

FOSFOR- KREDSLØBET

og fremtidens sørestaurering

Forfatterne



Sofie Emilie Svendsen Kamlarczyk er bachelor-studerende i biologi ved Syddansk Universitet.

Artiklen her udgør sammen med tilhørende undervisningsmateriale hendes bachelorprojekt, der er udført under vejledning af Kasper Reitzel og Theis Kragh. Sofiesvendsen@me.com



Kasper Reitzel Jensen er lektor ved Biologisk Institut, Syddansk Universitet. Reitzel@biology.sdu.dk



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

Denne artikel omhandler fosforkredsløbets relevans for det omfattende forsknings- og restaureringsprojekt i den midtjyske Ormstrup Sø.

Forfatterne ser på fosforforurening og fosfor som ressource, samt en kemisk og biologisk gennemgang af fosforkredsløbet.

Dårlig økologisk tilstand og iltsvind i søer er generelt forbundet med belastning med næringsstoffer fra oplandet, og især næringsstoffet fosfor, i form af fosfat, udgør den store synder. Omkring 75% af Danmarks søer har enten en moderat, dårlig eller ringe økologisk tilstand vurderet ud fra EU's vandrammedirektiv, der fastlægger rammerne for beskyttelse af Danmarks vandområder.

Målet for EU's vandrammedirektiv fra 2000 er som minimum at opnå en "god" økologisk tilstand i de danske søer senest i udgangen af først 2015, derefter 2021 og nu 2027. Det er dog indtil nu kun omkring 1/4 af alle danske søer, der opfylder dette minimumskriterium. Udover at være et næringsstof, der kan forurene søer, så er fosfat også en globalt begrænset og værdifuld

ressource. Verdens fødevareproduktion er dybt afhængig af fosfor, og i lighed med olie kontrollerer få lande uden for EU hovedparten af verdens fosforreserver. I modsætning til olie, der kan erstattes af vind- og solenergi, findes der ingen erstatninger for fosfat. I den globale fødevareindustri bruges fosfat som gødning til afgrøderne for at fremme udbyttet. Den skæve fordeling af fosforreserverne kan i krisesituationer og i fremtiden give anledning til geopolitiske konflikter. Således har krigen i Ukraine her i 2022 medvirket til rekordhøje priser på råfosfat og gødning generelt.

Når man tager i betragtning, at fosfor forventes at blive en begrænsning for verdens fødevareproduktion indenfor en nær fremtid, kan det synes som et dilemma, at fosfor går til spildevand som forurening i vore søer.

Den midtjyske Ormstrup Sø er ikke en undtagelse, hvad angår ringe vandkvalitet. De seneste 2 år har Ormstrup Sø været omdrejningspunkt for et stort forskningsprojekt, der skal bane vejen for fremtidens sørestatueringer. I projektet er det ambitionen at forbedre søens vandkvalitet samtidig med, at den værdifulde fosfat genanvendes. For at kunne genoprette forurenede søer er det essentielt at kende til de kemiske og biologiske principper, der ligger til grund for søens tilstand. Denne artikel handler derfor om fosforkredsløbets grundprincipper og dets relevans for vandkvaliteten i en sø som Ormstrup Sø.

Årsager til fosforforurening

I ferskvandssystemer er det primært fosfor, der er det begrænsende næringsstof for primærproducenterne, der blandt andet udgøres af undervandsvandplanter



Foto fra Ormstrup Sø med en algeopblomstring af blågrønalger, der lægger sig som en grøn malerfilm i overfladen af søen.
Foto: Theis Kragh

(makrofytter) og mikroalger (fytoplankton).

Der er forskellige årsager til, at fosfor naturligt forekommer i begrænsede mængder i ferskvandssystemer. Først og fremmest tilbageholdes meget fosfat i rodzonen (de jordlag, hvor der findes planterødder) på land, og den mængde opløst fosfat, der tilføres søen, bliver hurtigt optaget/bundet til andre komponenter. Nedbør indeholder meget lidt fosfor, så herigennem tilføres ikke betydelige mængder.

