Et studie i sørestaurering med Phoslock

Sørestaureringsmetoder til at binde fosfor i sedimentet består ofte i tilsætning af aluminiumssalte eller iltning, men for første gang er en dansk sø, Lyngsø i Silkeborg, blevet behandlet med Phoslock, der binder fosfor og forbedrer vandkvaliteten. SDU og AU har moniteret effekterne af Phoslockbehandlingen med fokus på fordelingen af Phoslock og søens fosfordynamik i de første 1,5 år efter Phoslockudbringningen.

Emma Polauke, Theis Kragh, Cecilie W. Møller, Martin Søndergaard & Kasper Reitzel

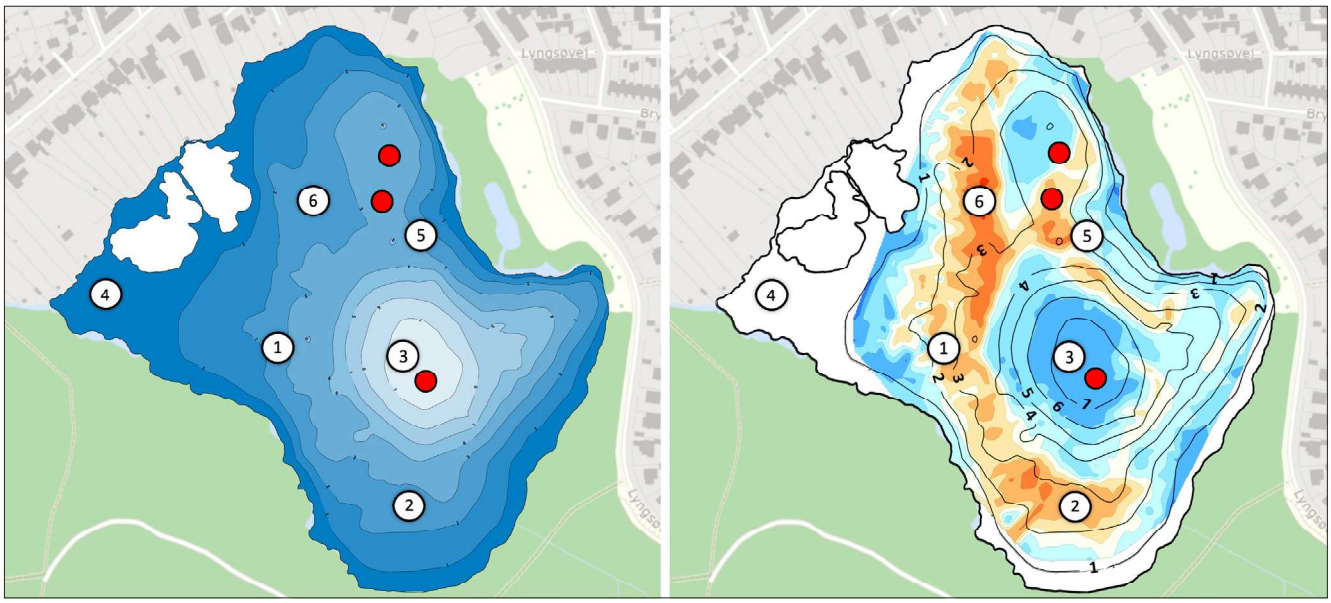
Restaurering af Lyngsø 2021

I udkanten af Silkeborg ligger Lyngsø; en lavvandet (middel dybde 2,4 m, max. 7,6 m) sø på ca. 10 hektar omkranset af skov og parcelhuse (Figur 1). Ligesom mange andre danske søer er Lyngsøs vandkvalitet og økologiske tilstand udfordret af årtiers tilførsler af spildevand rigt på fosfor, som i perioder med iltfrie forhold i bundvandet frigives fra søsedimentet til søvandet, hvor det kan give grobund for algeopblomstringer.

Som led i Vandområdeplanerne 2015-2021 /1/ blev Lyngsø udpeget til restaurering for at opnå god økologisk tilstand, og håbet om at søen også skulle kunne fungere som fremtidig badesø.

