

# Spiller kvælstof en rolle for tilstanden i søerne?

Fosfor er et vigtigt næringsstof for planters vækst, og ofte er det tilførslen af fosfor, der fokuseres på, når tilstanden i søerne skal forbedres, men hvad med kvælstof? I denne artikel ser vi på kvælstofs rolle og vurderer, under hvilke betingelser dette næringsstof kunne tænkes at være betydende for søernes tilstand.

SAARA OLSEN, MARTIN SØNDERGAARD,  
ERIK JEPPESEN, SUTING ZHAO & WEI LI

## Baggrund

Fosfor anses ofte som værende det begrænsende næringsstof for primærproduktionen i søer, og som regel kan der da også etableres gode sammenhænge mellem søers indhold af fosfor og en række af de centrale biologiske forhold /1/. Dette gælder eksempelvis for mængden af fytoplankton, og fosfor vil dermed også være afgørende for, hvor klart vandet er i søerne. I de danske vandplaner fokuseres der da også udelukkende på at nedbringe tilførslen af fosfor, hvis den økologiske tilstand skal forbedres.

Der er imidlertid en række undersøgelser – også fra udlandet – der peger på, at kvælstof i nogle situationer spiller en vigtig rolle for søernes tilstand. Også fra Danmark er det kendt, at nogle søer – især søer med langsom vandudskiftning, hvor kvælstof har god tid til at ”gasse af” – kan være kvælstofbegrænsede. På den anden side hævdes det, at hvis søer er kvælstofbegrænsede, så vil dette blot fremme væksten af kvælstoffikserende blågrønalger, så der på trods af lav tilførsel af kvælstof stadigvæk kan opretholdes en høj primærproduktion.

I denne artikel kigger vi nærmere på, hvordan det faktisk forholder sig med indholdet af kvælstof og fosfor i de danske søer. Hvornår

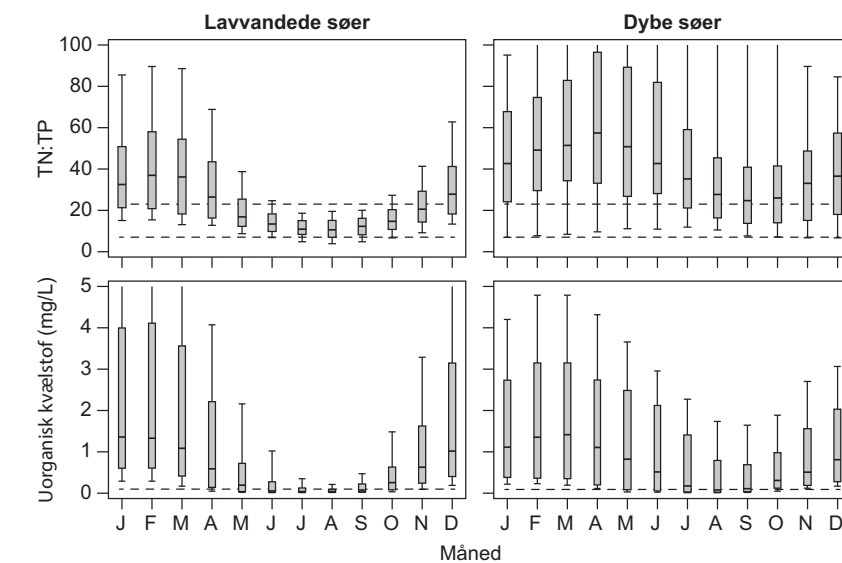


Fig. 1 TN:TP forholdet (vægtbasis) og det uorganiske kvælstofindhold (ammonium, nitrit og nitrat) i løbet af året i henholdsvis lavvandede (middeldybde < 3m, antal sømåneder=2590) og dybe søer (antal sømåneder=1723). Boksene viser 10 %, 25 %, median, 75 % og 90 % kvartiler. De stiplede linjer på de øverste figurer indikerer grænsen mellem potentiel N-begrænsning (TN:TP < 7) og potentiel P-begrænsning (TN:TP > 23). På de nederste figurer viser den stiplede linje den uorganiske kvælstofkoncentration = 0,1 mg/l.

kan man rent støkiometrisk forvente, at kvælstof bliver begrænsede for planternes vækst i forhold til deres fosfor- og kvælstofbehov, og hvordan ser det ud, hvis man på baggrund af empiriske data undersøger effekterne af fosfor kontra kvælstof? Under hvilke betingelser kan man forvente, at kvælstof har størst betydning, og kan det være, at tilførslen af kvælstof ikke kun er et marint anliggende, men også er noget, man i søer i højere grad kunne indrette

forvaltningen efter? Endelig ser vi også på resultaterne fra en række kontrollerede forsøg med forskellig tilsætning af kvælstof for at se, hvordan dette påvirker planters vækst, og for at komme nærmere ind på årsagssammenhænge.

