

Forbehandling af jorden før søetablering

Ved etablering af en ny sø kan den oversvømmede jord frigive fosfor. Det kan føre til en dårlig økologisk tilstand i søen og tillige påvirke nedstrøms vandområder negativt. Fosforfrigivelsen fra jorden foregår ofte hurtigt efter oversvømmelsen, men kan frigivelsen reduceres eller helt undgås ved forbehandling af jorden? Det spørgsmål har vi undersøgt under etableringen af Rønnebæk Sø ved forbehandling af jordene med sand-capping, dybdepløjning og tilsætning af jern.

THOR KOLATH, LOTTE REUSS,
SARA EGEMOSE & KASPER REITZEL

Fosforfrigivelse fra oversvømmet jord

Mange nye søer etableres på jord, som tidligere har været dyrket og derfor gødet /1, 2/. De fleste nye søer er etableret med det formål at sænke udledningen af kvælstof(N) til kystnære områder. Næringsstofferne fjernes i søerne ved sedimentation, adsorption til sedimentet og indbygning i biomasse; kvælstof afgasser til atmosfæren som N_2 og lattergas

ved denitrifikation. Etableringen af lavvandede søer er derfor et effektivt virkemiddel til at reducere kvælstof, men kan derudover også medføre enten tilbageholdelse eller frigivelse af fosfor(P), alt efter forholdene /1/. Fosforfrigivelsen fra den oversvømmede jord kan eutrofiere den nyetablerede sø og påvirke dennes økologiske tilstand og vil ydermere kunne påvirke nedstrøms vandområder negativt pga. de eksporterede næringsstoffer /1/.

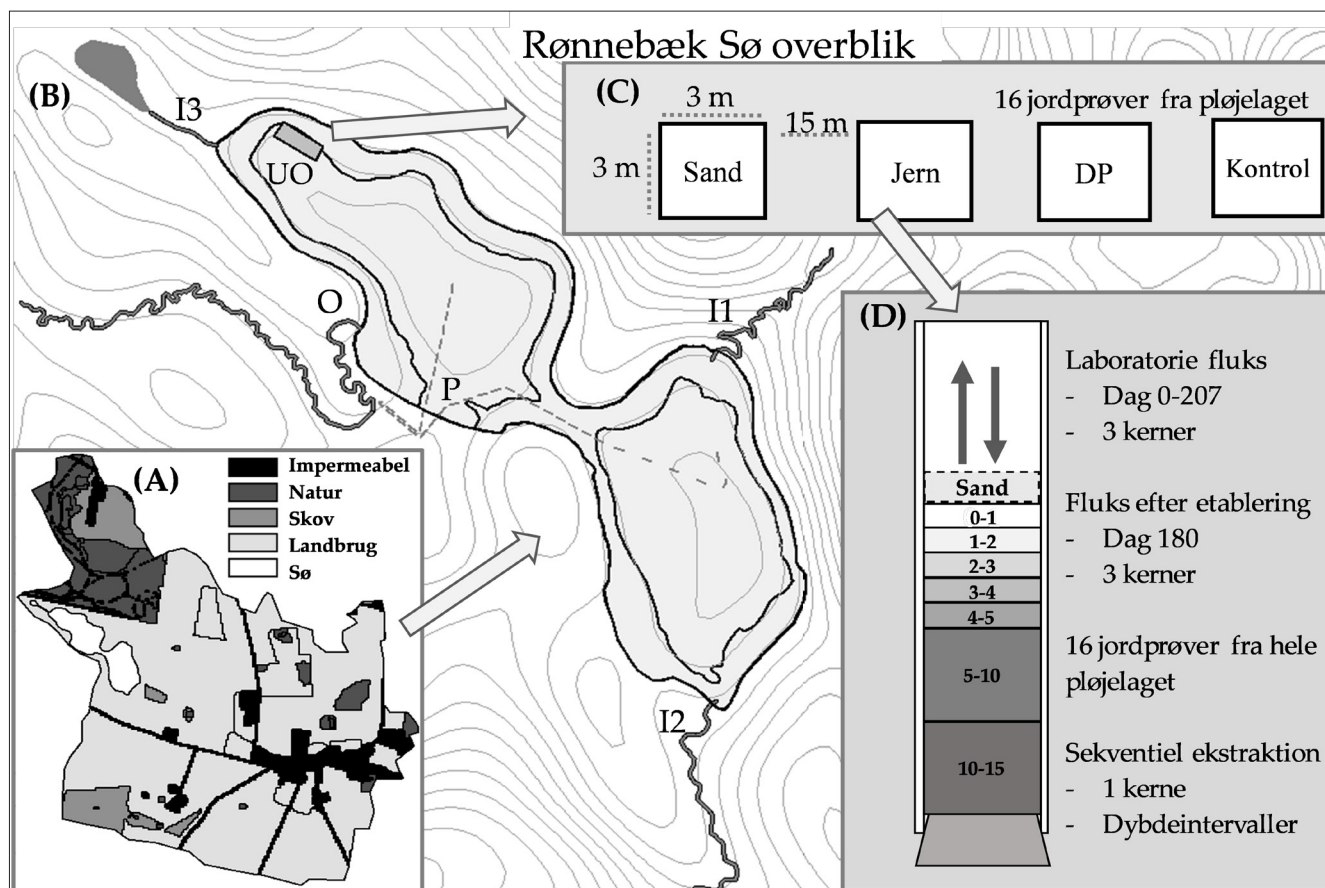
Oversvømmet jord kan frigive fra mindre end 1% til op mod 40% af det totale fosfor (TP)-indhold /2, 3/. Generelt frigives fosfor hurtigt fra oversvømmet jord. Frigivelsen er