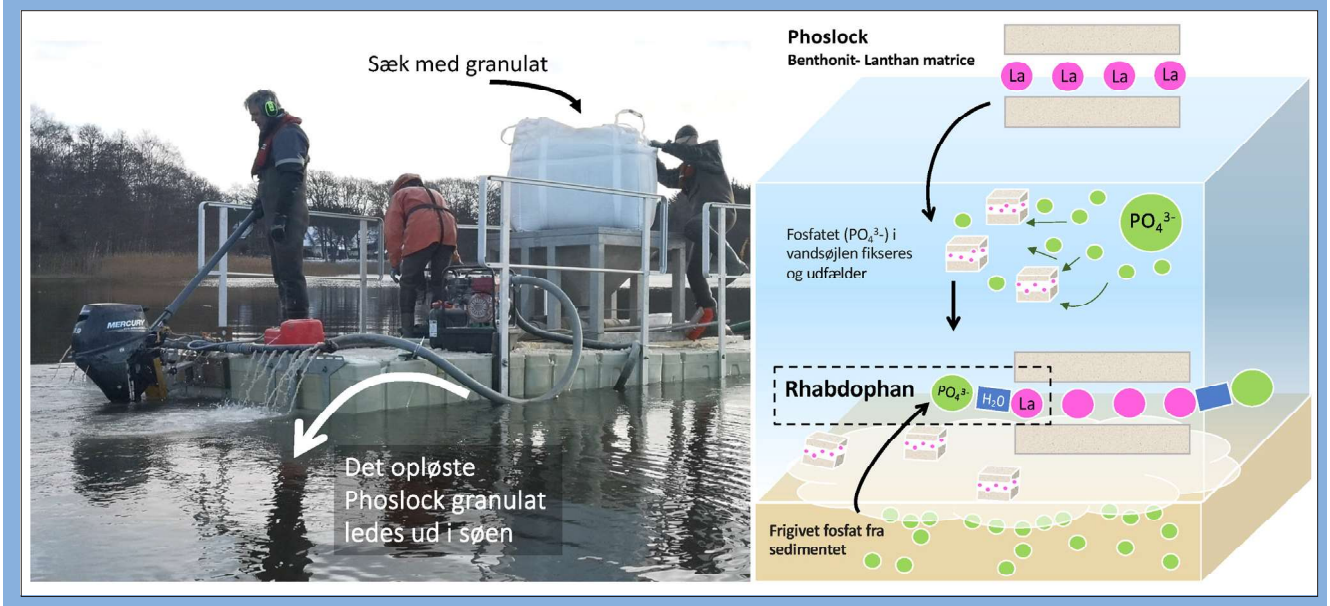
Det virkemiddel, der blev valgt til håndtering af Lyngsøs interne fosforbelastning, var kemisk restaurering ved udbringning af det fosforfældende produkt Phoslock; et modificeret produkt hvor lanthan (der har en stor evne til at binde fosfor) er blevet indbygget i en lermatrice. Phoslock har på verdensplan været anvendt til fosforfiksering i mere end 300 søer og vådområder /2/ /3/. I Danmark har Phoslock hidtil kun været testet i forsøgsøjemed, hvilket gør restaureringen af Lyngsø til den første fuldskalabehandling i Danmark (Faktaboks, Figur 2).

Phoslockbehandlingen er det, der kaldes en kemisk sørestaurering, hvor man forsøger at binde den mobile fosforpulje i søsedimentet, og derved begrænse frigivelsen af fosfor fra sedimentet til vandsøjlen, således at algeproduktionen hæmmes, og der opnås bedre lysforhold. De forbedrede lysforhold er en grundbetingelse for undervandsplanterne, som skaber grobund for et rigt dyreliv, ilter søvandet og bidrager til at øge sedimentets naturlige fosfortilbageholdelse.



Figur 1. I forbindelse med SDU's monitering af Lyngsø blev der udført sonaranalyser til kortlægning af søens dybdeforhold (venstre) og sedimentets hårdhed (højre) forud for udvælgelsen af sedimentovervågningsstationerne, 1-6. De rødlige farver illustrerer områder med blødt sediment, mens de blålige farver indikerer områder med mere hård bund. Hvide områder indikerer vanddybder mindre end 1 m og arealer med tæt rørskov. Placeringerne af de tre stationer undersøgt ved forundersøgelsen i 2018 er angivet med røde prikker /9/. Baggrundskort fra Danmarks Arealinformation. Søkort af T. Kragh.

