Ændringer i næringsstofomsætning efter en kemisk sørestaurering

Hvad sker der med omsætningen af næringsstoffer, når en sø behandles med aluminium? Er det kun omsætningen af fosfor som ændres pga. bindingen til aluminium, eller ændrer en aluminiumbehandling også omsætningen af kvælstof, silikat og opløst organisk stof? Svaret er Ja - illustreret med resultater fra Nordborg Sø, som blev behandlet med aluminium i efteråret 2006.

Sara Egemose
Kasper Reitzel
Hans Erik Jensen,
Torben L. Lauridsen,
Frede Ø. Andersen
Henning S. Jensen

Aluminium(Al)-behandling, som en restaureringsmetode til at fælde fosfor (P) i vandsøjlen og standse P-frigivelse fra sedimentet er velkendt og udbredt, især i USA /1/. I Danmark er 6 søer restaureret med Al inden for de sidste 10 år. De fleste beskrivelser af effekten fokuserer på de primære effekter, nemlig ændringer i søvandets P-koncentration, algemængde og sigtdybde. Meget få har set på ændringer i andre parametre og man ved kun lidt om, hvordan omsætningen af andre næringsstoffer ændres efter en Al-behandling.

Når Al tilsættes søvandet, oftest som aluminiumklorid eller aluminiumsulfat, dannes $Al(OH)_3$, som er en hvidlig flok, der synker mod bunden. Flokken adsorberer og fælder fosfat og opløste organiske P-forbindelser og ændrer dermed P-omsætningen; men $Al(OH)_3$ kan også adsorbere silikat. Dette kan føre til silikatbegrænsning af kiselalgevæksten og dermed ændringer i algesammensætningen. Både ændret produktion og adsorption af organiske forbindelser såsom humussyrer til $Al(OH)_3$ kan føre til ændringer i kulstofomsætningen. Uorganiske kvælstofforbindelser adsorberes ikke til $Al(OH)_3$, men kvælstofomsætningen kan ændres via den ændrede produktion i søen og adsorption af humussyrer.

Her beskrives ændringerne i næringsstofomsætningen i Nordborg Sø på baggrund af intensive undersøgelser i søen før og de første 3 år efter Al-behandlingen i 2006.

Baggrund

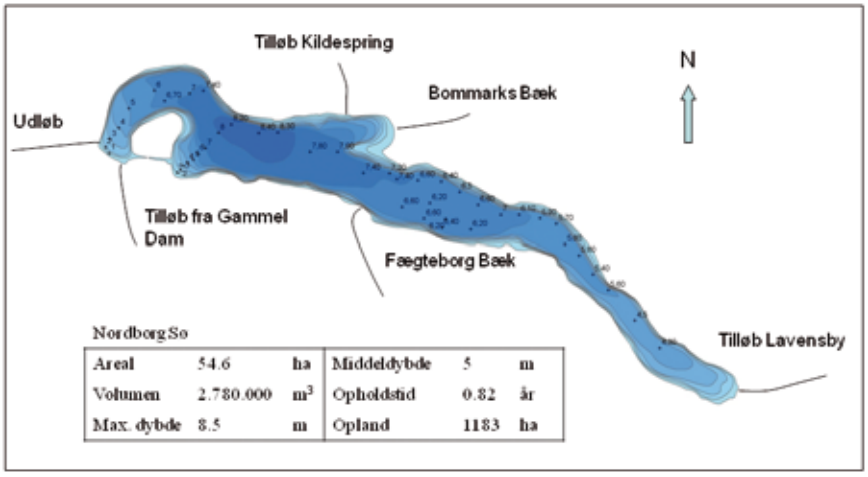
Nordborg Sø på Als var tidligere en klarvandet sø med en veludviklet undervandsvegetation, men igennem de sidste 80 år har den ændret karakter til en næringsrig sø med uklart vand pga. stor algevækst, en skæv fiskebestand og næsten ingen undervandsvegetation. Ændringerne skyldes tilførsel af næringsstoffer fra spildevand og landbrug. Den 55 hektar store sø afgrænses på sydsiden af Nordborg by, mens den på nordsiden er omgivet af landbrugsområder. De to oplandstyper udgør hhv. 25 % og 63 % af oplandet (Figur 1). Den gennemsnitlige sigtdybde i sommerperioden var i de sidste år op til restaureringen i 2006 ca. 1,5 m. Det er karakteristisk for Nordborg Sø, at sigtdybden er rigtig god om foråret, mens den falder til under 1 m midt på sommeren. Den gennemsnitlige P-koncentration i sommerperioden 2002 var 360 $\mu g\ l^{-1}$ /2/.

