. Sammenhæng mellem indhold af totalfosfor (TP) og klorofyl a (Chl) (begge sommermiddel) i danske kalkrige søer (total alkalinitet > 1 meq/l). Kun vist for søer med TP < 0,5 mg P/l, Chl < 300 $\mu\text{g/l}$, farvetal < 60 mg Pt/l og salinitet < 0,5‰. Venstre: Middeldybde < 3 m, N (søår) = 774 (antal søer=235), $\log \text{Chl} = 2,52 + 0,95 \cdot \log \text{TP}$, $r^2 = 0,48$. Højre: Middeldybde > 3 m, N (søår) = 450 (antal søer=64), $\log \text{Chl} = 2,41 + 0,84 \cdot \log \text{TP}$, $r^2 = 0,59$.

søvand, der ses i flere danske søer i disse år i forbindelse med indvandringen og kraftig fremvækst af vandremuslingen. Også forskelle i morfologiske forhold som vanddybde og vindpåvirkning samt selvskygning ved høje algetætheder og i nogle søer også skygning betinget af humusstoffer påvirker fosfor-klorofyl a forholdet. Endelig har de forskellige algegrupper forskelligt indhold af klorofyl a.

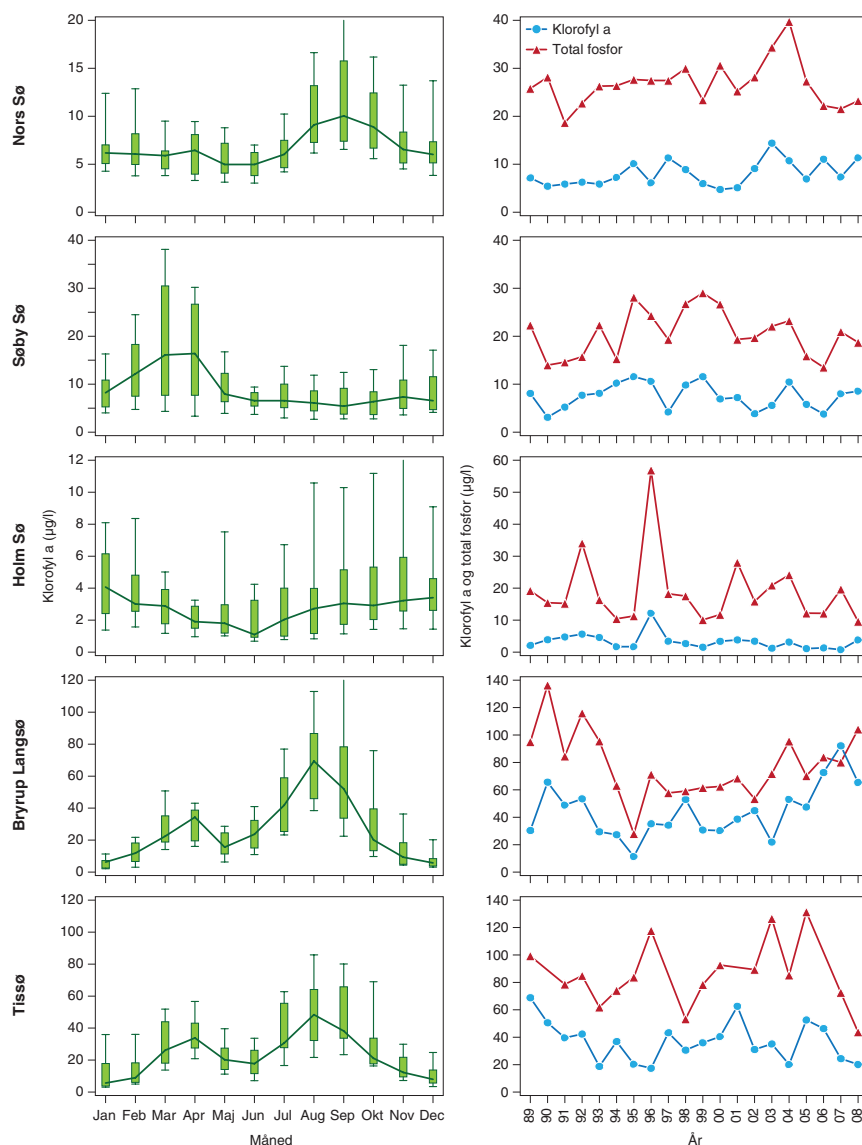
Sæsonvariationer og år-til-år variationer

Variationen i klorofyl a kommer også tydeligt frem, hvis man kigger på enkelte søer - både gennem sæsonen og fra år-til-år. I figur 2 er der vist 5 eksempler på søer, der nu er fulgt gennem 20 år, og hvor fosforkoncentrationen ikke har ændret sig signifikant. Ikke desto mindre er der i alle søer og i langt de fleste måneder mindst en faktor 2 mellem 10 % - og 90 % -fraktilen, dvs. i den gruppe, hvor de midterste 80 % af klorofylobservationer stammer fra. I mange tilfælde er der også mindst en faktor 2 imellem 25 % og 75 % fraktilen, dvs. mellem de midterste 50 % af observationerne. Største variation over sæsonen ses i perioder med øget opvækst af fytoplankton, som for eksempel i forbindelse med forårsopblomstringen i Søby Sø eller sensommeropblomstringen i Nors Sø og Bryrup Langsø. Denne variation hænger formentlig sammen med, at starten af opblomstringen varierer en del fra år til år afhængig af især klimatiske forhold, og det betyder, at det specielt i disse perioder vil være mere tilfældigt, hvilke klorofyl a værdier, der måles.