I naturen udvaskes opløst fosfat til det ferske miljø via forvitring af fosforrige bjergarter. Størstedelen af naturligt tilført fosfat i danske ferskvandssystemer stammer dog fra interne nedbrydningsprocesser i søen, hvor organisk fosfat igen frigives på opløst, uorganisk form

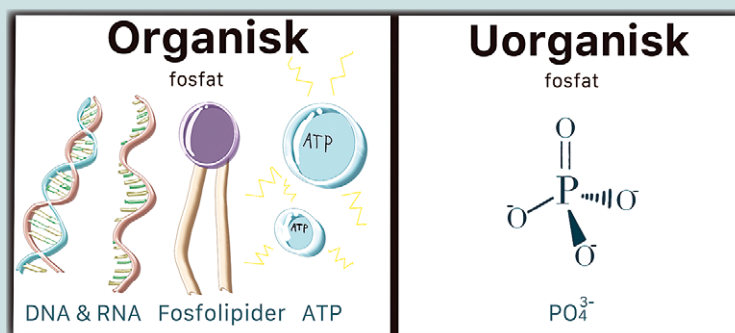


Illustration: Sofie Kamlarczyk

Fosfor findes som organiske og uorganiske forbindelser. Den uorganiske orthofosfat (til højre på figuren) er den eneste tilgængelige fosforforbindelse, som planter kan udnytte. Når primærproducenter som mikroalger benytter fosfat til deres produktion, indbygges det i organisk stof og indgår blandt andet i cellernes DNA, RNA, fosfolipider og ATP (figuren til venstre).



Blågrønalge-opblomstring i Ormstrup Sø.
Foto: Theis Kragh

Algeopblomstringer

Fytoplankton (mikroalger) er primærproducenter, der lever frit i vandsøjlen i både det marine og ferske miljø. De kan formere sig hurtigt via ukønnet forering, og de nyder godt af næringsstoffer som fosfat. Man kan derfor i næringsrige søer med høje fosfatkoncentrationer se store opblomstringer af fytoplankton på nogle tidspunkter af året. Foråret og forsommeren giver med en øget mængde sollys og varmere vand gode betingelser for fytoplankton-opblomstringer. Om efteråret kan der også forekomme store fytoplankton-opblomstringer, da efterårets omrøring af vandsøjlen gør fosforpuljer, der har ophobet sig i søens bundvand om sommeren, tilgængelig for fytoplanktonet. Når der er en stor biomasse af fytoplankton, vil vandet i søen fremstå uklart og grønligt. I nogle tilfælde, som på billedet, skyldes dette en opblomstring af blågrønalger (cyanobakterier), der også nyder godt af de næringsrige forhold. Opblomstringer af blågrønalger ses særligt i varme sommerperioder, da de er varmeelskede, og i søer, hvor kvælstof er det begrænsende næringsstof. Blågrønalger har evnen til at fiksere kvælstof, hvor gassen dinitrogen omdannes til plantetilgængeligt ammonium, der kan benyttes til algerne produktion. Evnen til at kvælstoffiksere giver derved blågrønalgerne en fordel, i forhold til andre primærproducenter, hvis der forekommer en kvælstofbegrænsning i søerne. Nogle arter af blågrønalger kan udskille cyanotoxiner, der er giftige for søens øvrige liv.

Ved store fytoplankton-opblomstringer kan planter, der vokser på søens bund blive overskyggede og mangle sollys til deres produktion. En nedsat/mangelende produktion fra disse undervandsplanter kombineret med højere temperaturer og stillestående vand, kan i værste tilfælde følge til iltvind, hvilket især ses hos dybe, lagdelte søer om sommeren. Det mikroskopiske fytoplankton har derved en stor betydning for søens øvrige liv og økosystem.