Den tidligere Nordborg Kommune har i løbet af de sidste 15 år rettet en del fejlopkoblinger i kloaksystemet ligesom en stor del af Nordborg by nu er separatkloakeret, og endelig har kildeopsporinger bl.a. ført til standsning af ulovlige gylleudslip. Tilførslen af P til Nordborg Sø stammer i dag overvejende fra landbrug og regnbetingede udledninger. I 2002 udgjorde tilførslen fra landbruget 53 % og tilførslen fra regnbetingede udledninger 28 % /2/. Den eksterne P-tilførsel var i 2002 nedbragt med 56 % til 528 kg i forhold til 1994. Ud fra undersøgelser i 2002-2005 blev det vurderet, at den eksterne P-tilførsel til Nordborg Sø stadig var ca. 30 % for høj /3/.

De mange års P-tilførsel har betydet, at der er ophobet en stor P-pulje i sedimentet. Søen er i perioder lagdelt om sommeren med deraf følgende iltfattigt bundvand. Dette betød, at der om sommeren blev frigivet store mængder jernbundet P til søvandet fra P-puljen i sedimentet. Den interne P-belastning var i 2002 mindst 2 gange større (1292 kg) end den eksterne belastning (528 kg). Udtømning af sedimentets P-pulje sker stort set ikke pga. sæsonvariation i vandtransporten med meget lave sommerværdier. I 2002 afgav søen således kun 35 kg P /3/.

Restaureringen

For at reducere den eksterne P-tilførsel med 30 % samt eliminere den interne P-frigivelse



Figur 1. *Kort over Nordborg Sø med angivelse af de 5 største tilløb samt udløbet. Tabellen indeholder søens morfologiske data.*

Figur 2. *Billeder fra restaureringen af Nordborg Sø*

besluttede den daværende Nordborg Kommune at iværksætte en restaurering af Nordborg Sø via en yderligere reduktion af den eksterne P-tilførsel og en fjernelse af den interne P-frigivelse vha. Al-tilsætning /4/. I efteråret 2006 blev der etableret to bundfældningsbassiner med integrerede sandfiltre i hhv. tilløbet Kildespring fra et landbrugsopland og tilløbet Fægteborg Bæk fra et byopland til søen, mens et tredje tilløb (udløb fra Gammel Dam) blev omlagt, så det i stedet løber til søens afløb (figur 1). Dernæst blev søen behandlet med poly-aluminiumklorid (52 g Al m^{-2}) over 3 uger i oktober 2006 på alle dybder over 2 meter (figur 2). Al blev doseret i forhold til den mobile P-pulje i sedimentet (3,4 t i de øverste 10 cm) med en molær Al:P-ratio på 8:1.

Målet var at opnå en fremtidig total P (TP)-koncentration i søvandet < 100 $\mu g\ l^{-1}$ og en forbedret sigtdybde pga. reduceret algevækst.

Fosforomsætningen

Al-behandlingen har medført en signifikant reduktion af P i vandfasen. Først via fældning af opløst P og P-holdige partikler fra vandfasen og efterfølgende via en effektiv eliminering af den interne P-frigivelse (94 %) fra sedimentet (figur 4). Den gennemsnitlige sommerkoncentration af TP faldt 89 % fra 2006 til 2007 og for fosfat var reduktionen 97 % (fra 183 $\mu g\ l^{-1}$ til 5 $\mu g\ l^{-1}$ figur 3). Tre år efter behandlingen i 2009 var TP og fosfat stadig reduceret med hhv. 73 % og 93 %.