Et andet problem i forhold til vandplanerne er de betydelige år-til-år variationer, der ses i søers klorofylkoncentrationer, se fig. 2. Det betyder en øget risiko for at "ramme forkert", hvis en indsatsplan baseres på få eller et enkelt års målinger. Mest ekstreme vil variationerne være i lavvandede søer, der næringsstofmæssigt ligger i det område, hvor de ofte skifter mellem en klar vandet og uklar tilstand, og der typisk ses store variationer i en række biologiske variable (se fx /3/). Selv søer med relativt ensartede klorofylkoncentrationer fra år til år kan give problemer, hvis de ligger tæt på en grænse mellem to økologiske klasser. Blandt de viste søer har både Bryrup Langsø og Tissø klorofylkoncentrationer, som fra år til år netop ligger og svinger tæt på det interval, der er udmeldt til at være grænsen mellem god og moderat økologisk tilstand.

Præcision og antal prøvetagninger

Prøvetagningsfrekvensen i de danske søer afhænger af måleprogram og har gennem de senere år især været defineret via det natio-



Figur 2. Klorofylindholdet i de fem søer fra det nationale overvågningsprogram, hvor der ikke har været signifikante ændringer i søernes fosforindhold (sommerværdier) gennem de seneste 20 år (se /4/), og hvor der ikke har været foretaget restaureringsindgreb. Venstre kolonne viser variationen i klorofylindhold gennem sæsonen og højre kolonne gennem årene (sommergennemsnit). I højre kolonne er også vist den gennemsnitlige sommerfosforkoncentration. Boksene i sæsonvariationen viser 10 %, 25 %, median (forbundne), 75 % og 90 % fraktilerne. Ingen af søerne er permanent lagdelte om sommeren og middeldybden varierer mellem 0,7 m (Holm Sø) og 8,2 m (Tissø).

nale overvågningsprogram, NOVANA. Her anvendes to hovedtyper i søer over 5 hektar: 19 årlige prøvetagninger (2 gange per måned om sommeren) eller 7 prøvetagninger (1 gang per måned om sommeren). Dermed varierer det også, hvor præcist indholdet af klorofyl a rent statistisk kan bestemmes. I 2009 blev den hyppige prøvetagningsfrekvens anvendt i 19 søer og den mindre hyppige i ca. 60 søer.

Prøvetagningsfrekvensens betydning er illustreret i tabel 2, hvor den statistiske præcision (et udtryk for den relative usikkerhed på gennemsnitsværdien) er vist. Eksempelvis viser tabellen, at med 6 sommerprøver i en lavvandet sø opnås der en præcision på 0,92-

0,94 ved et acceptniveau på 80 %. Det betyder, at såfremt gennemsnitskoncentrationen er f. eks. 20 µg klorofyl/l er intervallet 3 til 38 µg P/l. Da det er på acceptniveau 80 %, vil 1 ud af 5 søer ligge uden for denne range. Såfremt prøveantallet øges til 15 sommerprøver, øges præcisionen til 0,46-0,47 (dvs. i eksemplet 11-29 µg klorofyl/l). Hvis der ønskes et højere acceptniveau, vil det stille krav om flere prøvetagninger for at nå samme præcision. For de lavvandede søer ser der ikke ud til at være væsentlige forskelle i præcisionen på næringsfattige og næringsrige søer. Derimod ser præcisionen i de dybe søer ud til at være bedst i søer med lavt fosforindhold.

Tabel 1. Danmarks officielle indmeldinger for klorofylgrænseværdier ($\mu\text{g/l}$) til grænsen mellem god-moderat økologisk tilstand (/1/) med angivelse af EU-udmeldinger i parentes og DMU-forslag til højre/2/. Totalfosforgrænser er også vist via omregningen mellem totalfosfor og klorofyl, som angivet i figur 1. Totalfosforværdierne under DMU-forslag er fra /2/. Værdierne er angivet for henholdsvis dybe (middeldybde: 3-15 m, alkalinitet > 1 meq/l) og lavvandede søer (middeldybde < 3 m, alkalinitet > 1 meq/l).

