

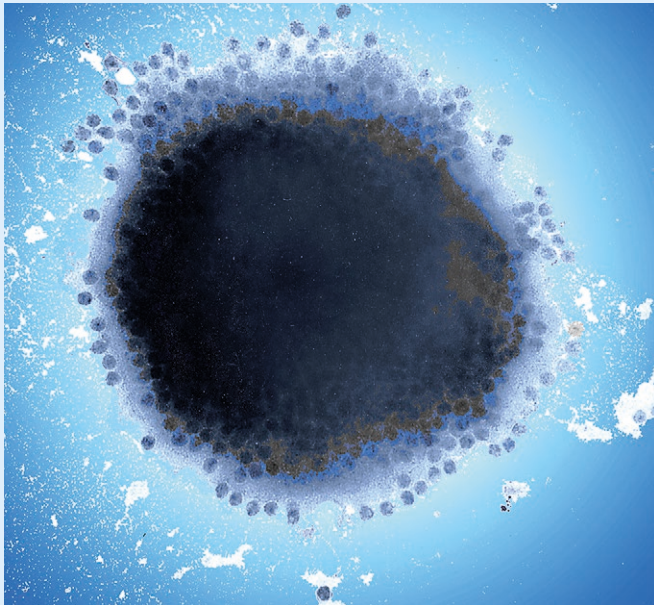
NATURVIDENSKAB OG TEKNOLOGI
DIREKTE FRA FORSKNINGSVERDENEN

AKTUEL *natur* VIDENSKAB

**AF ALLE DYR
LIGNER MYRERNE MÅSKE
OS MENNESKER ALLERMEST**

PFAS: Problematiske fluorstoffer overalt
Flydende forbindelser gør elektronik mere pålidelig
Svampebekæmpelse med naturens egne midler

NR. 2 - 2023 MAJ 50 KR.



En bakteries dødsøjeblik

Ligesom alle andre organismer bliver bakterier også inficeret af virus, og billedet viser en inficeret bakterie lige i det øjeblik, hvor virusserne har reproduceret sig selv inden i cellen og sprænger den. Billedet af den eksploderende celle er taget med et elektronmikroskop og er forstørret 80.000 gange. Det er professor Mathias Middelboe fra Center for Hadal Research, Københavns Universitet, der har fanget det sjældne øjeblik, og billedet opnåede en 2. plads i Danmarks Grundforskningsfonds Fotokonkurrence 2023.

Læs mere og se de andre vinderbilleder på dg.dk

Store pattedyr kan bidrage til et større optag af CO₂

Forskning, der for nylig er publiceret i tidsskriftet *Nature Climate Change*, viser, at der ved hjælp af verdens store dyr kan ophobes store mængder kulstof i planter, træer og under jorden. Dyrene bidrager nemlig til at skabe variation i den vegetation, som kan optage CO₂. Det sker for eksempel, når de gennem deres færden transporterer frø, som bliver til træer, der kan ophobe store mængder kulstof. Derfor mener forfatterne bag studiet, at man i langt højere grad bør prioritere det, der kaldes trofisk rewilding, hvor man gennem opprioritering af habitater for vilde dyr genaktiverer de økosystemer, der naturligt ophober kulstof.

Kilde: *Nyhedsbrev fra Carlsbergfondet*

Succes med humor

Med humor som redskab gør gymnasielærer Anders Torp fra Ørestad Gymnasium undervisningen i fysik og matematik sjov at deltage i. Og det gør han så godt, at han for nylig er blevet belønnet med Novo Nordisk Fondens Naturvidenskabelige Gymnasielærerpris 2023 (Øst for Storebælt). Med prisen følger 250.000 kr., hvoraf 50.000 kr. er en personlig pris, mens 200.000 kr. går til gymnasiet.



Kilde: *Novo Nordisk Fonden*

Quizzen

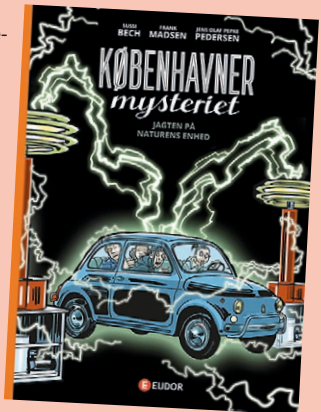
Hvad sker der med ubefrugtede æg i en myrekoloni?

1. Myrerne bortskaffer dem, da de kan blive inficeret af svampe
2. De bliver spist af myrerne
3. De bliver til hanmyrer

Find svaret i artiklen: *Af alle dyr ligner myrerne måske os mennesker allermest.*

Fysikhistorien som tegneserie

Københavnermysteriet – jagten på naturens enhed er en ny tegneserie, der kombinerer thrillerens underholdende kvaliteter med en indføring i fysikkens 2.500-årige historie – historiens klimaks udspiller sig på Niels Bohr Institutet. Bag tegneserien står tegneserieskaber Frank Madsen fra forlaget Eudor, tegneren Sussie Bech og fysiker og seniorforsker Jens Olaf Pepke Pedersen. Udgivelsen er støttet af Novo Nordisk Fonden.



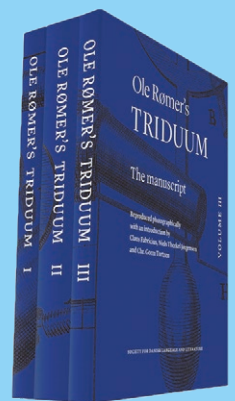
Forbud mod private raketopsendelser droppet

Et lovforslag fra 2020, om at det skal være ulovligt for private at opsende raketter fra dansk jord eller danske skibe, er nu trukket tilbage. Det fremgår af et ministersvar fra Uddannelses- og Forskningsministeren, Christina Egelund (M). "Raketforeningen" Copenhagen Suborbitals kalder det ifølge Ingeniøren.dk for »en sejr for rumfart og forskning i Danmark«. De har kæmpet siden 2020, hvor lovforslaget første gang skulle i høring, men blev udskudt af to omgange. Først på grund af corona og derefter et folketingsvalg.

Kilde: *Ingeniøren.dk*

Ole Rømer's Triduum

I 1706 foretog den danske astronom Ole Rømer sine berømte Triduum-observationer, der i præcision overgik alle målinger foretaget af datidens astronomer og kom til at spille en væsentlig rolle i de første undersøgelser af stjernernes bevægelser i det 18. århundrede. Med støtte fra Carlsbergfondet er Rømers arbejde nu for første gang udgivet i sin oprindelige helhed. Når udgivelsen er vigtig, skyldes det ikke mindst, at størsteparten af Ole Rømers observationer gik tabt ved Københavns brand i 1728. *Claus Fabricius, Niels Therkel Jørgensen og Chr. Gorm Tortzen: Ole Rømer's Triduum, Det Danske Sprog- og Litteraturselskab 2023 (3 bind, 819 sider), 849,95 kr.*



indhold



Af alle dyr ligner myrerne måske os mennesker allermost

Myrerne har, selvom de mangler vores avancerede hjerner, udviklet ingeniørkunderskaber, teknologiske genialiteter og sågar biologisk krigsførelse, som vi mennesker kan lære noget af.

8



Flydende forbindelser gør elektronik mere pålidelig

Effektelektronik har en nøglerolle i den grønne omstilling. Og nu arbejder forskere på at udvikle bedre og mere pålidelig effektelektronik.

26



Svampebekæmpelse med naturens egne midler

Svampesygdomme er et stort problem i landbruget verden over, og derfor er der stor interesse for såkaldte biofungicider, der bruger naturens egne mikrober til at bekæmpe svampene.

18



PFAS - Problematisk fluorstoffer overalt

Fluors industriskabte binding til carbon er blandt de stærkest mulige. Det gør fluor-organiske stoffer uhyre anvendelige og holdbare, men gør dem også til "evigheds-kemikalier" i miljøet, uanset om de stammer fra kølegasser, regntøj, stegepander eller pesticider.

32

FORSKNING OG NYHEDER

- 4 KORT NYT
- 7 Registerdata og depression i Skandinavien
- 8 Af alle dyr ligner myrerne måske os mennesker allermost
- 14 En god kop kaffe med en bismag af lattergas
- 18 Svampebekæmpelse med naturens egne midler
- 24 Har dyr en tidsfornemmelse?
- 26 Flydende forbindelser gør elektronik mere pålidelig
- 32 Problematisk fluorstoffer overalt
- 38 Flagellater – havets mikroskopiske prædatorer
- 44 BAGSIDEN: 25 år med festlig kemi

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 Kjær og Jørgen Dahlggaard
Tlf.: 3036 0660 / 3036 0662 / 8715 2094
E-post: red@aktuelnaturvidenskab.dk
Hjemmeside: aktuelnaturvidenskab.dk



AALBORG UNIVERSITET



AARHUS UNIVERSITET



KØBENHAVNS UNIVERSITET



DET NATURVIDENSKABELIGE FAKULTET



DET TEKNISKE FAKULTET



Roskilde Universitet

SPONSOR-
ABONNENTER



novo nordisk®

Sorte huller vokser sig store på intergalaktisk gas

Sorte huller er enorme kræfter i vores univers, og de kan vokse sig til supertunge giganter ved at indtage store mængder materiale. De mekanismer, som gør det muligt for dem at vokse sig store, har dog længe været en gåde for forskerne.

Nu er forskerne Sandra Raimundo og Marianne Vestergaard fra DARK ved Niels Bohr Institutet sammen med kollegaen Matthew Malkan i USA lykkedes med at påvise én effektiv måde, som sorte huller i centrum af galakser bliver aktive og indtager materialer på: Nemlig ved at opsluge intergalaktisk gas, der bliver transporteret fra en galakse til en anden i forbindelse med et sammenstød af galakser, eller når en galakse passerer tæt forbi en anden.



Sammenstød af galakser kan give ny næring til de sorte huller i galaksernes centrum. Foto: NASA and The Hubble Heritage Team

Forskerne har med studiet påvist en af de mekanismer, der driver gas mod centrum af galakser. Og de nye resultater viser, at en større andel af galakserne har aktive sorte huller, når gassen bevæger sig i den modsatte retning af galaksens rotation. Det er første gang, at forskere har fået observationsdata som bevis for mekanismen. Forskningen er baseret på

observationer af 3000 udvalgte galakser. Forskerne fandt, at en markant større andel af de galakser, hvor de kunne registrere gas ude af trit med galaksens rotation (dvs. intergalaktisk gas) havde aktive sorte huller. Forskerne mener det kan spille ind, at den modsatrettede gas er ustabil og ude af kredsløb.

»Selvom den modsatrettede gas kommer med sin egen energi fra rotationen, så kan sammenstødet med de modsatrettede bevægelser i galaksen få gassen til at tabe

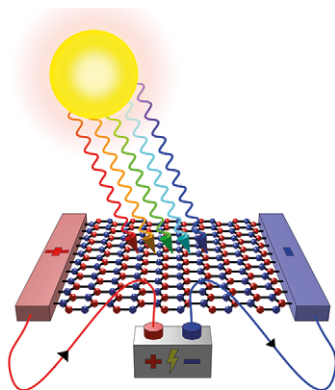
den rotationsenergi. På den måde vil gassen være overladt til galakse-kernens tyngdekraft og kunne falde hurtigere mod det sorte hul i centrum,« forklarer Sandra Raimundo, der er hovedforfatter på studiet, der er publiceret i *Nature Astronomy*.

Kristian Bjørn-Hansen, KU

Metode til at forudsige materialers egenskaber

Isolceller udnyttes solens lys til skabe en elektrisk strøm. Traditionelle solceller fremstilles af silicium og er typisk tykke og umulige at bøje. Desuden skal de gennem en kompliceret proces, hvor der tilføres forskellige atomare "urenheder" i krystalstrukturen i cellens to halvdele, som sørger for, at strømmen løber den rigtige vej. Dette kaldes dotering, og uden dotering ville elektronerne i strømmen ikke vide, hvad der er "plus og minus", og solcellen ville være ubrugelig. I et videnskabeligt gennembrud har det for nyligt vist sig, at der findes materialer, som uden dotering helt af sig selv leder strømmen den rigtige vej. Det er netop denne slags materialer, som forskere fra Aalborg Universitet i samarbejde med blandt andet DTU har undersøgt i en artikel publiceret i tidsskriftet *Nature Physics Journal: Computational Materials* (9, 35 (2023)).

I artiklen har forskerne undersøgt hele 326 nye materialer, der alle deler de egenskaber, der garanterer, at den elektriske strøm ledes den rigtige vej. Materialerne er undersøgt med avancerede teoretiske metoder baseret på kvantemekanik. Det er lykkedes at forudsige solcellernes effektivitet med stor præcision,



Figuren viser en prototype på et to-dimensionelt materiale, hvor rød og blå repræsenterer henholdsvis bor- og nitrogenatomer. Det er vigtigt, at der er forskel på højre og venstre, hvilket kan ses ved, at man ikke kan spejle strukturen langs en vertikal akse (det kan man til gengæld godt langs en horisontal akse).

hvilket gør det muligt at "screene" materialerne for de bedste kandidater til fremtidens solceller.

Ph.d.-studerende Mikkel Ohm Sauer fra Institut for Materialer og Produktion samt Matematiske Fag på AAU er hovedforfatter på artiklen. Han udtaler: »Det fantastiske ved studiet er, at vi kan beregne stoffernes egenskaber med så høj pålidelighed. På den måde slipper man for

at prøve sig frem i laboratoriet, når man skal vælge materialer til nye solceller. Vi kan i hvert fald give et meget sikkert bud på, hvilke materialer, der vil fungere bedst, og hvad, man kan forvente, cellens virkningsgrad vil være.«

De nye materialer tilhører alle såkaldt to-dimensionelle halvledere, som er en helt ny og meget lovende klasse af materialer. De spås blandt andet at få anvendelse i fremtidens elektronik og som lyskilder i for eksempel mobiltelefondisplays. To-dimensionelle materialer er ekstremt tynde, typisk kun med tykkelser på nogle få atomlag. Derfor er materialeforbruget i de nye solceller minimalt, og de kan nemt bukes og foldes, fordi lagene er så tynde. Projektet er ledet af professor Thomas Garm Pedersen fra Institut for Materialer og Produktion ved AAU, som siger: »Solcellerne er blot ét eksempel på de egenskaber, som vi kan beregne med de nye metoder. Vi har tidligere undersøgt materialernes evne til at udsende lys, og faktisk viser det sig, at mange af dem er supergode til at omdanne lys fra en farve til en anden. Det forventer vi mange spændende anvendelser af i fremtiden.«

Andreas Nørskov Pedersen, AAU

Nyt enzym overlever varme og nedbryder plastik

Lektor Evamaria Petersen har sammen med kolleger og studerende fra Aalborg Universitet udviklet det første enzym i verden, som kan nedbryde plastik af typen polykarbonat.