højest inden for få dage og aftager derefter efter uger til måneder /2-4/. Fosforfrigivelsen kan dog i enkelte tilfælde fortsætte i mange år efter oversvømmelsen af landbrugsjord /5/.

I de lavvandede Filsø og Birke Sø har man set, at store fosformængder kan omlægges og eksporteres som partikulært fosfor, pga. vinden, der hyppigt ophvirvler partikler i vandfasen /3, 6/. En anden væsentlig kilde til fosforfrigivelse er opløsningen af fosforbindende jern(Fe)-forbindelser under de reducerede forhold i den vandmættede jord. Ændringer i sedimentets pH- og biogeokemiske ændringer forårsaget af oversvømmelsen kan også frigøre



Figur 1. Rønnebæk Sø før etablering, oktober 2017 (venstre), og efter etablering, januar 2018 (højre).



Figur 2. Overblik over Rønnebæk Sø og forbehandlingsforsøget. A) Opland med arealanvendelsen for sø-etablering (2017). B) Rønnebæk Sø med 1 m højdekurver, indløb er markeret (I1, I2 og I3), udløb (O), undersøgelsesområdet (UO) og (P) angiver et rørsystem, der sikrer vandtilførsel til Rønnebækken om sommeren. C) Undersøgelsesområdet med angivelse af forbehandlede prøvefelter. D) Skematisk beskrivelse af jordkerner optaget i prøvefelterne og undersøgelserne af disse; Kumuleret fluks gennem 207 dage, fluks over kerner indhentet i søen 180 dage efter etablering, analyser af jordprøver på blandet jord fra hele pløjelaget før etablering af søen, og sekventiel ekstraktion af fosforpuljer på kerner af hver behandling i adskilte dybdeintervaller før etablering.

fosfor /4/. Undersøgelsen af forbehandling af jordene fokuserer udelukkende på den diffusive fosforfrigivelse fra intakte jordkerner indsamlet, oversvømmet og fulgt over tid i laboratoriet /2/.

Rønnebæk Sø og forbehandlinger

Rønnebæk Sø er etableret ved Næstved i 2017 bl.a. for at sænke kvælstofudledning og sikre sommervand i Rønnebækken som klimatilpasningstiltag samt for at øge biodiversitet og rekreative værdier i forbindelse med et tilknyttet skovrejsningsområde. Søen er på knap 8 ha, opdelt i 2 bassiner med en middeldybde på 1,5 m og max-dybde på 3,5 m. Rønnebæk Sø er etableret på tidligere landbrugsjord og 76 % af oplandet udgøres af landbrugsjord (/2/, Figur 2).