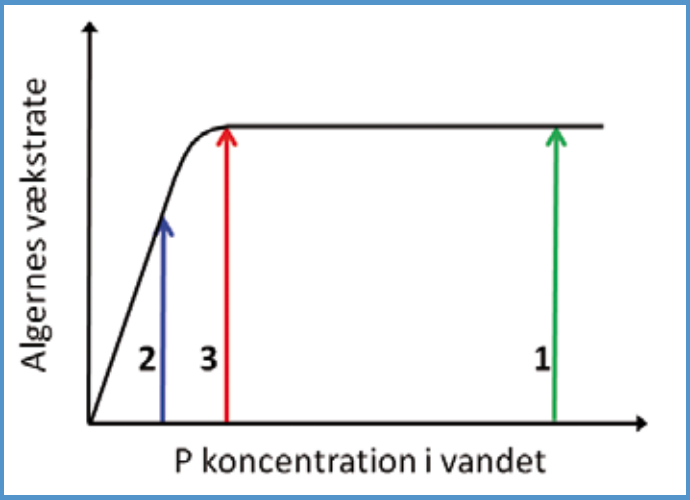
Før Al-behandlingen sås hvert år en ophobning af P i bundvandet, men dette sker ikke efter behandlingen, da Al-flokken binder P som ellers ville frigives til vandfasen. Tværtimod tilbageholder søen nu P. I maj-sep 2006 før behandlingen frigav sedimentet netto 1807 kg P (figur 4). I samme periode i 2007 og 2009 blev der til sammenligning kun frigivet hhv. 103 og 188 kg P i sommerperioden.

Men som figur 3 antyder, så stiger indholdet af TP i vandfasen langsomt igen. Da der ikke ses en fornyet intern belastning må det skyldes den eksterne P-tilførsel. Den eksterne tilførsel af P faldt med 40 % til 117 μg TP l^{-1} fra 2006 til 2007,efter at tiltagene i oplandet var gennemført. Ved brug af Vollenweiders sø-model /5/ vil det medføre en ligevægtskoncentration i søvandet på 61 $\mu g\ l^{-1}$, hvilket stemmer godt overens med den koncentration som er observeret i vandfasen i 2009 på 65 $\mu g\ l^{-1}$. Det er dog endnu uvist om TP-koncentrationen nu vil stabilisere sig på dette niveau.

