

NATURVIDENSKAB OG TEKNOLOGI
DIREKTE FRA FORSKNINGSVERDENEN

AKTUEL *natur* VIDENSKAB

TEMA: SØRESTAURERING OG FOSFORKREDSLØBET

Jagten på den forsvundne drivhusgas

Aske fra energitræ er naturgødning

Elektriske felter fortæller
om faste stoffers indre

NR. 4 - 2022 SEPTEMBER: 50 KR.



Foto: Morten Rasch, KU

Nyt liv til Arktisk station

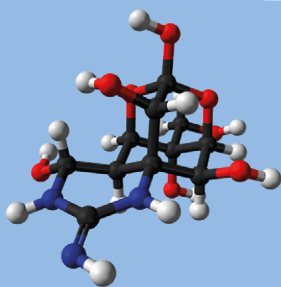
Efter at have været lukket i flere år, slog Arktisk Station i Qeqertarsuaq (som ligger på øen Disko i det vestlige Grønland) igen dørene op for forskere fra hele verden. Først satte Covid-19 en stopper for en stor del af de undersøgelser, som normalt foregår i Arktis, og dernæst har stationen holdt lukket på grund af en stor modernisering. Nu er antallet af sengepladser øget fra 26 til 39, der er kommet nye og topmoderne laboratorier til samt en slags lagerhotel, hvor forskerne fra år til år kan opbevare deres udstyr.

Kilde: Sermitsiaq.ag

Genvej til giftstof

Nogle dyr – såsom visse kuglefisk – producerer det potente giftstof tetrodotoxin (TTX), som forskere længe har været interesserede i at kunne fremstille syntetisk, da stoffet har nogle interessante egenskaber som potentielt smertestillende lægemiddel og middel mod heroinafhængighed. Molekylet, som består af carbon, oxygen, nitrogen og hydrogen arrangeret i fire sammenvævede ringe, er dog meget vanskeligt at syntetisere. Den hidtil bedste metode kræver en proces med hele 33 trin, hvor udbyttet er 0,5 % udbytte (dvs. forhold mellem reaktanter og produkt). Nu er det lykkedes forskere at strømline processen, så molekylet kan fremstilles i 22 trin og med et udbytte på 11 %. Med denne proces vil ifølge forskerne give adgang til at producere biologisk aktive stoffer afledt af tetrodotoxin.

Kilde: Nature/ Konrad, D. B. et al. Science 377, 411–415.



Voldsom haj

Ifølge en ny 3D-model af fortidshajen megadolon (*Otodus megalodon*), lavet

af et internationalt forskerhold, var bæstet 16 meter langt og vejede 61 tons. Forskerne vurderer, at den kunne svømme 1,4 meter i sekundet og kunne æde et op til 8 meter langt bytte på en gang, svarende til størrelsen på en moderne spækhugger.

Kilde: Cooper et al., Doi: 10.1126/sciadv.abm9424



Illustration: J.J. Graido

Quizzen

Hvorfor er processen denitrifikation ikke en sandsynlig forklaring på, at der fjernes lattergas (N_2O) fra overfladevandet i oceanerne?

- A) Fordi denne proces slet ikke forekommer i oceanerne
- B) Fordi denitrifikation kræver iltfrie forhold
- C) Fordi denitrifikation ikke fjerner, men kun producerer N_2O

Læs svaret i artiklen Jagten på den forsvundne drivhusgas.

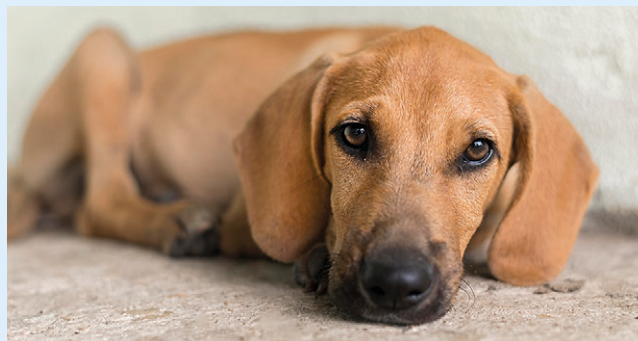


Foto: Colourbox

Hundevelfærd med en pris

I et nyt studium sammenligner forskere fra Københavns Universitet velfærden hos den moderne familiehund med den såkaldte landsbyhund. I mange lande findes landsbyhunde, som går frit rundt blandt beboerne i en landsby uden at høre til hos én bestemt familie, og som ofte er lidt forhutlede og i en dårlig ernæringsstilstand. En dansk familiehund vil til sammenligning have høj velfærd på mange parametre, men de lider ofte af ensomhed og urealistiske sociale forventninger fra ejerne, som i sidste ende kan føre til angst, depression eller aggressiv adfærd. Problemer, som landsbyhundene typisk ikke har.

Applied Animal Behaviour Science, Vol. 251, 105640

Ørsted-pris til materialeforsker

Professor i materialekemi ved Aarhus Universitet Dorthe B. Ravensbæk har for nylig modtaget H.C. Ørsted Selskabets forskerpris på 50.000 kr. Hun får prisen for sit arbejde med at udvikle nye bæredygtige materialer til genopladelige batterier. Målet med hendes forskning er at finde effektive, billige og miljøvenlige alternativer til navnlig grundstoffet litium, som indgår i Li-ion batterier over alt. Prisen er indstiftet af H.C. Ørsted Selskabet og Langeland Kommune med støtte fra energiselskabet Ørsted.



Foto: Jacob Fredgaard Hansen

Fremtidens elektronik

Med 24 millioner kroner fra Innovationsfondens Grand Solutions-program skal Frede Blaabjerg fra Aalborg Universitet stå i spidsen for projektet AI-Power, der har til formål at øge effektiviteten af alverdens elektronik via algoritmer udviklet af kunstig intelligens (AI). Ud over Aalborg Universitet deltager en række industripartnere samt London South Bank University i projektet.

Kilde: Aalborg Universitet

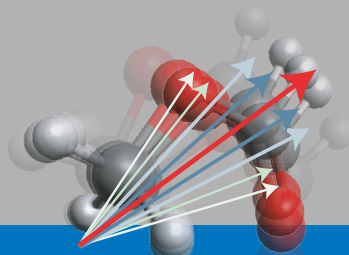
indhold



TEMA: Fosfor-kredsløbet og sørestauring

Et stort tværfagligt forskningsprojekt i Ormstrup Sø i Midtjylland er udgangspunktet for dette tema om fremtidens sørestauring. I tre artikler ser vi nærmere på fosfor-kredsløbet, på hvordan ny teknik sikrer mange og hyppige målinger, og hvordan dette giver et grundlag for at bygge en såkaldt digital tvilling af en sø.

8
10
16
20



Spontane elektriske felter fortæller om faste stoffers indre

Nye muligheder for at forstå hvordan et fast materiale ændrer sin struktur over tid.

24



Jagten på den forsvundne drivhusgas

Lattergas bliver for en stor dels vedkommende produceret i havet, men nogle steder på Jorden mangler det i overfladevandet. Nu vil forskere opklare mysteriet.

30

FORSKNING OG NYHEDER

- 4 KORT NYT
- 8 Virkelighedens problemer respekterer ikke faggrænser
- 10 Fosforkredsløbet og fremtidens sørestauring
- 16 Forskere streamer livet i søer
- 20 Søens digitale tvilling – et virtuelt laboratorium
- 24 Spontane elektriske felter fortæller om faste stoffers indre
- 30 Jagten på den forsvundne drivhusgas
- 35 Detaljer fra det sorte huls baghave
- 36 Aske fra energitræ er naturgødning
- 41 SERVICE og Bøger
- 44 BAGSIDEN:
Hilsen fra en stjernekuvøse

AKTUEL NATURVIDENSKAB

Udgiver

Aarhus Universitet, Faculty of Natural Sciences og Faculty of Technical Sciences, i samarbejde med:

- Det Natur- og Biovidenskabelige Fakultet, Københavns Universitet
- Det Naturvidenskabelige Fakultet og Det Tekniske Fakultet, Syddansk Universitet
- Det Ingeniør- og Naturvidenskabelige Fakultet og Det Tekniske Fakultet for IT og Design, Aalborg Universitet
- Roskilde Universitet

Ansvarshavende

David Lundbek Egholm, prodekan ved Faculty of Natural Sciences, Aarhus Universitet.

Redaktion

Redaktører Carsten Rabæk Kjaer og Jørgen Dahlgaard

Tlf.: 8715 2094 / 3036 0660 / 3036 0662

E-post: red@aktuelnaturvidenskab.dk

Hjemmeside: aktuelnaturvidenskab.dk



AALBORG UNIVERSITET



AARHUS
UNIVERSITET



KØBENHAVNS
UNIVERSITET



DET NATURVIDENSKABELIGE
FAKULTET



DET TEKNISKE
FAKULTET



Roskilde Universitet

SPONSOR-
ABONNENTER



Forskere afslører kæmpeægs ophav

Forestil dig at gå rundt ved siden af en to meter høj fugl med et enormt næb og en volumen svarende til en hest (cirka 200 kg). Det var virkelig heden for de første mennesker i Australien, der levede for 65.000 år siden.

Vores forfædre havde nemlig selskab af den i dag uddøde andefugl: *Genyornis newtoni* med det utrolige tilnavn "Demon Duck of Doom".

Fuglen kunne ikke flyve, men lagde til gengæld kæmpeæg på størrelse med meloner – tilsyneladende til stor glæde for fortidens mennesker, der formentlig gik på æggerov og nød godt af de vigtige proteiner, lyder det i et nyt studie udarbejdet af forskere fra Københavns Universitet i samarbejde med et internationalt forskerhold. Studiet er netop udgivet i tidsskriftet *PNAS*.



Til højre et emu-æg og til venstre ægget, som forskerne mener stammer fra "dæmonanden" *Genyornis newtoni*. Sidstnævntes æg vejer cirka 1,5 kg – mere end 20 gange så meget som et almindeligt kyllingeæg. Foto: Trevor Worthy

Netop de store æg har der været stor polemik om, siden forskere for 40 år siden fandt rester af æggeskallerne med 50.000 år på bagen. For indtil for nylig vidste man ikke, at æggene rent faktisk tilhørte "dæmonanden".

Siden 1981 har forskere verden over nemlig været i tvivl om, hvor æggeskallerne stammer fra. Nogle har foreslået *Genyornis newtoni*, mens andre forskere mener, at skallerne stammer fra *Progyura*-fuglen, der er en uddød art af megapoder, som er en familie af kyllinge-lig-

nende fugle på mellem fem og syv kg med store fødder.

Fortalere for *Progyura*-fuglen peger især på, at de fundne æggeskaller er små og derved ikke passer til størrelsen på den enorme *Genyornis newtoni*-fugl.

»Men vores analyse af protein-sekvenser fra æggene viser dog tydeligt, at æggeskallerne ikke kan stamme fra megapoder og *Progyura*-fuglen,« forklarer Josefin

Stiller, der er adjunkt på Biologisk Institut på Københavns Universitet og en af forskerne bag det nye studie.

»Det betyder, at det kun kan være *Genyornis*, og på den måde har vi løst en meget lang og ophedet debat om æggene ophav,« supplerer medforfatter og KU-professor Matthew Collins, der forsker i evolutionær genetik.

Ida Eriksen, Københavns Universitet

Simpel kemi mod plastproblem

En beholder med 225 °C varm alkohol tilsat lidt kaustisk kali kan være en forbløffende enkel løsning på en af de store udfordringer for den grønne omstilling: Hvordan genanvender vi de enorme mængder af polyuretan-affald, som produceres verden over? At det kan gøres så enkelt, kom også bag på de forskere ved Aarhus Universitet, der har udviklet og patenteret metoden som en del af det danske RePURpose-konsortium. Resultatet er netop publiceret i tidsskriftet *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*.

Polyuretan (PUR) er en gruppe af avancerede plastmaterialer, som har mange forskellige egenskaber og endnu flere anvendelser. Du finder det blandt andet i madrasser, møbler, køleskabe, sko, legetøj, maling, fugemasse, isolering, biler, vindmøller og flyindustrien. Desværre finder du det også i voldsomme mængder deponeret på lossepladser, for det



Eksempler på produkter af polyuretan sammen med de fire forskere, der nu har fundet en billig og enkel måde at genbruge materialet på.

Fra venstre: Steffan K. Kristensen, Martin B. Johansen, Bjarke Donslund og Troels Skrydstrup. Foto: Karoline T. Neumann.

er svært at genanvende PUR-affaldet. Det skyldes, at den kemiske struktur, som giver PUR dets styrke, betyder, at det ikke kan smelte. Man kan altså ikke bare støbe det om til nye produkter, som man kan med en række andre plastmaterialer.

Nu viser en simpel kemisk reaktion sig så at

være en del af løsningen: ved at lade PUR koge i væsken efter ovenstående opskrift i godt et par timer bliver det nedbrudt (depolymeriseret) til materialets oprindelige bestanddele – såkaldte amin-prækursorer og polyoler – og vel at mærke i så ren form, at de kan konkurrere med de råstoffer, som fabrikkerne bruger til at producere PUR.

Reaktionen kræver en autoklave, altså en trykkoger, for at komme op på de 225 °C, men hverken højt tryk eller dyre ingredienser. Forskerne er selv overraskede over, at det kan gøres så simpelt. De har som en del af konsortiet RePURpose arbejdet længe på grundide-

en, men med andre og dyrere kemikalier. De håber, at den nye teknologi kan danne basis for en cirkulær økonomi omkring polyuretan-industrien, hvor PUR produceres, bruges, genvindes og genanvendes til nye PUR-materialer.

Peter Gammelby, Aarhus Universitet

Ny membranteknologi gør spildevand til en ressource

En forskergruppe ved Aalborg Universitet har udviklet en type membranproces, der som en slags avanceret kaffefilter lader rent vand løbe igennem, mens giftige affaldsstoffer ophobes, inden de slipper ud i naturen. Membranteknologi anvendes allerede i dag til blandt andet spildevandsrensning og omvendt osmose til afsaltning af havvand. Det centrale ved det nye membran-system er, at spildevandet varmes op til 40-50 grader, mens det bliver filtreret – og det åbner helt nye muligheder, forklarer lektor Cejna Anna Quist-Jensen:

»Når spildevandet bliver varmt, bliver det filtreret meget effektivt i vores membranproces. Den nye proces er så effektiv, at affaldsstofferne tilbageholdes, og de værdifulde produkter krystalliserer og bliver til tørstof i stedet for slam, som det ellers typisk ender med at blive.«



Cejna Anna Quist-Jensen står med en beholder med nogle af de stoffer, der er udkrystalliseret i processen. Cejnas kollega adjunkt Aamer Ali holder membranen. Foto: Institut for Kemi og Biovidenskab, AAU

I dag bliver slammet eksempelvis brugt som gødning og spredt ud over markerne. Ulempen er, at slammet – fordi det ikke er helt rensat – også kan indeholde fosfor, skadelige tungmetaller og medicinrester. Den nye metode kan blandt andet udkrystallisere

fosforen fra spildevandet, og det gør det muligt at udnytte og genbruge fosforen. Det er godt af flere årsager: Dels havner fosforen ikke i vandmiljøet, og dels er verden ved at løbe tør for fosfor som ressource. Den fosfor, landbruget benytter sig af, bliver typisk udvundet af miner i Marokko, Rusland, Kina og USA, men inden for de næste 50 til 100 år løber minerne tør.

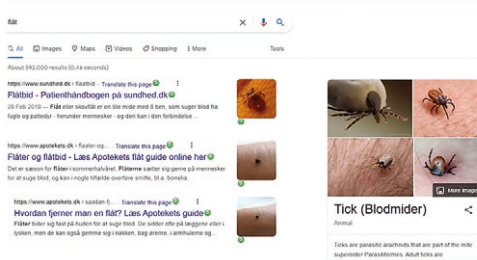
»Når vi kan udnytte spildevandet bedre og udkrystallisere rent fosfor med vores membranteknologi betyder det, at vi med tiden ikke længere vil behøve at hente fosfor op fra miner i jorden. Når vi effektivt kan trække det ud og genbruge alt det, der ellers ville gå til spildevand, har vi et stærkt kort at på hånden i forhold til kommende fødevarerkriser,« slutter Cejna Anna Quist-Jensen. Projektet er blandt andet støttet af Poul Due Jensen fonden, Danida og Innovationsfonden.

David André Højlund Graff, AAU

Flåt-googlinger hjælper videnskaben

Det er højsæson for flåter lige nu. Og det betyder, at vi googler mere efter information om de små, upopulære blodsugere end ellers. Selvom du sikkert ikke tænker over det, bidrager du faktisk til videnskabelig forskning om flåtters aktivitetsmønstre, når du søger på computeren. Det demonstrerer et studie fra Københavns Universitet.

For ved hjælp af online-værktøjet Google Trends har forskerne udtrukket data over, hvornår på året danskerne søger på ordene "flåt" og "tæge", og hvornår befolkningerne i ni europæiske lande har gjort tilsvarende over en periode på 10 år for bedre at kunne overvåge flåtternes spredning. Der hersker nemlig i disse år en formodning om, at klimaforandringerne vil bringe flere flåter og dermed flere sygdomme til nordlige lande som Danmark.



Ved at matche Google-søgningerne med vejrdata har forskerne efterfølgende analyseret, om de forskellige befolkningers google-søgninger stemmer overens med flåtternes sæsonmønstre de pågældende steder og dermed klimaforskellene. Længden af flåtters aktivitetsperiode afhænger nemlig af temperaturerne.

»Vi benytter os af, at mange personer, der bliver bidt af en flåt, formodentlig søger information om flåter ved at gå hen til deres computer og google. Vi kan så kigge på, hvor

i verden, der bliver søgt på hvad og hvornår,« siger Per Moestrup Jensen.

»Når man kigger ud i Europa, er der en meget tydelig sammenhæng mellem folks flåt-søgninger på Google og de lokale temperaturforskelle. Det bekræfter de sæsonmønstre, som vi antog, at flåterne har. Dataene viser blandt andet også mønstre i, hvor flåttsygdommen TBE findes. Så fordelingen af flåtternes sæsoner kan måske informere os om, hvilke sygdomme der kan eksistere og transporteres i de enkelte økosystemer,« siger Per Moestrup Jensen.

I Danmark lader det dog endnu ikke til, at der er sket forandringer i form af nye flåtmønstre eller etablering af nye flåtarter, men forventningen er, at det sker på et tidspunkt, lyder vurderingen fra Per Moestrup Jensen.

Maria Hornbek, Københavns Universitet

Hemmeligheden bag klar tale

Intet andet dyr taler og synger som mennesket, og det er der særligt én grund til: Evolutionen har forenklet vores strubehoved. Vi mangler den stemmemembran, som aber og menneskeaber har.

»Derfor kan vi tale og synge så klart og stabilt, som vi gør,« siger Ole Næsbye Larsen, zoolog fra SDU og medforfatter på et nye studie.

Opdagelsen overrasker, fordi evolutionen ellers ofte specialiserer eller optimerer evner ved at gøre anatomi og processer mere komplicerede – men denne gang er der altså tale om en simplificering.

»Det er helt klart en overraskelse. Vi har studeret menneskets anatomi i adskillige hundrede år og abernes også i et godt stykke tid, og det her er altså gået hen over hovedet på forskerne,« siger Ole Næsbye Larsen.

Studiet bygger på en række sammenlignende anatomiske undersøgelser af strubehoveder fra 44 arter af aber og menneskeaber. Det

viste sig, at der var stemmemembraner i alle strubehovederne undtagen dem fra *Homo sapiens*. Forskerne konkluderer derfor, at evolutionen har fjernet stemmemembranen fra mennesket på et tidspunkt, efter vi skiltes fra vores nærmeste slægtning, chimpansen, for seks millioner år siden.

Vanskeligere var det at bestemme stemmemembranens funktion, men et lykkeligt sammentræf gjorde det muligt: En japansk zoolog havde i anden anledning haft en chimpansé på operationsbordet for omkring 30 år siden. Den skulle have en kikkertundersøgelse og var i narkose. Opvågningsprocessen tog en halv times tid, hvor aben lå og gryntede lidt.

»Vore japanske kolleger fandt disse gamle optagelser frem og kiggede nærmere på stemmemembranens bevægelser, og pludselig gik det op for dem, at det var stemmemembranen, der udførte størstedelen af åbne-lukkebevægelserne og ikke stemmelæberne, som vi ellers gik og forestillede os!

Vi fandt derfor også andre ældre videooptagelser frem, blandt andet nogle kikkertundersøgelser, som jeg selv sammen med tyske og østrigske forskere havde foretaget på dødningehovedaber for omkring 20 år siden – og fandt samme resultat,« siger Ole Næsbye Larsen.

Den store gevinst ved at slippe af med stemmemembranen var, at vores sprog blev lettere at forstå. Matematiske modeller viste, at aber med stemmemembran lettere kan frembringe kraftige og højfrekvente lyde end mennesker. Til gengæld slår deres lyde let over i "støj", som vi kender fra barnegråd eller skrig.

»Mennesket skal bruge lidt mere energi på at frembringe en given lyd, når der ikke er nogen stemmemembran. Til gengæld producerer vi ikke "støj" og får en klarere og mere stabil stemme,« siger Ole Næsbye Larsen.

Birgitte Svennevig, SDU. DOI: 10.1126/science.abm1574

Mindre CO₂-fangst end troet

En af tilgangene til at begrænse udledningen af CO₂ til atmosfæren er at pumpe CO₂ ned i undergrunden og oplagre den der. Sådanne metoder til "carbon-capture" har været i brug længe, for eksempel i Sleipner-gasfeltet i Nordsøen, hvor CO₂ er blevet pumpet ned i undergrunden siden 1996.