Et undersøgelsesområde blev udvalgt på baggrund af 16 jordprøver fra pløjelaget, der viste en ensartet lerjord (Tabel 1). I undersøgelsesområdet blev 4 prøvefelter oprettet. Et felt var ubehandlet kontrol og tre felter dedikeret til test af forskellige forbehandlingsmetoder (Figur 2). De benyttede forbehandlinger

var: 1) dybdepløjning, hvor jorden blev vendt til en dybde af 80 cm, så topjorden blev begravet under tidligere dybere jordlag, 2) Sandcapping med rent sand i et 6 cm tykt lag, og 3) tilsætning af jernproduktet CFH-12® (Kemira Oyj.), der blev tilført i en mængde på 2,9 kg m². Jerntilsætningen svarede til et Fe:P forhold på 10:1 til den potentielt mobile fosforpulje i hele pløjelagets dybde.

Jordkerner blev indsamlet fra de behandlede prøvefelter umiddelbart før søen blev etableret. Under kontrollerede forhold blev jordkernerne oversvømmet i laboratoriet. Fosforfrigivelsen blev derefter fulgt under iltede forhold og i mørke gennem 207 dages inkubation. Den kumulerede udveksling af fosfor og andre næringsstoffer (fluks) blev fundet ved målinger af koncentrationen i vandet over de enkelte kerner med få dages mellemrum (Figur 3).

Jordens sammensætning blev undersøgt på kerner fra hvert prøvefelt og størrelsen af fosforpuljer med varierende biotilgængelighed blev bestemt med en sekventiel ekstraktionsprocedure foretaget på særskilte dybdeinter-

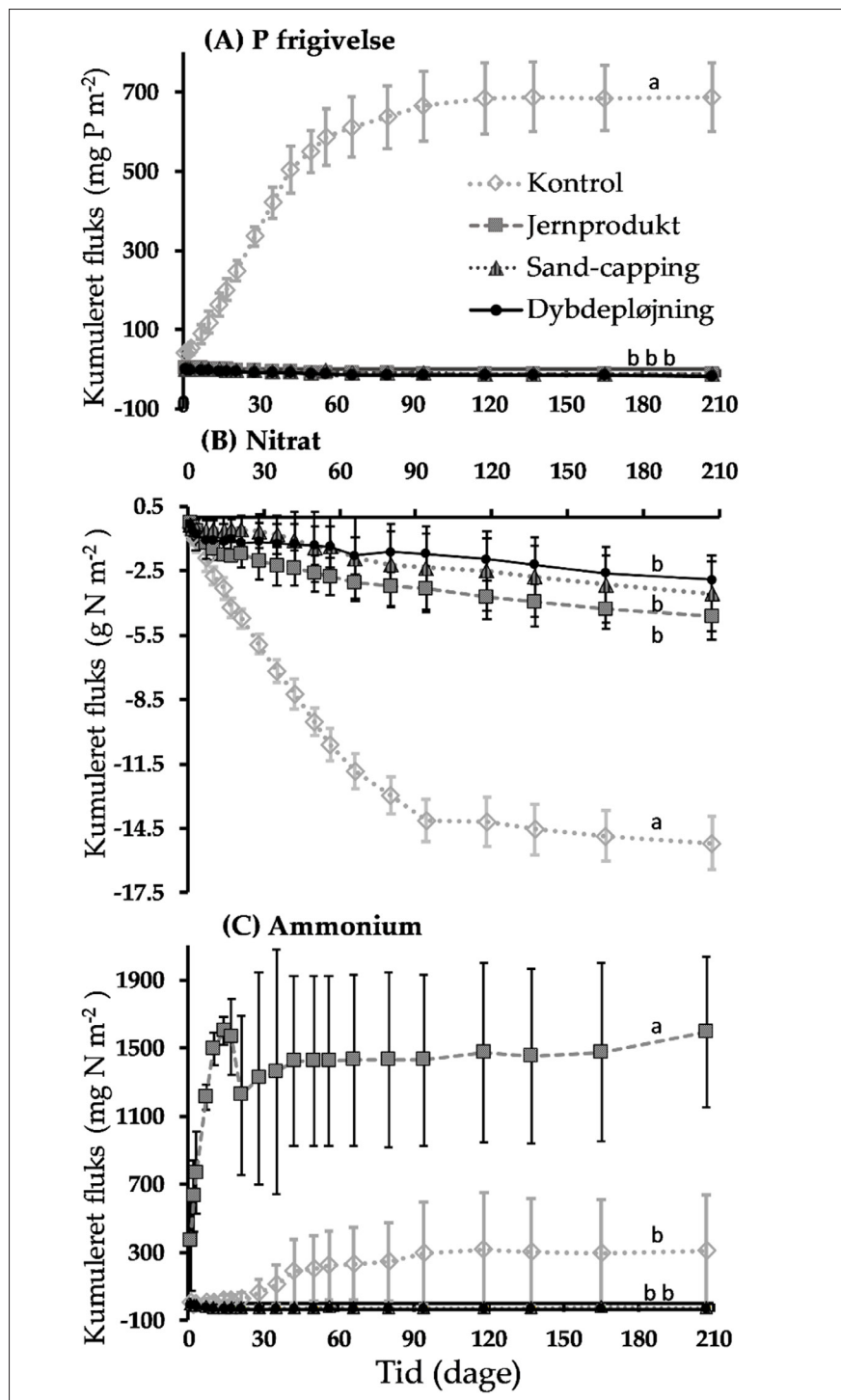
valler ned gennem kernerne /7/, (Figur 2). Denne procedure anvendes for at kunne sammenholde fosforfrigivelsen med puljernes fordeling og sammenligne med forbehandlingerne. Kerner blev indsamlet fra prøvefelterne igen 180 dage efter oversvømmelsen og fluksen fulgt gennem en kortere periode for at vurdere om forløbet i søen afveg fra fluksen målt i laboratoriet.