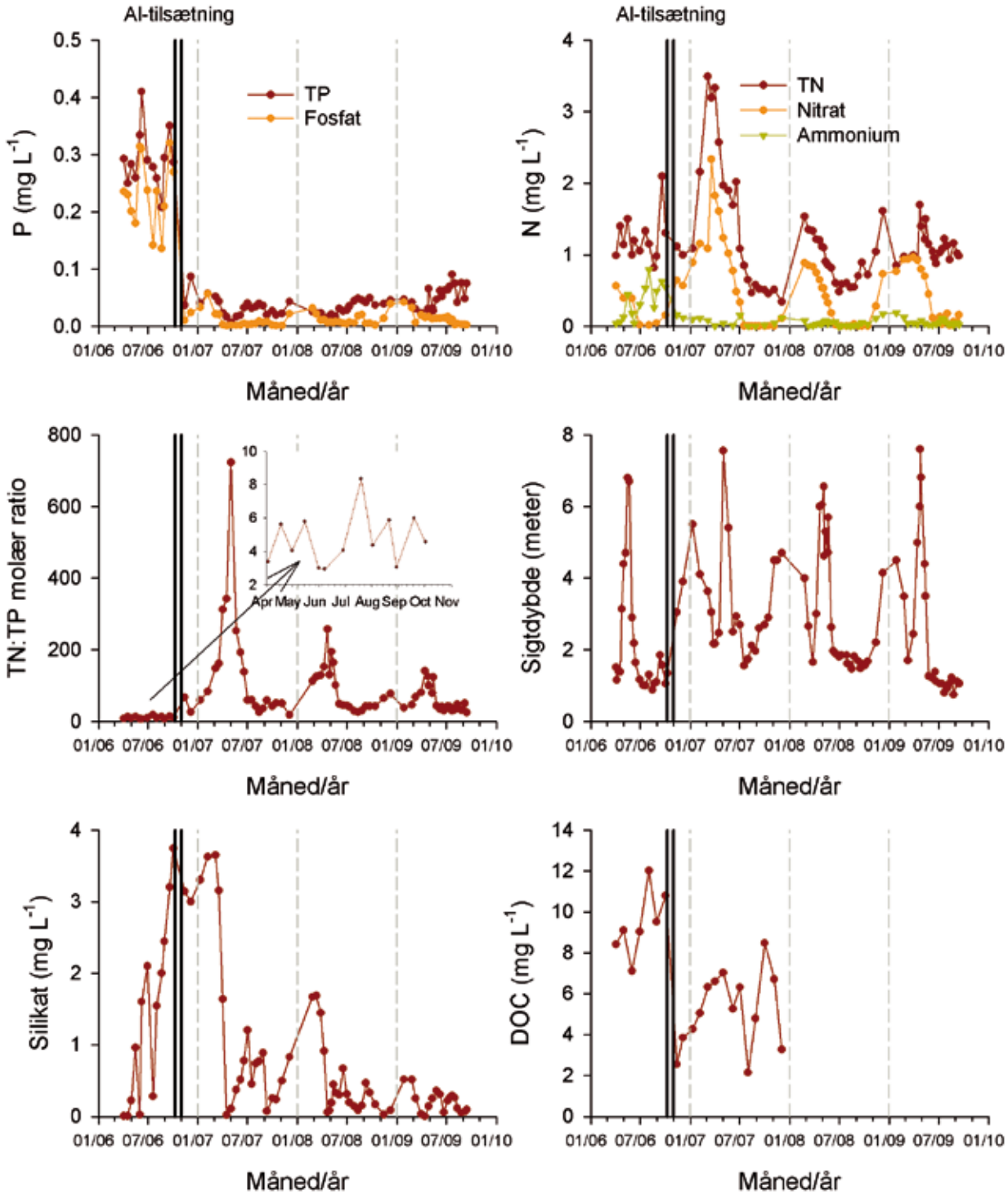
Kvælstofomsætningen

Nitratkoncentrationen i søvandet steg det første år efter behandlingen, men er nu tilbage på samme niveau som før (figur 3). Stigningen var ikke en direkte konsekvens af behandlingen, men skyldtes øget nitrattilførsel i 2007 pga. mere nedbør og en P-begrænset algeproduktion, hvilket førte til N-akkumulering i søvandet. Derimod er akkumuleringen af ammonium i bundvandet totalt elimineret efter behandlingen. Før behandlingen blev der frigivet store mængder ammonium fra sedimentet til vandfasen (figur 4). I 2006 blev frigivelsen i sommerperioden målt til 17 tons, men denne frigivelse faldt til

BOKS 1. Sammenhængen mellem algernes vækst og P-koncentrationen i søvandet.



Forholdene før og efter en sørestaurering med Al.
Pil 1 illustrerer forholdene før sørestaureringen: høj P-koncentration, høj vækstrate og uklar sø. Pil 2 illustrerer forholdene efter en Al-behandling: P-koncentrationen er nu meget lavere så algernes vækstrate er begrænset af P og søen bliver klar. Pil 3 illustrerer forholdene efter nogle år med en fortsat mindre tilledning af P. P koncentrationen er øget så den ikke længere er begrænsende. Selvom P koncentrationen stadig er meget lavere end før Al–tilsætningen, er koncentrationen så høj at algerne ikke længere er begrænsede - søen bliver igen uklar. P-koncentration i Nordborg Sø er ikke lav nok til vedvarende at begrænse algevæksten.