Men hvor meget CO₂, det nøjagtigt har sparet atmosfæren for, er ikke så let at afgøre, da de virksomheder, der står for CO₂-fangsten, har forskellige tilgange til at måle, hvor meget CO₂, de gemmer væk på den måde. Og de mest detaljerede statistikker om carbon capture er baseret på oplagringsskapaciteten snarere end på, hvilken mængde der faktisk bliver afsat.



Foto: CC BY-SA 3.0

For at skaffe et mere realistisk billede har forskeren Yuting Zhang og kolleger fra Imperial College i London undersøgt lagringsraterne af CO₂ mellem 1996 og 2020 for 20 ud af de 26 faciliteter til CO₂-fangst, der findes i verden – herunder Sleipner-projektet.

Forskerne brugte offentligt tilgængelige data til at beregne mængden af CO₂, der blev oplagret, og vurderede, at faciliteterne samlet havde oplagret 197 megatons CO₂ i den 24-årige periode. Det svarer til, at rapporter baseret på lagringskapaciteten har overvurderet lagringen med 19-30 %, og vi har derfor ikke sparet atmosfæren for helt så megen CO₂, som vi gik og troede.

Forskerne opfordrer derfor til en standardisering af den måde, man rapporte-

rer CO₂-fangst på, så vi mere nøjagtigt kan monitorere, hvad dette tiltag i kampen mod klimaændringer reelt bidrager med.

CRK, Kilde: Nature/ Environ. Sci. Technol. Lett. 2022, 9, 8, 693–698

Drone på slap line

I juni måned i år præsterede forskere fra dronecentret på SDU for første gang i verden at koble en drone direkte på en højspændingsledning med 150.000 volt i en test i det centrale Odense, hvor den har hentet ny energi til sit batteri fra ledningen. Resultatet åbner for at anvende droner til både inspektion og opgaver direkte på de 7000 km højspændingsledninger. I kraft af et bedre overblik kan ledningsnettet udnyttes i langt højere grad end i dag, hvilket kan få afgørende betydning for den grønne omstilling og udbygningen af blandt andet vindmølleområdet i Danmark.

Projektleder Emad Samuel Malki Ebeid fra Mærsk Mc-Kinney Møller Institutet forklarer, at batteriopladningen sker ved hjælp af induktion. Forskerne har udviklet en letvægtstransformer til droner, som omslutter højspændingsledningen og inducerer strøm fra vekselstrømmen i ledningen via det magnetfelt, stærkstrømsledningen genererer. Styrken af dette magnetfelt afhænger



Foto: Emad Samuel Malki Ebeid

af strømstyrken i højspændingsledningen, og her taler vi om betydelige strømstyrker (500 – 1000 Ampere). »Det er første gang, vi tester på en rigtig elledning, efter at vi har testet dronen i HCA Airport gennem længere tid,« siger Emad Samuel Malki Ebeid.

Dermed fortsætter forskerne og projektlederen, hvor drone-kollegaerne fra SDU slap for nylig, da de satte sundhedsdroner fri i luften mellem Svendborg og Ærø for første gang.

SDU-dronen er udviklet i projektet Drones4Energy, som netop er afsluttet. Den specialdesignede drone er igennem flere år blevet testet og udviklet i lufthavnen i samarbejde med blandt andet Energinet. Projektet, der blev lanceret i 2018, er fulgt op af et nyt projekt ved navn Drones4Safety. Her er fokus på inspektion af broer og jernbaner, alt imens dronen lader batteriet op på ved at koble sig på de nærliggende elledninger.

Med den vellykkede test har forskerne demonstreret, at teknologien fungerer, lyder det fra projektlederen.

»Nu har vi vist, at vi kan lande på ledningen og lade direkte op. Det betyder, at vi kan lade sværme af autonome droner placere sensorer og inspicere ledningsnettet, som i dag skal afbrydes og inspiceres af mennesker ved brug af lifte og helikoptere,« siger Emad Samuel Malki Ebeid.

Jakob Haugaard Christiansen, SDU tek

Jordskælv set fra ballon

I udforskningen af planeter som Venus vil forskere gerne kunne bruge balloner i dens atmosfære, fordi Venus' overflade er for varm til, at måleinstrumenter og andet udstyr vil kunne overleve særligt længe. Eksempelvis vil forskerne gerne kunne måle lavfrekvente lydbølger, der breder sig i Venus' atmosfære, som stammer fra jordskælv i undergrunden. Sådanne målinger kan nemlig hjælpe med at afsløre detaljer om planetens indre struktur, såsom hvorvidt den er opbygget af distinkte lag.

For at teste, om denne tilgang har nogen gang på jord, har Rafael Garcia fra universitetet i Toulouse i Frankrig og kolleger analyseret data om atmosfærisk tryk indsamlet af et netværk af balloner sendt op i



Forskere i færd med at opsende en ballon udstyret med sensorer, der er i stand til at registrere jordskælv tusinder af kilometer væk.

Foto: CNES/SABLON Igor, 2021

Jordens øvre atmosfære. Forskerne fandt, at fire af ballonerne havde registreret trykforstyrrelser fra et jordskælv med en størrelse på 7,3 (på den såkaldte moment-magnitudeskala) nær Indonesien i december 2021. De fire balloner fløj alle indenfor en afstand af 3000 kilometer fra jordskælvets epicentrum i højder op til 20 kilometer over Jordoverfladen. Forskerne kunne ud fra måledataene identificere forskellige typer af seismiske bølger, og på den baggrund kunne de udlede jordskælvets størrelse og placering såvel som oplysninger om Jordens interne struktur. Resultatet antyder dermed, at tilsvarende balloner faktisk vil kunne bruges til at måle seismisk aktivitet på andre planeter.

CRK, Kilde: Geophysical. Res. Lett.



VIRKELIGHEDENS PROBLEMER

respekterer ikke faggrænser

Om forfatteren



Poul Toft Frederiksen er programchef for forskning hos Poul Due Jensen Fonden

Forskningen, som beskrives i temaet, er finansieret af Poul Due Jensens Fond og er en del af projektet: *Lake Stewardship (Monitoring af Ormstrup Sø 2020-2023)*, hvor flere danske universiteter indgår.

Intet økosystem på planeten er uberørt af menneskelig aktivitet. Og selv om vi skulle beslutte os for at "frede" områder, kan vi ikke regne med, at naturen finder tilbage til en sund tilstand af sig selv. Dertil er påvirkningerne fra tidligere indgreb og fremtidige klimaforandringer for voldsomme. Vi bliver nødt til at acceptere, at naturen nu er vores ansvar. Vi er ikke længere en del af naturen, vi er, med et gammeldags og lidt knirkende ord, naturens forvaltere. En forvalter laver ikke quick fixes – en forvalter har en opgave, der i princippet er uden udløbsdato.

Med det in mente kan man blive mere trist end overrasket, når man kommer forbi en sø, der ligner en gigantisk grydefuld ærtesuppe. Den er rent ud sagt klam. Vi kender årsagen, masser af næringsstoffer. De vigtige er kvælstof og fosfor. Kvælstof er en i praksis ubegrænset ressource og kan i bedste fald tilbagedannes til inert atmosfærisk

kvælstof. Anderledes med fosfor. Det er en begrænset ressource, og hvis det ikke skylles ud og laver ballade i å- og havmiljø, så bliver det i søen.

En enkelt sø – mange spørgsmål

I et stort, tværfagligt projekt centreret om Ormstrup Sø i Midtjylland, stiller vi overordnet det enkle spørgsmål: Kan vi genskabe en klar sø fuld af biodiversitet ved at fjerne fosfor og bringe det hen, hvor det gør gavn, ud på markerne?

Enkle spørgsmål er aldrig enkle ret længe, når først de kloge forskere tager fat. Vi har derfor arbejdet med spørgsmål som:

- Hvad vil det sige at genskabe en sø? Hvordan så den ud før i tiden?
- Hvordan har søen det egentlig? Hvordan er fysikken, kemien, biologien og økologien i dag – og hvor vil vi have den hen?
- Kan vi bygge en model af en sø

– en digital tvilling – som er så præcis, at vi kan bruge den til at "forvalte" søen?

- Hvordan skal vi få fosfor væk fra søen, og hvordan kan det anvendes?
- Og ikke mindst, det spørgsmål alle frygter – hvad koster det?

Vi skal bruge mange forskellige naturvidenskabelige discipliner for at få fyldestgørende svar på alle disse spørgsmål, og vi skal supplere med IT- og ingeniørkunst. Endelig skal vi lave samfundsøkonomiske analyser af vores handlinger, for til syvende og sidst skal nogen – vi – til lommeerne for at investere i en sundere natur, og det skal gøres klogt. For virkelighedens problemer respekterer ikke faggrænser.

De tre følgende temaartikler i dette nummer har alle udgangspunkt i projektet i Ormstrup sø. I kommende numre vil vi følge op med nye artikler, efterhånden som projektet og vores viden udvikler sig. ■



KLAR TIL BRUG
1. OKTOBER 2022

FOSFOR FRA PROBLEM TIL LØSNING

Søer som fosforminer
Søens digitale tvilling
Design en sø-robot

Tre nye cases til ungdomsuddannelser i hele landet! Mød forskerne fra artiklerne i introduktionsfilmene og brug deres data. Problemstillinger, film og materialebank er gratis og kan downloades på nvhus.dk fra den 1. oktober 2022. Brug det, når du vil.

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 fødevarerproduktion 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 fødevarerindustri 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 fødevarerproduktion 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

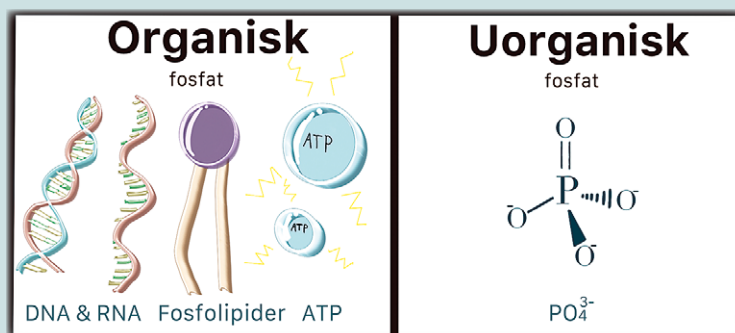


Illustration: Sofie Kamlarczyk

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/manglende 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.

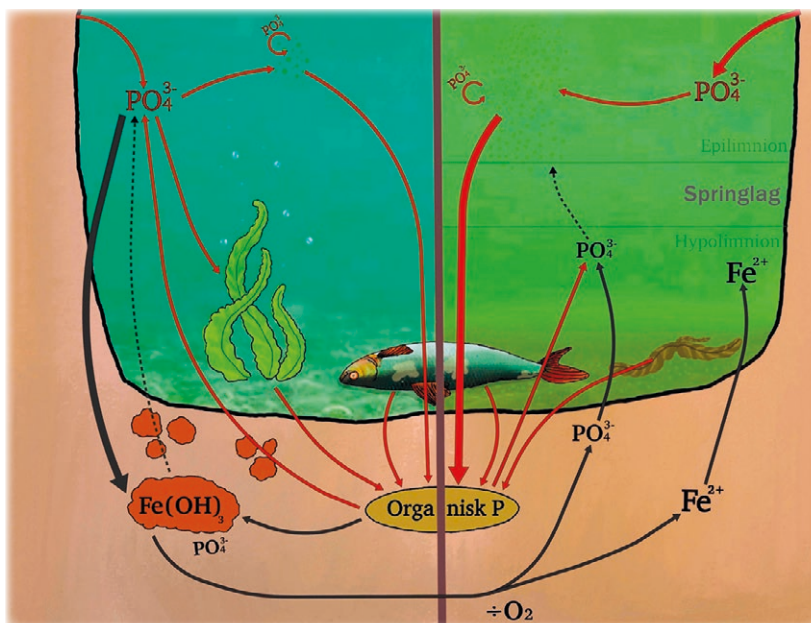


Illustration af fosforkredsløbet i en klar sø (venstre) og en uklar sø (højre). Store pile angiver, at en stor andel fosfat bevæger sig i pilens retning. Stiplede pile angiver, at en lille andel fosfat bevæger sig i pilens retning. Sorte pile illustrerer de processer, hvor fosfat bevæger sig til og fra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

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

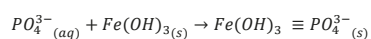
Landbrugsafgrøder er ligesom undervandsplanter og mikroalger afhængige af næringsstoffet fosfat, og derfor gøder mange landmænd deres marker med fosfatrig gødning. Mængden af tilført fosfat overstiger dog ofte den mængde, der fjernes med afgrøderne igen. Fosfat kan adsorberes til jern på overfladen af 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 (makrofytter) 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

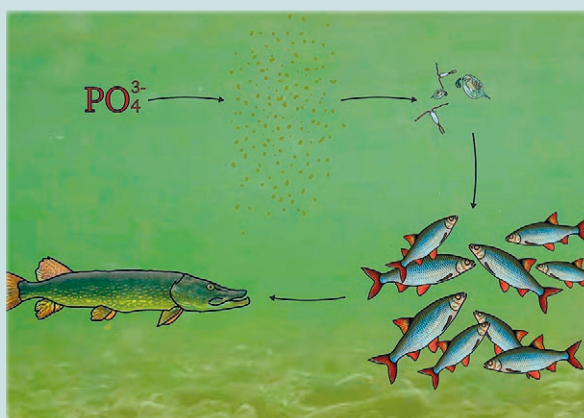
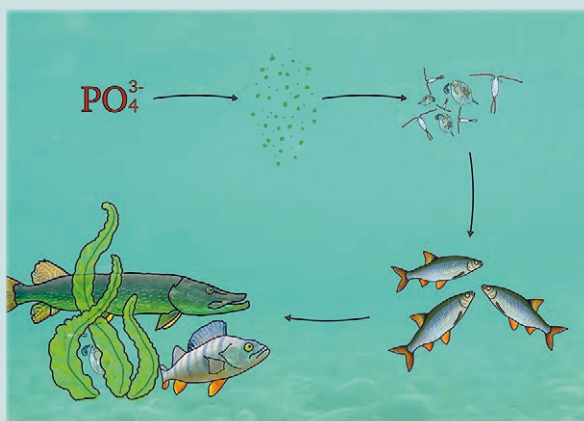


Illustration: Sofie Kamlarczyk.

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.

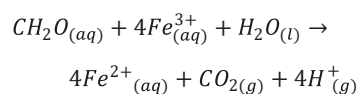
fosfat i epilimnion er lav, går fytoplanktonets vækst ikke helt i stå. Plantetilgængeligt fosfat frigives til de øvre vandlag via ekskrementer og nedbrydning i vandsøjlen samt via tilførsel fra oplandet. Derudover kan bevægelige fytoplanktonarter placere sig ved grænsen af springlaget for at øge optaget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

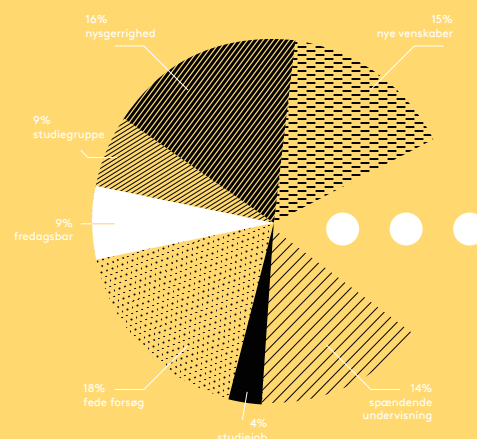
Hvis du underviser i Matematik, Informatik, Fysik, Kemi, Biologi eller Bioteknologi kan du benytte dig af vores mange undervisningsforløb, som er tilrettelagt til at supplere gymnasiernes kernestof.

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



FORSKERE STREAMER LIVET I SØER

Et tværfagligt projekt i Ormstrup sø anvender en avanceret, automatisk målebøje til kontinuerligt at måle vandkvalitetsrelaterede data, mens fiskenes adfærd overvåges med speciel teknologi. Søens tilstand live-streames direkte til forskernes pc og giver en bedre indsigt i søers økosystemer og deres dynamik.

Om forfatterne



Anders Nielsen er seniorforsker ved Sektion for Søkologi, Aarhus Universitet
an@ecos.au.dk



Martin Søndergaard er seniorforsker ved Sektion for Søkologi, Aarhus Universitet
ms@ecos.au.dk



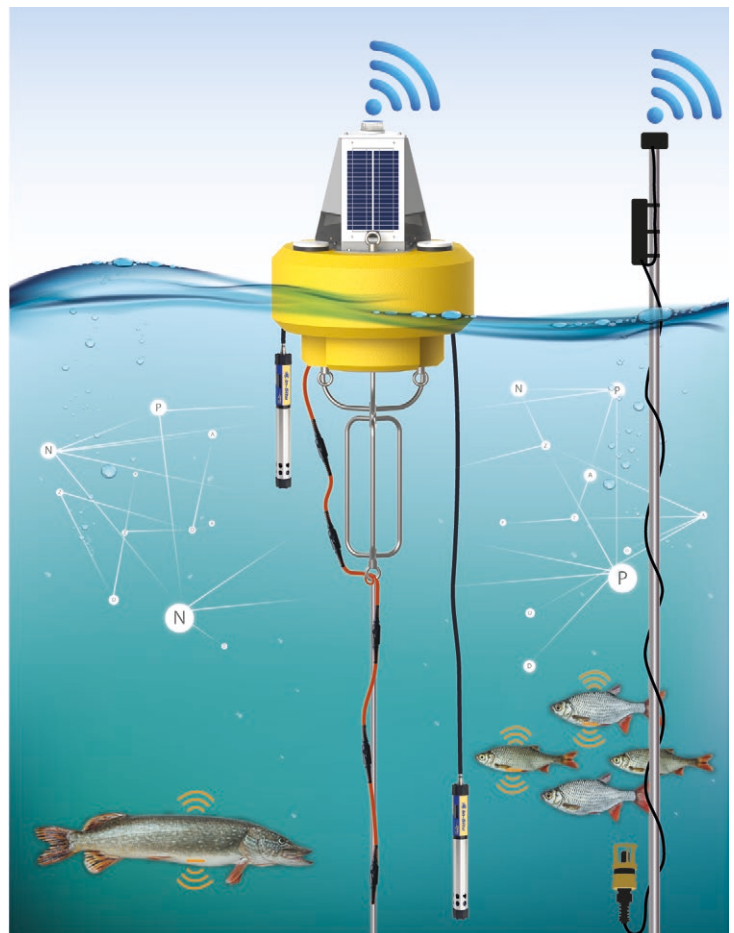
Henrik Baktoft er seniorforsker ved DTU Aqua, Sektion for Ferskvandsfiskeri og Økologi.
hba@aqua.dtu.dk



Christian Skov er lektor ved DTU Aqua, Sektion for Ferskvandsfiskeri og Økologi.
ck@aqua.dtu.dk

Søer verden over tjener mange formål. De er essentielle miljøer for biologisk mangfoldighed. De interagerer i kulstof- og næringsstofkredsløbet. De giver mulighed for fiskeri og har stor rekreativ værdi og er ikke mindst en drikkevandsressource (omend drikkevand i Danmark altovervejende kommer fra grundvandsmagasiner). Søerne er imidlertid sårbare over for øget næringsstoffertilførsel, som på forskellig vis ændrer deres økologiske balance, der kommer til udtryk som blandt andet iltvind og algeopblomstringer.

I Danmark har der især siden 80'erne været fokus på mange søers forringede tilstand, der hovedsagelig skyldes øget tilførsel af fosfor og kvælstof som følge af spildevandspåvirkning og landbrugsintensivering. Igennem årene er der gennemført en række tiltag, som har haft til formål at forbedre søernes tilstand. For at vurdere effekten af disse tiltag har søernes tilstand været fulgt via forskellige overvågningsprogrammer, som betyder, at der i dag eksisterer lange tidsserier for udvalgte søer i Danmark. Disse tidsserier giver helt unikke muligheder for at analysere søernes tidsmæssige udvikling og for eksempel se på indflydelsen fra



Bøje-systemet er solcelledrevet og fuldautomatisk og måler blandt andet vandtemperaturen i fem dybder samt i luften. En del af fiskene er mærket med akustiske transmittere, og deres adfærd kan følges i real-tid.

klimaændringer og effekterne af initiativer iværksat for at reducere tilførslen af næringsstoffer. Samtidig danner tidsserierne basis for at

benytte computerbaserede virtuelle laboratorier, som kan forudsige, hvordan søerne vil opføre sig i fremtiden.

Søernes dynamik

De lange tidsserier har vidt forskellige målefrekvenser. I bedste fald måles to gange månedligt i sommerperioden, men ofte foretages kun månedlige prøvetagninger eller nogle gange endda sjældnere. Og hvad fisk angår, kan der gå adskillige år mellem fiskebestandsmonitoring. Det kan være godt nok til at fastlægge et niveau for søens tilstand, men mange søer gennemgår store kortvarige udsving, som den rutinemæssige overvågning overhovedet ikke fanger (se graf). Det kan for eksempel være korte, midlertidige iltsvind ved søbunden eller næringsstofændringer, som kan stimulere algeopblomstringer og gøre vandet uklart. Med nye metoder får vi nu bedre kendskab til disse kortvarige dynamikker og dermed ny viden til at forstå søernes tilstand og deres omskiftelighed.