Faktaboks 1. Hvad er Phoslock, og hvordan virker det?
Phoslock er et modificeret ler-produkt bestående af bentonit (95 %) og grundstoffet lanthan (5 %), der er blevet indbygget i bentonitmatricen. Lanthan har en meget høj affinitet for uorganisk fosfor (fosfat (PO_4^{3-})), som findes i både søvand og sedimentets porevand. Ved kontakt med bentonitmatricen fastlåses fosfatet i et lanthan-fosfat-kompleks (Rhabdophan), der er meget tungtopløseligt og derved ikke opløses under hverken iltfrie forhold eller forhold med høj eller lave pH. Phoslocken doseres i et vægtforhold på 100:1 (Phoslock:mobilt fosfor). I teorien kan der i tilfælde med meget høje koncentrationer af frie La^{3+} ioner i søvandet forekomme toksiske effekter på det akvatiske dyreliv, men dette er aldrig observeret i nogle af de mange sørestaureringer med Phoslock, der er foretaget indtil nu. Phoslock udbringes som granulat, der blandes op med søvandet og ledes ud i overfladevandet. I Lyngsø foregik dette med en specialbygget pram og på de områder, som var dybere end 2 m. Når Phoslock tilsættes søvandet daler det ned gennem vandsøjlen og lægger sig til sidst som et lyst dække på overfladen af sedimentet (Figur 2) /4/. Udbringningen gennemføres på vindstille dage, hvor risikoen for at turbulens i vandsøjlen, som kan lede produktet til utilsigtede områder af søen, er mindst. I modsætning til andre kemiske restaureringsprodukter (såsom aluminiums- og jern-salte), påvirker Phoslocks ikke søvandets pH og alkalinitet og er derfor et godt alternativ til disse produkter i forholdsvis lavalkaline søer, som eksempelvis Lyngsø. I Lyngsø kostede Phoslockbehandlingen (produkt og udbringning) ca. 1.2 mio kroner.



Figur 2. Foto taget under Phoslockudbringningen på Lyngsø i december 2021 (venstre). Konceptfigur over Phoslocks fosforbindingsmekanisme (højre). Af C. W. Møller og E. Polauke

Et studie i Phoslock

For at vurdere Phoslock´s evne til at binde fosfor i Lyngsø´s sedimentet har Syddansk Universitet fulgt søen i de første 1,5 år efter udbringningen og udført forskellige laboratorieanalyser af sedimentprøver indsamlet på seks repræsentative overvågningsstationer i søen. SDU har fokuseret på undersøgelser af sedimentets forskellige fosforfraktioner og størrelsen af sedimentets potentielt mobile fosforpulje, som er den mængde fosfor, der potentielt kan frigives til søvandet (defineret som summen af fosfor der let kan frigives til porevandet, jern-bundet fosfor, der frigives under iltfrie forhold og fosfor bundet i organisk materiale, der over tid kan blive omsat) /5/.

Fra udenlandske studier er der rapporteret om tilfælde hvor Phoslock efter udbringning er blevet flyttet rundt i søen, således at den jævne fordeling, der stiles efter ødelægges. Derfor er der på Syddansk Universitet løbende målt på Phoslocks vertikale og horisontale fordeling i sedimentet på seks stationer. Sideløbende har vi indsamlet vandprøver til monitering af søvandets lanthanindhold, da meget høje koncentrationer (mg pr. L) af opløst Lanthan i søvandet potentielt kan være toksisk for visse fisk og invertebrater. Søens respons på Phoslock-behandlingen ud fra forskellige vandkemiske og biologiske parametre er præsenteret i anden artikel i dette nummer /6/.

Dosering af Phoslock

I henhold til dansk praksis bestemmes doseringen af Phoslock relativt til søens pulje af potentielt mobilt fosfor i sedimentet og mængden af fosfor i søvandet, som tilsammen antages at udgøre den mængde fosfor, der skal inaktiveres /7/. Ved de officielle forundersøgelser, som går forud for kemisk sørestaurering, udvælges sedimentovervågningsstationerne til analyse af sedimentets fosforpuljer normalt ud fra søens dybdeforhold /7/ (Figur 1, venstre). Denne tilgang risikerer dog at forskelle i sedimentets beskaffenhed overses. Søer med heterogent sediment kan

Tabel 1. Oversigt over de seks sedimentstationer med information om stationernes dybdemæssige placering (m), stationernes arealdække (m2) og stationernes relative dækning af søbunden, som antages at frigive P (%).