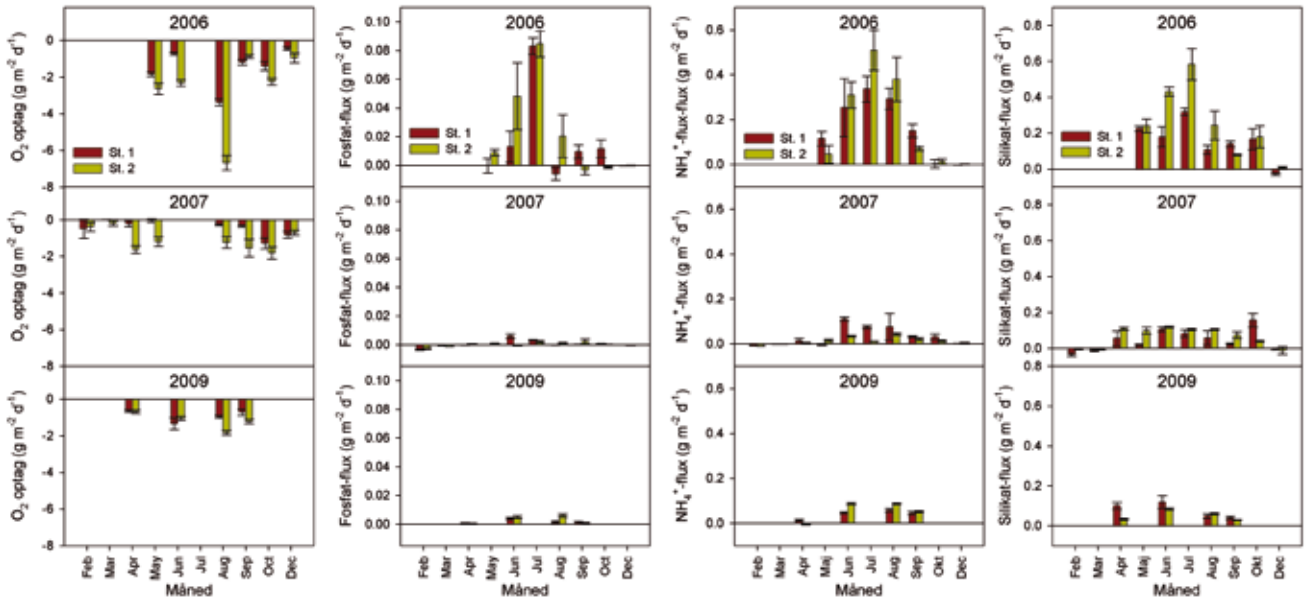


Figur 3. *Gennemsnitskoncentrationen for hele vandsøjlen af TP, fosfat, TN, nitrat, ammonium, silikat og DOC i vandfasen, samt den molære TN:TP ratio og sigtdybden før og efter Al-behandlingen i oktober 2006.*

3 tons i 2007 og 3,5 tons i 2009. Denne ændring skyldes sandsynligvis bedre iltforhold i bundvandet, højere nitrifikationsrate pga. af de bedre iltforhold i sedimentet og måske en lavere ammonifikation pga. P-begrænset mineralisering.

Silikatomsætningen

Silikatkoncentration i vandet faldt lidt umiddelbart efter Al-tilsætningen pga. binding af silikat til Al-flokken og deraf følgende udfældning, men det interessante er, at efter kiselalgeopblomstringen i foråret 2007 med deraf følgende stort silikatoptag så har koncentrationen stabiliseret sig på et langt lavere niveau end før behandlingen (figur 3). Det skyldes et skift fra negativ til positiv silikatretention, da silikat fra mineraliseret materiale nu bliver tilbageholdt i sedimentet af Al. En anden forklaring kan være mindsket mineralisering som det reducerede iltforbrug i sedimentet antyder (figur 4). Al tilbageholder effektivt silikat /6/og derfor er silikatfrigivelsen fra sedimentet i sommerperioden faldet fra 18 tons før behandlingen til hhv. 5,5 og 4,5 tons i 2007 og 2009 efter behandlingen (figur 4). Selvom tilgængeligheden af silikat i søvandet er stærkt reduceret har vi ikke set effekter på sedimentationen af biogent silikat, hvilket tyder på, at kiselalgeproduktion ikke er vold-



Figur 4. *Udvekslingsrater inkl. standardafvigelser (n=5) af ilt, fosfat, ammonium og silikat mellem vand og sediment på 2 stationer målt i laboratoriet i 2006, 2007 og 2009 ved in situ temperatur og iltindhold. I juli 2006 og juni/juli 2007 var der ingen ilt ved sedimentoverfladen og der er derfor ikke målt iltflux.*

somt påvirket af den ændrede silikattilgængelighed og at der ikke er silikatbegrænsning. Dog så vi en reduktion i kiselalgebiomassen i 2007 sammenlignet med 2006.

Kulstofomsætningen

Koncentrationen af opløst organisk stof (DOC) i søvandet faldt til ca. halvdelen efter behandlingen samtidigt med at farven (indikator for humusstoffer) i vandet faldt tilsvarende (figur 3). Retentionen af DOC er steget med 30 %. Reduktionen i DOC og vandets farve skyldes, at Al-flokken også binder humusstoffer /6/. Sedimentet iltforbrug faldt 57-91% efter Al-behandlingen (figur 4). Dette kan ikke forklares af en lavere kulstoftilførsel til sedimentet, da sedimentationen af kulstof er uændret, men en forbedret mineralisering i vandsøjlen kan have medført mindre sedimentation af labilt C. Det reducerede iltforbrug kan måske også skyldes, at sedimentets bakterievækst er blevet P-begrænset efter Al-behandlingen. Det er en problemstilling, som i øjeblikket undersøges i laboratorieforsøg.