Avanceret bøjesteamer data

For at blive klogere på søernes kortvarige udsving anvender vi nu særlige målebøjer. Det gælder for eksempel i et stort tværfagligt projekt med udgangspunkt i Ormstrup Sø syd for Bjerringbro, finansieret af Poul Due Jensen Fonden. Her har vi på en bøjeste, der flyder i overfladen installeret et monitoringssystem, der ned gennem vandsøjlen måler en række parametre, der siger noget om søens vandkvalitet. Bøjeste-systemet er solcelledrevet og fuldautomatisk og måler blandt andet vandtemperaturen i fem dybder samt i luften. Vandtemperaturen siger meget om, hvordan søen er lagdelt, og med bøjeste kan vi med stor detaljegråd kortlægge, hvor ofte, hvor længe og hvor dybt, søen lagdeler. Bøjeste måler også iltkoncentrationen i overfladen og ved bunden, samt vandets turbiditet (klarhed) og mængden af alger (via deres pigmenter) i overfladen.

Måling af algemængder med sensorer

Kontinuerte og automatiserede målinger af vandtemperatur og iltkoncentration er velafprøvede teknikker, der oftest giver pålidelige data. Det er derimod mere vanske-



Foto: Kåre Nielsen fra InCaseOF

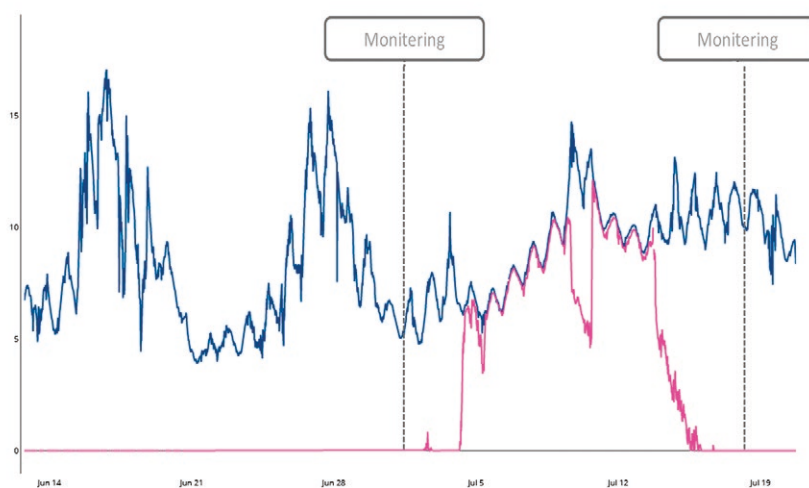
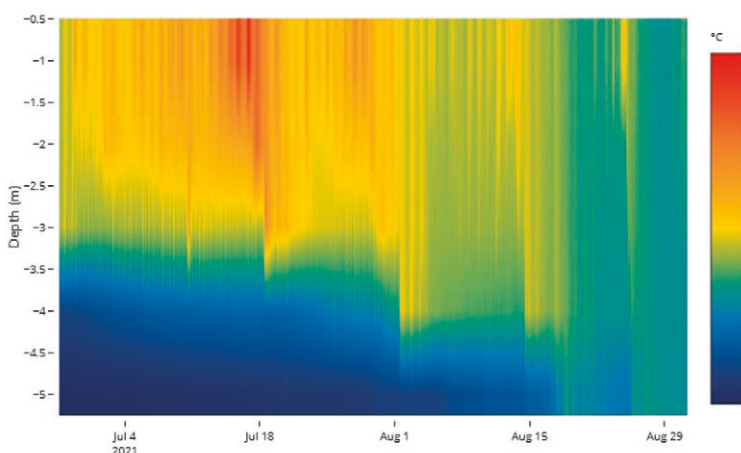


Illustration af kontinuert målt ilt-koncentration i Ormstrup Sø i henholdsvis overfladen (blå) og ved bunden (pink). Man kan se, at søen i lange perioder er uden ilt ved bunden, undtagen en kort periode i starten af juli. Målinger hver 14. dag (indikeret med stiplede lodrette linjer) vil ikke fange den korte periode, hvor der er ilt i hele vandsøjlen.



Konturplot af temperaturfordelingen ned gennem vandsøjlen i Ormstrup Sø over tid. I perioder hvor temperaturen i søens nederste del er koldere end den øverste, er søen lagdelt med et springlag i midten. Lagdelingen fungerer som en barriere, hvorved bundvands ilt-niveau falder, hvilket kan give anledning til en række afledte effekter som næringsstoffrigivelse fra bunden.

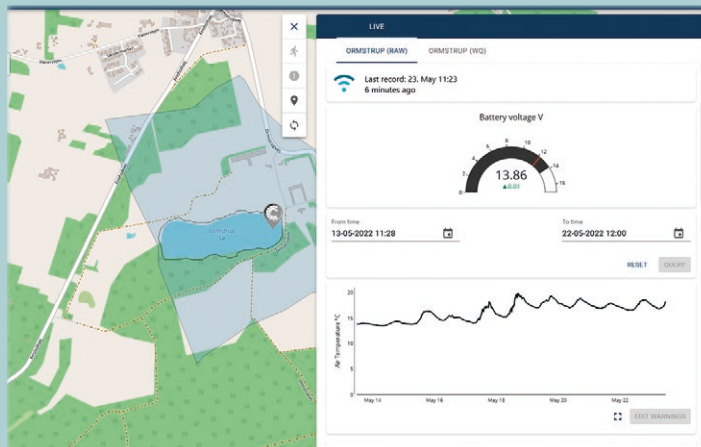


↑ Se et eksempel på datavisualisering.

Målebøjen

Bøjesystemet måler hvert 15. minut, det vil sige næsten 100 gange i døgn, og data sendes ved hjælp af LoRaWAN (der står for Long Range Wide Area Network) til et cloud-baseret system. Herfra bliver data visualiseret og streamer et realtidsindblik i søens dynamik til en offentlig hjemmeside

LoRaWAN kan dække relativt store områder med meget lidt hardware og giver mulighed for energibesparende løsninger, som er nødvendig, når bøjesystemet er udlagt i søen og alene genererer strøm via solpaneler. Energiforbruget fra et monitoringsystem kan være en udfordring, navnlig på danske breddegrader, hvor vintermånedernes solindstråling er begrænset. Men bøjesystemet har været testet over vinteren uden problemer.



adfærd, for eksempel i forhold til fødesøgning, og i hvilket omfang byttefisk, som skallerne, er i stand til at undvige rovfiskene. Som en del af projektet i Ormstrup sø har vi mærket gedder, skaller og aborrer i søen med særlige sendere, der udsender et akustisk signal cirka en gang i minuttet. Derudover har vi opsat lyttestationer i søen samt udviklet et avanceret system, der gør det muligt at beregne fiskenes position her og nu. På den måde får vi et ret præcist overblik over, hvor fiskene opholder sig, og hvordan de bevæger sig rundt i søen. Det avancerede system muliggør desuden, at fiskenes position med få minutters forsinkelse bliver streamet til en offentlig hjemmeside døgnet rundt. Her kan forskere og andre nysgerrige følge med i fiskenes adfærd her og nu via tusindvis af daglige data om fiskenes placering, og man kan blandt andet se, hvordan fiskene opfører sig under kortvarige iltsvind:

<https://live.telemetry.fish>

Projektets samarbejde
Forskningselementerne, som beskrives i artiklen, er finansieret af Poul Due Jensens Fond og er en del af projektet: *Lake Stewardship (Monitoring af Ormstrup Sø 2020-2023)*, hvor flere danske universiteter indgår.

Udover artiklens forfattere har følgende personer bidraget til arbejdet - fra Aarhus Universitet, Institut for Ecoscience, Sektionen for Søøkologi:

Thomas A. Davidson, Eti E. Levi og Dennis Trolle samt fra Danmarks Tekniske Universitet, Institut for Akvatiske Ressourcer (DTU Aqua): Martin Hage Larsen og Nicolas Azaña Schnedler-Meyer.

Videre læsning

Læs mere om projektet på hjemmesiden: www.pdjf.dk/programmer/baeredygtig-soerestauring

ligt at opnå gode målinger af algemængden. Konceptet i det automatiske bøje-monitoringsystem er at anvende optiske sensorer, som udsender lys ved specifikke bølglængder, der matcher for eksempel det spektrum, hvor algers klorofyl-a pigment auto-fluorescerer og derpå måle på den returnerede lysmængde, som udtryk for koncentrationen af klorofyl-a. Metoden har et stort potentiale, men også udfordringer. Eksempelvis er oversættelsen af de tal, som de optiske sensorer måler, til faktiske algekoncentrationer påvirket af en række faktorer som algesammensætning, begroning og såkaldt quenching (som betyder, at algerne midt på dagen kan beskytte sig selv mod kraftigt lys). Der er derfor brug for grundig kalibrering. I Ormstrup-projektet foretager vi løbende kontrolprøver af algekoncentrationerne, som anvendes til kalibrering, men der er fortsat behov for mere viden og tests af sensorerne for at opnå valide tal for de faktiske algekoncentrationer. Denne viden er også central i forhold til at vurdere, om sensorerne

på et tidspunkt vil kunne erstatte (eller supplere) den traditionelle og tidskrævende laboratoriemetodik i takt med, at sensorerne bliver endnu bedre. Sensorerne har dog stadig værdi her og nu, da de giver vigtig information om den relative ændring af algeniveauer og kan dermed for eksempel varsle, om en algeopblomstring er undervejs og også danne grundlag for at beslutte, hvornår der skal indhentes manuelle vandprøver. Denne viden er interessant, hvis en given sø for eksempel benyttes til badning eller som drikkevandsreservoir, hvor alger kan udgøre en sundhedsrisiko.

Danmarks største akvarium

Tætheden af fisk og sammensætningen af arter har stor betydning for økosystemet i næringsforurende søer. Dominans af fredfisk, som skaller og brasen betyder, at søen typisk fremstår grøn og uklar, mens søer med en dominans af rovfisk som gedde og aborrer ofte vil fremstå mere klarvandede. Fiskenes betydning for søernes tilstand hænger blandt andet sammen med deres

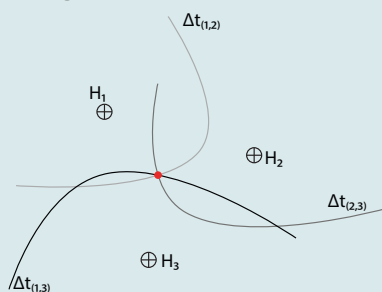
Bøjer skal tilpasses mindre søer

Højfrekvente målinger i søer har stort potentiale og har indtil nu kun i meget begrænset omfang været anvendt i Danmark. Ormstrup-projektet er derfor en vigtig "showcase", der giver værdifulde erfaringer at bygge videre på. En af udfordringerne er, at gængse bøjesystemer typisk er udviklet til offshore-industrien eller større Nordamerikanske søer og dermed *over-engineered* til de forhold, de udsættes for i danske søer. Næste skridt i Ormstrup-projektet er at udvikle bøjesystemer specifikt til mindre søer (som vi har i Danmark og mange andre steder i verden), som kan gøre højfrekvent dataindsamling meget mere tilgængeligt i den rutinemæssige overvågning af det akvatiske miljø og samtidig en naturlig del af for eksempel forskningsprojekter og forundersøgelser forud for restaureringsindgreb, som det er tilfældet i Ormstrup Sø.

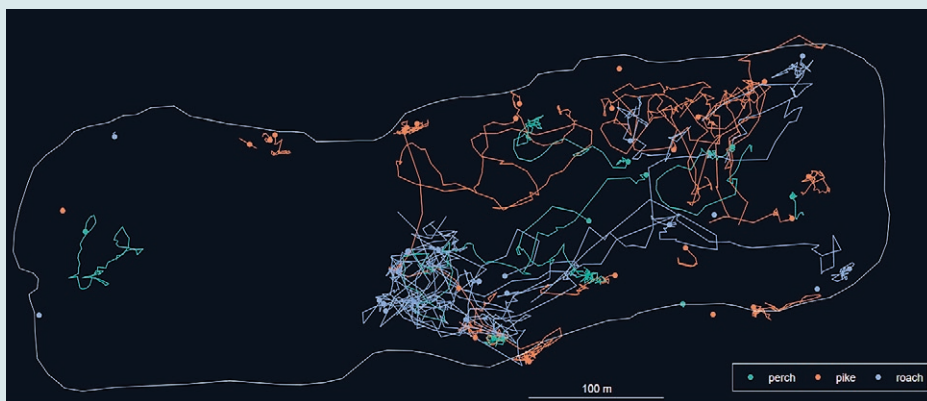
Ormstrup Sø er ligeledes den første sø i verden, hvor man streamer fiskenes adfærd direkte til forskere og borgere. Ud over viden om

Real-time/live tracking af fisk

Ormstrup Sø er så vidt vi ved den eneste sø i verden, hvorfra man online kan følge fiskenes adfærd. For at kunne følge fiskene bliver de først mærket med sendere, der hver udsender et kodet lydsignal indeholdende et unikt ID samt fiskens dybde cirka en gang i minuttet. Signalerne opfanges af hydrofoner placeret langs søens kant, og data sendes via et LoRa (Long Range)-netværk til en pc hos DTU. Når denne pc modtager nye data, beregner den med det samme positionen for den fisk, der udsendte lydsignalet og sender positionen videre til en hjemmeside, hvorfra fiskene kan følges. Beregningen af positionerne er baseret på en teknik, der kan betegnes som "en omvendt GPS".



Figuren viser princippet i denne metode. Senderne udsender et lydsignal, der opfanges på de tre hydrofoner (H1, H2 og H3). Idet lydets hastighed gennem vand kan beregnes ud fra vandets temperatur og saltindhold (for eksempel 1450 m/s i 10 grader varmt ferskvand), bliver signalet registreret en lille smule tidligere på en



Et screen dump fra siden med live-visning af fiskenes positioner i søen. (Se <https://live.telemetry.fish>) Hver mærket fisk er repræsenteret af en prik, der viser fiskens seneste position og en streg, der viser, hvor fisken har været den sidste time.

$$\sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} - \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2} = c\Delta t_{(1,2)}$$

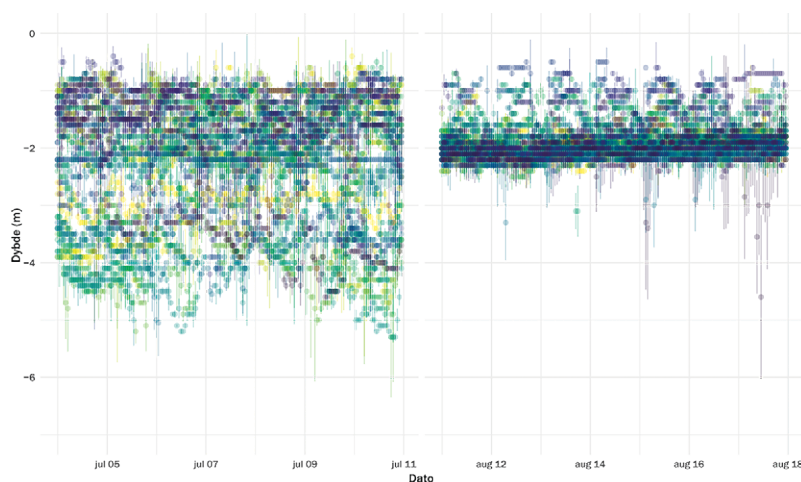
$$\sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} - \sqrt{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2} = c\Delta t_{(1,3)}$$

$$\sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2} - \sqrt{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2} = c\Delta t_{(2,3)}$$

hydrofon, hvis fisken er tæt på, end hvis den er længere væk (en forskel i størrelsesordenen 0-500 millisekunder). Forskellen i registreringstiden af de tre mulige parvise kombinationer af hydrofoner illustreres af linjerne $\Delta t_{(1,2)}$, $\Delta t_{(1,3)}$ og $\Delta t_{(2,3)}$, der beskrives af de viste ligninger. De tre ligninger indeholder to ukendte (x og y), der er fiskens position, c er lydets hastighed. Ved hjælp af avancerede matematiske modeller kobles alle registreringerne fra en given fisk sammen, og positionerne beregnes, hvorefter fiskens spor/track kendes.

adfærden af nogle af de mest almindelige fisk i Danmark giver undersøgelserne også ny viden om, hvordan fisk reagerer på sørestaureringstiltag. Håbet er at kunne udbrede metoden til flere søer, så det kan gøre os klogere på, hvordan forskellige miljøforhold i forskellige søer påvirker fiskene, deres adfærd og dermed økosystemet som helhed.

Ud over at forskere og interesserede borgere får indblik i søens tilstand her og nu og med en hidtil uset opløsning, indgår de højfrekvente data samtidig i skabelsen af en digital tvilling af søen. Her bliver sensordata anvendt sammen med en computer-model til at beskrive dynamikken i hele søens økosystem. ■



Figuren viser, hvordan gedderne i Ormstrup Sø indenfor få uger bliver begrænset i deres leveområde på grund af iltvind i søens dybe områder. Til venstre er afbilledet en periode på 7 dage i sommeren 2020, hvor der er ilt overalt i søen. Hver prik indikerer en dybdeposition af en af de cirka 40 mærkede gedder, som svømmer rundt i søen, og hver gedde har sin egen farve. Det fremgår, at gedderne anvender det meste af søens vandsøjle som opholdssted (søen er cirka 5,5 meter dyb). Til højre ses en periode på 7 dage cirka fem uger senere, hvor der er iltvind i søens dybe områder, det vil sige der findes næsten ingen ilt under cirka 2 meters dybde. Det ses tydeligt, at gedderne nu er koncentreret i søens øvre vandmasser.

SØENS DIGITALE TVILLING

— et virtuelt laboratorium

Computer-modeller af økosystemer kan betragtes som virtuelle fuldskala laboratorier, og kan anvendes til at simulere eksperimenter, som ikke altid er praktisk mulige at gennemføre i den virkelige verden.

Om forfatterne



Dennis Trolle er professor, trolle@ecos.au.dk



Tobias K. Andersen er postdoc, tka@ecos.au.dk



Anders Nielsen er seniorforsker, an@ecos.au.dk



Karsten Bolding er seniorforsker, bolding@ecos.au.dk

Alle ved Sektion for Søøkologi, Inst. for Ecoscience, Aarhus Universitet



Nicolas Azaña Schnedler-Meyer er postdoc ved DTU Aqua, Institut for Akvatiske Ressourcer

Målebøje i Ormstrup Sø. Foto: Kåre Nielsen fra INcaseOF

Computer-modeller kan anvendes til at beskrive fysiske, kemiske og biologiske processer og bruges i stor stil i både forskning og forvaltning af akvatiske økosystemer. Computer-modellerne består af en række matematiske beskrivelser af virkelige processer, som tilsammen forsøger at beskrive, hvordan energi og stof flyttes rundt i et økosystem. Modellerne består af en række matematiske beskrivelser af virkelige processer, som tilsammen forsøger at beskrive, hvordan energi og stof flyttes rundt i et økosystem. Modellerne består af en række matematiske beskrivelser af virkelige processer, som tilsammen forsøger at beskrive, hvordan energi og stof flyttes rundt i et økosystem.

re mængder data, lige fra information omkring temperaturlagdeling til bevægelsesmønstre for fisk, og derfor udgør modeller også et naturligt samlingspunkt for forskellige fagfelter indenfor forskningen.

Hvis modellerne på tilfredsstillende vis kan beskrive dynamikkerne i det individuelle system, kan de anvendes til at gennemføre en lang række virtuelle eksperimenter. Eksperimenterne kan give bedre forståelse for søens processer eller hjælpe med at identificere områder, hvor denne forståelse mangler. De kan også anvendes til at forstå, hvordan et økosystem potentielt vil reagere på påvirkninger som øget forurening og klimaforandringer. Dette er særdeles belejligt, da nogle eksperimenter på grund af størrelse eller økonomi simpelthen ikke lader sig gøre at teste i fuld skala i den virkelige verden. Et godt eksempel

er eksperimenter, som undersøger effekter af klimaforandringer på søer. Et fuldskala-forsøg, hvor en hel sø skulle opvarmes og følges over en længere årrække er ikke praktisk eller økonomisk muligt. Men en model-simulering, hvor blandt andet input af lufttemperatur ændres, kan nemt gennemføres og analyseres for årtier eller århundreder bag computeren.

Fokus på de kortvarige processer

I Danmark er der en lang og stærk tradition for udvikling og brug af økosystem-modeller, som kan testes og videreudvikles på baggrund af det omfattende data, der indsamles via det nationale overvågningsprogram NOVANA. I dag repræsenterer WET-modellen (Water Ecosystems Tool), der er udviklet ved Aarhus Universitet, state-of-the-art indenfor området.

Overvågningsprogrammer som NOVANA indsamler imidlertid typisk kun data en eller to gange om måneden. Det kan være en udfordring, da der er en stigende erkendelse af, at højfrekvente processer – det vil sige processer, som kan udspille sig over få dage, timer eller sågar minutter og sekunder (for eksempel kortvarige lagdelinger af vandsøjlen) og som også kan forekomme ofte – kan have stor betydning for den overordnede dynamik og stofbalance over længere tid. Derfor er forskere i stigende grad interesseret i at kunne kvantificere de fysiske, kemiske og biologiske processer i høj tidslig opløsning. Her får forskerne hjælp af sensor-teknologi, som automatisk kan måle for eksempel vandets temperatur og ilt hvert 15. minut, samt økologiske modeller med en tidslig opløsning på en time eller mindre. Disse nye muligheder anvender forskerne nu i stigende grad til at opnå en bedre forståelse for betydningen af forskellige højfrekvente processer.