Polykarbonat anvendes til eksempelvis plastikflasker, haveredskaber og husholdningsvarer, og der blev alene i 2022 forbrugt mere end 4,5 millioner tons af det på verdensplan. Materialet udgør en stor del af den plastikforurening, som truer Jordens økosystemer fra de højeste bjergtoppe til de dybeste oceaner.

Forskernes specifikke gennembrud er, at de har formået at udvikle et enzym, der kan "angribe" og nedbryde plastikken, og som samtidig kan fungere under de høje temperaturer på mindst 60-70 grader Celsius, der skal til for at blødgøre polykarbonat-plastikens struktur.



Lektor Evamaria Petersen. Foto: Thomas Strubjerg

»Vi byggede en teoretisk model af et proteinskelet, som kunne tåle at blive varmet op til 100 grader uden at blive ustabil. Oven på det modellerede vi aminosyrerne på en måde, så de kan danne et funktionelt enzym – en biologisk katalysator – der præcist kan klippe bindingerne i plastikmolekyler i stykker,« forklarer Evamaria Petersen.

I laboratoriet skabte forskerne efterfølgende en fungerende prototype af enzymet. Den kan være første skridt på vejen mod at løse problemerne med mikroplastik og plastik-øer i havene.

»Enzymet nedbryder plastikken til dets oprindelige organiske komponenter. Dem kan man genbruge og anvende til at producere plastik af igen, så potentialet er mega-stort,« uddyber hun.

Den første prototype af enzymet er kun effektiv mod polykarbonat, men ifølge Evamaria Petersen er det kun et spørgsmål om tid og penge at kunne udvikle løsninger efter samme metode til også at nedbryde andre typer af plastik.

Camilla Kristensen og David Graff, AAU

Forskningsresultatet er offentliggjort i 'bioRxiv – The Preprint Server for Biology': www.biorxiv.org/content/10.1101/2023.03.10.532063v1

Stor satsning på droner til naturbevarelse

Et stort anlagt forskningsnetværk WildDrone skal revolutionere måden, vi bedriver naturbevarelse. Netværket, som Syddansk Universitet står i spidsen for, har 19 partnere, heriblandt en række europæiske og afrikanske universiteter, adskillige forskningsinstitutioner, naturreservater, interessereorganisationer, private virksomheder og store globale aktører som BBC. Selve forskningen kommer til at foregå både i Europa og Afrika. Forskeren, der skal koordinere det hele, er professor Ulrik Pagh Schultz Lundquist fra dronecenteret på Syddansk Universitet i Odense.

»Kort sagt går WildDrone ud på at samle tre forskellige fagområder: biologi, droneteknologi og computervision. Målet er at udvikle droneteknologien, så den kan blive mere nyttig inden for naturbevarelse,« siger Ulrik Pagh Schultz Lundquist.

Allerede nu bruger man i stor stil droner ude i naturen, blandt andet til at indsamle information om truede dyrearter. Men det er



Foto: Colourbox

et relativt arbejdskrævende manuelt værktøj, som kræver en dronepilot, der kan styre dronen, og efterfølgende nogen, der kan nærstudere alle optagelserne. I WildDrone vil forskerne automatisere processen, så dronerne flyver af sig selv, og informationerne bliver behandlet helt automatisk. Dermed vil man kunne indsamle helt ny viden om dyreliv, man ellers ikke ville kunne få adgang til.

»Vi forventer, at vi kan indsamle en større mængde data, end man kan nu, og vi forventer også at få data på et højere niveau, fordi vi kan behandle det automatisk,« siger Ulrik Pagh Schultz Lundquist.

Netværket skal gennemføre en række konkrete forskningsprojekter. For eksempel skal dronerne overvåge løver i Kenya med henblik på at undgå konflikter med kvægbesætninger. De skal også observere marsvin, sæler og fugle i Vadehavet og undersøge storke migrationsruter mellem Nordeuropa og Afrika. På trods af de ambitiøse mål for WildDrone, skal vi dog ikke regne med, at der ligger et færdigt droneprodukt til naturbevarelse, når det er færdigt om 4 år.

»Det er grundforskning, det her, men hvis bare halvdelen af vores mål lykkes, har vi opnået rigtig meget, i forhold til hvad man kan bruge droner til ude i naturen, og vi bliver under alle omstændigheder klogere,« siger Ulrik Pagh Schultz Lundquist.

Netværket har modtaget 3,68 millioner euro – eller knap 28 millioner danske kroner – i støtte fra EU, den britiske forskningsfond UK Research and Innovation (UKRI) og det schweiziske sekretariat for uddannelse og forskning (SERI).

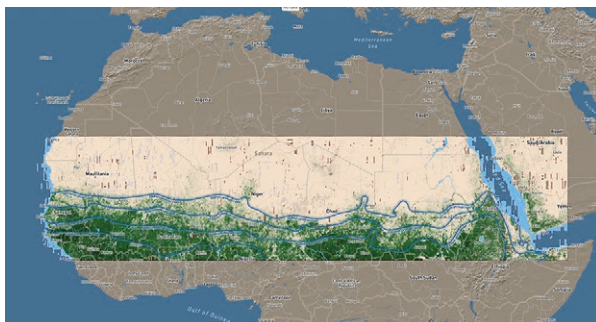
Sebastian Wittrock, SDU Tek

9 milliarder træer optalt i gigantisk puslespil

At købe aflad for udledning af CO₂ ved hjælp af klimakreditter vinder indpas blandt virksomheder verden over. Her bliver en mængde CO₂-udledning neutraliseret i form af for eksempel et plantet træ eller et træ, man undlader at fælde.

Nu har forskere fra Københavns Universitet sammen med NASA opfundet en metode, der gør det nemmere at holde styr på, hvor mange træer der faktisk bliver plantet, og hvor mange der bliver fældet. Med metoden har forskerne optalt samtlige 9,9 milliarder træer i det tørre landbælte Sahel, der løber tværs over Nordafrika, og derudover målt, hvor meget kulstof træerne lagrer.

»Meget tyder på, at handel med klimakreditter kun bliver mere og mere udbredt i fremtiden. Derfor er det afgørende, at vi er i stand til at overvåge, om handlen med klimakreditter afspejler det faktiske antal træer i naturen og dermed har en positiv klimaeffekt. Og



Forskernes data kan tilgås på hjemmesiden: <https://trees.pgc.umn.edu/app>

det kommer vi nu med en løsning på,« siger professor Rasmus Fensholt fra KU.

I samarbejde med NASA har forskerne gennemgået 300.000 satellitbilleder af Sahel-området i høj opløsning for at sammenstykke en mosaik, der bedst viser antallet af træer fra oven. Derefter har de med kunstig intelligens trænet en af NASA's supercomputere til at genkende eksempelvis et akacietræ på sin flade krone.

»Vores undersøgelse viser, at deep lear-

ning-teknikker kan revolutionere den globale kortlægning af træer og deres biomasse. Vores kunstige neurale netværk har lært at udvinde komplekse mønstre fra store mængder af satellitbilleder, hvilket muliggør mere nøjagtig og effektiv identifikation af individuelle træer og efterfølgende estimering af deres biomasse,« siger professor Christian Igel fra KU.

Ud over at kontrollere effekten af klimakreditter kan metoden også hjælpe med at undersøge, om naturgenopretningsprojekter med træer faktisk går, som de skal. Forskningen er udgivet i tidsskriftet *Nature* i marts.

»Over de sidste 10-15 år er der brugt rigtig mange ressourcer i verdens tørre områder på storstilede træplantningsprojekter, som blandt andet Verdensbanken har finansieret. Men har de virket, og har træerne overlevet? Det kan vores metode hjælpe med at kortlægge,« siger Rasmus Fensholt.

Af Maria Hornbek, Københavns Universitet

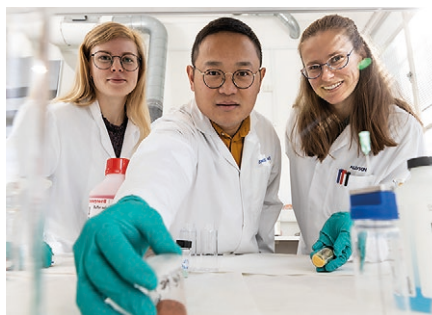
Ny teknologi fjerner og nedbryder PFAS i ét trin

Forskningsgruppen Water Engineering Innovation på Aarhus Universitet er i fuld gang med at udvikle en teknologi, der ved hjælp af biomasse og sollys skal indfange og fjerne evigheds-kemikalier i ét samlet, bæredygtigt trin.

»Vi har udviklet flere forskellige metoder, der kan indfange og nedbryde PFAS. Nu er vi ved at samle teknologierne i et samlet design.«

Sådan siger lektor Zongsu Wei, der leder forskningsgruppen på Aarhus Universitets Institut for Bio- og Kemiteknologi. Her arbejder 16 forskere på at udvikle en miljøvenlig, cirkulær teknologi, der ved hjælp af restbiomasse fra landbruget og sollys kan indfange og nedbryde de såkaldte evigheds-kemikalier, PFAS.

De mest gængse måder at filtrere drikkevand for PFAS i dag er via filtrering med enten aktivt kul-filter, ionbytnings-filter eller med



Ph.d.-studerende Charlotte Skjold Qvist Christensen (tv), adjunkt Zongsu Wei (midt) og ph.d.-studerende Allyson Leigh Junker (th). Foto: Nicolai Hildebrand

en specialdesignet membran. Alle disse muligheder filtrerer PFAS fra vandet, men destruerer ikke PFAS. Filtrene er derfor alle midlertidige, idet de skal sendes til forbrænding for at destruere det akkumulerede PFAS eller også ender filtrene på lossepladser.

Den løsning, forskningsgruppen Water Engineering Innovation på Aarhus Universitet arbejder på, er ikke midlertidig, men perma-

nent. Målet er et filter, der konstant indfanger og nedbryder PFAS og regenererer sig selv, og som kan installeres f.eks. ved drikkevandsboringer eller ved rensningsanlæg.

Teknologien har forskningsgruppen bevist i lab-skala. Forskningsgruppen arbejder bl.a. på et filter af biokul, hvis overfladekemi er modificeret for at forbedre adsorptionsevnen. Når PFAS er fanget i filteret bliver det nedbrudt via en metallisk fotokatalysator, der består af titanium-dioxid og en række overgangsmetaller. Metal-katalysatorerne er fikserede i filteret, og processen starter, når metallerne udsættes for ultraviolet lys.

Tilsammen skal filteret med fikserede fotokatalysatorer kunne fjerne al PFAS fra gennemstrømmende vand. Teamet har i lab-skala indtil videre kunnet fjerne over 99 % PFAS fra vand-fase og nedbryde 53 % PFAS fotokatalytisk.

Jesper Bruun, AU Engineering

Registerdata og depression i Skandinavien

Mange mennesker lider af depression, som er kendetegnet ved nedtrykthed og nedsat lyst og interesse. Andre typiske symptomer er svækket koncentrationsevne og psykomotorisk aktivitet (dvs. langsom tankegang og stivnede bevægelser) ligesom søvn- og spisemønstre kan være påvirket. Nogle mennesker oplever også selvmordstanker.

Der er stor forskel på, hvor alvorlige symptomer mennesker diagnosticeret med depression oplever. Nogle udvikler livslange sygdomme med betydelig funktionsnedsættelse, men andre oplever en enkelt, mild episode, der forsvinder efter nogen tid. Flere og flere mennesker diagnosticeres med depression, og det er derfor vigtigt at forstå, hvorfor depression er så almindeligt og dermed hjælpe forskere, politiske beslutningstagere og klinikere med at udvikle bedre behandlingsmuligheder og forebyggende tiltag.

Stor skandinavisk undersøgelse

I en ny undersøgelse har forskere i et tværgående nordisk samarbejde set nærmere på registerdata for i alt 273.000 personer diagnosticeret med depression i Danmark, Norge og Sverige (i perioden 1975-2013) for at vurdere, om det er det samme billede, der gør sig gældende i disse tre skandinaviske lande. Resultaterne viser, at det er det – i hvert fald et stykke ad vejen. I alle tre lande diagnosticeres således cirka dobbelt så mange kvinder end mænd med depression. Denne kønsbalance er almindelig kendt og kan bunde i både biologiske og sociokulturelle forskelle. Selvskade var uforholdsmæssigt mere udbredt hos unge kvinder i Danmark og Sverige, mens der generelt ses flere selvmord hos mænd.

Udover disse ligheder var der også nogle vigtige forskelle. Således var der registreret færre psykiatriske lidelser i det danske psykiatriske speciallægerregister end i Sverige. Aldersfordelingen af patienter med depression ser også anderledes ud, idet der i Danmark stilles flere depressionsdiagnoser i ældre befolkningsgrupper. Desuden var diagnosen angstlidelse efter en depressionsdiagnose mere end 2,5 gange så almindelig i Sverige som i Danmark (henholdsvis 44,4% og 16,5%).



Foto: Shutterstock

Disse forskelle kan forklares med forskellene i psykiatrisk speciallægebehandling i de forskellige lande. Flere behandles for en psykiatrisk lidelse hos speciallæger i Sverige (4,3 %) end i Danmark (3,1 %). Mens en henvisning fra den praktiserende læge til speciallæge er den mest almindelige vej i Danmark, går patienter i Sverige ofte direkte til den psykiatriske speciallæge.

Årsager til forskelle mellem landene

Når man sammenligner forskellige lande med hensyn til depression må man således tage i betragtning, at nogle af de observerede forskelle kan afspejle forskelle i diagnostisk praksis, veje til pleje og i registerinfrastrukturen.