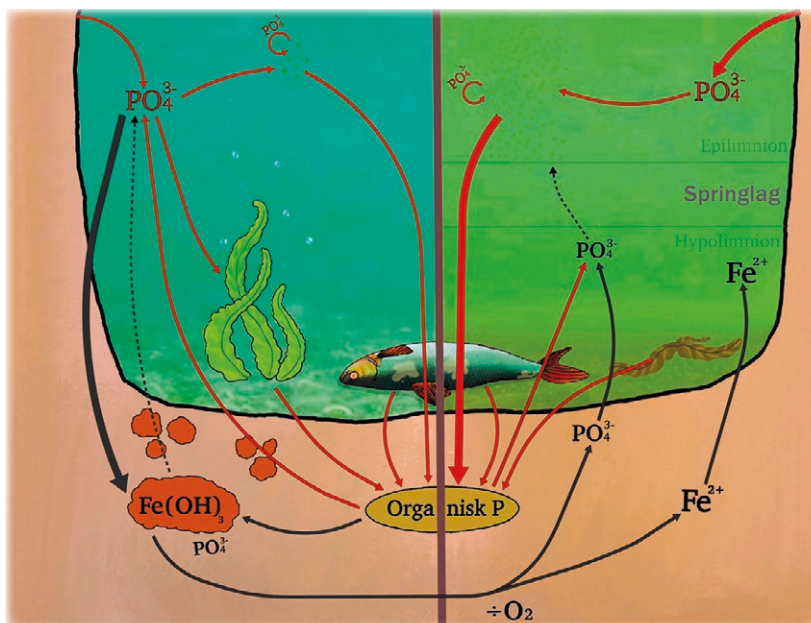


Illustration af fosforkredsløbet i en klar sø (venstre) og en uklar sø (højre). Store pile angiver, at en stor andel fosfat bevæger sig i pilens retning. Stiplede pile angiver, at en lille andel fosfat bevæger sig i pilens retning. Sorte pile illustrerer de processer, hvor fosfat bevæger sig til og fra sedimentets jernpulje

og recirkuleres. Det er dog langt fra størstedelen af fosfat-tilførslen i ferskvandssystemer, der i dag skyldes naturlige processer.

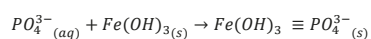
Landbrugsafgrøder er ligesom undervandsplanter og mikroalger afhængige af næringsstoffet fosfat, og derfor gøder mange landmænd deres marker med fosfatrig gødning. Mængden af tilført fosfat overstiger dog ofte den mængde, der fjernes med afgrøderne igen. Fosfat kan adsorberes til jern på overfladen af jordpartikler, og med en stor mængde tilført fosfat på markerne, kan der forekomme et stort tab af fosforrige jordpartikler til de omkringliggende vandløb og søer via jorderosion. Hvis mængden af tilført fosfat overskrider jordens bindingskapacitet, kan fosfat blive udvasket på opløst, uorganisk form. Derudover tilføres fosfat også til det ferske vandmiljø på opløst, organisk form, grundet udvaskning fra oplandet. I dag udgør fosfortilførslen fra markerne den største kilde til fosforforurening i Danmark.

En anden kilde til forurening med fosfor er byspildevand. Før 1987, hvor vandmiljøplanen

blev vedtaget med initiativer til rensning af spildevand, udgjorde byspildevandet den største kilde til fosforforurening. I dag renses spildevandet dog for fosfat og andre næringsstoffer i rensningsanlæg. I et rensningsanlæg skal spildevandet igennem forskellige rensningsprocesser, hvoraf én af disse er kemisk rensning. Under kemisk rensning tilsættes kemikalier, oftest indeholdende jern, der binder og bundfælder størstedelen af spildevandets fosfat, der til sidst ender i en slamfraktion.

Processer i en klarvandet sø

Søer kan sammenlignes lidt med naturlige rensningsanlæg: Fosfat kan under iltede forhold binde sig til søens jernpulje i sedimentet, hvor det danner tungtopløselige forbindelser med blandt andet oxideret jern (ferrijern). Naturligt bliver det fosforrige sedimentet i søen dog ikke manuelt fjernet, som slammet i et rensningsanlæg. Ved bindingen indtræffer følgende reaktion:



Fosfat adsorberes således til overfladen af de oxiderede jernhydroxider, hvilket hindrer, at fosfaten er tilgæn-

geligt for store fytoplankton-opblomstringer, der kan gøre søen uklar.