Model skal simulere Ormstrup Sø

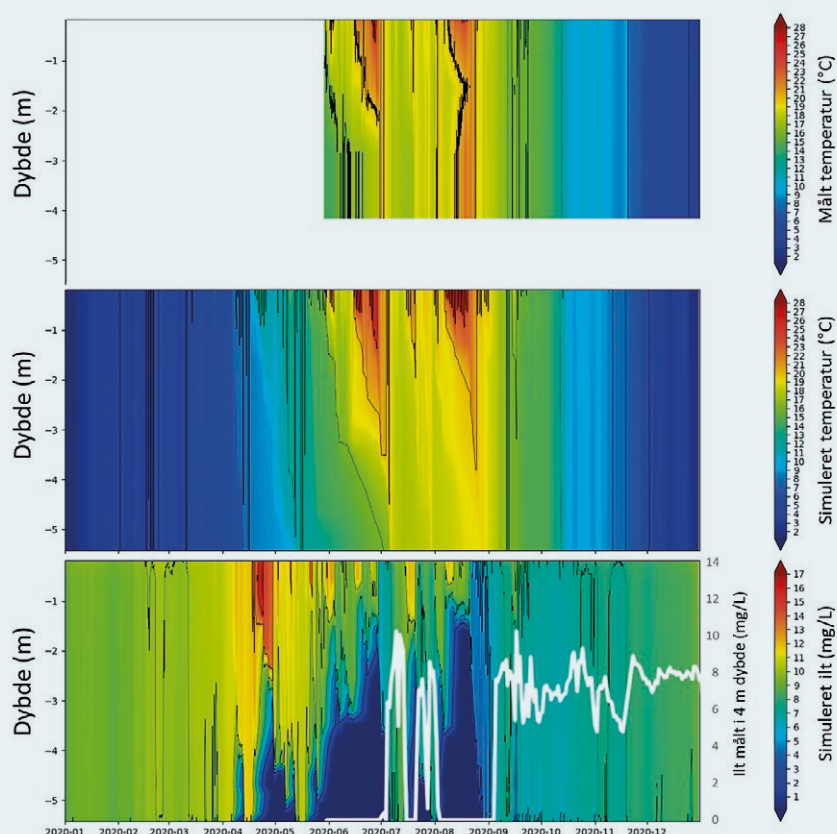
Et aktuelt eksempel på dette er et projekt finansieret af Poul Due Jensen Fonden, der fokuserer på den danske Ormstrup Sø. Projektet skal skabe en bedre forståelse for mekanismen, der er i spil i forbindelse med sørestaurering. Håbet er, det vil gøre os i stand til at vælge og optimere de mest optimale sørestaurerings-tiltag, således indsatsen resulterer i en klarvandet sø med høj biodiversitet, hvor den klarvandede tilstand bevares i så lang tid som muligt.

I projektet er der udlagt en målebøje på søens dybeste sted, som måler temperaturprofiler hvert 15. minut samt iltkoncentrationen i top og bund (4 meters dybde). Desuden indsamles og analyseres der vandprøver ugentligt for kemiske og biologiske vandkvalitetssele-menter, herunder næringssalt- og klorofyl-koncentrationer. Søen, som i dag er særdeles uklar med høj koncentration af alger, restaureres i projektet ved flere omgange af bio-manipulation, hvor der fjernes fred-fisk fra søen, og efterfølgende ved

Metoder til at eksperimentere med økosystemer

Computermødeler udgør en af flere forskellige metoder til at undersøge effekter af for eksempel klimaforandringer på søer. Eksempler på andre metoder er såkaldte "space-for-time" studier, hvor søer på tværs af en klimagradien sammenlignes; mesocosm-eksperimenter, hvor mindre forsøgstanke forsøger at gengive forholdene i en sø; paleolimnologi, hvor bundsedimentets sammensætning undersøges og aldersbestemmes; og lange tidsserier af observationsdata. Alle disse metoder har, ligesom computer-mødelerne, fordele, ulemper og begrænsninger. Men tilsammen kan de give en god indikation af fremtiden for søernes økosystemer.

Temperatur- og iltprofiler

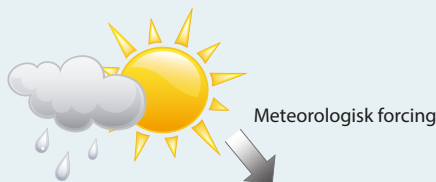


Figurerne viser øverst de observerede temperaturprofiler fra søens målebøje (bemærk, at målebøjen blev udlagt i maj måned 2020 og med dybeste sensor i 4 meter, hvorfor der ikke er observationsdata før maj eller under 4 meters dybde).

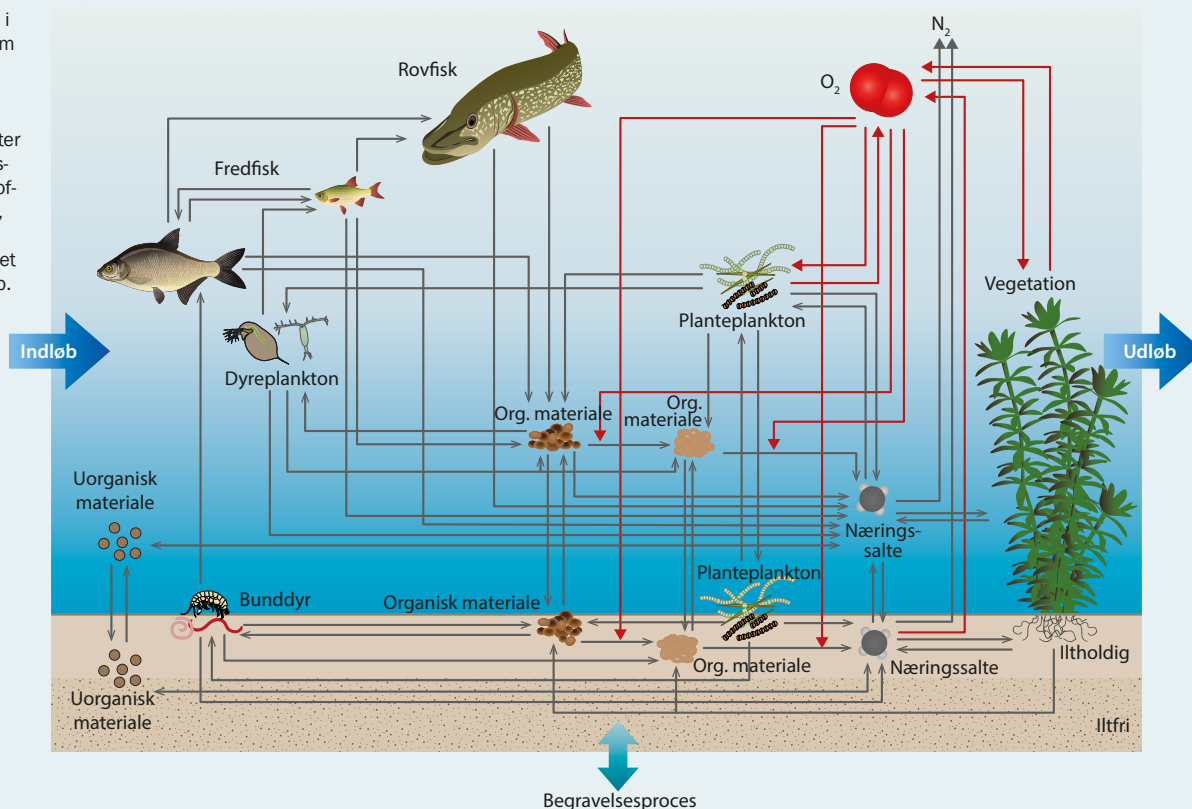
I midten vises de modelsimulerede temperaturprofiler, og nederst vises den modelsimulerede iltkoncentration (for hele vandsøjlen) og den observerede iltkoncentration i 4 meters dybde repræsenteret af hvid linje. Når den model-simulerede ilt-dynamik sammenlignes med den observerede iltkoncentration ved bunden ses det, at tidspunkterne, hvor der sker lagdeling (hvor iltkoncentrationen falder i bundvandet) og efterfølgende opblanding (hvor iltkoncentrationen hurtigt stiger i bundvandet), simuleres med stor nøjagtighed af modellen.

oppumpning af fosforholdigt bund-sediment. Målet med den økologiske model er at træne modellen mod det omfattende data og videreudvikle på modellens procesbeskrivelser, såle-

des den i højere grad kan simulere de observerede dynamikker. I sidste ende er målet at anvende modellen til at simulere holdbarheden af restaureringen – det vil sige, hvor



Eksempel på en konceptuel model i WET. Pilene mellem de forskellige tilstandsvariable repræsenterer processer, der flytter masse (i henholdsvis fosfor-, kvælstof- og tørstofenheder, sorte pile) eller ilt (røde pile) rundt i et økologisk kredsløb.



WET-modellen

I Danmark er der en lang og stærk tradition for udvikling og brug af økosystem-modeller. Lige fra Glumsø-modellen udviklet af Sven Erik Jørgensen ved Danmarks Farmaceutiske Højskole i 1970'erne, som indeholdt tre trofiske niveauer (alger, dyreplankton og fisk), til WET-modellen (WET = Water Ecosystems Tool) udviklet af Aarhus Universitet, som i dag repræsenterer state-of-the-art og kan tilpasses søer i hele verden.

WET-modellen er særdeles fleksibel i forhold til, hvilke trofiske niveauer der ønskes simuleret og kan dermed tilpasses et givent økosystem i både indland og udland. Dette kan gøres ved at ændre sammensætningen af organismegrupper i fødenettet i den konceptuelle computermodel, hvor der kan tændes eller slukkes for de forskellige typer af organismer, og samtidig kan der også inkluderes en eller flere organismer fra samme gruppe – eksempelvis for at repræsentere flere forskel-

lige arter af fisk. Ligesom i projektet i Ormstrup Sø kan modellen tilpasses yderligere til den enkelte sø eller fjord ved at træne modellen imod lokale observations-data. I praksis gøres dette ved at ændre på parameter-værdier i modellen, typisk ved brug af maskinlærings-algoritmer, således modellens output i højere grad kommer til at stemme overens med observationer.

WET-modellen kan kobles til forskellige fysiske modeller. Det inkluderer den én-dimensionelle General Ocean Turbulence Model (GOTM), som er særdeles god til at simulere lagdeling, eller den tre-dimensionelle model General Estuarine Transport Model (GETM), som eksempelvis er egnet til at repræsentere dynamikken i større søer og fjorde. WET-modellen anvendes i dag over hele verden lige fra søer og fjorde i tempererede Danmark til søer og drikkevandsreservoirer i det tropiske Ghana.

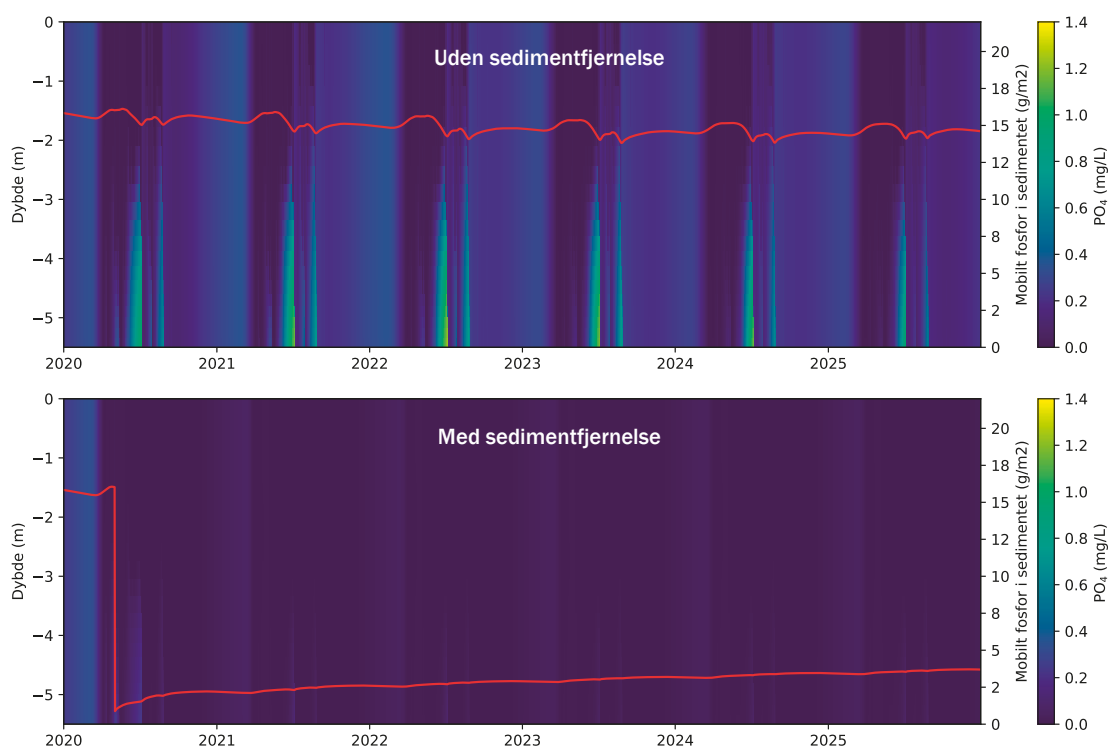
lang tid restaureringen må forventes at "holde" søen i en klarvandet tilstand, og om der eventuelt senere må forventes at blive behov for en opfølgende indsats for at bevare søen i den ønskede tilstand.

Projektet i Ormstrup sø er første gang i Danmark, at en sømodel holdes op i mod et datasæt med høj

tidslig opløsning. I projektet anvender vi WET-modellen, som er koblet med en model, der fysisk simulerer lagdeling i vandsøjlen (General Ocean Turbulence Model, GOTM). Den koblede model trænes via de observerede højfrekvente temperaturprofiler og iltkoncentrationer samt data fra det detaljerede kemiske og biologiske måleprogram.

Simulering og målinger stemmer godt overens

Både måledata og modelsimuleringen viser, at Ormstrup Sø gennemgår flere midlertidige lagdelinger henover foråret og sommeren. Varigheden af lagdelingsperioderne varierer fra nogle få dage til over en måned. Effekten af lagdelingen er særdeles tydelig på iltkoncen-



Virtuelt modeleksperiment, hvor en situation uden (øverst) og med (nederst) sedimentfjernelse sammenlignes. I model-eksperimentet (nederst) er der fjernet 95% af den mobile pulje af fosfor i de øverste 20 cm af søens bund på én gang i maj måned 2020, hvilket giver en tydeligt effekt på frigivelsen af fosfat (PO_4^{3-}) til vandsøjlen. I modelsimuleringen uden sedimentfjernelse kan det ses, hvordan fosforpuljen i sedimentet (rød kurve) varierer i løbet af året, hvor puljen i nogle perioder stiger og i andre perioder falder, da den mobile fosforpulje frigives delvist til vandsøjlen.

trationen, som typisk falder hurtigt og i løbet af få dage under en lagdelingsperiode, hvilket resulterer i, at søen bliver helt iltfri i bundlagene flere gange om året. Når måledata sammenlignes med modelsimuleringen, fremgår det, at modellen i høj grad er i stand til at simulere de ellers meget dynamiske lagdelingsperioder og også hastigheden, hvor med ilt forsvinder fra bundlagene, når lagdeling indtræffer. Modellen, som simulerer alle dybdelag i søen, giver desuden en indikation af, hvor tæt på overfladen de iltfrie lag kommer. På den måde kan modellen udfylde et datahul, da observationer fra iltssensorer kun findes i overfladen samt i 4 meters dybde. Iltsvind ved bunden betyder typisk, at jern-bundet fosfor frigives fra bundsedimentet og siver op i vandsøjlen, hvorefter det bliver tilgængeligt for alger i overfladen, når søen igen opblandes efter en lagdelingsperiode. Samtidig viser data fra fiskenes bevægelse, at de som forventet søger mod overfladen, når iltten forsvinder fra bunden. Dette bevægelsesmønster simulerer modellen også.

En stor del af årsagen til, at Ormstrup Sø er næringsrig og uklar, findes på søens bund. En meget stor pulje af næringsalte i form af både fosfor og kvælstof ligger i søbunden efter års deposition, som delvist frigives til vandet særligt i sommertid. I næste fase af projektet vil en stor mængde sediment blive fjernet fra søen med det formål at reducere søens næringsindhold og dermed gøre den mere klarvand. Samtidig vil vi træne modellen for Ormstrup Sø yderligere på baggrund af data, der løbende indsamles i projektet. Vi har lavet indledningsvis virtuelle eksperimenter med sedimentfjernelse for at undersøge, hvor store mængder der nødvendigvis skal fjernes fra søens bund for at opnå en god tilstand i søen.

Disse virtuelle eksperimenter viser, at sedimentfjernelse har stor og længerevarende effekt på fosforfrigivelsen fra søens bund, som udgør en meget væsentlig del af den samlede næringsbelastning til søen.

Et værktøj til fremtiden

Modelværktøjet, som udgør det virtuelle laboratorium for Ormstrup sø, trænes løbende til data, der indsamles i projektet, men de foreløbige resultater viser, at modellen i høj grad allerede er i stand til at simulere to vigtige elementer i høj tidslig opløsning, nemlig lagdeling og iltodynamik. Det er en central forudsætning for, at vi også kan simulere næringsaltdynamikker samt fiskenes bevægelser, for eksempel som følge af iltsvind. Modellen indikerer også, at der kan forventes en væsentlig effekt af den planlagte fjernelse af sediment fra Ormstrup Sø, forudsat at der herved fjernes en meget stor del af den eksisterende næringsaltpulje på bunden.

Selve WET-modellen, som videreudvikles i projektet, er open source og kan allerede nu frit downloades og anvendes. Forskerne bag projektet vil løbende opdatere modellen, og interesserede kan følge med i modeludviklingen på informations-siden www.wet.au.dk.

Videre læsning

Om NOVANA:
novana.au.dk

Om Glumsø-modellen:
Jørgensen SE (1976) A eutrophication model for a lake. *Ecol Model* 2:147 - 165.

Om WET-modellen:
Hu F, Bolding K, Bruggeman J, Jeppesen E, Flindt MR, van Gerven L, Janse JH, Janssen ABG, Kuiper JJ, Mooij WM, Trolle D (2016) FABM-PCLake - linking aquatic ecology with hydrodynamics. *Geosci. Model Dev.* 9:2271 - 2278.

Schnedler-Meyer, N.A., Andersen, T.K., Hu, F.R.S, Bolding, K., Nielsen, A, Trolle, D. (2022). *Water Ecosystems Tool (WET) 1.0 - a new generation of flexible aquatic ecosystem model*. *Geosci. Model Dev.* 15:3861 - 3878.



Maleri af Catherine Williams @cjaw_art

Forfatterne



David Field er professor (emeritus) på Aarhus Universitet i Fysik og Astronomi. Han har det seneste årti forsket i, hvordan de elektriske egenskaber af tynde film af materialer kan bruges til at undersøge, hvad der sker inde i disse film – fra det ydre rum til laboratoriet. dfield@phys.au.dk



Andrew Cassidy er centerleder ved Center for Interstellar Catalysis ved Institut for Fysik og Astronomi ved Aarhus Universitet. Hans forskning fokuserer på rollen af molekyler i faste stoffer som materialer og koncentrere sig overvejende om deres rolle i det interstellare medium. amc@phys.au.dk

SPONTANE ELEKTRISKE FELTER

fortæller om faste stoffers indre

I 2009 opdagede forskerne, at der opstår spontane elektriske felter i tynde film af forskellige faste stoffer. En række nye eksperimenter har nu vist, at denne såkaldte spontane elektriske effekt kan bidrage til forståelsen af hvordan et fast materiale ændrer sin struktur over tid.

Hvis du går ud til din bil en vintermorgen, vil du ofte opleve, at din forrude er dugget. Vand er kondenseret fra luften og danner en tynd, fast film, der skjuler dit udsyn. Samme aften, hvis det er klart, kan du se op på Orions bælte omkring tusind lysår væk. Deroppe i rummet mellem stjernerne findes der små og ekstremt kolde støvkorn af siliciumdioxid. Overfladerne på disse små korn er også dækket af tynde, faste film af molekyler som vand, ammoniak og kulilte (carbonmonoxid).

Du finder tynde film af molekyler overalt i naturen: i din indkørsel, i

det ydre rum og også – takket være elektronikindustrien – i dit TV og din telefon. Men på trods af den allestedsnærværende tilstedeværelse af disse typer materialer, ved vi stadig ikke, hvad der styrer deres struktur. Dertil vi ved endnu mindre om, hvordan molekylerne inde i dem interagerer med hinanden, hvordan de bevæger sig, og hvordan strukturen ændrer sig spontant med tiden.

Selvom de faste film er ekstremt tynde, indeholder de enormt mange molekyler; milliarder af molekyler. I disse såkaldte "glasagtige", faste stoffer er molekylerne alle rodet sammen og ikke ordnet på nogen

organiseret måde. Hvert molekyle er omgivet af molekyler, der er lidt anderledes orienteret, roteret i en anden retning eller placeret lidt længere væk. Tænk på den tynde film af vandmolekyler på bilens forrude: Alle vandmolekylerne har nøjagtig den samme H_2O -struktur, men de vil alle være i forskellige omgivelser. Normalt er det vi "ser", når vi studerer disse glasagtige materialer, et gennemsnitligt billede af det gennemsnitlige molekyle, som er meget uklart med hensyn til detaljerne om det enkelte molekyle. Det er som regel også lige meget, for det er gennemsnittet, der tæller, når vi studerer materials egenskaber.