Generelt var depression forbundet med en betydelig sygdomsbyrde i alle de tre lande. For eksempel ses et sammenfald mellem depression og en øget sandsynlighed for selvmord, selvskade og tidlig død i både Sverige og Danmark. I Sverige ses også et sammenfald mellem depression og mindre gunstige socioøkonomiske forhold (dvs. lavere indkomst og uddannelsesniveau), og dette var især tilfældet for kvinder. Sådanne uligheder kan medvirke til at forværre sygdomsbyrden for depression og kan være endnu mere udtalt i andre lande.

John Shorter, RUC. Resultaterne er offentliggjort i tidsskriftet Lancet Regional Health Europe. 2023;100621, ISSN 2666-7762.

Om John Shorters forskning

Den omtalte forskning er udført i et stort tværgående nordisk forskningssamarbejde, og for størstedelen finansieret af US National Institute for Mental Health. Fra dansk side deltog et team fra Sct Hans Hospital (Institut for Biologisk Psykiatri), hvor John Shorter var postdoc. John er siden blevet adjunkt i biomedicinsk datavidenkab ved Roskilde Universitet, og han skal nu i forlængelse af den beskrevne forskning arbejde med genetisk analyse af data for om muligt at identificere genetiske markører, der kan forudsige sandsynligheden for at udvikle depression.

E-mail til John Shorter: johnsh@ruc.dk

AF ALLE DYR LIGNER MYRERNE MÅSKE OS MENNESKER ALLERMEST

Myrer lever i komplekse sociale strukturer med millioner af individer, der har hver deres funktion i samfundet. På den måde ligner myrer måske mennesker allermest af alle dyr. Samtidig har myrerne, selvom de mangler vores avancerede hjerner, udviklet ingeniørkundskaber, teknologiske genialiteter og sågar biologisk krigsførelse, som vi mennesker kan lære noget af.

Hvis man betragter én enkelt myre, ser den måske ikke ud af så meget. Hovedet ser lidt for stort ud, den virker ikke særligt kvik, og en tommelfinger kan mase den flad på et øjeblik.

Myrer er dog aldrig alene. De er hver især individer i enorme samfund, der kan rumme over én million artsfæller, som lever i et komplekst samspil med hinanden og med deres omgivelser på en måde, som bedst af alt kan sammenlignes med den måde, hvorpå vi mennesker lever i storbyer.

Myrerne har hver især en defineret rolle i samfundet. I samfundet findes både soldater, bønder, hus-hjælp, kamikazepiloter og en dronning, som dog ikke spiller nogen lederrolle i myrernes organisationsløse samfund.

Selvom de mange millioner af myrer ikke har nogen ledere, er de alligevel i stand til at bygge komplekse tuer, skabe genial ingeniørkunst, bygge broer og tøm-

merflåder samt at forsvare sig mod alt fra bakterier til store pattedyr som os.

Der er så mange fascinerende historier at fortælle om myrer, hvilket seniorforsker Joachim Offenbergs fra Institut for Ecoscience ved Aarhus Universitet også opdagede, da han for efterhånden nogle år siden havde sine første lektioner på biologistudiet.

»Jeg voksede op med Greenpeace og var overbevist om, at jeg skulle være marinbiolog og studere hvaler. Men så stødte jeg på myrerne og fandt ud af, at de har en meget mere interessant livshistorie end de store dyr og faktisk også ligner os mennesker meget mere, selvom de ikke gør det på udseendet,« fortæller han.

Joachim Offenbergs skal i forbindelse med foredragsserien Offentlige Foredrag i Naturvidenskab holde et oplæg om netop sin passion for myrer, og hvad der ifølge ham gør dem til nogle af de mest spændende dyr på vores lille blå planet.

Myrer har hver deres job – ligesom mennesker

Hvis man stikker hovedet ind i en myrekoloni, vil man opdage, at myrerne både ser meget forskellige ud, og at de også laver meget forskellige ting.

For det første er der dronningen. Hun lever hele sit liv inde i tuen og kommer aldrig uden for en dør. Hendes eneste job er at lægge æg og lægge rigtig mange af dem, så samfundet kan blive ved med at eksistere.

Når nu dronningen ikke kan komme uden for en dør, har hun brug for nogle andre myrer til at sørge for sig. Det tager nogle specialiserede arbejdermyrer sig af, og det er deres job at sikre, at dronningen bliver fodret med nok mad, til at hun kan blive ved med at producere de mange æg, som kolonien har brug for. På samme måde findes der også arbejdermyrer, som tager sig af æggene, når først dronningen har lagt dem. De flytter dem fra dronningens kammer til et ægge-kammer, hvor æggene klækker

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

Forskeren
Joachim Offenbergs
holder den 25. april 2023
foredrag om myrer i serien
Offentlige foredrag i Natur-
videnskab. Artiklen bygger
på dette foredrag. Se mere
på ofn.au.dk



og bliver til larver, som andre myrer passer på.

De myrer, der tager sig af myrelarverne, er også med til at bestemme, hvilke typer myrer der kommer ud af æggene. Når kolonien har brug for flere af den ene eller anden slags myrer, påvirker de æggene med forskellige hormoner, så selvom myrerne har den samme genetiske kode, udvikler de sig i forskellige retninger til netop det, som kolonien har brug for.

Foruden dronningen og hendes oppassere findes der i myresamfundet også myrer, der er tuens landmænd. Nogle myrer holder for eksempel bladlus som husdyr, og så malker de bladlusene for honningdug, som de kan brødføde kolonien med. Andre bladlus dyrker svampe, som de kan fodre de andre millioner af myrer med.

»Faktisk er myrer sammen med mennesker de eneste dyr, der holder andre dyr som husdyr. Det er da sjovt at tænke på,« siger Joachim Offenberg.

Myrer begår selvmord for at beskytte kolonien

Det er klart, at med så meget lækker mad i boet er der risiko for, at andre insekter kommer og stjæler det. Derfor har myresamfundet selvfølgelig også sin egen hær bestående af soldater.

Soldatermyrer er kendetegnet ved, at de har ekstra store hoveder og ekstra store kæber med et kraftigt bid, der kan kappe lemmer af andre insekter eller sågar jage store pattedyr væk.

Jaja, én enkelt myre har sjældent så skræmmende en effekt på et stort pattedyr, at det får det til at daffe, men når én soldatermyre angriber, udskiller den samtidig et feromon, der får de 25.000 andre soldatermyrer til at gøre det samme. Så har det ofte den effekt, at selv de største pattedyr skynder sig væk i en fart.

I kampen med andre insekter kan soldatermyrerne også tilkalde en hær af kamikazepiloter. Kamikazepi-

En vældig soldatermyre sammen med en gruppe arbejdermyrer af samme art. Foto: Shutterstock

Kæde af vævermyrer, der trækker to blade sammen under deres redebyggeri. Foto: Brian Rasmussen, Randers Regnskov.





Vævermyre der benytter en larve som limpistol: Foto: Brian Rasmussen, Randers Regnskov.

loterne er nogle helt specielle myrer, der i koloniens tjeneste begår selvmord med det formål at rydde den indkommende trussel af vejen.

Kamikazepiloterne er myrer, som i den hormonelle påvirkning i larvestadiet har fået skruet op for gener, der hjælper dem til at danne forstørrede kirtler med en ætsende væske. Alle myrer har disse kirtler, men de er særligt store hos selvmordsmyrerne. Når myrerne går i kamp, løber selvmordsmyrerne forrest, kaster sig ind i mængden af fjender, hvor de eksploderer og sender deres ætsende væske ud i alle retninger. Det gør, at fjenderne dør.

»Det, som gør myrerne så interessante, er, at selvom myrerne er meget uintelligente, ved de alle sammen, hvad de skal gøre, selvom de lever i et meget komplekst samfund med mange forskellige funktioner og millioner af myrer. Samtidig er der ingen, som fortæller dem, hvad de skal gøre. De ved det bare,« siger Joachim Offenberg.

Spilfirma kopierer myrernes ledelsesfrie organisation

Netop myrernes evne til at leve i et meget struktureret samfund uden topstyring har fanget interessen hos ikke bare biologer, men også organisationsteoretikere, der gerne vil

forstå, hvordan man kan have skarp organisering uden ledelse.

»Ledere vil ofte være bagudskuen- de, og det kan bremse nyudvikling. Derfor er der interesse i at forstå, hvordan man kan have organi- sationsstruktur uden ledelse, så der kan opstå innovation,« siger Joachim Offenberg.

Faktisk forsøger nogle virksom- heder at kopiere myrernes måde at gøre tingene på. Det gælder blandt andet computerspiludvik- leren Valve, der arbejder uden ledelse, men hvor medarbejdere spørger hinanden, om det, som de laver, er en god idé. Vil en med- arbejder for eksempel udvikle et nyt spil, skal han eller hun have to kollegaer med på ideen, før man kan gå videre.

Valve står blandt andet bag succes- erne Counterstrike og Half-Life, så et eller andet må de gøre rigtigt.

»Myrerne har organiseret deres samfund på den her måde i 100 millioner år med succes. Kigger man på de dyr, som fylder mest i form af biomasse på Jorden, er det mennesker, myrer og termitter. Vi er alle sammen sociale dyr, der lever i komplekse samfund, og som er gode til at udvikle intelligente løsninger på givne problemstillinger. Mennesker gør det ved at bruge vores intelligens, mens myrerne har udviklet en anden måde at skabe intelligente løsninger uden intelli- gens og ledelse,« forklarer Joachim Offenberg.

Bruger myrelarver som limpistoler

Skeler man til nogle af de geniali- teter, som myrerne står bag, kan man som eksempel kaste et blik på vævermyrerne, der lever i trætoppe i troperne. Vævermyrerne bygger ikke tuer på eller under jorden, men samler i stedet blade fra forskellige grene og bygger store bladkupler af dem.

Når vævermyrerne skal samle blade, skal mange ting gå op i en

højere enhed. For det første er myrerne nødt til at samarbejde for at trække bladene på grenene sammen. Det sker ved, at myrerne laver lange levende broer mellem grenene, og så forkorter de hele tiden broerne, indtil bladene er trukket sammen.

Det er dog ikke nok for myrerne at trække bladene sammen. De skal også have dem til at blive sammen, og til det formål hiver de myrelarver ud af boet. Myrer kan ikke selv lave silke, men det kan myrelarverne, som skal kunne forpuppe sig, inden de kan blive til færdigudviklede myrer. Myrelarverne holder myrerne som limpistoler og får dem til at sprøjte klæbrig silketråd ud på bladene, så de kan lime dem sammen.

»På den måde kan myrerne bygge reder på størrelse med badebolde. Det sker uden nogen byggeformand eller nogen til at fortælle dem, hvordan de skal gøre. I stedet ligger det i myrernes biologi, at når de som eksempel ser én myre, der rækker ud efter et blad, vil andre myrer gøre det samme, indtil flere hundrede myrer har fået bygget en bro fra det ene blad til det andet,« siger Joachim Offenberg.

I samme genre findes der i Amazonas også myrer, der kan bygge flodpramme, som de kan fragte dronningen, æggene og larverne rundt på under oversvømmelser. I det tilfælde bider arbejdermyrerne fast i hinanden og danner en stor flodpram, som resten af kolonien kan flyde rundt på.

Mennesker kopierer myrernes skorstene

Foruden at være voldsomt fascinerede er forskere også begyndt at se i myrernes retning for at finde inspiration til at løse nogle af de problemstillinger, som vi mennesker står over for. Myrerne har i flere tilfælde haft millioner af år til at løse nogle problemer, som vi mennesker kun har haft 200.000 år eller sågar blot et par hundrede år til at få fokus på.



Vævermyrer samarbejder om at nedlægge stort byttedyr. Foto: Rasmus Lundegaard



Myredronning i sin rede omgivet af larver og arbejdere: Foto: Shutterstock

Store kønsforskelle mellem myrer

I en myrekoloni er der kun én dronning, men det er faktisk ikke det eneste sted, hvor der er kønsforskelle mellem myrerne. Langt de fleste myrer er nemlig hunner, og kun et fåtal udvikles som hanner. De har vinger ligesom dronningen og bliver populært betragtet som ikke meget andet end sædceller med vinger. Anden funktion tjener de faktisk ikke, og derfor lever en hanmyre også ofte kun i et par uger, mens en dronning kan blive op til 30 år.

I modsætning til mennesker, hvor kønskromosomer bestemmer, om vi udvikler os til hanner eller hunner, er det antallet af genomer, der bestemmer, om myrer udvikler sig til hanner eller hunner. Hanner udvikles fra ikke-befrugtede æg og modtager som sådan ingen gener fra en far og kan heller ikke få sønner. Hunner har derimod to kopier af et genom i alle deres celler – én kopi fra far og én kopi fra mor.

Selvom hannen dør ganske kort tid, efter han har parret sig med en hun, kan han fortsætte med at føre sine gener videre i mange år. Dronningen parrer sig nemlig kun én gang i livet, hvorefter hun etablerer sin koloni ved hjælp af et organ, der agerer sædbank i resten af hendes levetid. I den første tid spiser dronningen ikke noget, men lever af fedtdepoter rundt om på kroppen og energi fra de flyvemuskler, som hun ikke skal bruge mere. Først når de første æg er klækket, og de første arbejdermyrer er udviklet, begynder dronningen at spise igen.



Dansk skovmyre fanger skadedyr (frostmålerlarve) i æbleplantage. Foto: Jens Pedersen

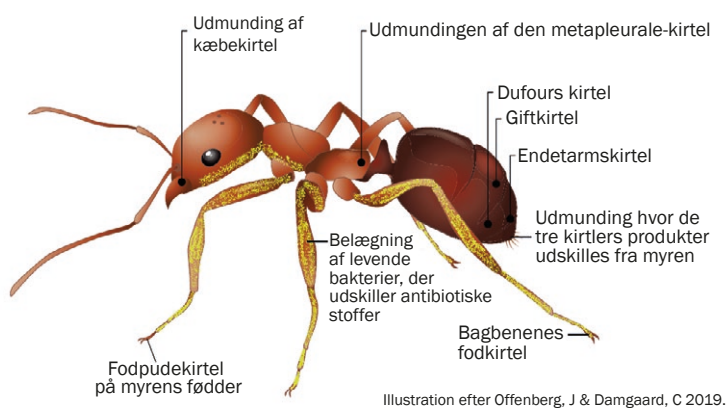


Illustration efter Offenberg, J & Damgaard, C 2019.