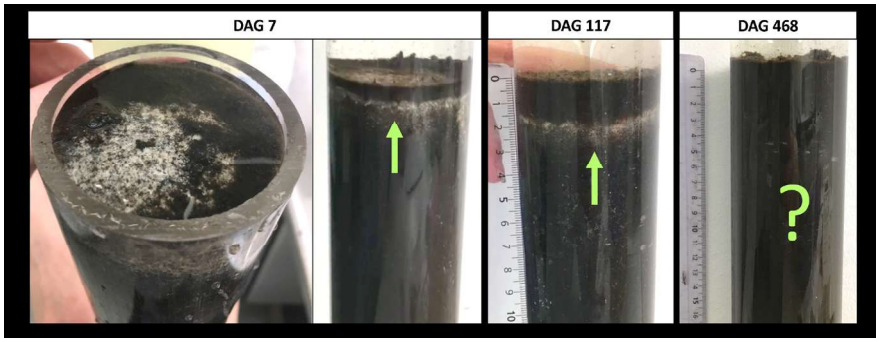
Station	Dybde (m)	Arealdække (m²)	Relativt arealdække af områder med antaget fosforfrigivelse (%)
1	2,2	14.222	17.0
2	2,5	21.804	26.1
3	7,6	18.192	21.8
4	< 1	9.129	10.9
5	3	3.700	4.4
6	2,8	16.468	19.7

bestå af både hårde og sandede områder med lavt fosfor-indhold, og af områder med meget blødt sediment med høj andel af organisk stof, som ofte indeholder mere fosfor /8/, og derved risikeres potentielt vigtige områder til vurderingen af sedimentets samlede fosfor pulje at blive overset. Undersøgelser af søsedimenters hårdhed omfatter traditionelt manuelle arbejdsindsatser, men sonaranalyser har i andre søer vist sig at have potentiale til at opnå information i høj opløsning om søsedimenters regionale hårdheder. Dette er blandet andet set i den ca. 900 hektar store retablerede Filsø /8/.

Ved den officielle forundersøgelse i Lyngsø (2018) blev søens potentielt mobile fosforpulje anslået til ca. 600 kg /9/, hvilket indikerede et behov for at tilsætte 60 tons Phoslock (se Faktaboks). For at få et mere detaljeret billede af søens sedimentforhold scannede vi i marts 2020 søen med sonar, for at kortlægge eventuelle forskelle i overfladesedimentets densitet (Figur 1 højre), hvilket tillod os at udpege seks stationer med forskellig sedimenthårdhed, der tilsammen kunne repræsentere hele søbunden (Tabel 1, søkortet med zoneopdeling på figur 4). I kraft af disse undersøgelser fandt vi en potentielt mobil fosforpulje på ca. 450 kg, hvilket medførte at Phoslockdoseringen kunne nedjusteres til omtrent 45 tons, som blev udbragt i december 2021 (Figur 2).