Effekt af forbehandlinger

Den ubehandlede kontroljord fra Rønnebæk Sø frigav 690 mg P m⁻² i løbet af 207 dages inkubation i laboratoriet. 85 % af fosforfrigivelsen forløb allerede inden for 60 dage fra oversvømmelsen begyndte. Derefter faldt fosforudvekslingen mellem jord og vand gennem resten af inkubationen (Figur 3). Fosforfrigivelsen fra Rønnebæk Sø var således hurtig og kortvarig, som det er fundet i tidligere undersøgelser af oversvømmet landbrugsjord /3, 4/. Alle tre forbehandlinger førte til en signifikant formindsket fosforfrigivelse. Fosforudvekslingen var ikke signifikant forskellig mellem metoderne, hvis effektivitet der dermed ikke

Tabel 1. Årlig middelværdi i søvandet målt 7 gange gennem 2018 /11/. Middelværdier for 16 jordprøver af blandet jord fra pløjelaget indsamlet fra undersøgelsesområdet før sæetablering (2017). Standardafvigelsen mellem de 16 jordprøver er angivet efter ±.

Vandkemi		Jordkemi	
Sigtdybde (m)	1,3	Organisk indhold (%)	5,1±0,7
Alkalinitet (meq L ⁻¹)	3,7	Densitet (g cm ⁻³)	1,97±0,06
Klorofyl (µg L ⁻¹)	12,6	Total-fosfor (mg g ⁻¹)	0,62±0,09
Total-fosfor (mg L ⁻¹)	0,080	Fosfortal	1,9±0,1
Total-nitrogen (mg L ⁻¹)	1,920	Molært TFe:TP-forhold	10,8±1,5



Figur 3. Kumuleret frigivelse af A) fosfor, B) nitrat og C) ammonium angivet som middelværdi og standardafvigelse over tre jordkerner for hver af de fire behandlinger: kontrol, tilsætning af jernprodukt, sand-capping og dybdepløjning. Signifikante forskelle mellem den kumulerede frigivelse fra behandlingsgrupperne er angivet med a og b.

kunne skelnes imellem.

Den ubehandlede jord indsamlet i søen 180 dage efter oversvømmelsen viste en middelfrigivelse på 1,8 mg P m⁻² d⁻¹, mens den forbehandlede oversvømmede jord optog mellem 0,4 og 0,1 mg P m⁻² d⁻¹, hvilket er i fin overensstemmelse med forbehandlingernes effekt i laboratorieforsøget. Den stadige fosforfrigivelse fra kontroljorden efter 180 dages oversvømmelse antyder, at fosforfrigivelsen målt i laboratoriet viser den hurtigst mulige frigivelse. Fosforpuljen udtømmes langsommere i søen og frigivelsen strækker sig over en længere periode bl.a. som følge af lavere temperaturer, fortsat indbygning af fosfor i sedimentet fra planteproduktion og tilførsel til sedimentet ved sedimentation af partikler /2/.