Figuren viser forskellige kilder til antibiotika, der findes på myrens krop. Den metapleurale kirtel er en kirtel, som kun myrer har og den udskiller bredspektrede antibiotiske stoffer. En biofilm med levende bakterier udskiller desuden antibiotiske stoffer på myrens ben, hoved og bryst.

Blandt andet ventilerer man i dag mange højhuse ved hjælp af teknologi, som myrerne opfandt for mange millioner af år siden.

Bladskærmyrer, som ideen til den effektive ventilation af højhuse kom fra, lever i tuer, der kan gå otte meter ned i jorden. Selvom myrerne lever så langt nede under jorden, skal de stadig kunne trække vejret, og derfor er der brug for ventilation, så frisk luft kan komme fra jordoverfladen og ned i dybet.

For at kolonien ikke bliver iltfattig

dybt under jorden, udnytter myrerne det faktum, at jo højere man bygger en skorsten, des højere vindhastighed bliver den udsat for, og der skabes et stærkere vakuum omkring høje skorstene end omkring lave skorstene. Netop vakuumforskellen mellem en høj og en lav skorsten benytter myrerne (og mennesker) til at få frisk luft ned i boligen ved at bygge begge skorstene, så der sker en helt automatisk ventilation, hvor frisk luft bliver trukket ind i de lave skorstene og skubbet ud igen i de høje skorstene.

»Myrerne bygger også gange, som tager den friske luft helt ned i bunden af kolonien, før det vender tilbage og ryger ud af de høje skorstene,« fortælle Joachim Offenberg.

Kan udnyttes til biologisk krigsførelse

Joachim Offenberg arbejder selv med måder at udnytte myrerne helt særlige egenskaber til formål, som kommer os mennesker til gavn.

Netop fordi myrerne er meget territoriale og beskytter deres koloni, kan man bruge dem til biologisk bekæmpelse af skadedyr. Blandt andet har Joachim Offenberg lavet forsøg, hvor han har vist, at kolonier af skovmyrer kan beskytte træer fra at blive angrebet af både plantesygdomme og insekter, der spiser træerne eller de frugter, som hænger på dem.

Dyrker man for eksempel æbler, er frostmåleren et frygtet skadedyr, fordi disse sommerfuglelarver elsker at gnaske i blade og blomster fra æbletræer. Men har en koloni af skovmyrer bosat sig i æbletræet, vil de gøre alt for, at frostmålerne ikke føler sig hjemme, og det skal en hær af soldater nok sørge for.

Myrerne kan derudover også beskytte træerne mod plantesygdomme, og det har ikke nødvendigvis noget at gøre med soldatermyrerne.

Kendetegnende for myrer er, at de har helt uhyggeligt mange kontakter til andre myrer hele dagen lang. Det vil også sige, at hvis en bakterie er i stand til at smitte bare én myre, vil den hurtigt kunne sprede sig til den næste og den næste og den næste, indtil hele kolonien, herunder dronningen, er smittet.

Derfor har myrerne også udviklet deres eget bredspektrede antibiotika, som bliver udskilt fra særlige kirtler på myrens krop. Dertil kommer, at myrerne også dyrker bakterier på deres kroppe, og disse bakterier producerer ligeledes et antibiotikum, der slår andre bakterier og svampesygdomme ihjel.

Joachim Offenberg har i sine forsøg med skovmyrer og æbletræer set, at myrernes antibiotika ikke bare beskytter mod myresygdomme, men faktisk også beskytter mod sygdomme, som rammer træerne. Derved bliver træer, der huser en myrekoloni, ikke bare beskyttet mod insekter af soldatermyrerne, men også mod bakterier, svampe mm.

»Det er noget, som vi først er begyndt at undersøge for nylig, men som rummer et stort potentiale i forhold til at bekæmpe bakterier og svampesygdomme på planter, men måske også bakterier, der smitter mennesker. Vores teori er, at myrerne har udviklet de her meget potente antibiotika, fordi det har været en nødvendighed, idet de bor så tæt og derved skaber meget gode betingelser for, at sygdomme kan sprede sig,« siger Joachim Offenberg.

Faktisk har en ph.d.-studerende under Joachim Offenberg etableret et firma, der vil udvikle og sælge smittespredningsløsninger baseret på myrer og stoffer fra myrer.

»I et af vores seneste forsøg har vi isoleret en af de bakterier, som lever på myrer, og når vi har den sammen med alle tænkelige former for plantesygdomme, slår bakterien dem ihjel, ligesom den også slår tre ud af seks humane bakterier, som det er meget svært at behandle med antibiotika, ihjel,« siger Joachim Offenberg.

Uintelligente myrer er problemknusere på matematiske problemer

Indenfor matematikken findes der en kendt problemstilling, som hedder ”den handelsrejsendes problemstilling (the traveling salesman problem)”, der i sin essens handler om at regne ud, hvilken rute en handelsrejsende skal tage for at tilbagelægge den kortest mulige vej mellem en masse punkter.

Problemet er i sin natur let nok at udregne, hvis man har fire eller måske fem punkter, men lige så snart man når op på 20 punkter, bliver regnestykket så kompliceret, at selv verdens mest moderne supercomputere ikke kan regne det

ud. Samtidig er 20 punkter meget lidt i sammenligningen med, hvad for eksempel pakkebude skal rundt til af forskellige adresser hurtigt muligt i løbet af en arbejdsdag.

Simulationer med digitale myrer har dog vist sig at kunne løse problemet uden at skulle lave de umulige beregninger. I simulationerne benytter man digitale myrer, som går på forskellige stisystemer med forskellige afstande mellem forskellige punkter. De digitale myrer lægger digitale duftspor, som andre myrer kan følge, og signalet bliver stærkere, jo flere myrer der går på en given sti. Samtidig ”damper” duftsporet af over tid. Da de digitale myrer ligesom deres levende artsfæller helst vil gå på stier med kortest afstand mellem to punkter, vil de stier, som samlet set giver den korteste afstand mellem alle punkterne efterhånden lyse op af digitale duftspor.

Digitale myrer er i dag en af de løsninger, som man kan bruge på at løse problemet om den handelsrejsende. ■

Videre læsning
Offenberg, J & Damgaard, C 2019, 'Ants suppressing plant pathogens: a review', *Oikos*, bind 128, nr. 12, s. 1691-1703.
doi.org/10.1111/oik.06744



Engager dine elever med inddragende workshops eller oplæg fra Det Tekniske Fakultet på Syddansk Universitet.

Har dine elever til tider svært ved at se relevansen af matematik?

Så prøv vores workshop **Matematik i robotter**, **Matematikken bag AI** eller **Støjfiltre i teori og praksis**, hvor ingeniørstuderende fra SDU gør teorien konkret og nærværende.

Eller hvad med at repetere emner i fysik eller kemi ved hjælp af virtual reality?

Vi har flere VR-workshops og kan også tilbyde en AR-skattejagt, der kombinerer augmented reality med fagligt indhold om magnetisme og elektriske felter.

Læs mere og tjek alle vores tilbud på www.sdu.dk/tek/brobygning eller skriv direkte til os på brobygning@tek.sdu.dk

EN GOD KOP KAFFE MED EN BISMAG AF LATTERGAS

Nye undersøgelser fra Costa Rica viser, at der ved kaffedyrkning kortvarigt frigives massive mængder lattergas i lavninger i terrænet, når der gødskes og det samtidig regner. Disse lattergas-hotspots er hidtil ikke inddraget i de nationale drivhusgasregnskaber. Problematikken er desuden yderst relevant i dansk landbrug i forbindelse med lavbundsjorder.

Forfatteren



Bo Elberling er professor ved Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet. Han forsker i processer i jordmiljøet og samspillet mellem planter og mikroorganismer.
E-mail: be@ign.ku.dk



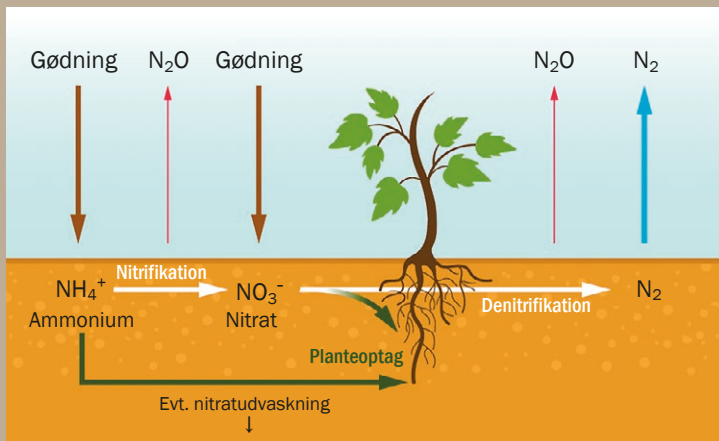
Abeline Bentzon-Tarp er uddannet naturgeograf ved Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet. Er nu ansat ved Akademiet for de Tekniske Videnskaber og arbejder i projektet "Fremtidens bæredygtige produktion" med den bæredygtige omstilling af dansk produktionsindustri.
E-mail: mail@abeline-bentzon.dk



Lattergas

Lattergas (dinitrogenoxid - N_2O) er en vigtig drivhusgas, der er omkring 300 gange så stærk som CO_2 . Lige nu stiger indholdet af lattergas i atmosfæren, primært fordi vi i hele verden gødske vores marker med mere og mere kvælstof.

Globalt set bidrager landbruget med mere end 50 % af den lattergas, som frigives fra menneskelig aktivitet. Den andel forventes at stige markant i takt med befolkningstilvæksten og et øget behov for fødevarer. Når der gødskes med kvælstof, forsvinder en betydelig mængde af kvælstoffet ved udvaskning, men også ved at jordens mikroorganismer omdanner kvælstofforbindelser i jorden til



Et udsnit af naturens nitrogen-kredsløb.

lattergas. Det er i alles interesse, at gødningen kommer afgrøderne til gode og bidrager til en øget landbrugsproduktion. Gødning er desuden dyrt, så der er et betydeligt

potentiale for en win-win situation, hvis man kan optimere, hvordan og hvornår der gødskes for at minimere et uønsket kvælstoftab og øge optaget i afgrøderne.

Vi danskere drikker flere end fire milliarder kopper kaffe om året! Det gør os til en af de mest kaffedrikkende nationer i Verden. Næsten hver anden dansker starter dagen med en god kop morgenkaffe. Men de færreste er klar over, hvilke miljømæssige konsekvenser kaffeproduktion har. Kaffebønner er et af de tropiske landbrugsprodukter, der kræver mest kvælstof, og derfor kan produktionen af kaffe lokalt medføre en betydelig risiko for nitratudvaskning men også til frigivelse af lattergas. Det er dog uvist, hvor meget kvælstof der mistes, blandt andet fordi der hidtil ikke er foretaget målinger i regntiden og umiddelbart efter gødsning.

I det mellemamerikanske land Costa Rica dyrkes Arabica-kaffe, og produktionen har længe været afgørende for landets økonomi og samfundsudvikling. Kaffen dyrkes på bjergskråninger, typisk i 500 til 1500 meters højde, og mere end 50.000 familier er direkte involveret i kaffeproduktionen. Dette svarer til 8 % af arbejdsstyrken i Costa Rica. Blandt de kaffeproducerende lande er Costa Rica det land, der har det højeste forbrug af gødning.

I kaffeproduktionen bruges årligt op til 350 kg kvælstof per hektar.

Som det er tilfældet i Danmark, bidrager landbruget i Costa Rica med mere end en tredjedel af landets samlede frigivelse af drivhusgasser, og mere end 25 % er knyttet til frigivelsen af lattergas. Costa Rica er blandt de førende lande i kampen mod klimaforandringerne, og landet har en ambition om at blive drivhusgasneutral inden 2030. Regnestykket er dog kompliceret, og man kan med god grund spørge, om man måler rigtigt med hensyn til lattergas.

Nye målinger

Lige inden regntiden starter, gødskes kaffepanterne. Derefter er det næsten umuligt at lave manuelle målinger af lattergasfrigivelsen. Derfor omfatter vores nye målinger automatiske kammer-systemer, som lukker og åbner automatisk. Når et kammer er lukket, måles stigningen i koncentrationen af lattergas i kammeret. Dette kan omregnes til en emission, hvilket er et udtryk for, hvor mange gram lattergas der frigives per areal over den tid, kammeret er lukket. Over tre dyrkningssæsoner har vi målt både på marker, som får den ordinære

mængde kvælstof (230 kg N per hektar per år) og marker uden tilførsel af kvælstof.

Foruden gasmålingerne er der målt vandindhold, nitratindhold og temperatur i jorde samt klimaet i området, herunder nedbør, lufttemperatur mv. Den månedlige gennemsnitstemperatur svinger mellem 18 og 21 °C, og der falder tre til fire gange så meget regn som i Danmark, dog primært i regntiden. Når det regner, efter der er gødsket, stiger emissionen af lattergas til mere end 70 gram N målt som N_2O per hektar per døgn, hvilket svarer til mere end 10 gange emissionen fra en ikke-gødsket mark. De høje emissioner falder langsomt efter nogle uger samtidig med, at nitratindholdet i jorden falder. Regnen vandmætter jorden, hvilket betyder at ilten hurtigt forsvinder, og en særlig gruppe mikroorganismer kan derefter lave nitrat om til frit kvælstof (N_2). Denne såkaldte denitrifikationsproces fjerner den nitratpulje, som er vigtig for kaffepanterne. Samtidig udvaskes nitrat, fordi nitrat nemt opløses i regnvandet, som siver ned i jorden. Lattergas er et mellemprodukt i denitrifikationen og frigives til atmosfæren, hvis den ikke når at blive omdannet til den



Øverst: Her måles frigivelsen af lattergas når kammeret som på billedet er lukket.

I midten: Kaffen er klar til at blive plukket fra træet.

Nederst: Kaffen plukkes stadig med håndkraft mange steder.