## Danske søers indhold af fosfor og kvælstof

Danske søer er generelt meget næringsrige,

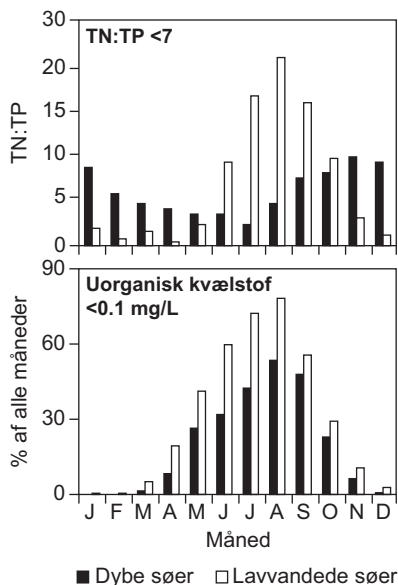


Fig. 2 Frekvensfordelingen af sømåneder (% af alle sømåneder) med TN:TP < 7 i henholdsvis lavvandede og dybe søer (øverst) og med et uorganisk kvælstofindhold < 0,1 mg/l (nederst).

og selvom det gennem de sidste 30-40 år er lykkedes at nedbringe næringsstofindholdet i betydelig grad, så præges mange af søerne stadigvæk af stor vækst af fytoplankton og uklart vand. Medianværdien for totalfosfor for over 600 søer undersøgt inden for de seneste 10 år ligger på 0,1 mg/l, totalkvælstof på 1,2 mg/l, klorofyl a på 40 µg/l og sigtdybden på 0,9 m (tabel 1).

I forhold til at vurdere kvælstof- eller fosforbegrænsning anvender man ofte TN:TP forholdet som udtryk for, hvor meget kvælstof og fosfor der er til stede i forhold til, hvor meget planterne kræver til deres vækst. I litteraturen anvendes lidt forskellige TN:TP forhold, men hvis TN:TP forholdet (på vægtbasis) er over ca. 23, anses planterne ofte for at være fosforbegrænsede, og hvis TN:TP forholdet er under ca. 7, så er der potentielt tale om kvælstofbegrænsning.

Ser man på TN:TP forholdet i de danske søer, så ligger medianværdien her på 12 og 10-90 % kvartilerne på 4-32. Dermed befinder mange af de danske søer sig næringsstofmæssigt i et område, hvor begge næringsstoffer

potentielt kan være begrænsende.

Der er imidlertid tale om store variationer hen over året (Figur 1). I både lavvandede og dybe søer, men især i de lavvandede søer, reduceres TN:TP forholdet markant over året. I starten af forårsperioden ligger TN:TP i de fleste søer over 30, hvilket tyder på fosforbegrænsning, mens TN:TP forholdet i løbet af foråret og sommeren reduceres til værdier, der ofte ligger under 10 og dermed i højere grad tyder på kvælstofbegrænsning.

Disse variationer skyldes blandt andet, at tilførslen af både fosfor og kvælstof kan variere afhængig af nedbør, og at der internt i søerne er forskellige mekanismer hen over sæsonen. I løbet af sommeren øges kvælstofjernelsen via denitrifikation, og samtidigt vil der i mange søer ske en øget frigivelse af fosfor fra søbunden. Begge mekanismer trækker i retning af lavere TN:TP forhold i løbet af sommeren.