← Kunstnerisk indtryk af den strålelinje (engelsk: Beamline) ved ASTRID på Aarhus Universitet, hvor den spontelektriske effekt blev opdaget i 2009. Det er også på denne strålelinje, at de nye målinger af henfaldet af strukturen af methylformiat er blevet foretaget.

Molekylær film

Film af fx kuliite

Støvkorn af siliciumdioxid

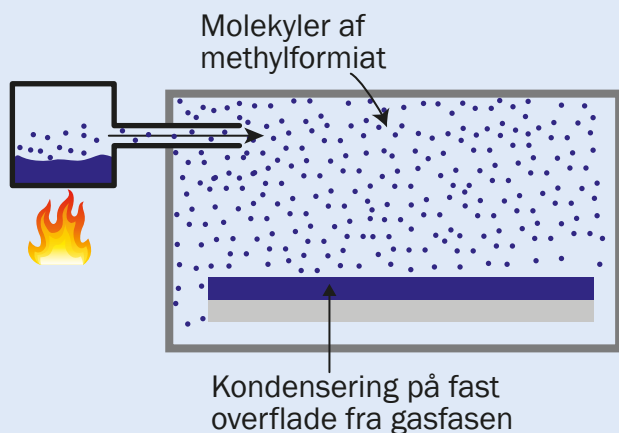


Illustration af, hvordan en molekylær film dannes ved at kondensere en gas på en overflade, hvor molekylerne orienterer sig spontant. Molekylære film finder vi overalt – på støvkorn i det ydre rum, som dug på forruden af din bil og i din mobiltelefon.



Film af vand på bilruden



Molekylær elektronik

Forunderlig effekt viser sig i tynde film

Vi har sammen med forskningsgrupper i Grækenland, Israel, Skotland og USA lavet tynde film af en hel række enkeltmolekyler som lattergas, kuliite eller methylformiat i et forsøg på at klarlægge deres elektriske egenskaber. Bemærkelsesværdigt nok har vi opdaget, at disse film spontant genererer enorme elektriske felter, som vi kan måle – for eksempel ved at detektere spændinger på deres overflader. Vi kalder dette fænomen for den spontelektriske effekt og film med denne egenskab for spontelektriske film. Faktisk blev den spontane dannelse af store elektriske felter i tynde film af molekyler først opdaget af Kutzner i 1972. Men da denne opdagelse meget sjældent er nævnt i nogen efterfølgende publikationer, og vi ikke kendte til denne halvtreds år gamle publikation, genopdagede vi strengt taget den spontelektriske effekt i 2009.

Filmene dannes vi ved at kondensere en gas på en kold, fast overflade – ligesom på din bilrude, men meget koldere – ned til $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$. Filmene dannes langsomt: De vokser med omkring 1 nanometer per sekund,

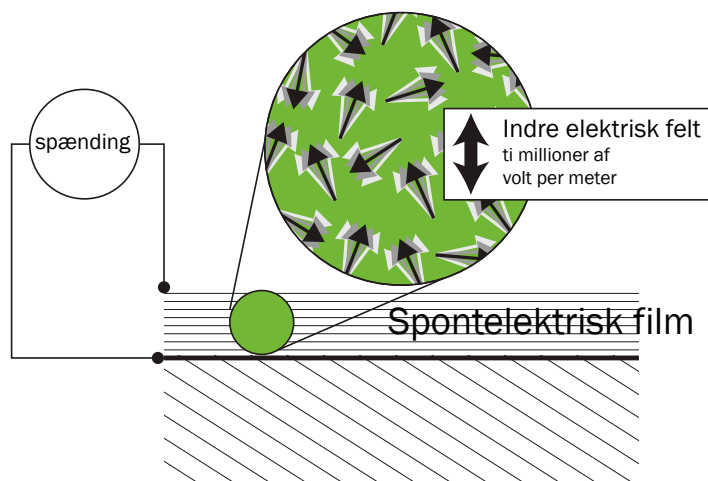
hvilket omtrent er samme hastighed, som dine fingernegle vokser. Den færdige film har en typisk tykkelse fra 50 nm op til 150 nm.

Det elektriske felt opstår, fordi mole-

Studier af tynde film

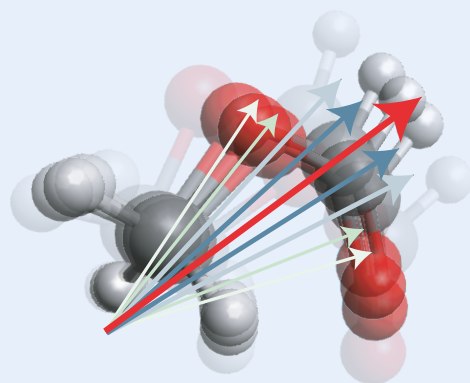
I vore studier har vi undersøgt de ultratynde film ved hjælp af ultraviolet lys fra de verdensledende lyskilder ASTRID og ASTRID2 – såkaldte synkrotroner – ved Center for Storage Ring Facilities på Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet. Vi har også studeret filmene med andre typer lyskilder, nemlig ved brug af infrarødt lys ved Heriot-Watt University i Skotland og også neutronstråler ved Oak Ridge National Laboratory i Tennessee, USA.

I vores forsøg med ASTRID har vi skabt elektroner med meget lav energi. Disse elektroner er brugt til at måle overfladespændingen af en tynd film af methylformiat. På denne måde fandt vi ud af, hvordan det spontelektriske felt i filmen ændrer sig som funktion af fremstillingstemperaturen af filmen. I andre undersøgelser med ASTRID2 kan vi måle små skift af absorptionsbølglængde på mindre end en tusindedel, igen som en funktion af fremstillingstemperaturen af filmen. I disse eksperimenter indikerer en ændring i absorptionsbølglængden en ændring i molekylets energiniveauer, og denne ændring kan være direkte relateret til styrken af det spontelektriske felt i en film.



Illustrationen viser skematisk molekyllernes orientering i en spontelektrisk film. Molekyler peger med deres plus-ender og minus-ender i alle retninger, men ikke helt lige meget. Typisk er der et par procent eller mindre ekstra chance for, at du vil støde på et molekyle, der peger, lad os sige, mere op end ned. Det betyder, at molekyllernes positivt ladede ender er en smule mere tilbøjelige til at være tæt på plus-enderne af andre molekyler, og det samme gælder de negativt ladede ender. Det samlede resultat er, at hele filmen bliver polariseret.

Molekylerne i en tynd film roterer og vibrerer



Molekylerne af methylformiat i en tynd film roterer og vibrerer helt vildt, typisk 10^{14} til 10^{15} gange i sekundet, men de enkelte molekyler forbliver dog bundet til samme position og med gennemsnitligt samme orientering af molekylet. Samtidig har molekylerne i filmen som helhed en tendens til være orienteret i den samme retning, hvilket skaber en polarisering i filmen og dermed et elektrisk felt. I meget sjældne tilfælde kan der ske det, at et enkelt molekyle foretager et stort udsving på i størrelsesordenen 0,2 nm. Det får molekylet til at indtage en ny orientering med en anderledes lokal konfiguration end før. Denne nye konfiguration forplanter sig derefter til andre steder i filmen, for eksempel via det spontelektriske felt, som er allestedsnærværende i filmen.

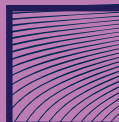
Over tid vil mange sådanne begivenheder forekomme, og nettoresultatet er, at strukturen som helhed "slappes", hvilket fører til et fald i molekyllernes tendens til at være orienteret i samme retning. Dette kan observeres gennem en reduktion af potentialet på overfladen af filmen, og nettoresultatet er, at det spontelektriske felt over en periode på flere timer falder fra $2 \times 10^7 \text{ Vm}^{-1}$ til $8 \times 10^6 \text{ Vm}^{-1}$ i film dannet ved -233°C .

kylerner i filmen er dipoler. Faktisk er de fleste molekyler dipoler, idet de har en tendens til at være mere positive i den ene ende og mere negativ i den anden ende. Vi har opdaget, at disse dipoler orienterer sig spontant, så den tynde film bliver let positiv eller negativ på den ene side i forhold til den anden side. Det skaber en elektrisk spænding på filmens overflade og et stort elektrisk felt inde i filmen. Da det elektriske felt er spænding divideret med tykkelse, og filmen er meget tynd, betyder det, at få volt på filmoverfladen giver enorme felter inde i filmen – op til mere end 100 millioner volt per meter!

Nye muligheder for at studere faste materialer

Bevægelser af molekyler i faste stoffer er notorisk vanskelige at studere. I en serie nye eksperimenter med tynde film af methylformiat (HCOOCH_3) har vi vist, at den spontelektriske effekt åbner for helt nye metoder til at studere molekyllers bevægelser i faste materialer. Det skyldes, at eventuelle ændringer i styrken af det elektriske felt betyder, at molekylerne i filmen i gennemsnit har roteret og nu peger i en lidt anden retning. Selvom det kan lyde ubetydeligt, er det et første skridt til at afdække store spørgsmål om, hvorfor og hvordan faste stoffer ændrer deres struktur over tid – lige fra chokolade til medicinpiller, ja det lader os endda få indsigt i, hvordan stjerner dannes.

Men hvad sker der egentlig i vores tynde film af methylformiat, som ændrer materialets struktur over tid? Svaret på det spørgsmål afhænger af, hvilket temperaturinterval, vi snakker om. Ved lave temperaturer forbliver de faste stoffer glasagtige og uorganiserede, men strukturen ændres uden at der er diffusion involveret – for methylformiat ligger dette lavtemperaturregime omkring -233°C til -218°C . Så er der et højere temperaturregime fra -193°C til -183°C , hvor dynamikken er anderledes og er domineret af diffusion. Ved -183°C , den såkaldte "glasovergangstemperatur", reorganiserer molekylerne sig og danner et krystallinsk gitter.



**MAKE IT
REAL**



Skal fremtidens it-løsninger designes af piger fra din klasse?

IT-studerende eksperimenterer, undersøger, løser, lytter og ser. Uanset om det drejer sig om robotter, bæredygtig omstilling, sundhed, programmering, undervisning, underholdning eller noget helt andet. For IT er ikke noget, der ligger i en afdeling i et hjørne. Det er det, der binder verden sammen - og kan skille den ad.

Den 17.-19. oktober inviterer vi igen til IT-camp for kvindelige gymnasieelever i Danmark. Det bliver et program med faglige og sociale arrangementer, virksomhedsbesøg og undervisning af vores egne it-studerende.

Det er gratis at deltage, og vi sørger for mad og overnatning på hotel. Deltagerne får mulighed for at snuse til it-uddannelserne og livet som universitetsstuderende sammen med andre gymnasieelever.

Tilmelding er nødvendig, og pladserne fordeles efter først til mølle-princippet.

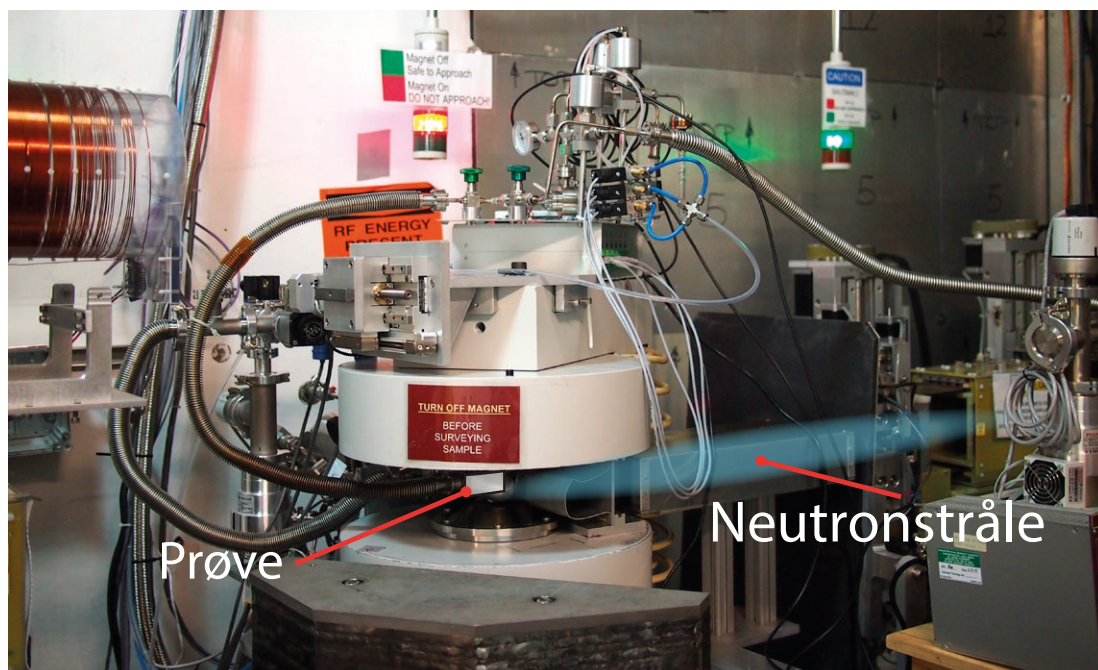
LÆS MERE PÅ: ITCAMP.AAU.DK

IT-CAMP FOR PIGER



AALBORG UNIVERSITET
AALBORG ESBJERG KØBENHAVN

Fotoet viser et neutroneksperimentet i Oakridge National Laboratory, Tennessee, USA. Isotop-mærket methylformiat bruges her til at måle diffusion af methylformiat-molekyler. Neutronstrålen sonderer grænsefladerne mellem lagene i prøven. Når lagene diffunderer ind i hinanden, ændres neutronspredningssignalet, og derved kan vi måle diffusion.
Foto: Andrew Cassidy



Videre læsning

David Field, Oksana Plekan, Andrew Cassidy, Richard Balog and Nykola Jones. A new class of spontaneously polarized material. Europhysics News. DOI: 10.1051/epn/201160

D. Field, O. Plekan, A. Cassidy, R. Balog, N.C. Jones & J. Dunger (2013) Spontaneous electric fields in solid films: spontelextrics. International Reviews in Physical Chemistry, 32, 345-392, DOI: 010.1080/0144235X.2013.767109

Andrew Cassidy, Mads R. V. Jørgensen, Artur Glavic, Valeria Lauter, Oksana Plekan and David Field, (2021). A mechanism for ageing in a deeply supercooled glass. Chem. Comm. 57, 6368. DOI: 10.1039/d1cc01639c

Andrew Cassidy, Mads R. V. Jørgensen, Artur Glavic, Valeria Lauter, Oksana Plekan and David Field, (2021) Low temperature ageing in a molecular glass: the case of cis-methyl formate. Phys.Chem. Chem.Phys. 23 15719. DOI: 10.1039/d1cc01639c

Roterende, vibrerende molekyler

Vi har målt den spontelektriske effekt på overfladen af film af methylformiat ved hjælp af lyskilden ASTRID på Aarhus Universitet. Kigger vi på lavtemperaturregimet først, har vi målt overfladepotentialet på film aflejret ved, for eksempel, $-233\text{ }^{\circ}\text{C}$, og vi observerede, at det henfalder fra -4 volt til $-3,5\text{ volt}$ på 4000 sekunder. Når vi analyserer den spontelektriske effekt, fortæller det os, at dette henfald betyder, at molekylerne har mistet noget af deres tendens til at være orienteret i samme retning, men kun gennemsnitlig med mindre end én grad. Dette tab opstår ved, at molekylerne roterer og vibrerer, men de forbliver på samme punkt i det faste stof. I filmen sidder molekylerne i et energiminimum, og deres rotation er begrænset af væggene i dette minimum. Det kan sammenlignes med en skateboarder, der er begrænset af formen på den overflade, han eller hun bevæger sig på. Formen af energiminimum kan bestemmes ved hjælp af en matematisk model for spontelektriske film.

Vi har beregnet, at molekyler skal rotere omkring 50 grader for at forårsage en varig strukturel ændring i materialet. Modellen viser, at kun så store udsving kan overvinde

barrieren for henfald, som barrieren måles gennem det tidsmæssige henfald af den spontelektriske overfladespænding. Så årsagen til strukturelle ændringer i materialet ved lav temperatur kan udelukkende tilskrives rotationsudsving på omkring 50 grader. Sådanne udsving sker ikke ofte: Barriererne for rotation er sådan, at kun omkring én ud af 10^{14} til 10^{15} rotationer kan opnå så stort et vinkeludsving.

Vi vil nu vende blikket mod, hvad der sker i den tynde film af methylformiat ved højere temperaturer, det vil sige temperaturer over $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$. Her afslører neutronsprædningsdata, at der i modsætning til ved lavtemperaturregimet, finder diffusion sted i materialet. Molekyler begynder nu at bevæge sig i forhold til hinanden, men i sneglefart på omkring en tyvendedel af en nanometer i timen. Men når molekylerne diffunderer, kan de også rotere, og efter et par timer ender vi med en film uden noget som helst spontelektrisk felt. Molekylerne har mistet al orientering.

Hvad betyder det for os?

Vores studier viser, hvordan strukturen af et glasagtigt fast stof langsomt men mærkbart ændrer sig over tid – ved lav temperatur som følge af rotationsbevægelser og ved

højere temperaturer nær glasovergangstemperaturen ved både diffusion og rotation. Vi kender alle det fænomen, at chokolade kan blive hvidt på overfladen. Molekylerne ændrer sig ikke, men deres organisation, dvs. chokoladens struktur, ændrer sig og chokoladen mister sin smag og konsistens.

Faste stoffer kan se uforanderlige ud, men indeni foregår en masse, som påvirker de massive spontelektriske felter. Spontelektriske film giver forskerne nye muligheder for at udforske langsomme ændringer i faste stoffer. Det er relevant i mange sammenhænge – lige fra chokoladen i hjemmet til, hvor hurtigt molekylerne skyer i rummet kan kollapse for at danne nye stjerner; en halv million år med spontelektriske støvkorn i rummet frem for tre millioner år uden spontelektriske støvkorn. Den spontelektriske effekt forklarer også, hvorfor og hvordan lægemidler starter som glasagtige, men ældes og med tiden bliver krystallinske, hvilket gør dem mindre effektive til behandling. En krystallinsk struktur er nemlig mindre opløselig i kroppen og derfor sværere at absorbere. Der er derfor en god grund til, at dine piller har en "sidste anvendelsesdato", og du derfor bør smide bedstemors gamle medicin ud. ■



KØBENHAVNS
UNIVERSITET



FORDI DIT STUDIEVALG KRÆVER GOD TID

Det kræver tid og fordybelse at finde den rigtige uddannelse. På Københavns Universitet har du masser af muligheder for at blive klogere på de naturvidenskabelige uddannelser, inden du træffer dit valg.

Du kan blandt andet:

- Tage et Uddannelsestjek
- Gå i studiepraktik
- Blive studerende for en dag
- Se film om uddannelserne

Læs mere om vores naturvidenskabelige uddannelser og dine muligheder på

studier.ku.dk/science



JAGTEN PÅ DEN FORSVUNDNE DRIVHUSGAS

Lattergas er en af de kraftigste af klodens drivhusgasser, og gassen ødelægger tilmed ozonlaget. Drivhusgassen bliver for en stor dels vedkommende produceret i havet, men nogle steder på Jorden mangler det i overfladevandet. Nu vil forskere opklare mysteriet.

Om forfatteren
Af Kristian Sjøgren,
videnskabsjournalist.
ksjoegren@gmail.com



DANMARKS FRIE FORSKNINGSFOND
INDEPENDENT RESEARCH
FUND DENMARK

Artiklen er sponsoreret af Danmarks Frie Forskningsfond | Natur og Univers.

Danmarks Frie Forskningsfond dækker alle videnskabelige hovedområder og uddeler hvert år godt 1 mia. kr. til forskningsprojekter baseret på forskernes egne ideer. Danmarks Frie Forskningsfond består af 84 anerkendte forskere udpeget på baggrund af deres høje faglige kompetence. Formand for Danmarks Frie Forskningsfond | Natur og Univers er professor ved Københavns Universitet, Henrik Grum Kjærgaard. Læs mere på www.dff.dk

Når snakken falder på klimaforandringer og drivhusgasser, er det svært at komme udenom CO₂.

Klimaforkæmpere, politikere, miljøorganisationer, forskere og firmaer taler alle sammen om CO₂-udledning, CO₂-kvoter, CO₂-niveauer i atmosfæren, CO₂-regulering, CO₂-det-ene-og-det-andet.

I alt den snak om CO₂ bliver det nogle gange overset, at der faktisk også findes andre drivhusgasser, som måske ikke er lige så betydningsfulde i aftrykket på den globale opvarmning som CO₂, men som alligevel ikke må ignoreres – især ikke hvis vi vil have et fuldstændigt overblik over, hvordan fremtiden kommer til at se ud med hensyn til

klimaet og de afledte effekter af global opvarmning.

En af disse drivhusgasser, som vi ikke må glemme, er dinitrogenoxid (N₂O), der også går under betegnelsen lattergas. N₂O er ikke bare en drivhusgas på niveau med CO₂, men faktisk en meget mere potent en af slagsen. Når det kommer til kapaciteten for at agere global opvarmer, er N₂O 300 gange stærkere som drivhusgas end CO₂. Samtidig nedbryder lattergas også ozonlaget med alle de negative effekter, som det har på både risikoen for udvikling af kræft og svækket immunforsvar hos mennesker samt destruering af afgrøder og det marine økosystem.