I en klarvandet sø er de to primære kilder til plantetilgængeligt fosfat i søen henholdsvis ekstern tilførsel fra oplandet samt fra intern nedbrydning og recirkulering af organisk bundet fosfat i søen. En del af det fosfat, der tilføres søen, vil enten være bundet til overfladen af jordpartikler fra oplandet eller vil hurtigt blive optaget af primærproducenterne og omdannet til organisk fosfor. Størstedelen af det tilførte fosfat vil dog bindes i søens sediment. Da meget af det tilførte fosfat i søen bindes til jern og gøres utilgængeligt for primærproducenterne, stammer størstedelen af det tilgængelige fosfat i søen fra ekskrementer og fra interne nedbrydningsprocesser i vandsøjlen, hvor fosfat "genbruges". Organisk materiale fra fytoplankton, undervandsplanter, fisk mm indgår i en nedbrydningsproces i både vandsøjlen og sedimentet, hvor organisk bundet fosfat igen frigives på dets uorganiske form. En sådan nedbrydningsproces, hvor næringsalte frigives af bakterier, kaldes mineralisering.

I mere næringsfattige, lavvandede søer har undervandsplanterne generelt en fordel i forhold til fytoplanktonet, fordi lys kan trænge igennem hele vandsøjlen. Undervandsplanterne er tæt knyttede til sedimentet, hvor de kan udnytte næringssaltene, der frigives fra nedbrydningsprocesserne til sedimentets porevand. Til sammenligning kan fytoplanktonet kun udnytte næringsstofferne i vandsøjlen. I en klarvandet, lavvandet sø, vil man derfor forvente at se mange undervandsplanter og en begrænset mængde fytoplankton.

Processer i den uklare sø

I dybe søer kan der om sommeren forekomme en temperaturlagdeling, hvor søens tungere og koldere bundvand placerer sig under søens lettere og varmere overfladevand. Herved inddeles vandsøjlen i tre zoner kaldet epilimnion, springlag og

Biologiske processer i vandsøjlen

Figuren viser en simplificeret illustration af fødekæden i vandsøjlen hos henholdsvis en klarvandet sø (øverst) og en uklar sø (nederst). I virkeligheden er der snarere tale om et fødenet end en fødekæde, da organismernes fødekilder overlapper afhængigt af deres livsstadie. Derudover er organismerne i vandsøjlen også forbundet med organismerne i bundvandet/sedimentet og fuglene i overfladen.

I den klarvandede sø holdes fytoplankton-bestanden nede via græsning fra zooplankton, der er små encellede dyr. Grundet tilstedeværelsen af undervandsplanter (makrofyter) i bundvandet har zooplanktonet mulighed for at søge skjul fra søens fredfisk om dagen og græsse på søens fytoplankton om natten. Fredfisk er fisk som skaller og brasen, der lever af små invertebrater. Undervandsplanterne i bundvandet er også til glæde for søens gedder, der kan stå på lur efter fredfisk i vegetationen. Aborre har også glæde af bundens vegetation, mens de er små og æder bunddyr, men jages ud i de frie vandmasser af gedderne, når de bliver større. Rovfiskene har endnu en fordel i det klare vand, da fiskene primært er afhængige af deres syn til jagt. Derved holdes mængden af zooplanktonædende fredfisk i skak, således at græsningstrykket på søens fytoplankton forbliver moderat.

I den uklare sø har en stor fytoplankton-opblomstring resulteret i, at bundens undervandsplanter er forsvundet. Derved kan søens zooplankton ikke søge ly for fredfiskene om dagen, og søens rovfisk kan ikke længere benytte vegetationen som jagtskjul. Det uklare vand giver også dårlige betingelser for rovfisk som aborre, der udelukken- de jager ved hjælp af synet. Aborren har derfor stor tilbagegang i uklare søer. Derudover er aborre