Sandsynligheden for øget kvælstofbegrænsning i løbet af sommeren kan også ses på indholdet af uorganisk kvælstof (nitrat + ammonium), hvor der i mange af de lavvandede

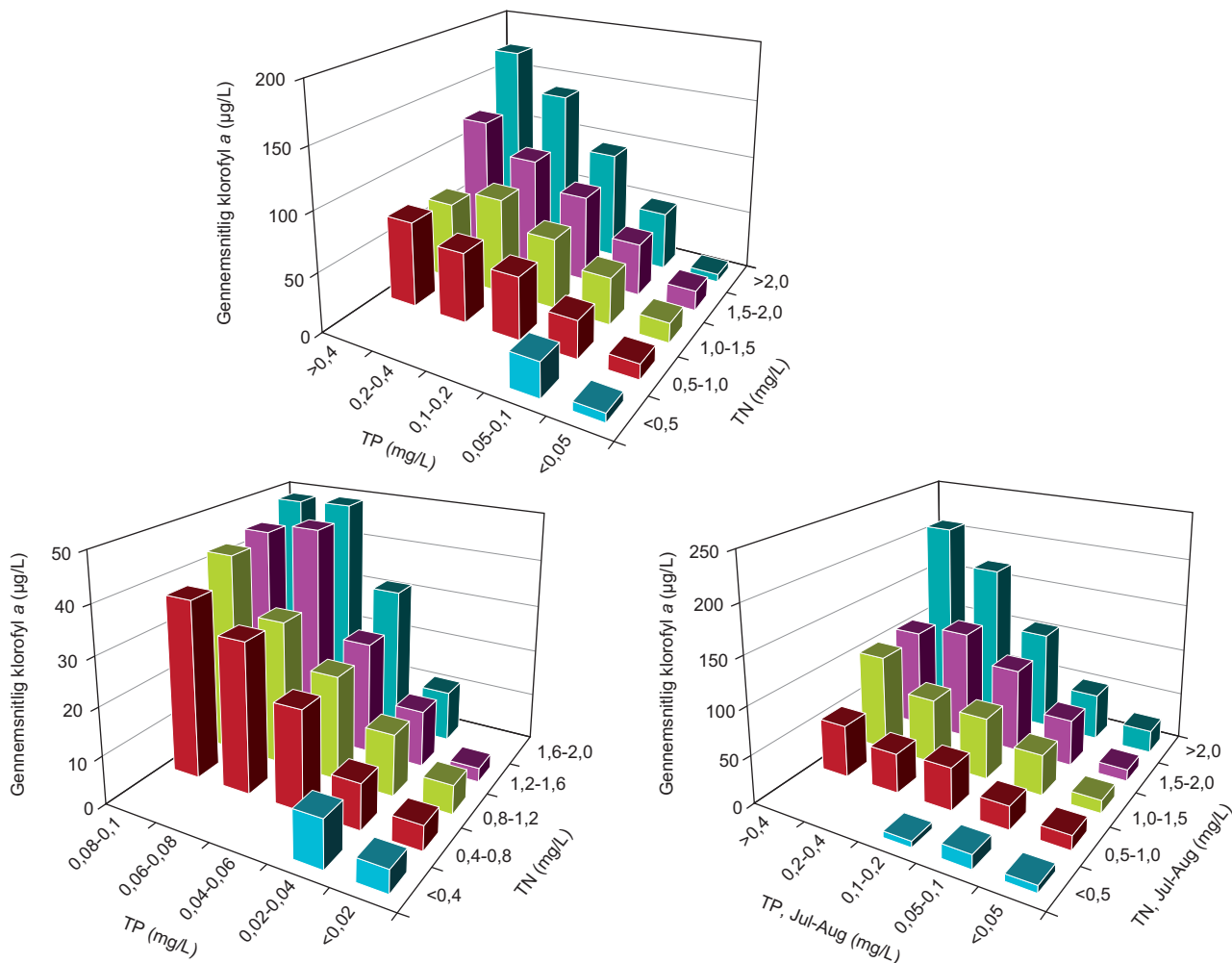


Fig. 3 Det gennemsnitlige indhold af klorofyl a i lavvandede søer med forskelligt indhold af TP og TN. Øverst: I forhold til sommergennemsnit (1. maj – 30. september), midten: samme, men med finere TP og TN inddeling, nederst: data baseret på juli- og august-målinger.

søer ses meget lave koncentrationer i alle tre sommermåneder (Figur 1 og 2). I august har omkring 75 % af de lavvandede søer en uorganisk kvælstofkoncentration under 0,1 mg/l, og det anses ofte som en kritisk grænse i forhold til kvælstofbegrænsning. I de dybe søer ser den potentielle kvælstofbegrænsning ud til at være mindre udtalt, formentlig fordi lagdelingen fører til mindre kontakt mellem sediment og overfladevandet.