Nej, når vi taler om global opvarm-

ning, må vi ikke fokusere så meget på CO₂, at vi glemmer N₂O.

En af de forskere, der er med til at sikre, at N₂O er på dagsordenen, når eksempelvis klimamodeller skal udvikles, eller når der skal træffes beslutninger og laves fremskrivningsmodeller i regi af FN's klimapanel IPCC, er lektor Carolin Löscher fra Danish Institute for Advanced Study ved Syddansk Universitet.

Carolin Löscher har allerede gjort flere uhyggeligt interessante opdagelser vedrørende den globale produktion af N₂O, og hun har for nyligt modtaget en stor forskningsbevilling fra Danmarks Frie Forskningsfond til at finde ud af, hvilken rolle havet og forskellige biologier



Om forskeren

Carolyn Löscher er lektor i oceanisk biogeokemi ved Danish Institute for Advanced Study på Syddansk Universitet. Hun er oprindeligt uddannet fra University of Kiel, hvorfra hun fik sin ph.d. i biologi og havforskning. Efterfølgende har hun arbejdet i flere år ved Helmholtz Center for Ocean Research- GEOMAR, hvor hun studerede havets nitrogen- og kulstofcyklusser ved hjælp af molekylære-, biogeokemiske- og modelbaserede værktøjer, ligesom hun var involveret i flere forskningssekspeditioner.



Carolyn Löschers forskningsinteresser er centreret omkring forståelsen af, hvordan mikrober påvirker faktorer med indflydelse på klimaet, og hvordan klimaet har indflydelse på selvsamme mikrober. Tanken er den, at hvis klimaet ændrer sig, vil det ikke bare gå ud over fiskene og pattedyrene i havet, men også mikroberne, hvilket kan få alvorlige konsekvenser for deres bidrag til at opretholde den globale kulstof- og nitrogenbalance.

Carolyn Löschers har gennem årene modtaget flere priser for sin forskning. Hun er gift og lever med sine to døtre i Odense.

ske processer i havet har for det globale N_2O -regnskab og dermed den planet og det klima, som vores generation efterlader til generationerne efter os.

»Min interesse inden for feltet er, at jeg bekymrer mig om havet, og en tredjedel af verdens N_2O bliver produceret i netop havet. Der er et stort behov for at forstå, hvordan N_2O bliver produceret i havet og i hvilke mængder, og hvordan det også bliver optaget af havet fra atmosfæren. Denne viden er vigtig at inkludere i de klimamodeller, som skal forudsige, hvordan verden kommer til at se ud i fremtiden,« fortæller Carolyn Löscher.

Et produkt af biokemiske processer

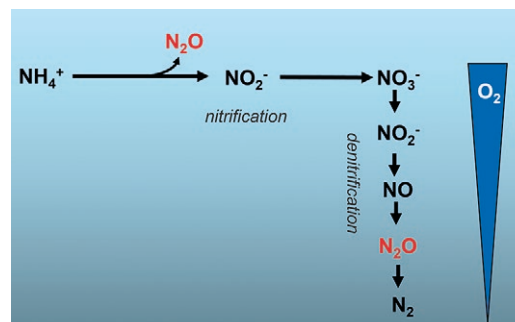
Carolyn Löscher er særligt interesseret i at forstå de processer, hvor med bakterier og arkæer producerer N_2O . Begge former for mikrober kan ad forskellige veje danne N_2O , som bliver frigivet til omgivelserne, og hvis de omgivelser er havoverfladen, bliver drivhusgassen frigivet der.

De to mest relevante processer hedder henholdsvis nitrifikation og denitrifikation.

- Ved nitrifikation oxideres ammonium og ammoniak via iltning til nitrit (NO_2^-), som efterfølgende bliver oxideret ved yderligere iltning til nitrat (NO_3^-). Disse to processer foregår ofte i to forskellige organismer, og et biprodukt af nitrifikationen er N_2O .
- Ved denitrifikation foregår hele processen omvendt, og nitrat bliver reduceret til nitrit og til sidst til nitrogen. Et produkt i denne proces er ligeledes N_2O .

»Det interessante er, at to processer kan danne N_2O og sende det ud i atmosfæren, men faktisk kan bakterier og arkæer gennem denitrifikation og afhængigt af ligevægtsforholdet også trække N_2O ud af atmosfæren igen,« forklarer Carolyn Löscher.

Carolyn Löschers tidligere forskning har blandt andet identificeret en produktionsvej af N_2O i arkæer i havet.



Skematisk illustration af de to kendte reaktionsveje, der producerer N_2O . Nitrifikation er en oxidation fra ammonium (NH_4^+) til nitrit (NO_2^-) og derefter til nitrat (NO_3^-). Det kan kun ske ved tilstedeværelsen af oxygen, og N_2O er et biprodukt i denne proces. Denitrifikation er en reduktion af nitrat til nitrit, nitrogenoxid (NO), N_2O og endelig til N_2 -gas. I denne proces kan N_2O enten blive produceret eller forbrugt. Denitrifikation kan dog kun ske, hvis der ikke er oxygen til stede, og derfor forventer man ikke, at denne proces vil kunne forbruge N_2O i overfladevandet i oceanerne.

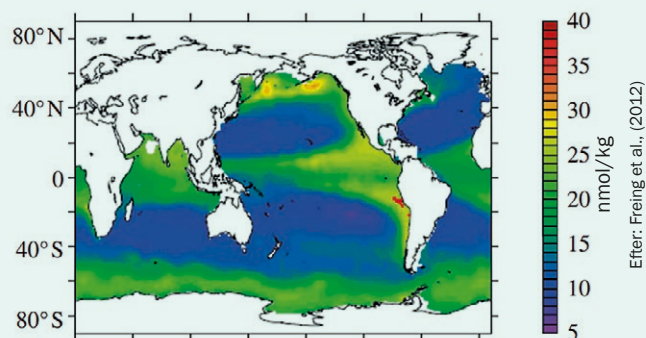
Havets N_2O er ikke i balance

Netop når det handler om havet, giver et faktum i produktionen af N_2O i havoverfladen forskere og klimamodeludviklere hovedpine. Kigger man på et verdenskort over forekomsten af N_2O i havoverfladen, er drivhusgassen forholdsvis ligeligt fordelt ud over kloden, bortset fra nogle specifikke steder, hvor

Her er koncentrationen af N₂O i havoverfladen overraskende lav

Forskere har i mange år vidst, at der forskellige steder på Jorden er mindre N₂O i havets overfladevand, end der burde være. Indtil nu har årsagen været ukendt, men forskere er begyndt at interessere sig mere og mere for emnet, i takt med at det i stigende grad står lysende klart, at udvekslingen af N₂O mellem havet og atmosfæren i disse områder kan have betydning for den globale opvarmning og de klimamodeller, som skal forudsige, hvordan verden ser ud i morgen og om 100 år.

Mange mennesker er formentlig ikke bevidste om den betydning, som N₂O har for klimaet, og det skal retfærdigvis sige, at FN's internationale klimapanel IPCC heller ikke er haft meget fokus på drivhusgassen før i tiden. Det er dog ændret på det seneste, hvor N₂O er gået fra ikke at være tillagt større betydning i det store klimaregnskab til i dag at være anerkendt som en meget vigtig faktor. Det gør forskning i effekterne af og på koncentrationen af N₂O i atmosfæren, såvel som i havet, vigtigere, end det nogensinde har været før.



Kortet viser den estimerede koncentration af N₂O i oceanerne (nmol/kg) i 200 meters dybde. Den blå farve repræsenterer områder, hvor der potentielt "forsvinder" N₂O på grund af endnu ikke identificerede processer.

der er mindre N₂O i havoverfladen, end man skulle forvente. Det bliver meget simpelt fjernet fra havet via mekanismer, som forskere ikke har styr på.

Disse områder med N₂O-underskud er blandt andet det Arktiske hav, den sydlige del af Østersøen og midten af Atlanterhavet. Når forskere tager prøver fra havoverfladen i disse områder, er der simpelthen ikke den mængde N₂O, som forskerne forventer. Det giver ingen mening, og forskerne har ikke en god forklaring på fænomenet.

Samtidig er det utroligt vigtigt at få styr på, hvor verdens mest potente drivhusgas forsvinder hen, når den ikke er der, hvor den burde være, og hvilken betydning det potentielt kan have for global opvarmning og de modeller, som man bruger til at regne på den. Når der er mindre N₂O i overfladevandet, vil ligevægten mellem havet og atmosfæren uundgåeligt trække N₂O ud af luften og dermed have en effekt på drivhusgassens koncentration i atmosfæren og den tilhørende effekt på det globale klima.

Carolyn Löscher forklarer, at mysteriet har fået hende og hendes kollegaer til at klø sig i hovedbunden.

»Kun én proces er kendt for at kunne fjerne N₂O, og det er denitrifikation, men den er ikke umiddelbart relevant at tale om i forbindelse med de lavere niveauer af N₂O i havoverfladen rundt om på Jorden. Denitrifikation foregår nemlig kun i mangel på ilt, og ilt er der rigeligt af i havoverfladen, uanset hvor på planeten man kigger hen,« siger hun.

Forskeren forklarer, at der kan være forskellige forklaringer på, at koncentrationen af N₂O er reduceret i overfladen af havet forskellige steder på Jorden.

»Enten skyldes det, at vi ikke forstår denitrifikation korrekt, eller at en anden proces, som vi ikke kender til endnu, er på spil,« siger Carolyn Löscher.

Formentlig er en biologisk proces på spil

I sin forskning prøver Carolyn Löscher at identificere den mystiske faktor, der leder til lavere koncentrationer af N₂O i havoverfladen forskellige steder på Jorden.

Hun fortæller, at havoverfladens koncentration af N₂O burde være i ligevægt med både vandet under havoverfladen og atmosfæren, men at den ikke er det, hvilket tyder på,

at N₂O på en eller anden måde bliver fjernet.

Man kunne måske forestille sig, at UV-stråling spillede ind i fjernelsen af N₂O fra havoverfladevandet, men det ville ikke give det patchwork-mønster, som forskerne har identificeret. Hvis UV-stråling fjernede N₂O fra havoverfladen, ville det ske over hele kloden og ikke kun hist og her.

»Det får os til at konkludere, at patchwork-mønsteret formentlig er resultatet af biologiske processer. Før vi kan forstå dem, er det dog vigtigt at finde ud af, hvordan vi kan kvantificere tabet af N₂O, samtidig med at vi skal udvikle målemetoder til at finde ud af, hvad der sker, når N₂O forsvinder. Det er den eneste måde at forstå ubalancen i den ligevægt, som burde finde sted i havoverfladen,« forklarer Carolyn Löscher.

Mærket N₂O er en sladrehank

I forskningsarbejdet indsamler Carolyn Löscher med sine kollegaer overfladevand fra de forskellige zoner, hvor koncentrationen af N₂O i havet er lavere end forventet. Prøverne tager de hver måned for at følge, hvordan koncentrationen af N₂O ændrer sig over tid afhængigt af måneden og forekomsten af

givne mikrober i overfladevandet. Ændrer koncentrationen af N_2O sig i takt med koncentration af givne mikrober, kan det være en indikation på, hvem eller hvad der er ansvarlig for at tage N_2O ud af havvandet.

Fra målestationen i den sydlige af Østersøen har forskerne faktisk prøver fra de seneste 50 år, hvilket giver dem en unik mulighed for at studere fænomenet over lange perioder.

Med prøverne i hånden og i laboratoriet skal forskerne undersøge de potentielt set relevante bakterier til bunds for at finde ud af, om og hvordan de fjerner N_2O fra omgivelserne. Forskerne gør meget simpelt det, at de tilføjer isotoper af N_2O til det vand, som mikroberne lever i. Herefter kan forskerne følge, hvor de mærkede molekyler ender hen. Ender de i mikrobernes celler eller i nitrit eller nitrat, fortæller det forskerne noget om de potentielle metaboliske veje, hvormed drivhusgassen bliver omdannet til det ene eller andet:

Ender det mærkede nitrogen i gas i form af N_2 , tyder det på, at denitrifikation er på spil, mens inkorporering af det radioaktivt ladede nitrogen i cellerne peger på helt nye processer for omdannelsen af N_2O til noget andet. Ender det mærkede nitrogen i nitrat, peger det på, at nitrifikation er på færde.

»Ud fra dette kan vi identificere, om der er tale om denitrifikation, selv ved tilstedeværelsen af ilt, om der er tale om fjernelse af N_2O gennem nitrifikation via en proces, som vi ikke kender til, eller om der er tale om en helt anden biologisk reaktion, som vi endnu ikke har forstået,« fortæller Carolin Löscher.

DNA-analyser gør forskere klogere på mikroberne

Ydermere vil forskerne også forstå, hvorfor mikroberne gør, som de gør, og hvad det har af betydning for dem og deres omgivelser.

En del af det forskningsarbejde går

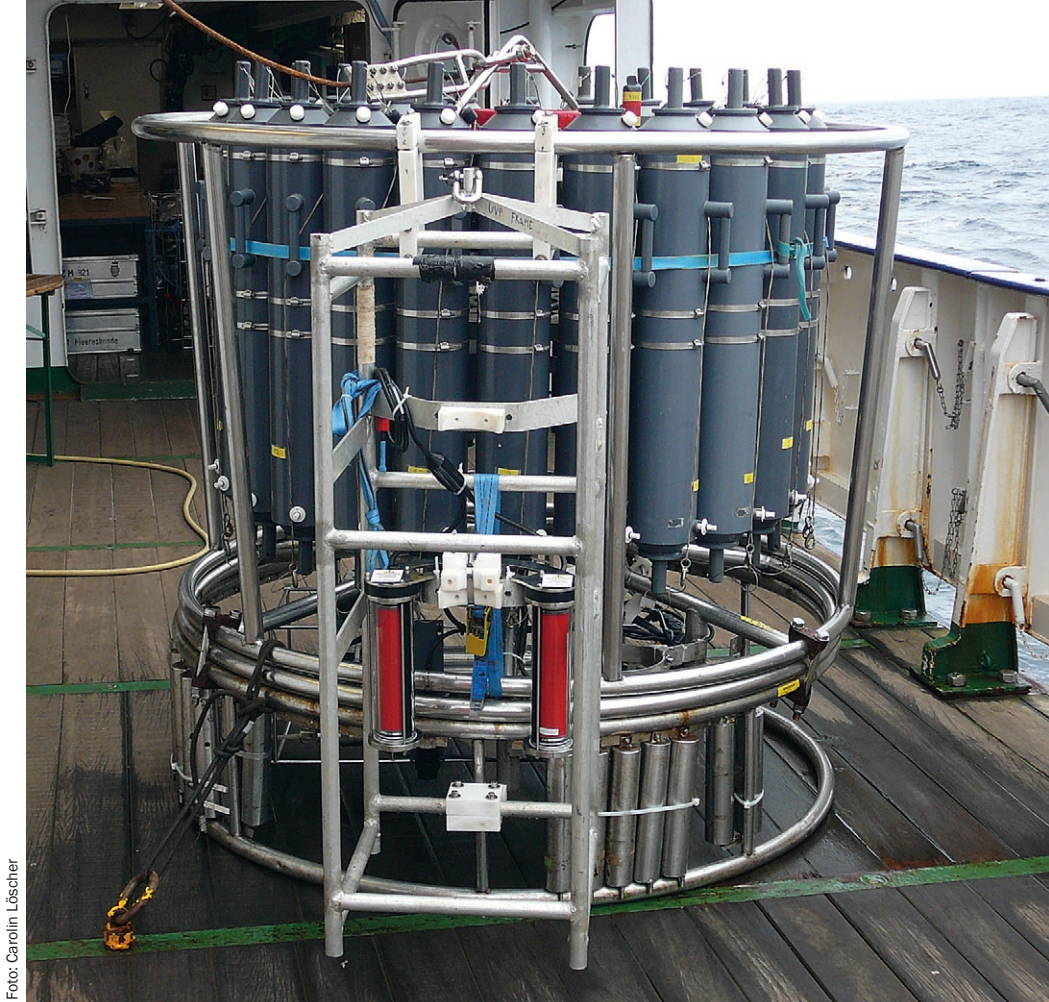


Foto: Carolin Löscher

Havet og klimaet

Verdens have og oceaner er drivkraften i det globale klima og svinger dermed også taktstokken i de klimaforandringer, som foregår lige nu og her. Verdens have dækker 70 % af Jordens overflade og udgør på den måde et gigantisk areal, der konstant udveksler varme, fugt, kulstof og nitrogen med atmosfæren, hvilket er med til at drive de langsomme, men alligevel ustoppelige, forandringer i klimaet på månedsbais, årsbasis og over årtusinderne. Disse faktorer har ikke bare betydning for, om det er varmt i dag eller i morgen, eller om sommeren kommer lidt tidligere på året. De har betydning for alt og alle, der lever på planeten.

Havenes indflydelse på klimaet sker blandt andet gennem optag af solstråling og frigivelse af varme, som er med til at drive den atmosfæriske cirkulation. Optag af solstråling og omdannelsen af strålingen til varme er med til at sikre, at havet kan frigive varme til Jorden året rundt, så der ikke er så glohedt eller iskoldt på tidspunkter af året, at intet kan leve her. Havene er på den måde klodens termostat. Havene frigiver også aerosoler til atmosfæren, hvilket er med til at danne fundamentet for skydannelse, ligesom vanddamp fra havene på et senere tidspunkt falder over land som regn. Havene optager også enorme mængder CO_2 fra atmosfæren og gemmer det væk i vandmasserne i millioner af år.

Havenes indflydelse på det globale klima sker gennem både fysiske, kemiske og biologiske processer. Derudover har de fysiske, kemiske og biologiske processer indflydelse på hinanden og danner samlet set et komplekst system af afhængighed, som mennesket med afbrændingen af fossile brændstoffer er ved at disrupte. Det er som at spille Klodsmajor med klimaet, når vi bringer de biologiske eller kemiske processer ud af balance ved at ændre på den atmosfæriske koncentration af CO_2 . Det vil alt andet lige have indflydelse på de biologiske, kemiske og fysiske processer i havet, der som tidligere fortalt har betydning for alt og alle på Jorden.

↑ En vandprøvetager som samtidigt måler ledningsevne, temperatur og dybde. Salt- og iltindhold registres også sammen med klorofylindholdet. Prøvetageren kan klare flere tusinde meters vanddybde.



**DANMARKS FRIE
FORSKNINGSFOND**
INDEPENDENT RESEARCH
FUND DENMARK

Vandprøver, hvor forskerne måler forskellige biogeokemiske parametre sammen med N_2O . Beholderne er lufttætte, så der ikke sker udveksling med atmosfæren.
Foto: Carolin Löscher

Videre læsning

Freitag, A. et al (2012): Global oceanic production of nitrous oxide, Phil. Trans. R. Soc. B 367, 1245–1255, doi:10.1098/rstb.2011.0360.



**DANMARKS FRIE
FORSKNINGSFOND**
INDEPENDENT RESEARCH
FUND DENMARK



derfor ud på at sekventere arvematerialet i de relevante mikrober for at afdække, hvilke type organismer der er tale om, og hvad de rummer af biologi. Det vil give forskerne et indblik i ikke bare, hvordan mikroberne trækker N_2O ud af havoverfladen, men også hvorfor de gør det.

Carolin Löscher forventer, at hun med forskningen vil være i stand til at etablere en forståelse for et link mellem mikrober i havet og udvekslingen af N_2O mellem havet og atmosfæren. Denne viden vil være kritisk i forhold til at kunne lave korrekte forudsigelser vedrøren-

de fremtidens klima. Det vil formentlig også involvere beskrivelsen af en del af den globale kvælstofbalance, som ingen førhen har haft kendskab til.

»Finder vi de relevante mikrober og biokemiske reaktioner for omdannelsen af N_2O , vil det ændre på nogle paradigmer i vores forståelse af, hvad der sker i havoverfladen, og hvordan det påvirker klimaet,« siger Carolin Löscher.

Opsigtsvækkende fund

Faktisk er det sådan, at Carolin Löscher med sine kollegaer allerede er kommet frem til de første erkendelser, som de dog af hensyn til fremtidig publicering endnu ikke kan løfte sløret for detaljerne i. Hun vil dog gerne fortælle, at resultaterne peger i retning af, at mere end én proces er involveret i fjernelsen af N_2O fra overfladevandet rundt om på Jorden. Faktisk ser det ud til, at både denitrifikation og inkorporering af nitrogen i mikrober spiller en rolle.

Hun forklarer dog også, at det indtil videre kun er indikationer, og at forskerne nu er ved at kvantificere fundet for at finde ud af, hvilken proces der spiller den vigtigste rolle.

»Og så har vi indtil videre kun identificeret det i Østersøen, hvorfra det meste af vores data indtil videre kommer fra. Derfor er vi også meget interesserede i at finde ud af, om de samme mikrober spiller en rolle i omdannelsen af N_2O i andre have, eller om andre mekanismer er på spil. Vi er kommet langt, siden projektet startede i januar,« siger Carolin Löscher. ■

SDU
Ingeniøruddannelserne

sdu.dk/ing #sduing

GO
Go Get IT Girls

Hacking og Cybersikkerhed på programmet

Den 28. september 17.00-19.00 afholder SDU et supersejt event på Det Tekniske Fakultet. Temaet er hacking og cybersikkerhed. Deltagerne vil blive introduceret til metoder og værktøjer som hackere bruger og de vil lære at bruge den viden til selv at hacke sig ind på en lille computer i ægte Lisbeth Salander style. Og så vil vi lære dem, hvordan at de beskytter sig selv imod hacking.