Fotos: Bo Elberling

helt uproblematisk gas, frit kvælstof, som der i forvejen er meget af i atmosfæren. Så for klimaet og for kaffeproduktionen handler det om at holde på nitraten i jorden og mindske hastigheden af denitrifikationsprocessen.

Udvaskning og mere lattergas

De fleste kaffemarkar i Costa Rica ligger i bjergområder, hvor der er bakker og lavninger. Selvom frigivelsen af lattergas i de mere veldrænede dele af markerne stopper efter nogle uger, så viser målinger af lattergas på en række steder på en skråning og ned mod en lavning i en kaffemark, at frigivelsen af lattergas sker over meget længere tid i lavningen. Dette skyldes ikke, at der gødskes mere i lavningerne, men at nitratoverskuddet fra alle omgivelserne sammen med regnvand samles i lavningerne, og at der her opstår de optimale betingelser for denitrifikation og dermed en langvarig frigivelse af lattergas. Vores undersøgelser viser, at der kommer mere end tre gange mere lattergas fra lavninger end fra de mere veldrænede dele af marken. Det betyder, at selvom lavningerne kun udgør 10 % af marken, bidrager de med 25 % af lattergasfrigivelsen.

Målingerne fra kaffemarkerne i dette projekt viser, at man i de nationale lattergasregnskaber i Costa Rica har underestimeret lattergasbidraget fra kaffeproduktionen. Det skyldes, at der ikke er foretaget målinger med stor hyppighed umiddelbart efter gødskning og efter større nedbørsbegivenheder, eller at der ikke er målt i lavninger.

Kan man reducere lattergasfrigivelsen?

Der er ikke nogen nemme løsninger, men målsætningen for landbruget og miljøet er den samme: Vi skal





Kaffemarkerne i Costa Rica som var omdrejningspunktet for denne undersøgelse. Bemærk træerne med orange blade – de er en del i en ny strategi, hvor træernes blade indgår som kvælstofkilde. Foto: Bo Elberling

undgå et tab af nitrat og produktion af lattergas. Det handler for kaffeproducenterne også om økonomi, for gødning er dyrt. I samråd med kaffeproducenter har vi diskuteret mulighederne for at undgå at gødske lige før regntiden, at gødske mere hyppigt og i mindre mængder og at gødske med andre kvælstof typer, som er mindre vandopløselig. En af de nye metoder, som bliver forsøgt, er at plante træer, som i symbiose med mikroorganismer kan binde kvælstof fra atmosfæren. Dermed øges kvælstofindholdet i blade, som når de lander på jorden, kan fungere som kvælstofkilde, der langsomt frigives i takt med at bladene nedbrydes. Desuden skygger træerne for kaffeplanterne, hvilket kan være en fordel i tørtiden.

Relevant i en dansk kontekst

Frigivelsen af lattergas fra marker skal måles med stor hyppighed. En mulighed er automatiske kammer-systemer, som kan lave målinger hver time. Derved kan pulse af lattergas måles, som i studiet fra Costa Rica viser sig knyttet til kombinationen af begivenheder som gødskning og vandmætning

af jorden for eksempel ved kraftig regn. I Danmark er det primært i vinterhalvåret, der falder store mængder nedbør, og det er her, vi må forvente den største udbredelse af oversvømmede marker, hvor denitrifikation kan ske. Dette sker dog kun, hvis der er nitrat tilgængeligt i jorden, hvilket typisk er tilfældet i lerede jorde under kraftig nedbør efter lang tids udtørring eller i det tidlige forår, når der gødskes. I begge tilfælde kan der forventes en betydelig frigivelse af lattergas, så længe der er nitrat i et ellers iltfrit jordmiljø.

I Costa Rica blev den største emission af lattergas målt i lavningerne, fordi vand og næringsstoffer fra et større markareal samledes her. I et dansk morænelandskab er lavbundslande hyppige, og om vinteren er de i lange perioder delvist oversvømmede. Nogle af disse lavninger er måske på vej ud af drift for at sikre en langsigtet kulstofophobning, men de bliver kun sikret mod en lattergasfrigivelse, hvis man samtidig sikrer, at de omkringliggende marker ikke overgødskes, og at de dermed modtager kvælstof fra omgivelserne.

I kaffemarkerne ses det, at frigivelsen af lattergas falder i takt med, at nitratindholdet falder. Men nitrat kan også dannes ved en anden vigtig proces, nitrifikation, hvorved lattergas også frigives, dog kun når der er ilt til stede i jordmiljøet. Ved nitrifikation omdannes ammonium til nitrat. Det betyder, at hvis fremtidige lavninger i Danmark skal undgå at bidrage til en lattergasfrigivelse, skal vandstanden være forholdsvis konstant. Svinger vandstanden op og ned i takt med tørre sommerperioder og våde efterår, så dannes der nitrat ved nitrifikation om sommeren, som så er en kilde til en denitrifikationsproces om efteråret.

En sidste ting man kan konkludere på baggrund af projektet i de costaricanske kaffemarkers er, at gødningstype, hyppighed og mængder er altafgørende for lattergasfrigivelsen. Vidensgrundlaget for at kunne byde på en ny strategi for lavbundslande under danske forhold synes for øjeblikket ikke at være tilstrækkelig. Men det arbejdes der på i skrivende stund. Nu er det tid til en god kop kaffe. ■

Videre læsning
Elberling, B. & Jørgensen, C.J. (2013) Kulstof & kvælstof på godt og ondt – danske vådområders bidrag til drivhusgasbudgettet. *Geoviden* 4, 9-12.

Elberling, B. (2019) Våde marker giver mere lattergas. *Aktuel Naturvidenskab* 2, 14-16.

Ny forskningsartikel: Bentzon-Tarp, A., Helgadóttir, D., Van den Meersche, K., Gay, F., Prieme, A., Roupsard, O., Mages, C. & Elberling, B. (2023) Tempo-spatial variations of nitrous oxide emissions in coffee agroforestry systems in Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 343, 108257.

SVAMPEBEKÆMPELSE MED NATURENS EGNE MIDLER

Hvede angrebet af svampesydommen hvedegråplet.
Foto: Shutterstock.

Om forfatterne



Andreas Therge Sørensen er uddannet mikrobiolog fra Syddansk Universitet. Han arbejder som videnskabsjournalist ved virksomheden Bioomix. ats@bioomix.com



Thies Marten Heick er adjunkt, ph.d. ved Institut for Agroøkologi, Aarhus Universitet. Han arbejder med plantebeskyttelse og plantesundhed. thiesm.heick@agro.au.dk

Svampesygdomme er et stort problem i landbruget verden over, og derfor bruges der hvert år store mængder fungicider – sprøjtemidler mod svampe. Det medfører dog mange negative effekter, og derfor er der stor interesse i såkaldte biofungicider, der bruger mikrober til at bekæmpe svampene.

Svampe har i naturen en vigtig rolle som nedbrydere af dødt organisk materiale. Svampe er hårdføre organismer, og kan derfor trives godt i skovbunde med et lavt indhold af næringsstoffer.

Svampene producerer enzymer der kan nedbryde cellulose og andre plantefibre, som jordbundsdyr og bakterier har svært ved at fordøje. På den måde er de, sammen med bakterier, med til at nedbryde døde planter og dyr til carbondioxid, vand og næringsstoffer. Det gør dem essentielle i det mikrobielle samfund, hvor de spiller en central rolle i carbon- og næringsstofkredsløbene.

Langt de fleste plantearter i verden lever i mutualistiske symbiose-

forhold med svampe. Dette symbiotiske forhold kaldes Mykorrhiza, og her hjælper svampene deres værter med at optage næringsstoffer og vand mere effektivt ved at kolonisere planternes rødder og dække dem i hyfer. Hyferne strækker sig ud i den omgivende jord og forlænger plantens rodsystem. Til gengæld modtager svampene kulhydrater fra fotosyntesen, der foregår i planternes blade. Denne symbiose er enormt gavnlig, da svampe kan forhøje planternes optag af vigtige mikro- og makronæringsstoffer, hvilket er grunden til at så mange planter i naturen har svampe som partnere.

Men det er bestemt ikke alle svampe, der er gavnlige for planterne. Der findes således en række

svampe, der lever i et parasitisk symbioseforhold, og det er også et problem for os mennesker, når de angriber planter, vi bruger som afgrøder. Et eksempel er svampearten *Zymoseptoria tritici*, der forårsager hvedesygdommen hvedegråplet (Septoria), der er en udbredt plantesygdom i Danmark. Den angriber vinterhvede allerede kort efter såning. Fugtigt vejr i maj kan medføre veletableret angreb i marken. Omkring slutningen af maj og begyndelsen af juni kan det fugtige vejr medføre, at smitten kan spredes til de øvre blade og aks. Svampenes angreb på akset kan resultere i et stort tab i udbytte, der globalt kan være op til cirka 40 % af den samlede høst. Og det er blot én af mange plantesygdomme som plager dansk korn. Andre svampe-

sygdomme, som gulrust, bygrust, bygbladplet, skoldplet og ramularia er også et stort problem.

Alt i alt mister vi i Nordvesteuropa knap 25 % af kornhøsten til svampesygdomme.

Problemer med svampemidler

Nogle plantesygdomme kan håndteres ved at bruge resistente plantesorter eller ved en ændring af dyrkningspraksissen. Men en del af sygdommene skal bekæmpes ved at anvende pesticider. For at give den bedst mulige effekt, bliver midlerne anvendt, før infektionerne etablerer sig, og i et tilstrækkeligt volumen for at kunne opnå den bedst mulige dækning af planterne.

Anvendelsen af fungicider har dog en bagside. Den mest anvendte gruppe af sprøjtemidler mod svampesygdomme i afgrøder kaldes azol-fungicider. Dem har vi anvendt i Danmark siden 1970'erne, og i dag bruges omkring 200 tons om året på de danske landbrugsarealer. Azoler findes nu udbredt i jorden i den danske natur, og man kan finde deres nedbrydningsprodukter i grundvandet (som 1,2,4-triazol). Forskning har vist, at brugen af azolfungicider har bidraget til selektion for azol-resistente svampe i miljøet. Det har gjort det stadig sværere for landmænd at behandle plantesygdomme som hvedgråplet-syge.

Den stigende resistens over for azoler er også et problem i behandlingen af svampeinfektioner i mennesker. Lungesygdommen Aspergillose behandles primært med azol-baserede lægemidler. Den forårsages af svampen *Aspergillus fumigatus*, en udbredt opportunistisk svamp, som kan findes stort set alle steder, og som ellers ikke udgør nogen fare, medmindre man har nedsat lungefunktion eller immunsystem. Siden 1998 har man fundet flere tilfælde af *Aspergillus*-infektioner i patienter, som har været svære at behandle. Det er vist, at en del svampe har udviklet deres resistens i miljøet



Foto: Mark Stebnicki, Pexels.

Pesticider som miljøproblem

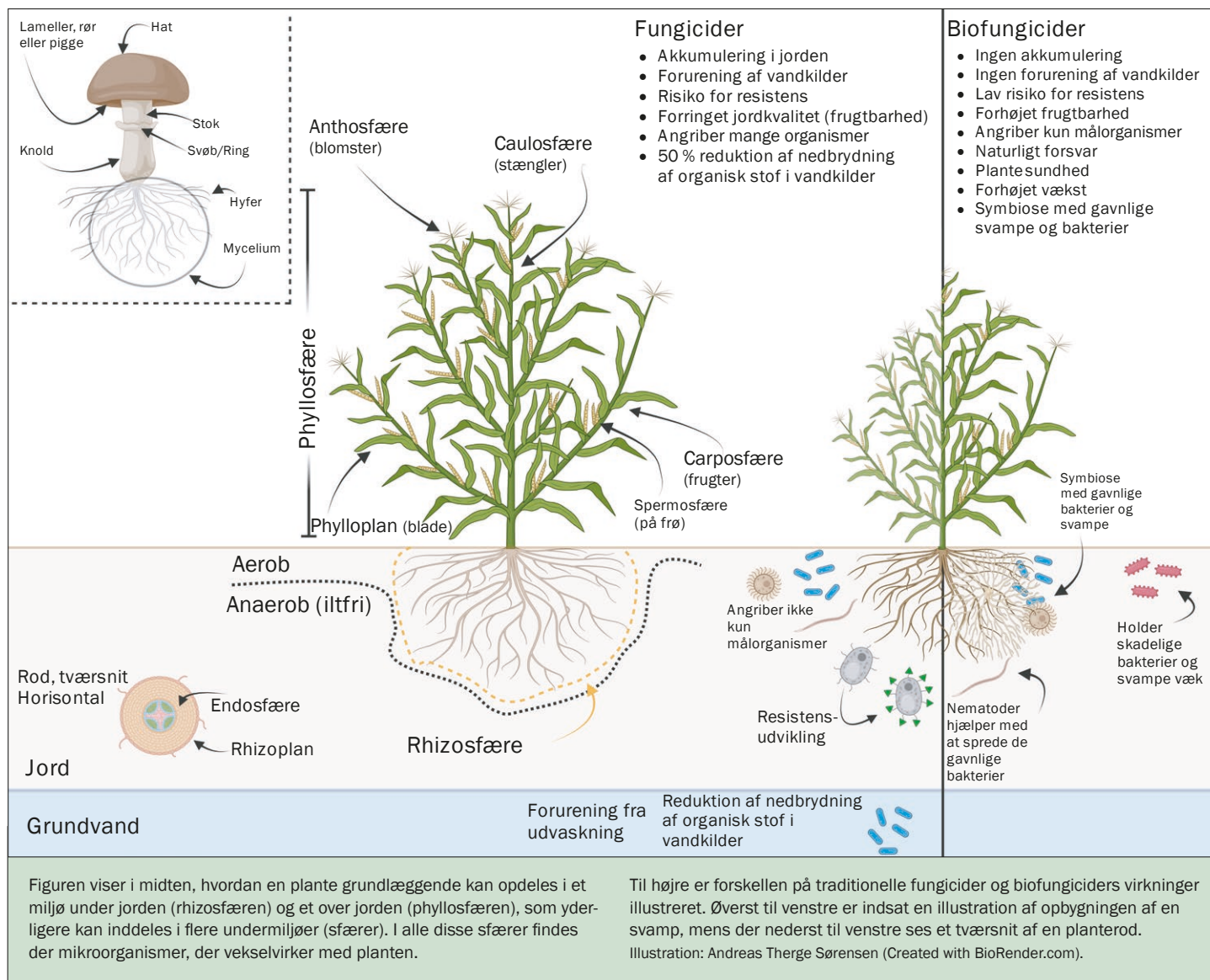
Pesticider er en samlebetegnelse for sprøjtemidler til at bekæmpe forskellige skadevoldere i landbruget. Insekticider og fungicider er således undergrupper af pesticider, der specifikt er beregnet til at bekæmpe henholdsvis insekter og svampe.