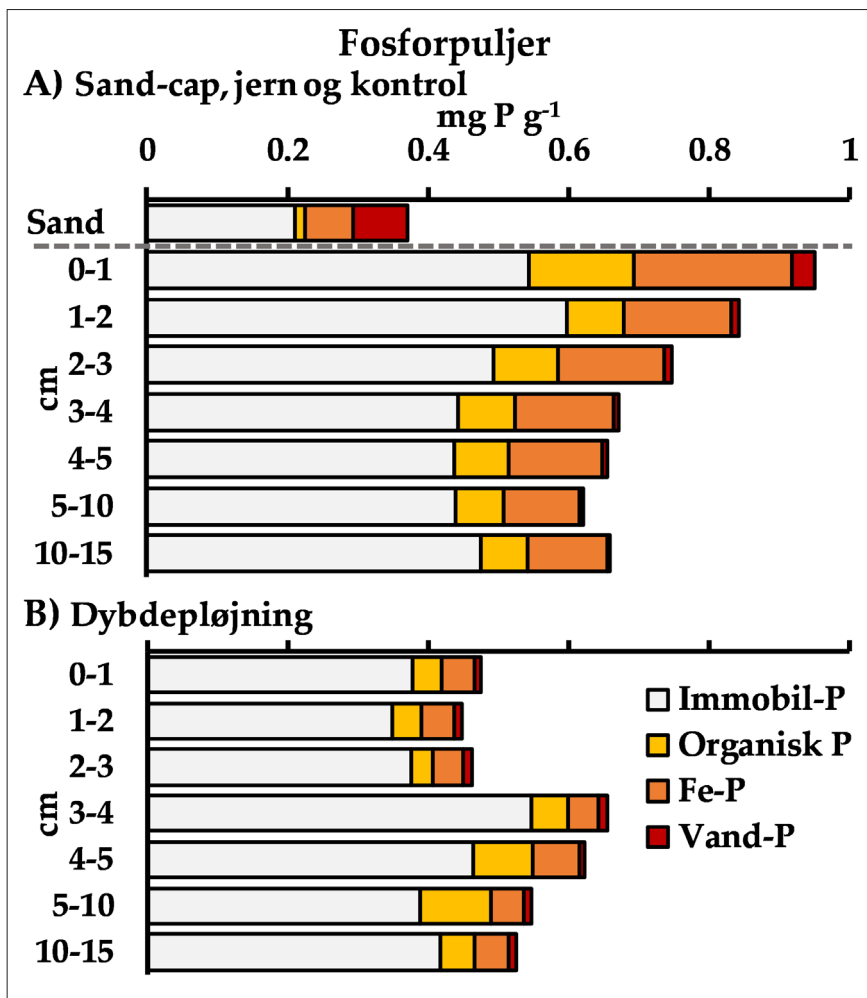
Udvekslingen af kvælstof mellem den oversvømmede jord og vandet blev også påvirket af forbehandlingerne. Nitratreduktionen var signifikant lavere for alle forbehandlingerne sammenlignet med den ubehandlede jord. Nitratreduktionen faldt for den ubehandlede kontroljord efter 80 dage, hvilket skyldtes at nitraten i jordkernerne blev opbrugt i laboratorieundersøgelsen og tilførslen af nyt nitrat var begrænset (Figur 3). Ammoniumfrigivelsen varierede meget mellem jordkerner med samme behandling. Frigivelsen var lav fra sand-capped og dybdepløjet jord, mens der var en tendens til højere frigivelse fra den ubehandlede jord. Endelig var frigivelsen signifikant højere fra den jernbehandlede jord (Figur 3).