Visuel inspektion af Phoslock

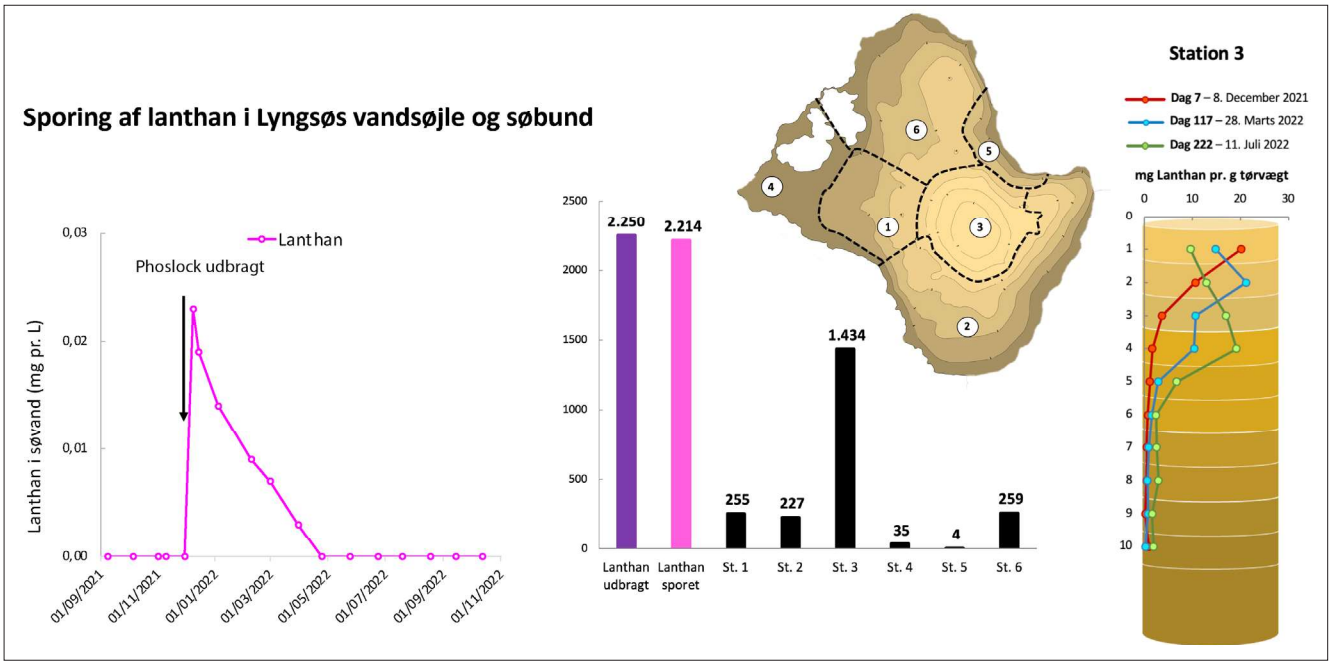
Vores første indsamling af sedimentkerner til undersøgelse af lanthanfordelingen i overfladesedimentet blev gennemført syv dage efter Phoslockudbringningen i december 2021. Ved visuelle inspektioner af intakte sedimentkerner (udført forud for de kemiske analyser af kernernes lanthan og fosforindhold) var det på dette tidspunkt muligt at se det lyse Phoslocklag i sedimentet fra alle stationerne, hvor det primært kunne ses i det øverste sedimentlag (Figur 3). Eneste undtagelse var station 5, som er placeret på en af søens stejle sandede skråninger. Dette tyder på, at Phoslock udbragt på skrånende områder hurtigt er blevet flyttet ud på dybere og mere flade områder i søen. I marts 2022 (117 dage efter udbringningen) kunne det lyse lag ses et par cm nede i profilerne, og i juli 2022 (222 dage efter udbringningen) kunne der stadig anes svagt lyse bånd dybere nede i sedimentet i de fleste kerner. Dette tyder altså på, at Phoslocken efterhånden synker ned i sedimentet, eller at nyt overfladesediment aflejres oven på Phoslocklaget. På kernerne indsamlet i marts 2023 (efter 468 dage) kunne Phoslock ikke længere ses med det blotte øje.



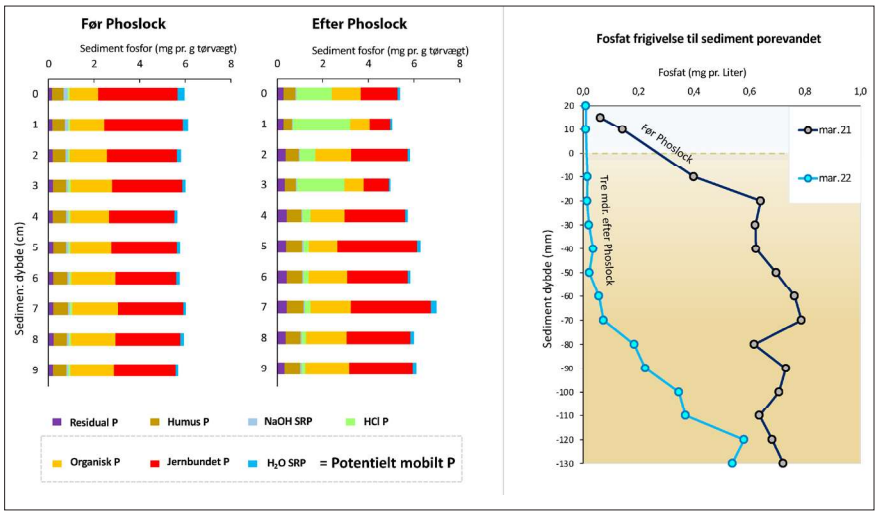
Figur 3. Sedimentkerner fra station 6, indsamlet på forskellige tidspunkter efter udbringningen. Phoslock ses som det hvide lag der er fremhævet med pile. Syv dage efter udbringning (d. 8. december 2021) kan laget tydeligt ses i de øverste sedimentlag. 117 dage efter (i marts 2022) kan laget stadig anes ca. 2 cm nede i sedimentet, mens det efter 468 (i marts 2023) ikke længere var muligt at se det hvide Phoslock-lag med det blotte øje. Fotos. E. Polauke.