Vandkvaliteten

Målet for P-reduktion i søvandet er til fulde opnået, mens målet om en varig forbedring af sigtdybden ikke er opnået. Den gennemsnitlige sommersigtdybde steg 1 meter fra 2,3 m i 2006 til 3,2 m i 2007, men er nu tilbage på samme niveau som før restaureringen, ligesom klorofyl a mængden kun faldt lidt fra 2006 til 2007 (figur 3). I boksen forklares, hvorfor sigtdybden ikke altid reagerer proportionalt med P-koncentrationen i søvandet. Før behandlingen var Nordborg Sø kvælstofbegrænset en stor del af året, hvilket medførte opblomstring af N-fikserende blågrønalger, men i 2007 efter behandlingen var søen P-begrænset (figur 3). Analyser af algesammensætningen i 2007 viste også en reduktion i mængden af blågrønalger. I 2008 og 2009 er TN:TP ratioen steget lidt.

Sammenfatning

Al-behandlingen af Nordborg Sø har givet ny og værdifuld viden om ændringer i næringsstofbalancerne efter en kemisk sørestaurering ligesom effektiviteten af Al er demonstreret via den markante reduktion af P-frigivelsen fra sedimentet. Til gengæld har restaureringen af Nordborg Sø også vist, at P-koncentrationen i søvandet skal reduceres endnu mere for at sikre en varig forbedring af vandkvaliteten (sandsynligvis til 12,5-25 μg TP l^{-1} ifølge de estimerede grænseværdier for opnåelse af god økologisk tilstand/7/). Det betyder, at den eksterne tilførsel af P skal reduceres yderligere for at forbedre vandkvaliteten og for at undgå at opbygge en ny P-pulje i sedimentet, som kan frigives om sommeren. Dette er også vigtigt i forbindelse med fremtidige Al-behandlinger.

Undersøgelserne i Nordborg Sø er foretaget af Center for Sørestaurering (CLEAR). Tak til Villum Kann Rasmussen fonden for finansiering af CLEAR. Også en stor tak til Nordborg Sportsfiskerforening for uvurderlig hjælp med prøvetagning og samarbejde under hele forløbet.

Referencer

/1/ Welch, E.B., Cooke, G.D. (1999): Effectiveness and longevity of phosphorus inactivation with alum. Lake Reserv. Manage. 15: 5-27.

/2/ Sønderjyllands Amt, 2003: Nordborg Sø 2002. Teknisk rapport.

/3/ Egemose, S., Jensen, H.S. (2009): Phosphorus forms in urban and agricultural runoff: Implications for management of Danish Lake Nordborg. Lake Reserv. Manage. 25: 410-418.

/4/ Egemose, S., de Vicente, I., Reitzel, K., Flindt, M.R., Andersen, F.Ø., Lauridsen, T.L., Søndergaard, M., Jeppesen, E., Jensen, H.S. (submitted): Changed cycling of P, N, Si and DOC in Danish Lake Nordborg after aluminum treatment. Can. J. Fish. Aquat. Sci.

/5/ Vollenweider, R.A. (1976): Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. Mem. I. Ital. Idrobiol. 33: 53-83.

/6/ de Vicente, I., Jensen, H.S., Andersen, F.Ø. (2008): Factors affecting phosphate adsorption to aluminum in lake water: Implications for lake restoration. Sci. Total. Environ. 389: 29-36.

/7/ Søndergaard, M., Jeppesen, E., Jensen, J.P., Amsinck, S.L. (2005): Water Frame Directive: Ecological classification of Danish Lakes. J. Appl. Ecol. 42: 616-629.

Saea Egemose (saege@biology.sdu.dk) og Kasper Reitzel er post docs i CLEAR på Biologisk Institut, Syddansk Universitet.

Frede Ø. Andersen & Henning S. Jensen er lektorer i økologi på Biologisk Institut, Syddansk Universitet. Frede Ø. Andersen er tillige Centerleder for CLEAR, et Villum Kann Rasmussen Centre of Excellence.

Hans Erik Jensen er ingeniør. Han var projektleder for Nordborg Sø projektet i den tidligere Nordborg Kommune og er nu ansat i Sønderborg Kommune, Naturgruppen.

Torben L. Lauridsen er seniorforsker ved Afdeling for Ferskvandsøkologi, DMU, Aarhus Universitet.