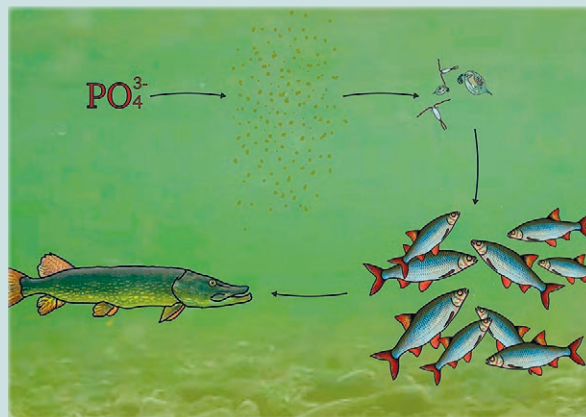
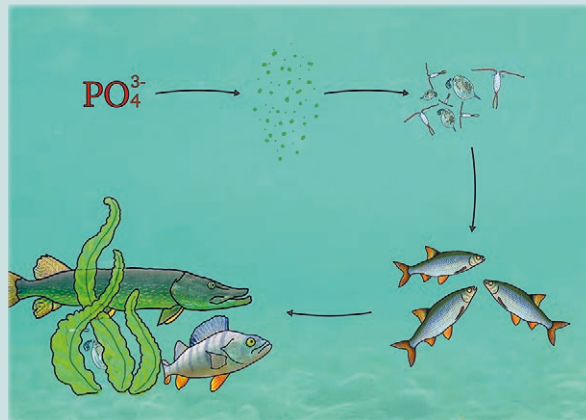


Illustration: Sofie Kamlarczyk.

som små også afhængige af søens bunddyr, hvilket der kan være begrænsede mængder af i uklare søer grundet iltsvind i bundvandet.

Manglen på rovfisk giver gode betingelser for søens fredfisk, der uforstyrret kan æde løs af de græssende zooplankton i søen, hvilket er til fordel for fytoplanktonet – herved opret- holdes søens uklare tilstand. Man har derfor i mange søer indført opfiskning af fredfisk som en del af søens restaurering, for at mindske presset på det fytoplankton-græssende zooplankton.

hypolimnion. Epilimnion udgør det varmere overfladevand, hvor sollys er tilgængeligt for primærproducenternes produktion, mens hypolimnion udgør det kølige bundvand nær sedimentet, hvor lyset ikke når ned. I springlaget forekommer der store temperaturændringer på korte afstande. Springlaget begrænser udvekslingen mellem overfladevandet og bundvandet, hvorved der skabes en næringsstof- og iltgradient i søens vandsøjle.

I den uklare sø resulterer den

store fosfortilførsel fra oplandet i store fytoplankton-opblomstringer i epilimnion. I dagtimerne overstiger fytoplanktonets produktion respirationen i overfladevandet, hvilket resulterer i en overmætning af ilt. Om natten overstiger fytoplanktonets respiration dets produktion, hvilket kan resultere i en undermætning af ilt i overfladevandet. Grundet de store mængder fytoplankton, vil koncentrationen af opløst fosfat i epilimnion som regel være lav. Her kan fytoplanktonets forbrug af

fosfat være større end tilførslen. Meget af det fosfor, der befinder sig i dette lag, er derfor typisk indbygget på organisk form i fytoplanktonet og opløst, uorganisk fosfat bliver også hurtigt optaget heri.

I søer med en meget stor fosforbelastning, som i Ormstrup Sø, kan der også ses en stor mængde opløst, uorganisk fosfat i epilimnion, på trods af store fytoplankton-opblomstringer. Selv i søer, hvor mængden af opløst, uorganisk

Cirkulær sø-restaurering

Der findes en række forskellige metoder, der kan tages i brug, når man ønsker at restaurere en sø. Disse metoder kan være fysiske (sedimentfjernelse), biologiske (opfiskning af fredfisk) og kemiske (iltning af sedimentet og tilsætning af kemikalier som aluminium samt phoslock, der binder fosfat uanset iltforholdene). Ofte får man det bedste resultat ved en kombination af metoderne. De nævnte metoder har begrænsninger, og de kan være omkostningstunge at gennemføre, selvom de typisk er brugt som engangstiltag.

Det er sjældent en god investering at restaurere en sø, hvis man udelukkende ser økonomisk på sagen. Ved at indtænke genanvendelsen af fosfor i regnestykket, kan sø-restaurering blive mere økonomisk interessant for både den enkelte sø-ejer og samfundet som helhed. Prisen på fosfor er nemlig stigende og må forventes at stige yderligere i fremtiden, da fosfor er en begrænset og ikke fornybar ressource. Derfor kan man ved at indtænke genanvendelse af fosfor som en del af en fremtidig, bæredygtig og cirkulær restaurering af vores søer slå to fluer med ét



Planteforsøg med genanvendt sediment fra Ormstrup Sø. Foto: Kasper Reitzel.

smæk i form af renere søer og genanvendelse af en kritisk ressource.