Jerntilførslen sænker fosforfrigivelsen ved at øge fosforadsorptionskapaciteten i jorden. Fosfor bindes til jernoxider, men også til andre forbindelser med f.eks. aluminium eller calcium. Under iltfrie forhold reduceres nogle naturlige jernforbindelser og den tilknyttede fosfor frigives. Under iltede forhold, der oftest er fremherskende i lavvandede søer, kan selv et tyndt overfladelag reducere fosforfrigivelsen, hvis forholdet mellem jern og fosfor er tilstrækkeligt højt; dvs. ved et molært Fe:P forhold på over 10:1 /8/. Den ubehandlede jord havde et Fe:P forhold på 11, men det var ikke tilstrækkeligt til at undgå fosforfrigivelse, hvorimod jerntilsætningen fjernede fosforfrigivelsen fuldstændigt. Det anvendte jernprodukt, CFH-12, er også mindre følsomt for redoxændringer end andre jernforbindelser /9/ og frigivelsen af opløst jern fra sedimentet til vandet var heller ikke signifikant højere efter denne behandling. Den høje ammoniumfrigivelse umiddelbart efter oversvømmelse af den jernbehandlede jord indikerer dog, at produktet i nogen grad har fungeret som elektronacceptor og øget nedbrydningen af organisk materiale og dermed ammoniumdannelsen. Den

lave nitratreduktion i den jernbehandlede jord kan sandsynligvis skyldes hæmning af denitrifikationen, muligvis via binding af let omsættelige organiske forbindelser til jern, således at disse blev utilgængelige for denitrificerende mikrober.

Både sand-capping og dybdepløjning fungerer ved at danne en fysisk barriere mellem den fosforrige topjord og vandsøjlen /2/. Det tilførte sandlag og jorden fra dybere lag har således et lavere indhold af biologisk tilgængeligt fosfor, der kan frigives (Figur 4). Frigivelsen fra topjorden til vandsøjlen sænkes af den længere diffusionsvej og den lavere koncentrationsgradient gennem barrieren /10/. Den fysiske adskillelse af topjords indhold af organisk stof og vandsøjlen forklarer både den lave fosfor- og ammoniumfrigivelse og den lavere nitratreduktion, hvis effekt varede ved gennem hele undersøgelsesperioden på 207 dage /2/.

Jorden fra Rønnebæk Sø havde et fosfortal på under 2, og indholdet af plantetilgængelig fosfor er dermed lavt. Fosforfrigivelsen fra den ubehandlede jord svarede også til mindre end 2% af den potentielt mobile fosforpulje. Fosforpuljerne, der kan forventes at være mobile omfatter: 1) fosfat i porevandet og let adsorberet fosfor, der frigives som følge af de ændrede ligevægtsforhold ved oversvømmelsen (Vand-P), 2) fosfor bundet og adsorberet til oxideret jern (Fe-P), og 3) fosfor indbygget i let omsættelige organiske forbindelser (Organisk P) /7/. Overført fra den målte fosforfrigivelse i den ubehandlede jord i laboratorieundersøgelserne til hele søen svarer det til 54 kg P. I en periode med ubetydelig vandudskiftning vil denne frigivelse kunne resultere i total-fosforkoncentrationer i søvandet på op mod 0,47 mg P L⁻¹ og det vil betinge meget eutrofe forhold i Rønnebæk Sø. Men i virkeligheden var de målte total-fosforkoncentrationer dog ikke målt højere end 0,19 mg P L⁻¹. Denne lavere koncentration kan skyldes mange forskellige forhold såsom fosfortab ved vandudskiftning og sedimentation og mindre frigivelse i gennemsnit fra jordene, hvis sammensætning kan variere meget. Størrelsen af Fe-P puljen i den ubehandlede jord viser dog, at op mod 8 g P m⁻² kan forventes frigjort fra de øverste 5 cm jord under iltfrie forhold over længere tid, hvilket vil påvirke søen markant. Søer etableret på mere næringsrig jord og designet med større vanddybde, hvor iltfrie forhold hyppigere vil kunne opstå, kan derfor frigive betydelige fosformængder, hvilket kan undgås ved forbehandling af jorden inden søerne etableres /2/.



Figur 4. Fosforpuljer fundet ved sekventiel ekstraktion før oversvømmelse af undersøgelsesområdet. A) Fosforpuljer i sandlaget benyttet ved sand-capping. Puljernes sammensætning og størrelse adskiller sig ikke væsentligt mellem kontrollen og jorden under sandlaget og jernproduktet. Her er puljerne i de øverste 0-15 cm kontroljord og jord under sandlag og jernprodukt angivet som middelværdien for puljerne mellem kernerne i hvert dybdeinterval. B) Fosforpuljer i de øverste 0-15 cm dybdepløjet jord.