Søtype	DK indmelding		DMU-forslag	
	Klorofyl ($\mu\text{g/l}$)	Totalfosfor ($\mu\text{g/l}$)	Klorofyl ($\mu\text{g/l}$)	Totalfosfor ($\mu\text{g/l}$)
Dybe	12-15 (8-12)	26-34 (16-26)	6,5	25
Lavvandede	22-28 (21-25)	58-74 (55-66)	13	50

Dette skyldes formentlig, at fytoplanktonet i disse søer især er styret af fosforindholdet.

Rent statistisk er det altså vanskeligt inden for en rimelig realistisk prøvetagningsfrekvens at fastsætte klorofyl a indholdet med særlig stor præcision. Det betyder, at man må være meget varsom med at anvende relationerne mellem totalfosfor og klorofyl a ukritisk, og at det vil være nødvendigt at arbejde med ret store sikkerhedsintervaller, hvis man vil være sikker på at opnå en given målsætning.

Afsluttende bemærkninger

Målingen af klorofyl a er langt fra den eneste udfordring i forbindelse med Vandrammedirektivets implementering, og anvendelsen af klorofyl a til at afgøre indsatsbehovene i forhold til at opfylde Vandrammedirektivets målsætninger må ses som det første af en række skridt. Klorofyl a er kun én af de variable, der skal anvendes til at karakterisere fytoplanktonet i en sø, hvor også algesam-

mensætningen skal vurderes, herunder forekomsten af de potentielt giftige blågrønalger og algeopblomstringer. Også andre biologiske kvalitetselementer skal indgå, nemlig undervandsplanter, fisk og bunddyr, og her taler al erfaring for, at de varierer lige så meget eller endda mere end klorofyl a, samtidig med at der kommer en række metodiske problemer til, som øger usikkerheden.

Alt i alt illustrerer de empiriske sammenhænge og eksemplerne, vi har vist i denne artikel, at klorofyl a og dets relationer til næringsstofbelastning er forbundet med en betydelig variation. Sammenholdt med den kendsgerning, at den klorofylgrænse, der er udmeldt til at gælde for søer med kun ringe menneskelig påvirkning, er forholdsvis høj, er der en stor risiko for, at der ikke vil blive gjort nok for at mindske næringsstoffølforlen. Dermed er der også stor risiko for, at mange søer forbliver uklare og at masseopblomstringer af blågrønalger om sommeren sta-

digvæk vil være et almindeligt syn. Forhåbentlig vil det, i takt med at flere biologiske variable inddrages og kombinerede indices udvikles, på lidt længere sigt være muligt at udarbejde mere præcise handleplaner, så de danske søers vandkvalitet sikres.

Referencer

- /1/ Finans-, Fødevarer-, Miljø-, Skatte-, Økonomi- og Erhvervsministeriet 2007: Faglig udredningsarbejde om virkemidler i forhold til implementeringen af vandrammedirektivet, 84 sider.
- /2/ Søndergaard, M., Jeppesen, E., Jensen, J.P. (redaktører), Bradshaw, E., Skovgaard, H. & Grünfeld, S. 2003: Vandrammedirektivet og danske søer. Del 1: Søtyper, referencetilstand og økologiske kvalitetsklasser. Danmarks Miljøundersøgelser. - Faglig rapport fra DMU 475: 140 s.
- /3/ Sandby Hansen, K. & Hansen J. 2006: Arreskov Sø. I: Liboriusen L. Søndergaard M. & Jeppesen E.: Sørestaurering i Danmark, del II eksempelsamling. Faglig rapport fra DMU nr. 636.
- /4/ Jørgensen, B. T., Bjerring R., Landkildehus F., Søndergaard, M., Sortkjær L., & Clausen J. 2010: Søer 2008. Faglig rapport fra DMU nr. xx. (i trykken).

MARTIN SØNDERGAARD (email: ms@dmu.dk) og SØREN E. LARSEN er seniorforskere, TORBEN B. JØRGENSEN seniorrådgiver og ERIK JEPPESEN professor ved Ferskvandsøkologisk Afdeling, DMU, Aarhus Universitet.

Tabel 2. Præcision på sommergennemsnit for klorofyl med acceptniveau på 80 %. Data fra 359 lavvandede (middeldybde < 3 m) og dybe (middeldybde > 3 m) NOVANA-søer større end 5 hektar.

Antal målinger pr. sommer	Dybe søer TP: <= 25	Dybe søer TP: [25;50]	Dybe søer TP: > 50	Lavv. søer TP: <= 50	Lavv. søer TP: [50,100]	Lavv. søer TP: > 100
5	0,65	0,82	-	-	-	-
6	0,55	0,69	0,90	0,94	0,94	0,92
7	0,49	0,61	0,78	0,82	0,82	0,80
8	0,44	0,55	0,70	0,73	0,73	0,72
9	0,40	0,50	0,64	0,67	0,67	0,65
10	0,37	0,47	0,59	0,62	0,62	0,60
15	0,29	0,35	0,44	0,47	0,47	0,46
20	0,24	0,30	0,37	0,39	0,39	0,38
25	0,21	0,26	0,32	0,34	0,34	0,33
30	0,19	0,23	0,29	0,30	0,30	0,30