Spred ordet til dine elever og opfordre dem til at tilmelde sig inden den 25. september. Og hey - måske de kan lokkes med pizza og drikke? Det er i hvert fald også en del af programmet.

For mere information og tilmelding www.sdu.dk/gogirls

Ved spørgsmål, tøv ikke med at kontakte os på:

65 50 73 34 eller mhoy@tek.sdu.dk

Detaljer fra det sorte huls baghave

I 2019 fik vi verdenshistoriens første billede af et sort hul: Det viste os en mørk kerne, omkranset af en gloende aura, som er skabt af materiale, der brænder op på dets vej ind mod det sorte hul.

Kunne man vriste endnu bedre billeder og mere viden ud af de gigantiske mængder data, som lå til grund for dette billede? Ja, mente en gruppe astronomer og fysikere, og det er de nu klar til at dele med verden. Resultaterne er publiceret i *The Astrophysical Journal*.

Under ledelse af lektor Avery Broderick, University of Waterloo, gik forskerne, der også tæller adjunkt Roman Gold fra Institut for Fysik, Kemi og Farmaci på Syddansk Universitet, i gang med at "slukke spotlyset og kigge efter ildfluer i stedet", som de beskriver deres arbejde. De har for eksempel skrællede forskellige elementer af billedmaterialet og har i det hele taget remasteret det originale billedmateriale fra det sorte hul M87, der befinder sig i midten af M87-galaksen.

»Det har givet os et detaljeret og unikt indblik i miljøet omkring det sorte hul,« siger Roman Gold.

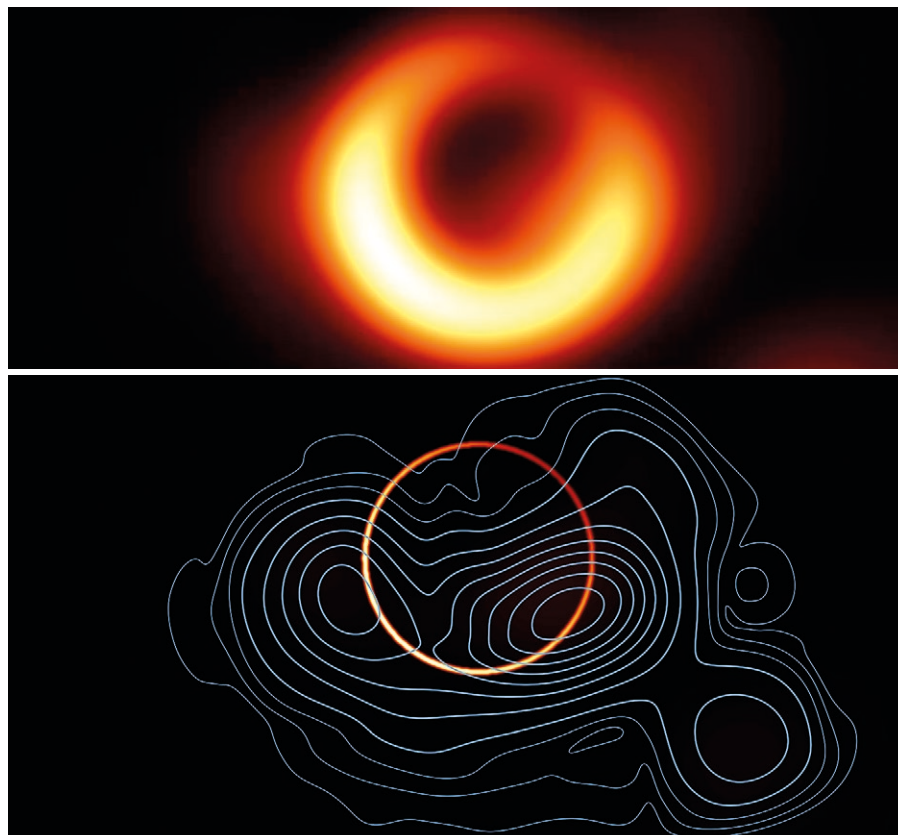
Blandt andet kan holdet nu fremvise et skarpere billede af ringen omkring det sorte hul og vise en tynd lysende ring, der er skabt af lyspartikler (fotoner), som er blevet slynget om på bagsiden af det sorte hul af intens tyngdekraft.

Hævet over rodet fysik

At isolere og udskille denne lysende ring fra de originale observationer af det sorte hul M87 er langt fra enkelt. Det kræver, at man kan skille tyngdekraft og astrofysik ad, når man studerer billeder af sorte huller i deres naturlige habitat, og det er, ifølge Roman Gold, præcis, hvad dette projekt handler om.

»Vi får den lysende ring til at skille sig ud, til at hæve sig over den rodede astrofysik,« forklarer han.

For at opnå dette måtte holdet udvikle noget særligt billedbehandlingssoftware, kaldet THEMIS. Mest oplagt var det at søge efter nogle af de fænomener, som teoretiske modeller og simuleringer tidligere har



Øverst ses det oprindelige billede af det sorte hul i M87, mens billedet til nederst viser, hvor meget skarpere ringen fremtræder, efter at de originale data er behandlet i den nye software. Illustrationer: Broderick et al. 2022. Credit: Broderick et al. 2022, ApJ, 935, 61

forudsagt, burde eksistere. Således burde en ring af fotoner eksistere i baggrunden – den er nu påvist i billedmaterialet. På samme måde har forskerholdet også fundet spor af en kraftig jet, der sprænger udad fra det sorte hul – hidtil også kun teoretisk forudsagt.

»Det fantastiske er, at det nyudviklede software ikke alene kan bruges til at udforske flere hjørner af de to sorte huller, som vi indtil videre har billeder af: Næsten hver eneste galakse i universet har et eller flere sorte huller, som også kan udforskes på denne måde,« siger Roman Gold.

Sorte huller blev længe anset for at være usynlige, indtil forskere lokkede dem ud af deres skjul med det globale netværk af teleskoper, Event Horizon Telescope (EHT). Ved at bruge otte observatorier på fire kontinenter, der alle pegede på det samme sted på himlen, observerede EHT-forskere to sorte huller i 2017.

Som at grave efter guld

EHT-samarbejdet afslørede først det supermassive sorte hul i M87-galaksen i 2019, og derefter i 2022 det forholdsvis lille, men tumultariske sorte hul i hjertet af vores egen galakse, Mælkevejen, kaldet Sagittarius A* (eller Sgr A*). Der findes supermassive sorte huller i centrum af de fleste galakser, og i dem er pakket en utrolig mængde masse og energi på meget lidt plads; det sorte hul M87 er for eksempel 2.000.000.000.000.000 gange tungere end Jorden.

»Der ligger en rigdom af information i de offentligt tilgængelige datasæt fra M87 og Sgr A*. For os forskere – hele det videnskabelige samfund – er det som at grave efter guld at dykke ned i dem,« siger Roman Gold, der er den eneste forsker fra et dansk universitet i EHT-samarbejdet. ■

Af Birgitte Svennevig, Syddansk Universitet
Videnskabelig artikel: Avery E. Broderick et al
2022 ApJ 935 61.



ASKE FRA ENERGITRÆ ER NATURGØDNING

**Energitræ er den største grønne energikilde i Danmark.
Restproduktet ved forbrænding er 75.000 tons aske, der bør recirkuleres
til plantager på sandet og næringsfattig jord
som værdifuld naturgødning.**

Om forfatterne
Mads F. Hovmand
er seniorforsker
mfh@bio.ku.dk

Torben Riis-Nielsen er
specialkonsulent

Flemming Ekelund er
lektor

Gosha Sylvestre er
laborant

Mads M. Krag er labora-
toriekoordinator

Alle ved Biologisk
Institut, Københavns
Universitet.

Energitræ er verdens ældste styrbare energikilde, vore forfædres sikre beskyttelse mod vilde dyr og varme til krop og madlavning. I Danmark er energiproduktion fra energitræ og affaldstræ i dag den største grønne og styrbare energikilde med en årlig produktion på 120 PJ (= 33 milliarder kWh). Energitræ udgør således ifølge Danmarks Statistik (2020) 50 % af den grønne energiforsyning og 70 % af den styrbare grønne energi.

Restproduktet ved afbrænding af træ er træaske. Årligt produceres der i Danmark 75.000 tons træaske, hvoraf cirka 45.000 tons realistisk kan indsamles fra de store kraftvarmeverker og genanvendes som naturlig gødning i plantagerne.

Træaske er en betydelige ressource, der bør anvendes med omtanke.

Indtil andre grønne og styrbare energikilder er blevet udviklet, vil vi stadig være afhængige af blandt andet energitræ og andre styrbare energikilder. Når der forbruges store mængder energitræ, er der fornuft i at indsamle og håndtere restproduktet træasken. Træasken indeholder de plantenæringsstoffer, som vi har "lånt" af jorden for at rejse skov og producere træ. Det er derfor oplagt at tilbageføre disse plantenæringsstoffer til skov-jordene i det omfang, det er muligt, til gavn for ny trævækst. I dag sendes tusindvis af ton træaske til deponi især fra værker på Sjælland. Men blandt andet i Vestjylland "returneres" store mængder til plantagerne.

Hvor meget der sendes på deponi, altså ikke genbruges, er det svært at få oplyst officielt.

Men hvordan reagerer skovøkosystemet, når man spreder træaske direkte på skovbunden? Det har vi forsøgt at belyse ved at udføre en række forsøg på sandede og næringsfattige jorde i Stråsø Plantage i Vestjylland.

Træaske til produktionsskov

I vestjyske Plantager er jordenes naturlige indhold af plantenæringsstoffer meget lavere end i østdanske moræne-jorde. Den største forskel finder vi i rodzonen (det vil sige i 10-50 cm's dybde). Her er indholdet af vigtige plantenæringsstoffer som kalium, calcium og magnesium 6 til 15 gange lavere

i vestjyske skovjorde sammenlignet med østdanske skovjorde. For skovenes topjorde – det vil sige 0–10 cm – er forskellen mellem Øst- og Vestdanmark noget mindre.

Vi lavede vores målinger i felten i 23 plots fordelt på to arealer med lysåben skov bestående af egeskov og blandingsskov med Eg og Lærk, begge arealer havde utedækket skovbund. Vi tilførte dansk træflis- aske fra kraft-varmeverket i Herning til arealerne. Askedoseringen var henholdsvis 0,9 kg og 1,8 kg pr m² svarende til 9 og 18 ton aske per hektar. Syv arealer uden asketilførsel tjente som referencearealer. Plantenæringen i 9 tons træaske svarer nogenlunde til den mængde plantenæring, der fjernes ved høst af heltræ pr hektar i løbet af en omdriftsperiode (vækstperiode) på 70-90 år. Men mange vestjyske plantager har leveret træ i to omdriftsperioder siden hedens opdyrkning i 1850'erne. Derfor er der i forsøget også tilført dobbelt ration, altså 18 ton træaske per hektar.

Vi fokuserede på træaskens kemiske sammensætning, især plantenæringsstoffer, og hvilken effekt asken kan have på jordens kemiske sammensætning og vegetationens sammensætning. I den forbindelse analyserede vi cirka 200 jord- og planteprov for 25 kemiske parametre. Desuden undersøgte vi ændringer i skovbundens flora: artssammensætning, biomasse og kemiske indholdsstoffer. Endelig undersøgte vi eksempler på, hvordan jordbundens mikroorganismer blev påvirket af asketilførslen.

Felt- og laboratorieanalyser

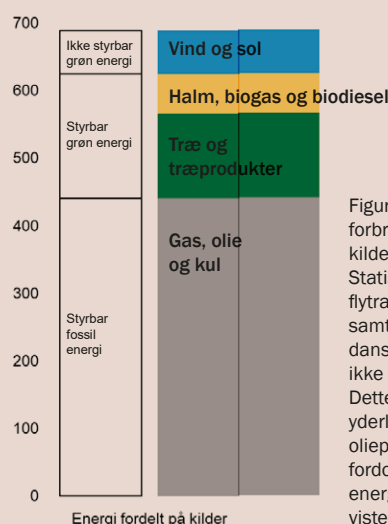
Vores målinger viste, at ved 9 og 18 ton/ha asketilførsel til skovbundens overflade steg koncentrationen af plantenæringsstoffer i topjordene 0-10 cm og i skovbundens utedække. Fosfor-koncentrationen i græsserne steg 35 % - 114 %. Calciumkoncentrationen steg mellem 23 % og 35 %, mens koncentrationen af kalium steg mellem 14 % og 44 %. Derimod var koncentrationen af kvælstof i urtevegetationen uændret, idet asken ikke indeholder kvælstofforbindelser. Kvælstofforbindelser udledes med røgen som NO_x ved forbrændingen.

Vi målte også tungmetaller og andre spormetaller, hvoraf nogle anses for toksiske og uønskede. Vi fandt ingen øgning af bly og cadmium i planter og jord, som blev tilført aske, men en mindre stigning for krom. Miljøstyrelsens direktiv for grænseværdier i afgrøder var dog langt fra overskredet, og koncentrationerne af tungmetaller lå en faktor 6 eller mere under de tilladte grænseværdier.

Tilførslen af træaske til skovbunden førte kun til små ændringer i vegetationssammensætningen. Det gælder både før og efter askeudbringning og mellem plots med og uden asketilførsel. Træasken ændrede

Styrbar og ikke-styrbar energi

Energiproduktion i Danmark kan opdeles i styrbar energi og ikke-styrbar energi. Styrbare energikilder er for eksempel fossile brændsler og biobrændsler samt atomkraft, som kan op- og nedskaleres efter behov. Ikke-styrbare energikilder som vind- og solenergi er derimod kun til rådighed, når det for eksempel blæser eller solen skinner. Anvendelse af ikke-styrbar energi forudsætter, at der investeres i 100 % backup fra styrbare energikilder, når den ikke styrbare energi i perioder yder lidt eller ingenting



Figuren viser det registrerede forbrug af forskellige energikilder opgjort af Danmarks Statistik. Energiforbrug til flytrafik til og fra Danmark, samt skibstrafik udført af danske rederier medtages ikke i den officielle statistik. Dette forbrug er estimeret til yderligere 540 PJ energi fra olieprodukter, hvilket giver en fordobling af forbrugt fossil energi i forhold til de i figuren viste værdier.

ikke afgørende plantedækkets sammensætning. Enkelte arter blev dog kortvarigt mere talrige, men virkningen aftog de følgende år. Dette gjaldt eksempelvis for græsarten Bølget Bunke. Det første år efter asketilsætning var der en stigning i antallet af blomstrende skud, men allerede det følgende år var antallet af græsskud det samme på alle plots.

Ændringer i bundvegetationen

Ændringer i sammensætningen af arter i plantagens bundvegetation har en særlig interesse, da den kan være en synlig indikation på generelle ændringer af biotopen.

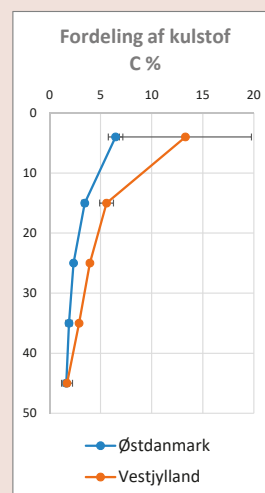
I parcellerne med nyplantet Lærk og Eg fandt vi efter asketilsætning en stigning i dækningsgrad for Fløjlsgræs, Gederams og Almindelig Kongepen, mens Hedelyng og Lyng-Snerre faldt. De nævnte arter var dog fortsat dominerende på arealer både med og uden asketilsætning. Disse parceller er nyplantede efter stormfald af nåleskov. Stormfaldet i år 2000 har forstyrret jorden, og arealet er efterfølgende lysåbent, hvilket muligvis er grunden til, at området rummer et større antal arter end arealet med ren egeskov. Vi fandt 15 arter af urter og græs, samme antal arter på arealer med og uden asketilsætning.

I det andet forsøgsområde, den ældre egeparcel, var vegetationen før asketilførslen domineret af arter tilknyttet næringsfattig og sur skovbund med homogen bevoksning af græsset Bølget Bunke med en dækningsgrad på cirka 50 %. Efter asketilførsel steg dækningsgraden af Bølget

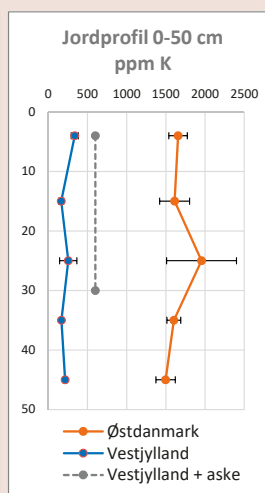
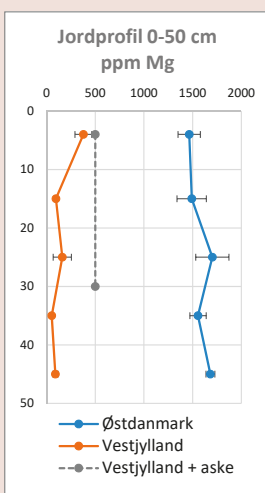
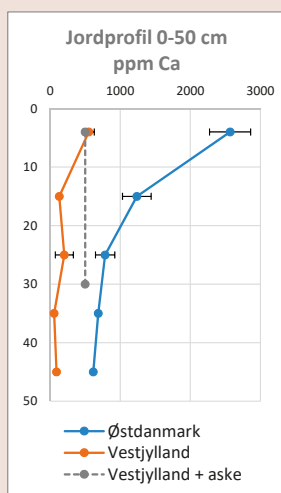
Næringsstoffer i jorden

Figurene viser koncentrationsforløbet af næringsstoffer i 0–50 cm's dybde baseret på 150 analyserede skovjorde fra hele landet. De viste elementer er vigtige for plantevæksten. Blå kurver viser gennemsnitskoncentrationer ned gennem jordprofilen for østdanske skovjorde, mens gule kurver viser tilsvarende koncentrationsforløb for vestjyske skovjorde. Stiplede linjer er beregnede koncentrationer for vestjyske jorde ved nedblanding af træaske i jordsøjlen 0–30 cm.

Kulstof er en indikator for jordens indhold af delvis forvandlede blade og humus. Andelen af kulstof er derved en indikator for nedbrydning af det organiske materiale, træerne tilfører skovbunden. Hvis blade og nåle ikke nedbrydes, frigøres deres indhold af plantenæringen ikke til vegetationen. Næringsstofferne er derved "låst inde" i en uomsættelig kulstof-pulje. De høje kulstof-koncentrationer i Vestjylland indikerer lille omsætningsrate af organisk stof, blade og nåle. Herved reduceres frigørelsen af plantenæring og dermed potentialet for trætilvækst. →



I forhold til kulstofindholdet for henholdsvis Vest- og Østdanmark er billedet af næringsstof-profilerne for kalium (K), magnesium (Mg) og calcium (Ca) det modsatte. De tre næringsstoffer har meget højere koncentrationer i de østdanske skovjorde end i vestjyske. For jorddybder under 10 cm, træernes rodzone, er koncentrationerne i de østdanske jorde i snit 10 gange højere end de vestjyske for de samme dybder. Dette misforhold i næringsstofpotentialet kan selv sagt godt have indflydelse på trætilvæksten i de to geografiske områder.



Med en stiplede lodret linje vises den elementkoncentration, man kan opnå ved at tilføre 18 ton træaske per hektar og nedblande aske sammen med det organiske

toplag til en homogen jordblanding fra 0 til 30 cm.

For de vestjyske jorde bliver koncentrationsforøgelsen af elementer i jordsøjlen 0–30 cm en faktor 3 til 6 højere ved aske-nedblanding. En klar forbedret næringsstofforhold i forhold til ugødet sandjord. Men koncentrationerne ligger stadig langt fra østdanske skovjorde uden tilsat aske.

Bunke til 80 %, og Hedelyng steg fra 1 % til 4 %. Skovstjerne steg fra 2 % til 4 %. Det totale antal af plantearter var uændret 10. Dækningsgraden af de tre dominerende mosser blev ikke påvirket af asketilsætningen, og ingen af de dominerende plantearter forsvandt eller blev nyetableret efter asketilsætning.