Kan forbehandling betale sig?

Restaurering af eutrofe naturlige søer for at mindske den interne frigivelse fra sedimentet kan være en bekostelig affære. Ved etablering af nye søer kan den fremtidige næringsstofftilstand indtænkes i søens design og risikoen for fremtidigt behov for restaurering mindskes. Lavvandede forhold under etableringen kan medføre omlægning og eksport af store mængder fosfor /6/, men i tilfælde, hvor fosforudledning vil true nedstrøms økosystemer udgør de afprøvede forbehandlingsmetoder

billige alternativer til de store udgifter forbundet med fjernelse af topjord (Tabel 2). De estimerede udgifter ved forbehandling for at gøre den mobile fosforpulje i hele pløjelaget utilgængelig i Rønnebæk Sø er beregnet i tabellen.

Udgifterne til topjordsafgravning er høje som følge af transportudgifterne, der dog vil kunne reduceres noget ved lokalt brug af jorden til diger, fugleøer og lignende. På trods af indkøbsprisen af sand og jernproduktet er transportudgifterne så meget lavere, at om-

Tabel 2. Estimerede omkostninger for storskala forbehandling af jordene i den nye Rønnebæk Sø /3/. Beregninger tager udgangspunkt i, at den potentielt mobile fosforpulje i et 30 cm dybt pløjelag skal fjernes eller gøres utilgængelig.

Forbehandlingsmetoder	Omkostninger (DKK ha ⁻¹)
Dybdepløjning	6.700
Sand-capping	300.000
Jernprodukt (CFH-12)	500.000
Topjordsafgravning	3.745.000

kostningerne ligger væsentligt under topjords-afgravning. Udgiften ved jernbehandling vil potentielt kunne sænkes markant, hvis det er tilstrækkeligt at dosere produktet i forhold til den reelle fosforfrigivelse fra den oversvømmede jord frem for i forhold til hele den mobile fosforpulje i jorden. Dybdepløjningen er en særdeles billig løsning, da der hverken er indkøbsudgifter til produkter eller transport. Dybdepløjningen forventes dog at være mest effektiv på lagdelte jorde med en afgrænset fosforrig topjord og dybere jordlag med lavere fosforindhold og højere fosforadsorptionskapacitet /2/. Metoden kan dog muligvis komme i konflikt med arkæologiske interesser.

Sand-capping, dybdepløjning og tilførsel af jern kan udgøre effektive og økonomisk attraktive metoder til at sænke fosforfrigivelsen fra tidligere landbrugsjord før etablering af nye søer /2/. Forbehandlingerne vil dog muligvis kunne sænke kvælstoffjernelsen i de nye søer, da denitrifikation påvirkes af, at organisk stof gøres utilgængeligt. Sand-capping og dybdepløjning kan også føre til en mindre mudret søbund til gavn for mange vandplan-

ter og herigennem påvirke biodiversiteten i de nye søer positivt.

Referencer

- /1/ Audet J., Zak D., Bidstrup J. & Hoffman C.C. 2020. Nitrogen and phosphorus retention in Danish restored wetlands. *Ambio*. 49: 324–336
- /2/ Kolath T., Reuss L., Egemose S. & Reitzel K. 2020. Reduction of Internal Phosphorus Load in New Lakes by Pretreatment of the Former Agricultural Soil - Methods, Ecological Results and Costs. *Sustainability*. 12, 3575. doi:10.3390/su12093575
- /3/ Kragh T., Sand-Jensen K., Petersen K. & Kristensen E. 2017. Fast phosphorus loss by sediment resuspension in a re-established shallow lake on former agricultural fields. *Ecological Engineering* 108: 2–9
- /4/ Pant H.K. & Reddy K.R. 2003. Potential internal loading of phosphorus in a wetland constructed in agricultural land. *Water Research* 37: 965–972.
- /5/ Duff J.H., Carpenter K.D., Snyder D.T., Lee K.K., Avanzino R.J. & Triska F.J. 2009. Phosphorus and nitrogen legacy in a restoration wetland, Upper Klamath Lake, Oregon. *Wetlands*. 29: 735–746.
- /6/ Sø J.S., Sand-Jensen K. & Kragh T. 2020. Fysisk design af nye søer kan reducere fosforpuljen og tilgødese