### Sammenhænge mellem indhold af fosfor, kvælstof og klorofyl

Hvis man i de empiriske sammenhænge for en række lavvandede søer ser på deres gennemsnitlige indhold af klorofyl a både i forhold til indholdet af totalfosfor og totalkvælstof, så tegner der sig et klart billede af, at begge næringsstoffer har betydning (Figur 3). Øget indhold af fosfor modsvarer i alle tilfælde af øget klorofyl, mens betydningen af kvælstof i form af øget indhold af klorofyl først ser ud til at slå igennem, når indholdet af fosfor er over ca. 0,05 mg/l. Ser man eksempelvis på fosforkategorien 0,06-0,08 mg/l, så øges det gennemsnitlige indhold af klorofyl fra omkring 25 µg/l, hvis TN er under 1,2 mg/l til 40-50 µg/l, hvis TN overstiger 1,2 mg/l.

Selvom det kan være svært at adskille effekterne af de to næringsstoffer, fordi de ofte følges ad, så tyder disse data på, at medmindre fosforindholdet er lavt, så kan forøget indhold af kvælstof føre til øget indhold af klorofyl a og dermed mere uklart vand. De højeste klorofylkoncentrationer ses således i søer, hvor både indholdet af fosfor og kvælstof er højt.

### Forsøg med kvælstoftilsætning

Kvælstoffets rolle i lavvandede søer med moderat høje til høje TP koncentrationer bekræftes af en række eksperimentelle undersøgelser, som er gennemført i søer i Danmark, England, Tyrkiet og Kina.

De peger på, at høj kvælstoftilførsel mindsker muligheden for at fastholde en klarvandet tilstand med mange undervandsplanter /2/. Men årsagerne til tabet af undervandsplanter har været diskuteret. Er der tale om, at de ikke får lys nok pga. øget vækst af fyto-

Table 1 Danske søers indhold af næringsstoffer samt klorofyl a og sigtddybe målt gennem de seneste 10 år (2005-2014). Der er vist sommergennemsnitlige værdier. N=antallet af søer (hvis der er flere års data fra samme sø, er disse midlet). Kun data fra søer > 1 ha er taget med.

Parameter	N	Middel	10% kvartil	Median	90% kvartil
Totalfosfor (mg/l)	623	0,181	0,030	0,099	0,371
PO4-P (mg/l)	380	0,073	0,003	0,014	0,185
Totalkvælstof (mg/l)	624	1,39	0,63	1,20	2,29
Nitrat+nitrit (mg/l)	361	0,20	0,01	0,04	0,54
Ammonium (mg/l)	301	0,08	0,01	0,05	0,16
TN:TP (vægtbasis)	623	16,8	4,1	11,8	31,8
Klorofyl a (µg/l)	622	57,1	7,8	39,9	129,0
Sigtddybe (m)	615	1,26	0,39	0,93	2,50