I sø-restaureringsprojektet i Ormstrup Sø ønsker forskerne at undersøge genanvendelsesmulighederne for fosfor. Når man fjerner de øverste og mest næringsrige lag af søens sediment vil man samtidig fjerne den største pulje af fosfor og reducere den næringspulje, der cirkulerer internt i søen. I dag deponerer man blot det fosforrige sediment, men tidligere forsøg i Orm-

strup Sø har vist, at det opgravede sediment potentielt kan bruges som plantegødning. For at kunne udnytte dette potentiale skal man finde metoder til, på en bæredygtig måde, at isolere og frasortere andre uønskede stoffer fra sedimentet. Udover at kunne genanvende fosfor fra sedimentet, håber forskerne, at det i fremtiden også vil blive muligt at genanvende fosfor fra vandsøjlen ved at opkoncentrere det på en plantetilgængelig form via filterings-systemer.

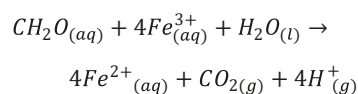
fosfat i epilimnion er lav, går fytoplanktonets vækst ikke helt i stå. Plantetilgængeligt fosfat frigives til de øvre vandlag via ekskrementer og nedbrydning i vandsøjlen samt via tilførsel fra oplandet. Derudover kan bevægelige fytoplanktonarter placere sig ved grænsen af springlaget for at øge optaget af uorganisk, opløst fosfat fra det næringsrige bundvand.

I hypolimnion forekommer der en større ophobning af fosfat og en lav iltmætning. Grundet den store fytoplankton-biomasse i epilimnion, øges mængden af organisk stof, der synker til bunds herfra. Nedbrydningen af de store puljer organisk materiale kan betyde, at respirationen kan overstige

ilttilførslen til bundvandet. Samtidig frigives der en øget mængde fosfat på opløst, uorganisk form i forbindelse med nedbrydningen. Det uklare vand forårsager, at bundplanter ikke kan overleve på søens bund, og disse kan derfor ikke bidrage til ilttilførslen i bundvandet via fotosyntesen. Springlaget hindrer også, at næringsstoffer og ilt udveksles mellem søens overfladevand og bundvand. Dette kan i sidste ende lede til iltsvind ved søbunden og en ophobning af næringsstoffer.

Når ilten i hypolimnion er opbrugt, benytter mikroorganismerne andre oxidationsmidler til nedbrydningsprocesserne. For eksempel reduceres ferrijern under iltfrie

forhold til ferrojern under følgende reaktion:



Denne reaktion kaldes jernreduktion. Her omdannes en del af søens oxiderede jernpulje til reduceret jern (ferrojern). Da fosfat ikke kan bindes til ferrojern, frigives det derfor igen fra sedimentet til bundvandet. Under efterårets omrøring vil det næringsrige bundvand opblandes med resten af vandsøjlen igen. Dette kan give anledning til en efterårs-opblomstring af fytoplankton, hvor det uorganiske fosfat fra bundvandet på ny indbygges på organisk form

i fytoplanktonet. Herved cirkulerer store fosforpuljer hele tiden mellem uorganisk og organisk form. Denne problematik ses også i Ormstrup Sø.

Ormstrup Sø – fremtidens sørestaurering

Ormstrup Sø er en midtjysk, lavvandet sø med en maksdybde på 5,5 meter. Søen har tidligere været klarvand, men er indenfor det seneste århundrede blevet uklar og meget næringsrig. Det skyldes sandsynligvis tidligere tilledning af spildevand fra det nærliggende Ormstrup Gods, udsætning og fodring af ænder samt belastning fra det opdyrkede landbrug i søens opland. På trods af søens lave gennemsnitsdybde på 2,3 meter er forekomsten af undervandsplanter ringe, og der ses periodevis lagdeling i søen om sommeren.