- biodiversiteten. Artikel i dette nr. af Vand & Jord.
- /7/ Psenner R., Pucsko R. & Sager M. 1984. Die fraktionierung organischer und anorganischer phosphorverbindungen von sedimenten. *Archiv für Hydrobiologie, Supplementband, Monographische Beiträge* 70: 111-155.
 - /8/ Jensen H.S., Kristensen P., Jeppesen E. & Skytthe A. 1992. Iron:phosphorus ratio in surface sediment as an indicator of phosphate release from aerobic sediments in shallow lakes. *Hydrobiologica*. 235: 731–743.
 - /9/ Fuchs E., Funes A., Saar K., Reitzel K. & Jensen H.S. 2018. Evaluation of dried amorphous ferric hydroxide CFH-12® as agent for binding bioavailable phosphorus in lake sediments. *Science of the Total Environment*. 628–629: 990–996.
 - /10/ Kim G. & Jung W. 2010. Role of sand capping in phosphorus release from sediment. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 14: 815–821.

Ph.d.-studerende THOR KOLATH (thorjensen@biology.sdu.dk), Specialestuderende LOTTE REUSS, Lektor SARA EGEMOSE og Lektor KASPER REITZEL er fra ved Biologisk Institut, Syddansk Universitet, Campusvej 55 5230 Odense M.



Planteplankton og klimaforandringer

Planteplankton og fotosyntese er grundlaget for primærproduktion og dermed for fødekæden i havet. Ethvert fald i planteplankton vil påvirke fødekæden og i sidste ende fiskeriet.

Nogle forskere har undersøgt de historiske niveauer af planteplankton ved at analysere 12 iskerner, hver 100-200 m lange, fra Grønlands indlandsis. Iskernerne består af gennem århundreder bevarede lag af den årligt afsatte is og sne. Hvert lag kan give en ide om tidligere niveauer af planteplankton i Nordatlanten i form af methansulfonsyre (MSA). MSA er et kemisk nedbrydningsprodukt af en aerosol

frigivet af mikrober, når planteplanktonet udvikler store opblomstringer. MSA vinddeponeres i havet eller på land, hvor det kan blive fastholdt i isen. Forskerne brugte MSA målinger som indikator for produktivitet, som groft set repræsenterer niveauet af planteplankton.

Iskernerne repræsenterede perioden 1767-2013 og man fandt, at niveauet begyndte at falde i midten af det 19de århundrede. Dette falder sammen med begyndelsen af industrialiseringen og større udsendelse af drivhusgasser. Der er usikkerhed om faldets størrelse, men der antydes et fald på omkring 10%.

Forskerne mener, at faldet drives af ændringer i den Atlantiske Meridional Overturning Circulation (AMOC), en stor-skala ocean cirkulationsproces der blander lag af havvand og dermed næringsstoffer til planteplanktonet. Efter industrialiseringens begyndelse antages det at AMOC er svækket med omkring 15%. Man undersøger stadig grunden til denne svækkelse, men der er beviser for at det delvis skyldes afsmeltningen af iskapperne og det arktiske isdække, der frigiver enorme mæng-

der af ferskvand. AMOC blev kraftigt svækket i 1980erne og 1990erne, som følge af en stor akkumulering af ferskvand i det subarktiske Atlanterhav i 1965-1990.

Forskerne sammenlignede deres resultater med data fra det 20-21 århundrede stamende fra studier der målet planteplanktonets niveau mere direkte ved analyse af havvand eller med satellitbilleder af havet. Resultaterne passede godt overens, hvilket indikerer at MSA er en troværdig proxy for planteplankton niveauet.

Isen fortsætter med at smelte, så yderligere svækkelse af AMOC kan forventes. Måske vil planteplankton mængden falde yderligere i Nordatlanten de følgende årtier, og som følge heraf påvirkningen af økosystem og fiskeriet.

Kilde: Osman, M.B., Das, S.B., Trusel, L.D., Evans M.J., Fischer, H., Grieman, M.M., Kipfstuhl, S., McConnell, J.R. and Saltzman, E.S. (2019). Industrial-era decline in subarctic Atlantic productivity. *Nature*. 569 (7757): 551-555. DOI: 10.1038/s41586-019-1181-8.

CH