Brugen af pesticider medfører mange negative virkninger på både planter, mikroorganismer, dyr og mennesker. En gruppe forskere undersøgte eksempelvis i 2020 med udgangspunkt i cirka 150 publikationer og Verdenssundhedsorganisationen WHO's databaser, hvor mange mennesker, der rammes af pesticidforgiftning på verdensplan. De estimerede, at omkring 11.000 mennesker hvert år dør som følge af pesticidforgiftning, mens hele 385 millioner mennesker udsættes for en skadelig mængde pesticider.

Pesticider er næst efter nitrat den vigtigste årsag til, at man ikke kan opnå en god vandkvalitet i de europæiske vandområder. Pesticiderne har en lang levetid i naturen, og den eneste måde, de bliver fjernet på, er gennem nedbrydning ved biotiske eller abiotiske omdannelsesprocesser. Fungicidernes skæbne og effekter i miljøet afhænger af deres egenskaber (for eksempel binding til jorden, nedbrydelighed) og miljøfaktorer (for eksempel jordtype, nedbør, topografi og landbrugsforvaltningspraksis).



Det mutualistiske symbioseforhold mellem en svamp og en plante kaldes mykorrhiza. Foto: Shutterstock.



og ikke som følge af lang tids azol-behandling.

Mange negative effekter

Udover sådanne eksempler på resistensudvikling er der også set andre negative effekter af brugen af fungicider. I Costa Rica har man set eksempler på, at akkumulering af kobberbaserede svampemidler har gjort jorden ubrugelig til dyrkning af alle slags afgrøder. Langtidsbrugen af denne type midler kan have negative virkninger på økosystemerne både på land og i vand, hvor der kan ske en ophobning begge steder.

Fungicider har flere skadelige virkninger på det mikrobielle samfund i jorden, når man sammenligner

dem med midler mod insekter og ukrudt (insekticider og herbicider). For eksempel kan brugen af fungiciderne klorothalonil og dinitrophenyl påvirke nogle af de bakterier, der er involveret i fikseringen af atmosfærisk kvælstof til nitrat, så både nitrifikations- og denitrifikationsprocesserne bliver afbrudt. Det betyder, at der vil ske en ophobning af ammonium og nitrat i jorden eller vandmiljøet, der kan øge risikoen for toksicitet over for planter og dyr, og eutrofiering af vandmiljøer på grund af udvaskning.

Fungicider kan mindske forekomsten af almindelige jordbundssvampe som *Penicillium* og *Trichoderma* spp, og dermed reducere konkurrencen om næringsstoffer, hvilket

vil øge bestanden af patogener med modstandsdygtighed over for svampemidlerne. Og anvendelse af benzimidazoler kan reducere forekomsten af den gruppe svampe, der kaldes *Entomophthora*, som er et naturligt biologisk bekæmpelsesmiddel imod bladlus.

Brugen af fungicider kan også påvirke symbiosen mellem planter og mykorrhizasvampe og hæmme udviklingen og bakteriekoloniseringen af rodsystemet, optag af næringsstoffer, vækst, udbytte, protein- og fosforindhold. Studier har vist, at de påvirker svampenes hyfer og sporer, hvilket reducerer deres aktivitet og dermed forringer de fordele, planten får gennem symbiosen med svampe.



Produkter bliver screenet ved dyrkningsforsøg i grotelt, hvor plantens udvikling evalueres. Foto: Simon Nørlev Vraa, Kolorit Media.

Fungicider i vandmiljø og grundvand

Nogle fungicider kan udvaskes til de nedre jordlag og dermed bidrage til forurening af grundvandet. Ved brug af pesticider i bestemte afgrøder som grøntsager, frugt, krydderier og ris kan der ophobes toksiske koncentrationer, der overstiger de tilladte niveauer. I 2014 blev der foretaget undersøgelser af vandprøver fra 123 forskellige vandløb rundt omkring i verden. Prøverne blev analyseret for forekomsten af fungicider og deres effekt på mikroorganismer, som er afgørende for flere forskellige økosystemprocesser (for eksempel næringsstofkredsløbet og nedbrydningen af organisk stof). Man så på, om forurening af fungicider havde en indvirkning på mikroorganismene og deres aktivitet. Her fandt forskerne, at i flere end halvdelen af vandløbene var nedbrydningen af organisk stof reduceret med cirka 50 %. Den høje toksicitet i vandprøverne skyldtes fungiciderne strobilurin, triazol og imidazol, som udgjorde cirka 60 % af den totale mængde fungicider, men bidrog med cirka 97 % af den samlede toksicitet overfor mikroor-

ganismene. Den meget høje reduktion i nedbrydningen af organisk stof kan have store konsekvenser for stofkredsløbene i vandløbs økosystem.

Biofungicider udnytter naturens eget forsvar

Et alternativ til syntetiske svampemidler, der benyttes i dag, er mikrobielle biofungicider, som består af mikroorganismer, som kan hæmme eller dræbe patogene svampe. Sådanne midler kan både benyttes i økologisk og konventionelt landbrug. De anvendte mikroorganismer kan være bakteriearter (af for eksempel bacillus-, pseudomonas- og streptomycesslægterne) eller svampearter (af for eksempel trichoderma). Mikroorganismer, der koloniserer planternes rødder, producerer en række naturlige forbindelser, som har svampbekæmpende egenskaber, der beskytter planten uden at forurene det omgivende miljø. Endvidere styrker nogle mikroorganismer planternes egen modstanddygtighed, mens andre udkonkurrerer svampene ved at tage deres plads og næringsstoffer.

I to artikler der blev udgivet i *Journal of Biofertilizers & Biopesticides* i henholdsvis 2012 og 2014, kunne forskere fastslå, at de potentielle fordele ved brugen af biofungicider i landbruget er betydelige. Nogle landmænd i økologiske landbrug benytter allerede biofungicider for at sikre og forbedre kvaliteten af deres økologiske produkter. Anvendes biofungicider som en del af en såkaldt integreret plantebeskyttelse (IPM), der går ud på at forebygge og begrænse forekomsten af ukrudt, svampesygdomme og skadedyr på en måde, der minimerer det samlede behov for brug af pesticider, kan man opnå en acceptabel bekæmpelse af skadevolderne hos afgrøder som frugt, grøntsager, nødder og blomster.

Biofungicider er normalt mindre giftige i sig selv end konventionelle fungicider. Biofungicider er ofte meget effektive i små mængder og nedbrydes hurtigt. Det medvirker til, at man kan undgå de forureningsproblemer, som de konventionelle fungicider forårsager. Bliver de benyttet som en del af programmer for integreret plantebeskyttelse, kan

Videre læsning

Der er fri adgang til de nævnte artikler:

Heijden, M.G. et al., 2015. Mycorrhizal ecology and evolution: The past, the present, and the future. *New Phytologist*, 205(4), pp.1406–1423.

Jamil, F. et al., 2022. Rhizosphere signaling: Insights into plant–RHIZOMICROBIOME interactions for sustainable agronomy. *Microorganisms*, 10(5), p.899.

Ullah, M. & Dijkstra, F., 2019. Fungicide and bactericide effects on carbon and nitrogen cycling in soils: A meta-analysis. *Soil Systems*, 3(2), p.23.

Jørgensen, L.N. and Heick, T.M. (2021) "Azole use in agriculture, horticulture, and Wood Preservation – is it indispensable?," *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 11. Available at: doi.org/10.3389/fcimb.2021.730297.

Information om "mikrobiologiske pesticider" på Miljøstyrelsens hjemmeside: mst.dk/kemi/pesticider/alternative-sproejtemidler/mikrobiologiske-midler/

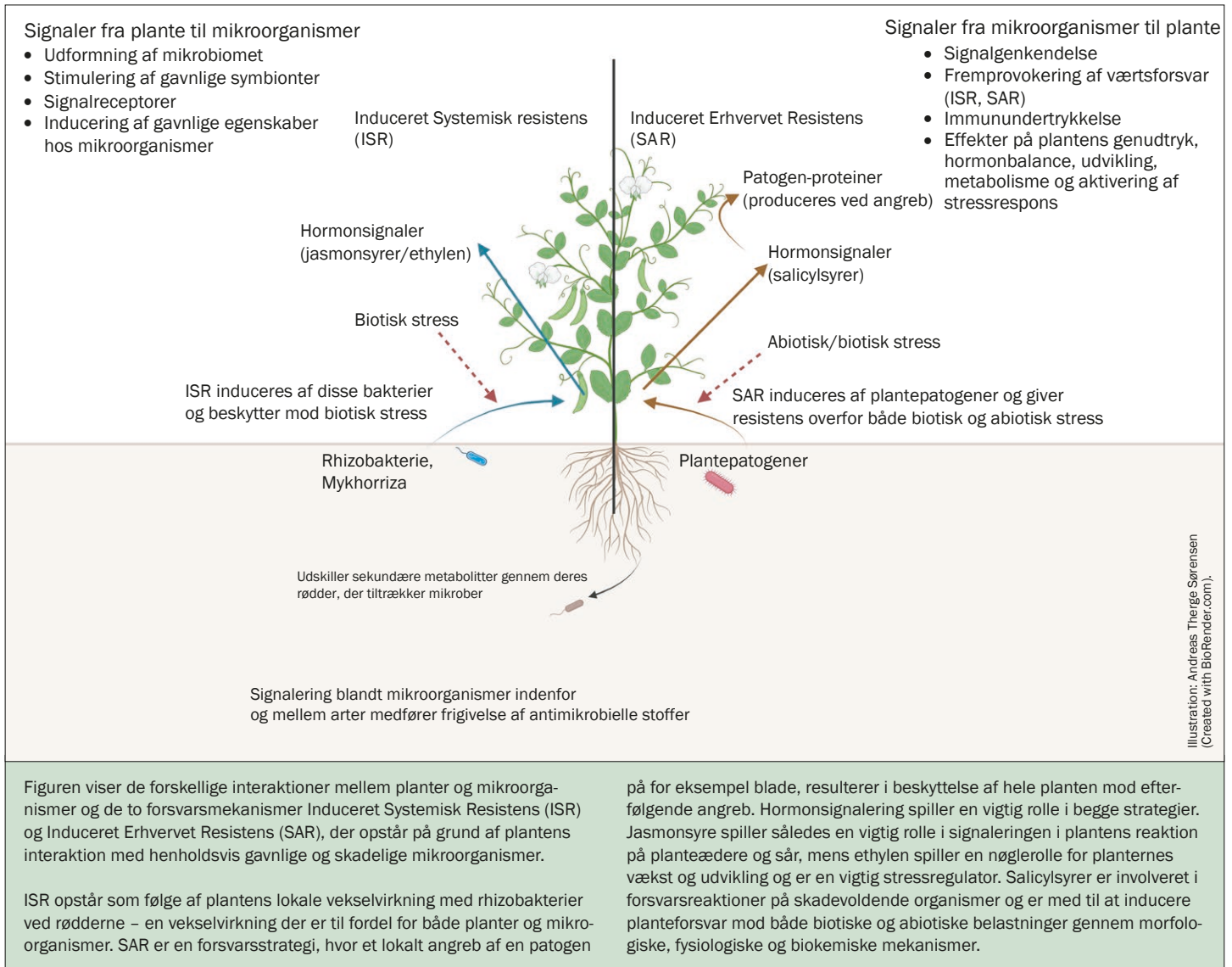


Illustration: Andreas Therge Sørensen (Created with Blender.com).

man i høj grad mindske brugen af de konventionelle midler, samtidig med at udbyttet af afgrøderne forbliver høj.

Bakterier, der benyttes i biofungicider, kan beskytte planter mod skadelige svampe og vira og give en øget modstandsdygtighed over for bakterier igennem en mekanisme kaldet induceret, systemisk resistens. Det foregår ved, at de gavnlige bakterier aktiverer plantens forsvarssystem, fordi de er i kontakt med plantens rødder. Mekanismen involverer signaler, der bliver transporteret gennem rødderne og luften og advarer de dele af planten, som endnu ikke er blevet angrebet. Bakterierne i biofungiciderne kan også frigive flygtige organiske for-

bindelser, som er en meget effektiv forsvarsmekanisme til at bekæmpe patogener.

Potentiale skal udfoldes

De væsentligste fordele ved at anvende biofungicider frem for konventionelle fungicider er, at de kan være med til at opretholde jordens frugtbarhed samtidig med, at de potentielt kan øge udbyttet og forbedre planternes sundhed.

Biofungicidernes effekter kan dog svinge meget og afhænger meget af vejrforhold. Det er vist, at biofungicider er gode til at bekæmpe plantesygdomme i beskyttede miljøer som drivhuse, men der mangler stadig gode resultater for, hvordan de virker på

store udendørs arealer. Det tager tid for biofungicider at etablere sig på planter og trænge ned gennem jordens overflade, og imens er de sårbare overfor regn og UV-stråler, som kan eliminere dem, inden de når at have en effekt.

Både forskere på universiteter og private virksomheder arbejder i dag med at undersøge biofungicidernes virkninger på svampesygdomme, og om de potentielt kan have skadelige virkninger for mennesker og andre organismer i naturen. Håbet er, at vi dermed kan udfolde biofungicidernes potentiale som et mere naturligt og gavnligt forsvar mod plantesygdomme, der kan sikre jordens frugtbarhed og øge fødevarerproduktionen. ■

Sammen om studiet

På KU bliver vi klogere i fællesskab. Vælger du en naturvidenskabelig uddannelse, kommer du til at arbejde i studiegrupper helt fra start. Du får hjælp af ældre studerende og vejledere. Og du har undervisere, der brænder for at dele deres viden.