Kvantitative analyser af lanthan

I perioden før og efter Phoslockbehandlingen blev der hyppigt målt på Lanthan i søvandet (Figur 4, venstre). I april 2022, fem måneder efter udbringningen, blev der ikke længere detekteret lanthan i vandsøjlen og koncentrationen var generelt relativ lav selv under udbringningen og dermed uden fare for toksiske effekter. Efter udbringningen har vi flere gange undersøgt de seks stationers lanthan-



Figur 4. Koncentration af lanthan (mg pr. L) målt i vandsøjlen før og efter Phoslock udbringningen (venstre). Lanthan-indholdet (kg) målt i sedimentet i juli 2022 er beregnet som summen af lanthanpuljerne fundet på de seks stationer skaleret til deres relative dækningsgrader og videre relateret til det totale søareal (midt). Lanthankoncentrationerne målt i de forskellige sedimentlag i kerner fra Station 3 undersøgt ved forskellige målekampagner (højre).



Figur 5. Den relative sammensætning af forskellige fosforformer (P) i sedimentet (målt ved sekventiel fosforekstrahering) på Station 3 før (marts 2021) og efter (marts 2022) Phoslock udbringningen (venstre), og sedimentets fosfat-frigivelse til porevandet ligeledes undersøgt før (marts 2021) og efter (marts 2022) Phoslock udbringningen ved brug af DGT-analyser (højre).

og fosforindhold i sedimentkerner skåret op i 1 cm intervaller. For at validere, at vi kunne genfinde den udbragte lanthan, brugte vi de seks stationer relative andel af det totale søareal. Undersøgelsen viste, at vi ved brug af disse 6 stationer kunne estimere en total lanthanpulje på 2.214 kg ud af de omtrent 2250 kg lanthan, som blev udbragt i december 2021 (Figur 4 midt).

Da lanthan ikke blev fundet i vandfasen efter april 2022, tyder det ikke på, at der har været resuspension af lanthan til vandsøjlen. Alligevel fandt vi forskelle i lanthanindholdet på de fem stationer placeret på mere end 2 m vand, som ellers burde have modtaget samme mængder Phoslock (Figur 4 midt). Mest Phoslock findes på områder repræsenteret af station 3, der dækker søens dybeste område.

Sedimentanalyserne af lanthanets vertikale fordeling i sedimentet fra station 3 viste, at Phoslock hurtigt blev blandet ned i sedimentets øverste 4-5 cm, sandsynligvis via fisk og bunddyr, der søger føde og huserer i overfladesedimentet (Figur 4 højre). Samtidig kunne det ses, at lanthankoncentrationerne i de øverste sedimentlag blev lavere over tid, hvilket indikerer en kombination af opblanding i sedimentet samt udsedimentering af nye partikler fra vandsøjlen.

Sedimentets fosforpuljer og fosfordynamikker

Analyserne af sedimentets fosforpuljer viser generelt, at puljen af jernbundet fosfor (rød) var mindre i 2022 end i 2021 i de øverste lag, og samtidig steg den fosforpulje (HCl-P), hvor Lanthanbundet fosfor forventes at findes /10/. Yderligere, blev der fundet et højt indhold af lanthan i de øvre sedimentlag (Figur 4 højre).