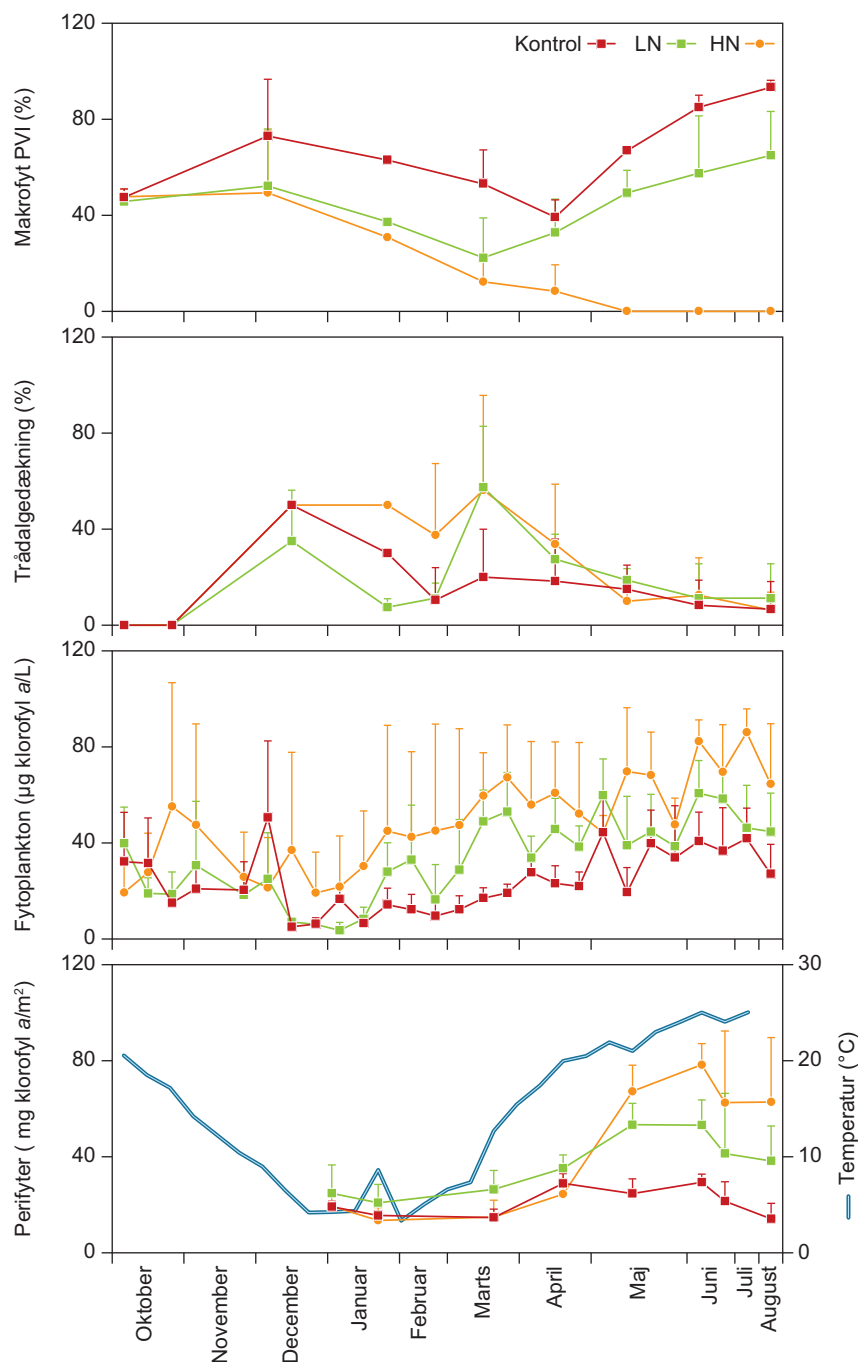


Fig. 4 Forsøg i indhegninger med forskellig kvælstoftilsætning: Ingen tilsætning (kontrol), lav N-tilsætning (LN) og høj N-tilsætning (HN). Ændringer i PVI (hvor stor en andel af vandmassen, der er fyldt op med planter), dækningsgraden af trådalger, biomassen af fytoplankton (alger i vandet) og perifyter (alger på planter) ved de forskellige N-behandlinger. I nederste figur vises også vandtemperaturen.



plankton eller alger, som gror på planternes overflader (biofilm), eller skyldes det toksiske effekter af nitrat eller ammonium? Det har også været diskuteret, om de korttidsforsøg, som typisk er gennemført, giver et realistisk billede af langtidsvirkninger af en øget kvælstofbelastning.

I CLEAR projektet har vi i samarbejde med Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences i Kina, gennemført eksperimentelle langtidsvirksomheder (1 år) med forskellige kvælstofbelastninger og sideløbende gennemført fysiologiske tests til vurdering af eventuelle toksiske effekter /3/. Forsøgene blev gennemført i lukkede plastikindhegninger i en lille sø med undervandsplanterne glinsende vandaks (*Potamogeton lucens*) og den fintløvede *Cabomba caroliniana*. TP lå mellem 0,05 og 0,07 mg P/l, og der var tre kvælstofniveauer – sø-koncentrationen (1,9 mg N/l i gennemsnit) og to forhøjede koncentrationer (hhv. ca. 3,5 mg og 5,5 mg N/l). De forhøjede koncentrationer blev fastholdt ved tilførsel af ammoniumnitrat hver 10. dag.