Du slipper ikke for lange dage og hårdt arbejde. Men du lærer at samarbejde, løse problemer med data og matematik og se sammenhænge på tværs af fag. Kompetencer, du kan bruge direkte i mange virksomheder og organisationer, når du skal ud på jobmarkedet.

Søg ind på en naturvidenskabelig uddannelse.

Ansøgningsfrist 5. juli.

studier.ku.dk/science



KØBENHAVNS
UNIVERSITET

På billedet testes en delfin for dens hukommelse om egen adfærd. Delfinen er trænet i at forstå en kommando, der betyder: Gentag den sidste ting, du gjorde. Træneren kan så enten bede delfinen om at udføre en handling ud fra en randomiseret liste eller om at gentage den seneste handling.
Foto: Adrián Azcárate, Loro Parque.



HAR DYR EN TIDSFORNEMMELSE?

Videnskabens erkendelse af, at dyr kan have kognitive evner og dermed ikke bare er biologiske maskiner, der drives af instinkter, er voksende.

Et nyt forskningsprojekt skal blandt andet undersøge delfiners og marsvins forståelse af tid.

Om forfatteren



Birgitte Svennevig er journalist, Det Naturvidenskabelige Fakultet, SDU. birs@sdu.dk

Om forskeren

Sara Torres Ortiz er biolog og postdoc i forskningsgruppen Lyd Og Adfærd på Biologisk Institut, Syddansk Universitet. Hun interesserer sig for dyrs kognition, for eksempel hvordan de tænker, løser problemer og kommunikerer. saraortiz@biology.sdu.dk

Forstår dyr, at tid findes? Kan de genkalde sig begivenheder fra fortiden og forestille sig fremtiden? Eller er det kun mennesker, der kan det?

Sara Torres Ortiz forsker i dyrs kognition og sammen med en række kolleger fra Biologisk Institut på Syddansk Universitet er hun, som en del af et større internationalt projekt, i gang med at undersøge, om delfiner kan forstå tid.

»Grundlæggende ved vi ikke ret meget om, hvorvidt dyr ligesom

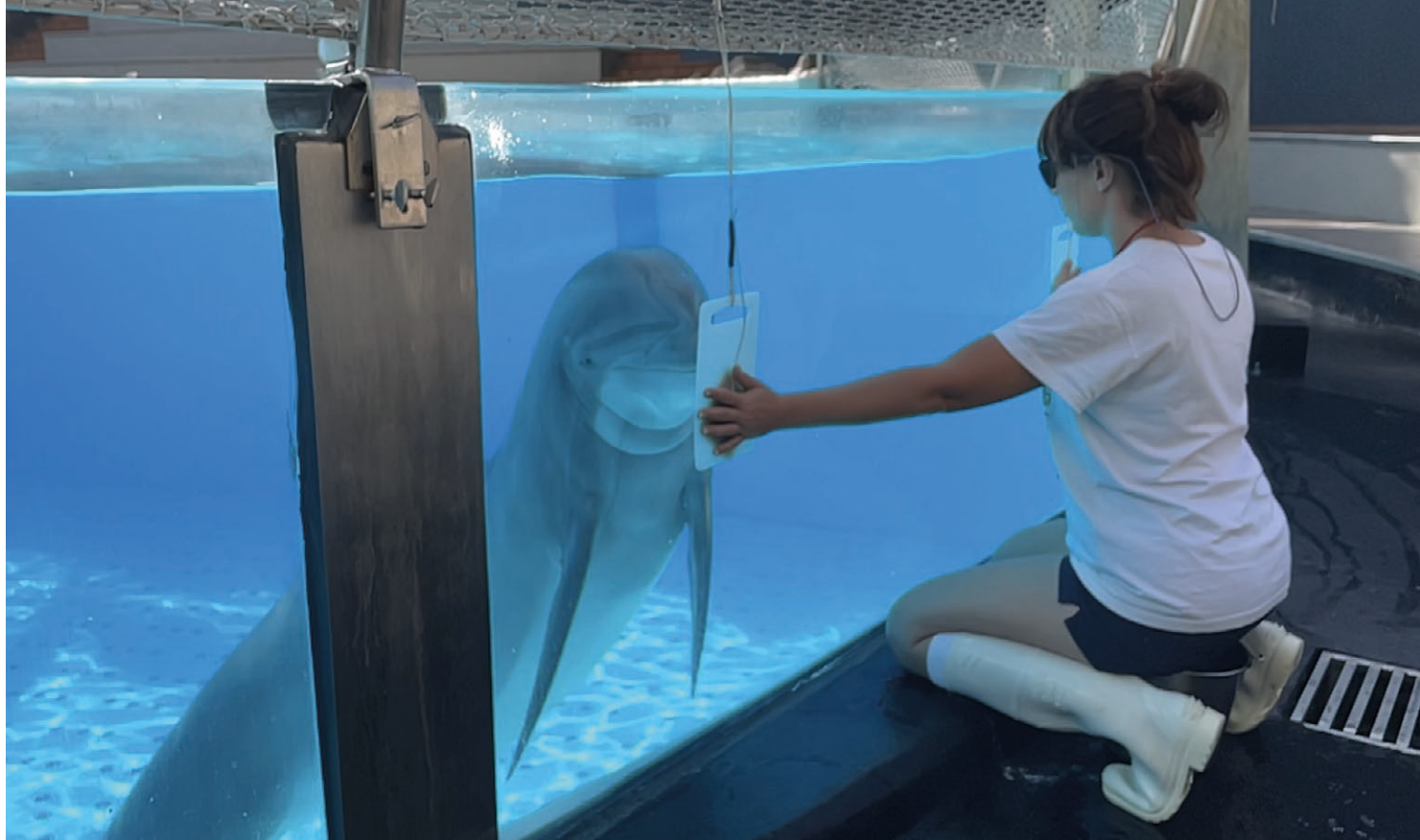
mennesker er i stand til at foretage mental tidsrejse, altså at bruge sin forestillingsevne til at rejse tilbage og frem i tid,« siger hun.

Hvis dyr har en forståelse af tid og for eksempel kan planlægge for fremtiden, kan det blandt andet få konsekvenser for den måde, vi tænker dyrevelfærd i dag, mener hun:

»Hvis dyr kan forstå tid, kan de blive udsat for unødigt lidelse af den måde, som vi behandler dem på. Eksempelvis kan det føre til stress at være tilbageholdt, også

efter at dyret er sluppet fri igen, og også selv om det er for en kort periode. Vi kan derfor blive nødt til at gentænke, hvordan vi holder, behandler og transporterer dyr i fremtiden.«

Udover SDU's delfin-studier indeholder projektet også studier af flagermus fra Johns Hopkins University i USA, mens Max Planck Institut for Ornitologi i Tyskland bidrager med studier af papegøjer. Projektet er støttet af Human Frontiers Science Program, og projektleder er lektor Magnus Wahlberg, Biologisk Institut ved SDU.



Instinkt eller tidsforståelse?

Umiddelbart tænker man, at de fleste dyr må have forståelse for tid – hvorfor begynder hunden ellers at blive rastløs, når fodringstid nærmer sig? Og hvorfor kan et egern finde tilbage til det sted, hvor det måske flere uger før har gemt sit forråd?

Ifølge Sara er disse eksempler dog ikke et udtryk for en forståelse af tid. De er nærmere udtryk for, at dyr kan have nogle medfødte instinkter, der – uden om alle kognitive processer – styrer dyrets adfærd (ligesom egernet i dette eksempel eller når trækfugle ved, hvornår de skal afsted).

Det kan også være, at dyret ved såkaldt associativ læring kan lære, at der er en sammenhæng mellem en begivenhed og dens ejers adfærd (ligesom hunden i dette eksempel).

Uanset hvilke processer, der er på spil her, foregår de i den mere primitive del af hjernen: amygdala. I modsætning hertil foregår mere komplekse kognitive processer i cortex og hippocampus, og det er dem, der skal i sving, hvis der skal skabes en mere bevidst forståelse af tid, som kan bringes i spil til for eksempel at planlægge ud i fremtiden.

Træning med delfiner

For at undersøge dyrs eventuelle evne for dette har forskerne defineret nogle bestemte aspekter af mental tidsrejse, som skal undersøges hos alle de dyr, der deltager i undersøgelsen:

Kan dyr huske fortiden? Kan de bruge erhvervede erfaringer til at planlægge for fremtiden? Kan de holde rede på tiden? For at sikre, at der ikke er tale om associativ læring, bliver dyrene hver dag præsenteret for nye tidspunkter, nye steder og nye belønninger, som de skal arbejde med.

Eksempelvis er delfiner og marsvin i øjeblikket i gang med at få testet deres såkaldte episodiske hukommelse, dvs. deres evne til at huske hvad, hvor og hvornår fra en tidligere begivenhed:

Om morgenen bliver de præsenteret for to symboler, bag hvilke, der gemmer sig henholdsvis en fisk og et stykke gelatine. Begge er attraktive fødeemner for en delfin, men de vil hellere have fisken end gelatine-stykket.

Første skridt er at erfare, hvilken gevinst, der gemmer sig bag de

to symboler. Dernæst lærer de, at depotet med fisk bliver fyldt sjældnere op end depotet med gelatine: Kun hver tredje time er der fisk, mens gelatine-depotet bliver fyldt op en gang i timen.

Når delfinerne har lært dette, bliver de præsenteret for de samme symboler et andet sted i deres akvarium på et andet tidspunkt. Her kan de vise, om de har lært, at det ikke kan betale sig at komme tilbage til symbolet for fisk, før der er gået tre timer – men at det godt kan betale sig at komme tilbage til symbolet for gelatine allerede efter en time.

En anden test går ud på at bede delfinerne svare på, hvordan de opfatter lyds varighed. Det gør Sara Ortiz og hendes kolleger ved først at lære delfinerne forskellen på to symboler, der betyder henholdsvis "samme" og "forskellig", så delfinerne kan svare "samme" eller "forskellig", når de bliver præsenteret for eksempelvis lyde.

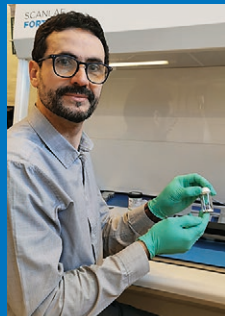
Delfin-studierne foregår i Loro Park på Tenerife og omfatter otte delfiner, der alle er trænedede til at arbejde med forskere. Marsvin-studierne foregår på Fjord&Bælt i Kerteminde. ■

På billedet lærer Sara Torres Ortiz en delfin symbolerne for henholdsvis "sild" og "gelatine" for at finde ud af, hvilken belønning delfinen foretrækker. Foto: Javier Luis López, Loro Parque

FLYDENDE FORBINDELSER GØR ELEKTRONIK MERE PÅLIDELIG

Effektive og pålidelige elektroniske komponenter er vigtige for brugen af el fra fx sol og vind i den grønne omstilling. Foto: Shutterstock

Forfatteren



Francesco Iannuzzo har en kandidatuddannelse som elektronikingeniør og en ph.d.-grad indenfor halvledere fra Università di Napoli "Federico II", Italien. Han er nu professor og sektionsleder ved AAU Energi, Aalborg Universitet, hvor han også er en del af Center of Reliable Power Electronics (CORPE).

Han forsker i effektteknologi og pålideligheden af effektteknologiske komponenter, tilstandsmonitorering, fejlmodellering og test op til megawatt under ekstreme forhold fia@energy.aau.dk

Effektelektronik bruges til styre og omdanne elektrisk energi i alle dele af el-systemet og har dermed en nøglerolle i den grønne omstilling. Derfor arbejder forskere på at udvikle bedre og mere pålidelig effektteknologi – for eksempel ved at bruge flydende metaller til at forbinde komponenterne.

En af vor tids helt store udfordringer er at omstille vores energiforbrug fra helt overvejende at basere sig på fossile brændstoffer til i meget højere grad at basere sig på vedvarende energikilder. Produktionen af energi fra vedvarende energikilder har det grundlæggende problem, at ingen vedvarende energikilde kan levere energi konstant. Når det ikke blæser, producerer vindmøllerne således ingen energi, og når solen ikke skinner, har vi ikke meget glæde af solceller. En energiforsyning baseret på vedvarende energi kræver derfor et energilagringssystem, som kan lagre energi, mens der produceres, og frigive den igen, når der er behov for det.