Sedimentets evne til at frigive fosfor blev også målt både før og efter Phoslockbehandlingen (Figur 5 højre). Dette blev målt via teknologien 'Diffusive gradients in thinfilm', hvori en fosfatadsorberende gelmembran nedsættes i en uforstyrret sedimentkerne, og over tid absorberer fosfor fra sedimentets porevand. Dette er således en måde at vurdere Phoslocks evne til at reducere porevandskoncentrationen af uorganisk fosfat, og dermed også den potentielle mindskede diffusion fra sediment til vandet i søen. På den dybeste station målte vi efter udbringningen markant lavere fosforkoncentration i porevandet øverste 7 cm sammenlignet med det ubehandlede søsediment i marts 2021. Dermed ser effekten på porevandets fosfatindhold ud til at passe fint med Lanthanindholdet i sedimentet.

Status og erfaringer

Tilsætningen af Phoslock til Lyngsø ser ud til at have haft den ønskede effekt på sedimentforholdene, så der kan opnås en mindsket intern fosforfrigivelse. Vores udvidede forundersøgelsesprogram med inklusion af sonar til stationsudvælgelsen i Lyngsøs heterogene sediment bidrog til en optimeret beregning af den nødvendige mængde Phoslock, som derved var med til at reducere omkostningerne forbundet med at indkøbet af Phoslock produktet. Fortsatte undersøgelser af sediments fosfordynamikker i relation til lanthans fordeling i sedimentet bør prioriteres for at vurdere behandlingens varighed, og samtidig øge vores system-økologiske forståelse af kemiske restaureringstiltag i fosforbelastede søer.

Referencer

/1/ Vandområdeplan 2015-2021 for Vandområdedistrikt Jylland og Fyn. Juni 2016. Miljø- og Fødevareministeriet Styrelsen for Vand og Naturforvaltning.

/2/ Spears, B., Mackay, E., Yasseri, S., Gunn, I., Waters, K., Andrews, C., Cole, S., De Ville, M., Kelly, A., Meis, S., Moore, A., Nürnberg, G., van Oosterhout, F., Pitt, J., Madgwick, G., Woods, H., Lürling, M. A meta-analysis of water quality and aquatic macrophyte responses in 18 lakes treated with lanthanum modified bentonite (Phoslock®), Water Research, Volume 97, 2016, P. 111-121.

/3/ Tempest, O. Smart water magazine. "Phoslock significantly reduces available phosphorus concentrations, improving water quality". May 2023. https://smartwatermagazine.com/news/phoslock-environmental-technologies/phoslock-significantly-reduces-available-phosphorus

/4/ Reitzel, K., Jensen, H S, Syddansk Universitet. Test af det fosfat-bindende lerprodukt "Phoslock®" i laboratorieskala. By- og landskabstyrelsen, Miljøministeriet.

/5/ Egemose, S., Jensen, H S., Reitzel, K. Erfaringer med aluminiumbehandling af danske søer. Miljøministeriet, Naturstyrelsen. 17. Maj 2011.

/6/ Søndergaard, M., Reitzel K., Jensen, H. J. 2023. Sørestaurering: ny metode i Lyngsø. Dette nummer af Vand og Jord.

/7/ Søndergaard, M., Reitzel, K., Jeppesen, E., Egemose, S., Lauridsen, T., Jensen, H. Vejledning for gennemførsel af sørestaurering. Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi. Nr. 382, 2020.

/8/ Kragh, T., Sand-Jensen, K., Petersen, K., Kristensen, E. Fast phosphorus loss by sediment resuspension in a re-established shallow lake on former agricultural fields. Ecological Engineering. Volume 108, Part A, November 2017, Page 2-9.

/9/ Skovgaard, H og Carl, J D. Orbicon. Restaurering af Lyngsø. Forundersøgelse af mulighederne for sørestaurering i Lyngsø. Silkeborg Kommune.

/10/ Reitzel, K., Lotter, S., Dubke, M., Egemose, S., Jensen, H., Andersen, F. Effects of Phoslock® treatment and chironomids on the exchange of nutrients between sediment and water. Hydrobiologica (2013). 703:189-202.

Emma Polauke, Ph.d.-studerende ved Biologisk Institut, Syddansk Universitet emmap@sdu.dk

Theis Kragh, Lektor ved Biologisk Institut, Syddansk Universitet tkragh@biology.sdu.dk

Cecilie Wagner Møller, Specialestuderende ved Biologisk Institut, Syddansk Universitet

Martin Søndergaard, Professor, Institut for Ecoscience, Aarhus Universitet ms@ecos.au.dk

Kasper Reitzel Lektor ved Biologisk Institut, Syddansk Universitet Reitzel@biology.sdu.dk