Jordens mikroorganismer, med og uden aske

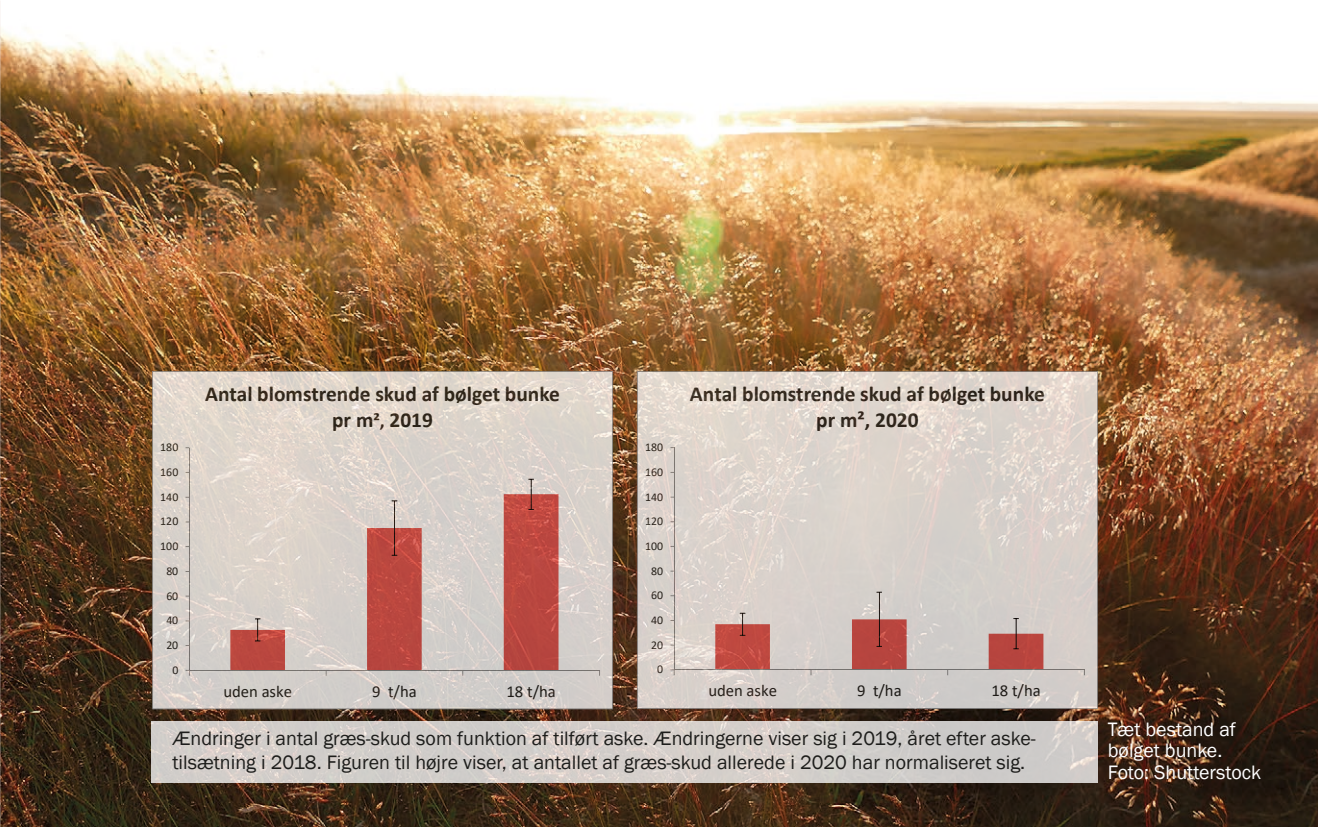
Som en indikator-parameter for mikrobiel aktivitet målte vi antallet af protozoer per gram jord i de

øverste 10 cm af jorden. Protozoer er encellede organismer, der æder bakterier. Bakterieædere spiller en central rolle i jordens omsætning af organisk stof. Protozoerne er selv føde for dyr højere oppe i fødekæden. Antallet af protozoer per gram jord er en indikator for den bakterielle aktivitet.

Antallet af protozoer steg cirka tre gange i plots tilført aske. Vi mener, at dette skyldes, at tilførte næringsstoffer øgede primærproduk-

tionen, samtidig med at jordens syreindhold blev neutraliseret en smule. I gennemsnit steg skovjordenes pH fra 4 til 6 ved tilførsel af den "basiske" træaske.

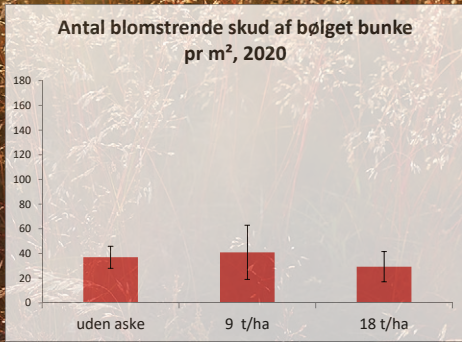
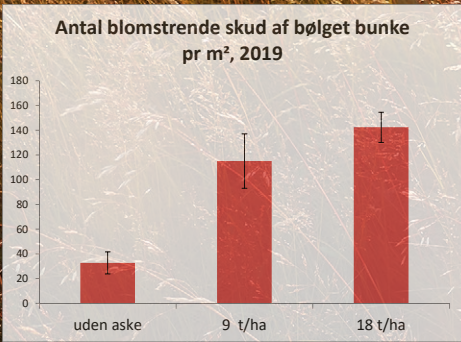
Asketilførsel øger antallet af bakterier i overjorden, og dermed stimuleres omsætningen af organisk stof. Toke Bang-Andreasen og kolleger fandt i et studium fra 2017 et lignende forhold i en anden vestjysk granplantage, hvor den mikrobielle aktivitet ligeledes blev øget ved tilførsel af træaske.



Taleksempel:
45.000 tons træaske pr år fra energisektoren svarer til tilførsel af store mængder handelsgødning (kunstgødning).

Træasken svarer til: 8.000 tons fosfor-kaliumgødning: PK-gødning (0- 7-11) og yderligere 10.000 tons kaligødning med mikronæringsstoffer: K gødning (0-0-40). Askens calcium-indhold svarer til 25.000 tons jordbrugskalk.

Total set er det alle plantenæringsstoffer, der ikke blot er nødvendige for markafgrøder, men også for skovens træer, buske og urter.



Ændringer i antal græs-skud som funktion af tilført aske. Ændringerne viser sig i 2019, året efter asketilsætning i 2018. Figuren til højre viser, at antallet af græs-skud allerede i 2020 har normaliseret sig.

Tæt bestand af bølget bunke. Foto: Shutterstock

Træaske bør tilføres strategisk

Vestjyske plantager på sandet jordbund har lav træproduktion. Vores undersøgelser viser, at tilførsel af træaske fra energiproduktionen forbedrer sandjordens indhold af plantenæring og øger dermed dyrkningspotentiallet.

Samlet set blev jordenes pH-værdi øget (det vil sige surhedsgraden faldt), og produktionen af skovbundens planter og mikroorganismer blev ligeledes øget. Analyser af skovjordenes indhold af plantenæringsstoffer viste, at asketilførsel kun påvirkede de øverste 0-10 cm. Tilførslen har dermed kun påvirket bundvegetationen. Træernes dybereliggende rodsystem har ikke umiddelbar gavn af asketilførsel lagt direkte på skovbunden.

Hvis man vil øge træproduktionen på de næringsfattige vestjyske sandjorde, peger vores forsøg på, at træasken fra energiproduktion skal tilføres mere strategisk. Fremtidige forsøg med tilskud af træaske bør derfor fokusere på at nedblande asken i dybereliggende jordlag (10-40 cm). Hermed beriges træernes rodzone med plantenæringsstoffer til gavn for vedproduktion og CO₂-neutral energiforsyning.



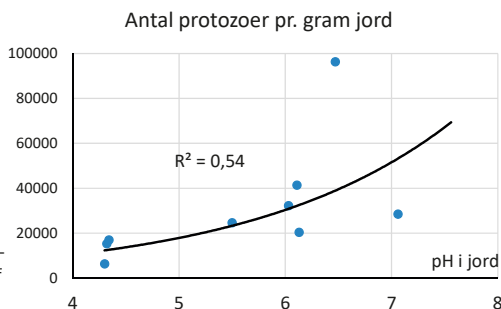
Billede fra en vegetationsanalyse i Stråsø Plantage. Rammen er 1 m² stor, og i hvert af de 9 x 9 = 81 krydspunkter i nettet er der lavet en pin-point-analyse ved at føre en metalpind lodret ned i vegetationen og registrere hver planteart, der rammes af pinden. På den måde får man et mål for dækningen af plantearten. Desuden er der lavet en total floraliste fra hvert plot ved hver måling. Vegetationen er domineret af Bølget Bunke og mosser (primært Trind Fyrremos og Cypresmos) samt lidt spredt tyttebær. Foto: Torben Riis-Nielsen

Forskningen beskrevet i artiklen er finansieret af 15. Juni Fonden.

Videre læsning
Hovmand, M.F., Nielsen, O., Rønn R. Element concentrations in energy wood and wood ash. Project report: Bio. Institute, Copenhagen University, 2019.

Toke Bang-Andreasen, et al. Wood Ash Induced pH Changes Strongly Affect Soil Bacterial Numbers and Community Composition. Frontiers in microbiology, 2017.

Antal af protozoer i skovjord som funktion af jordens surhedsgrad, pH. Tilsætning af basisk træaske øger pH og antallet af aktive protozoer stiger.



HENT INSPIRATION TIL

GYMNASIELÆRERDAGE

PÅ AARHUS UNIVERSITET

Underviser du i naturvidenskab, teknik eller teknologi i gymnasieskolen?
Så kom med til gymnasielærerdage og få

- ✓ **FAGLIGT NYT FRA FORSKNINGENS VERDEN**
- ✓ **IDÉER TIL NYE UNDERVISNINGSEMNER**
- ✓ **MULIGHED FOR AT NETVÆRKE MED ANDRE UNDERVISERE**
- ✓ **PRÆSENTATION AF AARHUS UNIVERSITETS TILBUD TIL GYMNASIER**

Det er gratis at deltage, men du skal tilmelde dig på au.dk/gym

**FÆLLES
GYMNASIELÆRERDAG
I SCIENCEFAG**

27. JANUAR 2023

Som noget nyt inviterer de naturvidenskabelige institutter på Aarhus Universitet til en fælles gymnasielærerdag for lærere i sciencefag.

**GYMNASIELÆRERDAG
I TEKNOLOGI OG
TEKNIK**

10. NOVEMBER 2022

Læs mere på
og tilmeld dig på

AU.DK/GYM



Sidste chance på Zoologisk Museum

Den 23. oktober lukker Zoologisk Museum i København endegyldigt for besøgende. Det sker som led i forberedelserne til åbningen af den nye store museumsbygning, der fra slutningen af 2024 samler Statens Naturhistoriske Museum i Botanisk Have. Så hvis du vil nå at hilse på uroksen, det gigantiske skjolddyr, den 17 meter lange planteædende dinosaur ved navn "Misty" eller andre af museets rariteter i de gamle rammer på Østerbro, så er det ved at være sidste udkald. Men ellers kan de unikke genstande opleves i den nye museumsbygning, når denne åbner. Foto: SNM

Offentlige Foredrag i Naturvidenskab

Efterårssæsonen 2022 byder på følgende foredrag:

27/9: *Jorden og livet – 3.800 mio. års spejling* ved geolog Minik Rosing

4/10: *Kvantefysikken – atomernes vilde verden* ved kvantefysiker Klaus Mølmer

25/10: *Søvn og immunforsvaret* ved neurofysiolog Birgitte Rahbek Kornum

1/11: *Vores urolige klode* ved geofysiker Bo Holm Jacobsen

15/11: *Fagre nye genetiske verden* ved genforsker Jacob Giehm Mikkelsen

22/11: *Datalogien i din lomme* ved datalogerne Kaj Grønbæk og Kasper Green Larsen

Foredragene livestreames til lokaliteter over hele landet. Se mere på ofn.au.dk



FAKTA

Bo Söderström:

Nordens sommerfugle – en felthåndbog. Oversat af Martin Stoltze. Gyldendal 2022. 272 sider, 349,95 kr.



Nordens sommerfugle

Den svenske økologiprofessor Bo Söderström har skrevet en komplet felthåndbog over alle dagsommerfugle i Danmark, Sverige, Norge og Finland, som nu er udkommet på dansk. Bogen beskriver og illustrerer 152 arter af dagsommerfugle samt kølle-sværmere, illustreret med over 600 fotos. Desuden indeholder bogen afsnit om sommerfuglenes liv og økologi, en beskrivelse af de vigtigste sommerfuglebiotoper samt en præsentation af nogle af de bedste sommerfuglelokaliteter i Norden.

FAKTA

Jan Faye og Asger

Kirkeby-Hinrup: Moderne bevidsthedsfilosofi – problemer, teorier, evidens. Nord Academic 2022. 336 sider, 349,95 kr.



Moderne bevidsthedsfilosofi

Forskerne er de senere år blevet meget kogere på hjernen. Men de er stadig uenige om, hvordan vi skal forstå bevidstheden, og hvordan den fungerer. I denne bog giver Jan Faye og Asger Kirkeby-Hinrup feltets videnskabs-teoretiske baggrund, præsenterer de mange filosofiske teorier – både de klassiske og de moderne – og relaterer dem til de empiriske videnskaber. Bogen er skrevet til alle med interesse i området.

Tvivl om centralt Alzheimer-studium

Et karakteristisk symptom på Alzheimers sygdom er, at der ophobes klumper af proteinet beta-amyloid (A β) i hjernen. En dominerende hypotese indenfor forskningen er, at disse klumper – også kaldet plaques – er den primære årsag til de invaliderende symptomer i form af demens, der også er karakteristisk for Alzheimers sygdom.

Det har dog vist sig vanskeligt videnskabeligt set at påvise, at disse plaques er den direkte årsag til de alvorlige symptomer. Men i 2006 udkom et studium i *Nature*, der for alvor gav et rygstød til hypotesen. I dette studium, med den unge neurofysiolog Sylvan Lesné i spidsen, identificerede forskerne en særlig undertype af beta-amyloid (kaldet A β *56), som de kunne vise forårsagede demens i rotter. Artiklen

fra 2006 har siden været et af de mest citerede alzheimer-studier overhovedet. Nu er studiet imidlertid kommet under mistanke. Da neuroforskeren Matthew Schrag kiggede nærmere på studiet af Lesné og kolleger fra 2006 samt andre af forskerens studier, fandt han tegn på, at en række billeder kunne være manipuleret. Schrags opdagelse har ført til, at *Nature* og andre tidsskrifter har udtrykt såkaldt "expressions of concern" om artikler af Lesné. Og en 6 måneder lang undersøgelse iværksat af tidsskriftet *Science* om artikler indenfor området fandt hundredevis af tvivlsomme billeder, herunder flere end 70 i artikler af Lesné.

At påvise snyd i videnskabelige artikler herunder billedmanipulation er en vanskelig og tidkrævende opgave, og der er i skrivende stund

ikke fældet endelig dom over i hvilket omfang, der er tale om egentlig svindel eller mere milde former for "billedforbedring" (eller måske lidt af hvert). Konsekvenserne for forskningen kan under alle omstændigheder være store. Forskningsbevillinger indenfor området i de 16 år har været helt domineret af beta-amyloid tilgangen, og dermed er udviklingen af lægemidler mod alzheimers i høj grad rettet mod at angribe beta-amyloid. Hvis troen på, at denne tilgang er den bedste, viser sig at være funderet på et falsk grundlag, kan millioner af forskningskroner og kostbar tid dybest set være spildt – ligesom tilliden til forskningen kan lide et knæk i en tid, hvor der ellers er problemer nok med at bekæmpe misinformation.

CRK, Kilde: *Science*/doi: 10.1126/science.ade0209

Roskilde Universitet

Læs Naturvidenskabelig Bachelor

”Vi finder et problem, og så leder vi efter naturvidenskabelige metoder til at løse det.

Vi samarbejder fx med hospitaler om modeller for, hvor lang tid kroppen kan tåle behandling med strålingsterapi mod kræft.”

— Max har læst Naturvidenskabelig Bachelor



Foto: Ture Andersen

RUC



Undervisningsmaterialer

Du kan finde masser af ekstrap materiale på aktuelnaturvidenskab.dk, der knytter an til artikler i bladet og som er beregnet på undervisningen i gymnasieskolen.

Sørestaurering og fosforkredsløbet

Arbejdsark til artiklen: *Fosforkredsløbet og fremtidens sørestaurering* i dette nummer. Arbejdsarket består af 9 spørgsmål med tilhørende svar og er udarbejdet af den ene af artiklens forfattere, Sofie Kamlar-czyk, som del af hendes bachelorprojekt.

Bemærk også, at Naturvidenskabernes Hus fra den 1. oktober i år tilbyder undervisningsforløb i tilknytning til projektet i Ormstrup Sø, som de tre temaartikler i dette nummer tager udgangspunkt i.

Find dette materiale på Naturvidenskabernes Hus' hjemmeside: nvhus.dk

Nye quizzer

Slangens proteinsyntese. Quizzen knytter an til artiklen *Slanger giver unikt indblik i proteinsyntesen* fra nr. 3/2022

Flagermus. Denne quiz har udgangspunkt i artiklen *På nattejagt med vilde flagermus* fra nr. 2/2022.

Begge artikler og tilhørende quizzer er lavet som del af projektet Brobygning på første række, som kobler artikler og tilhørende materialer til foredragsserien offentlige foredrag i Naturvidenskab. I kommende numre vil der komme flere artikler i denne serie. Projektet er finansieret af Novo Nordisk Fonden.

ABONNEMENTS-SERVICE

Har du fået ny adresse eller ønsker du at bestille et abonnement på bladet?

Kontakt os på telefon:

8715 2094 / 3036 0662

E-mail: abo@aktuelnaturvidenskab.dk

Abonnement kan også bestilles via hjemmesiden: aktuelnaturvidenskab.dk

Husk at melde flytning til ny adresse.

Vi modtager desværre ikke automatisk besked om din nye adresse.

Til nye abonnenter:

Bestil en intro pakke med otte helt nye numre plus abonnement i et år (6 numre) for kun 354,- kr. inkl. porto & ekspedition.

OM AKTUEL NATURVIDENSKAB

Styregruppe

- Birgitte Lyhne Broksø, kommunikationschef, Det Natur- og Biovidenskabelige Fakultet, Københavns Universitet
- David André Højlund Graff, strategisk kommunikationsrådgiver, Aalborg Universitet
- Jane Thoning Callesen, communication manager, Det Tekniske Fakultet, Syddansk Universitet
- (Vakant), Roskilde Universitet
- Mikkel Linnemann Johansson, teamleder, Det Naturvidenskabelige Fakultet, Syddansk Universitet
- David Lundbek Egholm, prodekan ved Faculty of Natural Sciences, Aarhus Universitet

Eftertryk kun efter aftale. Citat kun med tydelig kildeangivelse. Synspunkter, der fremføres i bladet, kan ikke generelt tages som udtryk for redaktionens holdning.

Layout: Jørgen Dahlgaard

Tryk: Jørn Thomsen Elbo A/S

ISSN: 1399-2309 (papirudgaven), 1602-3544 (web)

Oplag: 9.000



Redaktionsgruppe

- Sune Holst, Det Tekniske Fakultet, Syddansk Universitet
- Birgitte Svennevig, Det Naturvidenskabelige Fakultet, Syddansk Universitet
- Carsten Rabæk Kjaer, Aktuel Naturvidenskab
- Jørgen Dahlgaard, Aktuel Naturvidenskab
- Michael Skov Jensen, Københavns Universitet
- David André Højlund Graff, Aalborg Universitet
- (Vakant), Roskilde Universitet

Redaktionen:

Telefon: 8715 2094 / 3036 0660 / 3036 0662

E-mail: red@aktuelnaturvidenskab.dk

Hjemmeside: aktuelnaturvidenskab.dk

Postadresse: Aktuel Naturvidenskab, Ny Munkegade 120, Bygning 1520, DK-8000 Aarhus C

Omslagsfoto:

Ormstrup Sø i Midtjylland.

Foto: Kåre Nielsen fra INcaseOF

Al henvendelse til:
Aktuel Naturvidenskab,
Ny Munkegade 120, 8000 Aarhus C
E: abo@aktuelnaturvidenskab.dk
T: 87152094



Foto: NASA, ESA, CSA and STScI

Hilsen fra en stjernekuvøse

Mens sommerferien sænkede sig over landet i juli måned blev de første billeder og spektroskopiske data fra James Webb-rumteleskopet præsenteret for offentligheden. James Webb-teleskopet (eller blandt venner bare "Webb") har afløst Hubble-rumteleskopet som forskernes store øje i rummet – i kredsløb cirka 1,5 millioner kilometer fra Jorden. Nu begynder forskerne at høste frugterne af den teknologiske kraftpræstation, der er gået forud. Det er derfor svært at finde et mere oplagt videnskabeligt sommerferiebillede at vise på bagsiden end et af de første officielle billeder fra Webb.

Det spektakulært smukke billede viser NGC 3324, der populært sagt er en "stjernekuvøse" – det vil sige et område, hvor nye stjerner fødes. NGC 3324 er del af en større stjerne-tåge kaldet Carina-tågen, som findes i stjernebilledet Carina (Kølen), der kun kan ses fra den sydlige halvkugle. Kunne vi tage på en cirka 7600 lysår lang kosmisk tur til den afbildede region i vores galakse, ville den dog ikke fremstå for vores øjne som på billedet. Billedet er nemlig optaget i infrarødt lys, og farverne er efterfølgende tilføjet for at repræsentere forskellige bølglængder, hvor blå farver er de korte bølglængder, mens røde farver er de lange.

Billedet viser konkret den forrevne kant af en gigantisk "boble" i NGC 3324. Boblen er opstået i stjerne-tågen på grund af den intense ultraviolette stråling og stjernevind (partikelstrøm) fra nogle tunge, varme og unge stjerner i midten af boblen, som befinder sig ovenover det viste billedudsnit.

Strålingen fra de unge stjerner former kanten af tågen ved langsomt at erodere den væk. Det, der på billedet ser ud som røg, er i virkeligheden varm ioniseret gas og varmt støv, der strømmer væk fra tågen på grund af den kraftige stråling. De største "bjergtoppe" på billedet har en udstrækning på omkring syv lysår.

Forskere håber med hjælp fra Webb-teleskopet at kunne besvare en række store spørgsmål, såsom hvad der bestemmer, hvor mange stjerner, der kan dannes i et givent område, og hvorfor stjerner dannes med netop den masse, de har. Mens forskerne boltrer sig med sådanne spørgsmål, kan alle vi andre blot læne os tilbage og nyde strømmen af storslåede billeder, som Webb-teleskopets observationer kaster af sig.

Carsten R. Kjaer, Kilde: NASA