Lagdelingerne om sommeren er kortvarige, og der forekommer store iltsvingninger i særligt søens bundvand på blot få dage. Iltsvingningerne påvirker fosfats binding til

sedimentet, så det i iltfrie perioder frigives til vandsøjlen. Cirkuleringen af den store fosforpulje i søen har bevirket, at fytoplanktonet i søen snarere er begrænset af tilgængeligheden af kvælstof eller lys end af fosfor.

Ormstrup Sø er udpeget som én af 24 danske søer, der ifølge Miljøstyrelsens vandområdeplaner skal restaureres. Målet for restaureringen af Ormstrup Sø er, at søen opnår en god økologisk tilstand. Ormstrup Sø har siden 2020 været centrum for et stort, tværfagligt projekt støttet af Poul Due Jensen/Grundfos fonden. I forbindelse med projektet forventer man blandt andet i fremtiden at kunne skabe en detaljeret og dynamisk model over søen, der kan forudsige effekten af forskellige restaureringsindgreb og overføre erfaringerne til restaureringen af andre danske søer.

Mange forskellige økologiske parametre er i forbindelse med projektet blevet målt med en usædvanlig høj frekvens af prøvetagninger. Disse parametre går lige fra live

tracking af fiskeadfærd til udledning af drivhusgasser til generel vand- og sedimentkemi. Samtidig blev der i 2020 påbegyndt opfiskning af fredfisk i søen, som første led i restaureringsprocessen, hvor fire tons skaller blev fjernet fra søen. Fredfisk som skaller bidrager nemlig til at vedligeholde en stor bestand af fytoplankton og forværrer derved indirekte vandkvaliteten. Ved at undersøge fredfiskenes adfærd via live tracking håber forskerne at opnå viden om, hvordan man billigt og effektivt kan opfiske fredfisk fra danske søer i fremtiden.

Målet for projektet i Ormstrup Sø er også, at det skal være en model for fremtidens cirkulære tilgang til sørestaurering, hvor genanvendelse af fosfor er indtænkt som en naturlig del af restaureringsprocessen. Med det stærke, tværfaglige samarbejde i projektet, kommer der forhåbentligt i fremtiden endnu flere ideer til, hvordan den vigtige ressource fosfat kan genanvendes fra vore mange forurenede søer. ■

Videre læsning
Søndergaard, M. et al (2021): Ormstrup Sø: fremtidens sørestaurering. *Vand og Jord*. Nr. 2. 81-82.

Reitzel, K. et al (2021): Bæredygtig Søforvaltning: et paradigmeskifte i restaurering af søer. *Vand og Jord*. Nr. 2. 78-79.

Sand-Jensen, K. og Lindegaard, C. (2004): *Ferskvandsøkologi*. Gyldendal.

Christensen, L. M. Qu, H. Nielsen, G.U. Quist-Jensen, A.C. Reitzel, K.: Genindvinding af fosfat fra spildevand. *Aktuel Naturvidenskab*. Nr.5/2019.

Søndergaard, M. Jensen, H. Nielsen, R.J. Reitzel, K. (2015): Forundersøgelse af Ormstrup Sø. DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi. Nr.17

Undervisning:
Find arbejdsark til denne artikel på aktuelnaturvidenskab.dk

Nu kan du booke en lærerig ud-af-klassen-oplevelse

Hvis du underviser i Matematik, Informatik, Fysik, Kemi, Biologi eller Bioteknologi kan du benytte dig af vores mange undervisningsforløb, som er tilrettelagt til at supplere gymnasiernes kernestof.

Hvert år har vi besøg af hundredvis af gymnasieelever, der dykker ned i emner som:

- **Mikroplastik i havet**
- **Havets bæredygtige fødevarer**
- **Deep Learning - på opdagelse inden for kunstig intelligens**
- **Uendelighedsbegrebet**
- **Matematiske modelleringsforsøg med M&M's**
- **Outbreak - hvilken bakterie står bag sygdomsudbruddet?**
- **Idé til pille - prøv at udvikle et lægemiddel**

Læs mere om forløbene og book på sdu.dk/da/samarbejde/skoler_gymnasier

Du kan også booke ved at kontakte brobygningskoordinator Allan Haurballe Madsen på tlf. 65502988 eller ahm@sdu.dk