Langtidsvirksomhederne viste klare effekter af øget kvælstoftilførsel (Figur 4). Plantebiomassen faldt ved begge tilførsler af kvælstof i de første 6 måneder, men ikke i kontrollerne, efterfulgt af en delvis tilbagevenden i indhegningerne med lav N-tilførsel i vinterperioden (Figur 4). Planterne forsvandt helt ved den høje tilførsel af kvælstof den følgende sommer. Biomassen af trådalger steg i vinterperioden, men faldt i løbet af sommeren.

De fysiologiske tests viste derimod ingen forskel i indholdet af TN, nitrat, opløseligt protein, opløseligt sukker og klorofyl i blade og stængler af glinsende vandaks med stigende N-belastning. Et parallelt kørende forsøg med

planten *Vallisneria spirulosa* viste også en nedgang i plantebiomassen uden nogen klare ændringer i de samme fysiologiske variable /4/.

Resultaterne tyder derfor entydigt på, at det er skygning fra alger i vandet og på planterne, der er årsag til, at undervandsplanterne forsvinder ved høje N-koncentrationer, og at høje N-koncentrationer kan have drastiske effekter på vandplanterne i det givne fosforspektrum. Forsøg, som vi tidligere har gennemført i Danmark, viste, at planter påvirkes markant i negativ retning, når TN er større end 1-2 mg N/l om sommeren /5,6/, hvilket er tilfældet i mange danske søer (Tabel 1).

### Konklusion

Data fra de danske søer tyder på, at kvælstof også kan have en negativ påvirkning på søernes tilstand. Effekten kan være betydelig især i sommerperioden og især i de lavvandede søer med moderate eller høje fosforkoncentrationer.

I forhold til undervandsplanter, der spiller en vigtig rolle for at fastholde en klarvandet tilstand i de lavvandede søer, så viste forsøgene, at de udvalgte planter var delvist modstandsdygtig over for pludselige stigninger i N-belastning ved moderat TP-koncentrationer, men efter længere tids eksponering sker der et totalt kollaps ved høje N-koncentrationer som følge af skygning fra fytoplankton og fra alger på planternes overflade.

I forhold til diskussionen omkring kvælstofs rolle for vores vandmiljø kan det konstateres, at ikke kun de salte vande, men også mange søer, kan blive påvirket negativt af øget kvælstoftilførsel.

### Referencer

- /1/ Søndergaard, M., D. Trolle. & R. Bjerring, 2015. Sammenhænge mellem næringsstofindhold og biologiske kvalitetslementer i danske søer. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 36 s. - Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 136.
- /2/ Moss B., E. Jeppesen, M. Søndergaard, Lauridsen T.L. & Z.W. Liu, 2013. Nitrogen, macrophytes, shallow lakes and nutrient limitation – resolution of a current controversy? *Hydrobiologia* 710:3-21.
- /3/ Olsen S., C. Fengyi, L. Wei, S.-T. Zhao, M. Søndergaard & E. Jeppesen, 2015. Strong impact of nitrogen loading on submerged macrophytes and algae: a long-term mesocosm experiment in a shallow Chinese lake. *Freshwater Biology* 60:1525-1536.
- /4/ Zhao S., L. Yin, F. Chang, S. Olsen, M. Søndergaard, E. Jeppesen & W. Li, 2016. The response of *Vallisneria spirulosa* (Hydrocharitaceae) to different loadings of nitrogen at moderate phosphorus concentrations: growth experiments conducted in controlled mesocosm lake ecosystems- *Hydrobiologia*- online.
- /5/ Jeppesen, E., M. Søndergaard, M. Meerhoff, T.L. Lauridsen & J.P. Jensen, 2007. Shallow lake restoration by nutrient loading reduction – some recent findings and challenges ahead. *Hydrobiologia* 584:239-252.
- /6/ Gonzalez Sagrario, M.A., E. Jeppesen, J. Gomà, M. Søndergaard, T. Lauridsen & F. Landkildehus, 2005: Does high nitrogen loading prevent clear-water conditions in shallow lakes at moderately high phosphorus concentrations? *Freshwater Biology* 50: 27-41.

SAARA OLSEN, MARTIN SØNDERGAARD, ERIK JEPPESEN, Institut for Bioscience, Aarhus Universitet.

SUTING ZHAO, WEI LI, Laboratory of Aquatic Plant Biology, Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Kina.