Grundlæggende finder der to typer af energilagringssystemer: batterier og elektrolysebrændstoffer. I bat-

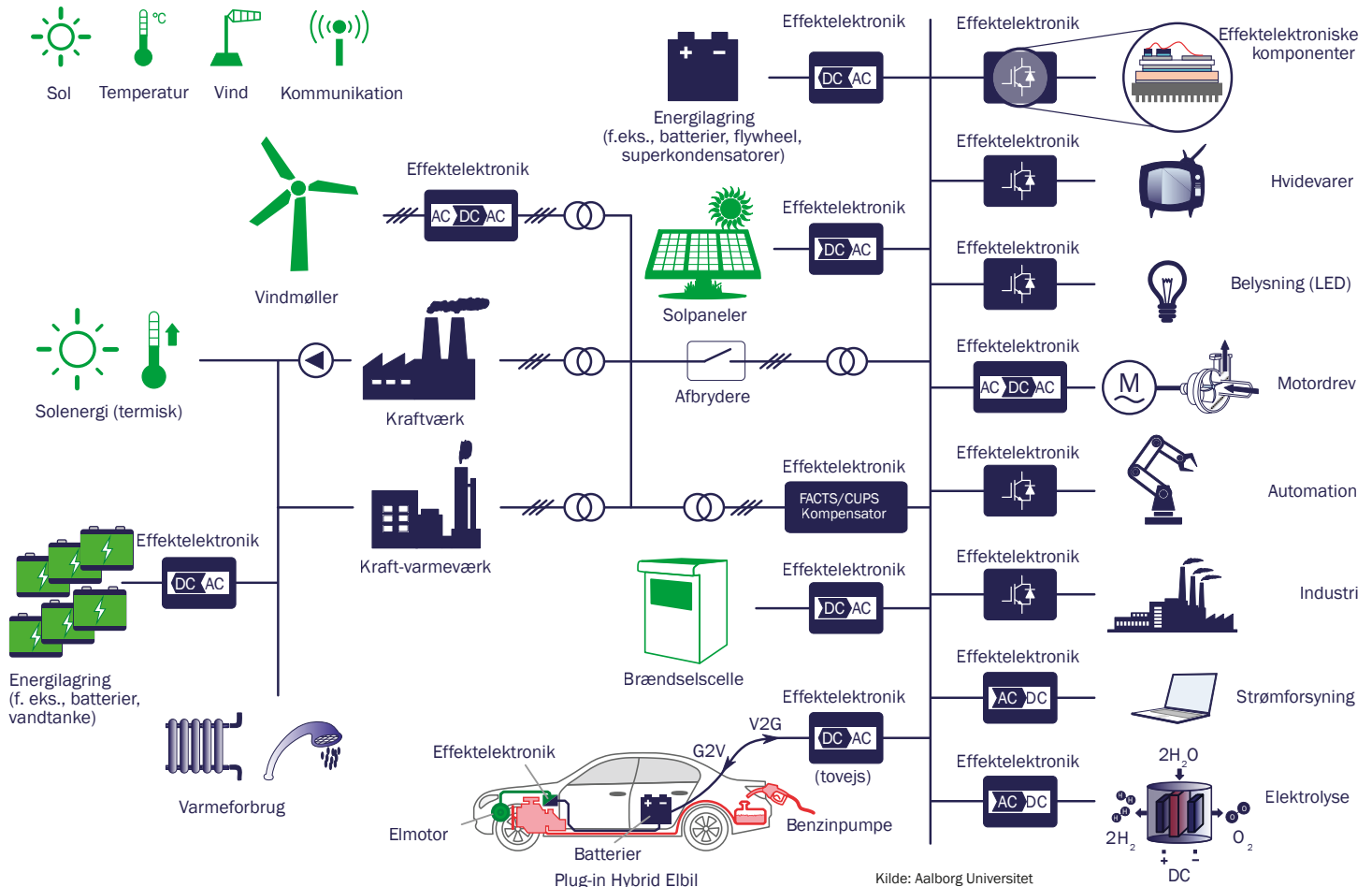
terier sker energilagring gennem elektroder, der omdanner lavenergiekjemikalier til højenergiekjemikalier. Denne reaktion kaldes elektrolyse, og den er reversibel, og derfor kan den akkumulerede elektriske energi genvindes ved omvendt elektrolyse. Elektrolysebrændstoffer som brint eller methanol laves ved hjælp af det samme elektrolyseprincip, som finder sted i batterier, men i stedet for at anvende det omvendte elektrolyseprincip, frigives den lagrede energi ved forbrænding, for eksempel i en bilmotor. Elektrolysebrændstoffer er CO₂-neutrale, fordi produktionen af brændstofferne fjerner den samme mængde CO₂ fra atmosfæren, som der udledes ved forbrænding.

Energi går tabt i konvertering

Når vi snakker om denne omstilling til en energiforsyning baseret på vedvarende energi er et helt

centralt koncept, det man kalder virkningsgraden (som har symbolet η). Når en energi omdannes fra en given form (for eksempel elektrisk) til en anden form (for eksempel kemisk), eller i samme form, men med forskellige karakteristika (eksempelvis fra elektrisk lavspænding til elektrisk højspænding), er der uundgåeligt et energitab, som kaldes konverteringstab. Virkningsgraden er dermed forholdet mellem den opnåede energi og den tilførte energi, og den er altid mindre end én, fordi der aldrig kan opnås mere energi, end der tilføres.

Virkningsgraden er typisk et meget højt tal, når der er tale om elektrisk energiomdannelse, for eksempel 0,9 eller endnu højere. Vi kan altså ud fra virkningsgraden umiddelbart aflæse den relative mængde energi, der går tabt i processen, idet



Figuren viser skematisk, hvordan der fra produktion af elektrisk energi til udnyttelse kan være flere trin, hvor der sker en konvertering. For eksempel kan konverteringen bestå i, at strømmen omformes fra jævnstrøm (DC) til vekselstrøm (AC) eller omvendt.

den blot er $1-\eta$. I omstillingen til en vedvarende energiforsyning er det derfor meget vigtigt at reducere den mængde energi, der går tabt ved konvertering. Faktisk sker der i hele processen fra produktion, transport, distribution og forbrug af energi typisk 5-6 omdannelser, hver med en virkningsgrad mindre end 1 og dermed et tab. Hvis hver omdannelse eksempelvis sker med en virkningsgrad på 0,9, betyder 5 konverteringer således, at kun $0,9^5$, dvs. knap 60 % af den oprindelige energi er tilbage. Det forklarer, hvorfor der på globalt plan for hver produceret 10 kWh går mere end 5 kWh tabt på grund af konverteringstab.

Det betyder også, at der potentielt kan være meget at vinde ved at øge effektiviteten af elektriske energitransformationssystemer.

Strategier for at øge virkningsgraden

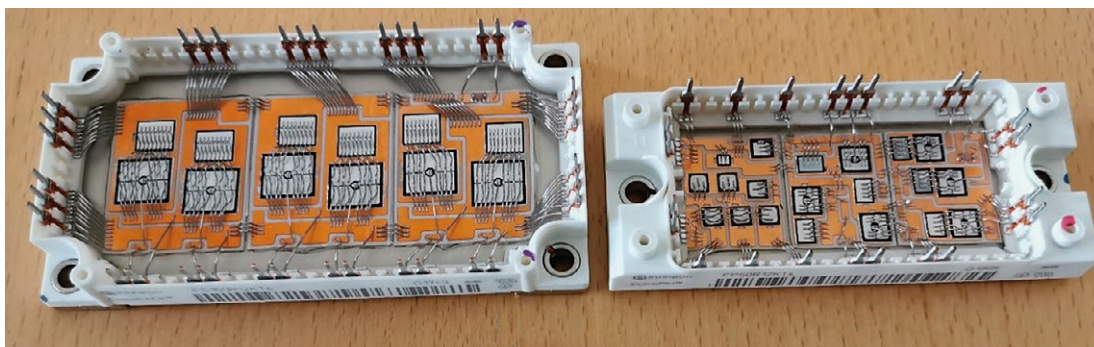
Men hvilke strategier har vi for at kunne øge virkningsgraden? Der er mange, men grundlæggende falder forskningen indenfor området i to hovedretninger. Den ene handler om at gøre de elektroniske kredsløb, der bruges til at ændre for eksempel spændingen eller strømmen i et elektrisk system, mere effektive. At øge virkningsgraden af et elektronisk kredsløb betyder, at kredsløbet vil producere mindre varme, mens det udfører sin funktion, hvilket betyder mindre tab af energi.

Den anden strategi går ud på at undgå store variationer i energiforbruget. Det skyldes, at konverteringstabene ikke er lineære. Med andre ord er konverteringstabene større ved højt forbrug end ved lavt

forbrug. Det er derfor bedre at have et konstant eller næsten konstant energiforbrug – og dermed konstant behov for energiproduktion – frem for et energiforbrug, der varierer meget i løbet af dagen og henover årtiderne.

På Aalborg Universitet har vi ved Institut for Energi (AAU Energy) to forskningsgrupper, der arbejder indenfor begge de nævnte retninger. Den ene gruppe arbejder således med at gøre elektroniske kredsløb mere effektive, mens den anden arbejder med at udvikle intelligente strategier for at balancere energiforbruget, så vi opnår energistrømme, der er så konstante som muligt. Det sidste handler om på grundlag af prognoser og algoritmer baseret på kunstig intelligens at blive bedre til at forudsige energiforbruget i den betragtede periode, så man kan

Foto: Aalborg Universitet



Billedet viser et eksempel på kommercielle effektelektronikmoduler. Man ser en række firkantede chips af halvleder materialer, som er forbundet med hinanden ved hjælp af metaltråde, såkaldte bond wirer. Chipsene er loddet på et underlag af kobber, som kaldes substratet. Foto: Aalborg Universitet

Foto: Nick Baker, University of Alabama, US.

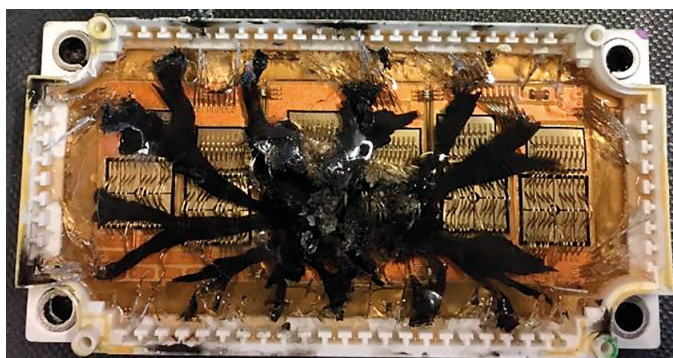
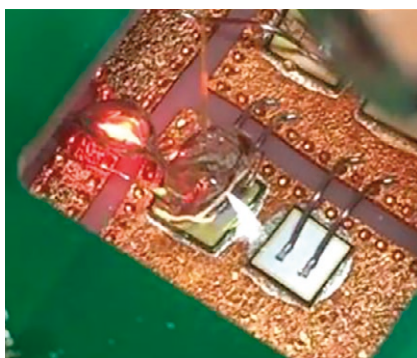


Foto: www.radionuseum.co.uk/rfrs.html

Billederne viser eksempler på ødelæggende svigt af strømforsyningsenheder. På billedet til venstre, som er optaget med et højhastighedskamera, ser man en overophedning, der får bond wirerne på den ene chip til at smelte. På billedet til højre er der simpelthen sket en eksplosion på grund af en termisk løbsk proces, der har ødelagt modulet.

vedtage strategier for at udskyde belastninger, det er muligt at udskyde, for eksempel opladning af elbiler.

Pålidelige komponenter

Når vi arbejder med at udvikle mere effektive elektroniske komponenter, handler det ikke kun om at opnå størst mulig effektivitet. Et ligeså vigtigt aspekt er, at komponenterne er *pålidelige*, det vil sige, at de ikke svigter og dermed holder længe. Alle teknologier indenfor vedvarende energi er baseret på elektroniske omformere, der gør det muligt at modulere og regulere den producerede energi over tid. I for eksempel en vindmølle eller en solcellegenerator er elektronikken nødvendig for at omdanne produktionen af variabel energi fra vinden eller solen til en energistrøm med faste parametre (typisk elektrisk spænding og elektrisk frekvens), der gør det muligt at distribuere energien i elnettet. Elektronik, der bruges til at styre og konvertere elektrisk energi, kaldes på fagsprog for effektelektronik. Da vedvarende energisystemer

er forholdsvis dyre, skal de elektroniske komponenter, der bruges indenfor dette område, helst kunne holde op til 25 eller endda 30 år. Det er naturligvis en stor udfordring at producere komponenter, der er pålidelige nok til at fungere over så lang en tidshorison.

Jeg leder selv en forskergruppe på AAU Energy, hvor vi beskæftiger os

specifikt med effektelektroniske komponenters pålidelighed. Når man taler om pålidelighed i denne sammenhæng defineres det konkret som, hvor stor en andel af komponenterne, der stadig virker efter et givet antal år. Og her er man selvfølgelig interesseret i at rykke grænserne, så en stadig større andel virker i flere og flere år.

Men det er svært, og det er mere end nogensinde nødvendigt at tænke i komponenter, der kan holde i 20 år eller mere uden vedligeholdelse. Det kræver, at vi bygger komponenterne med materialer, der er robuste overfor de belastninger, de bliver udsat for ved den daglige drift samt variationer i temperatur og fugtighed på grund af klimatiske forhold. Det er en interessant udfordring, som kræver en tværfaglig indsats, der går fra viden om elektronik indenfor for eksempel drift af transistorer, over grundlæggende fysisk viden om materialer, til termisk teknik, som handler om håndtering af den



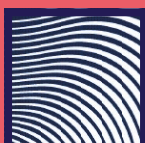
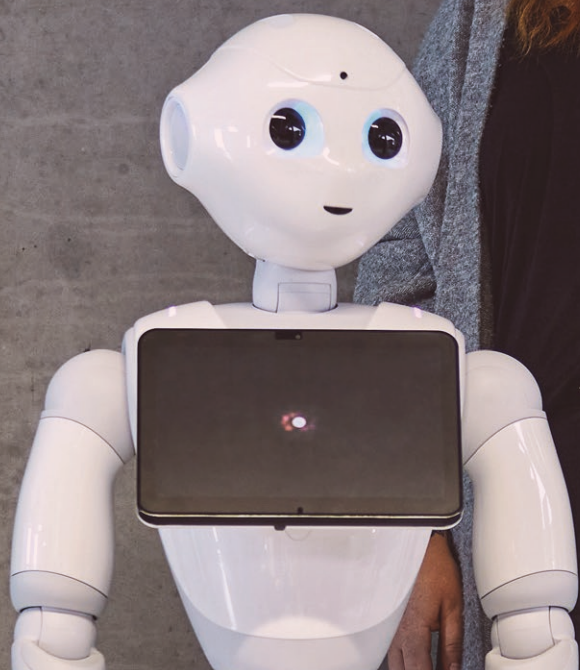
Der er fx effektelektronik i en inverter til et solcelleanlæg. Her skal jævnstrøm laves om til vekselstrøm. Elbiler bruger også en del effektelektronik.



AALBORG
UNIVERSITET

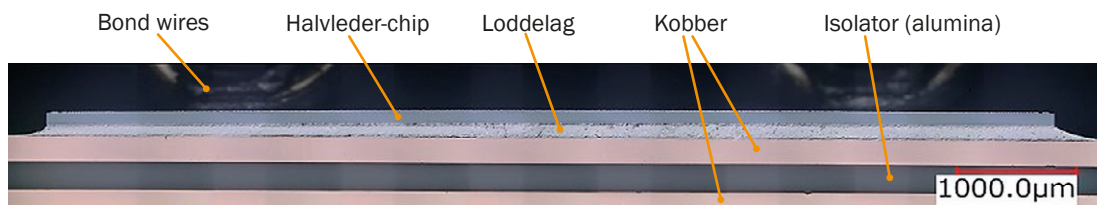
NY AI-UDDANNELSE I AALBORG

DESIGN OG
ANVENDELSE AF
KUNSTIG INTELLIGENS

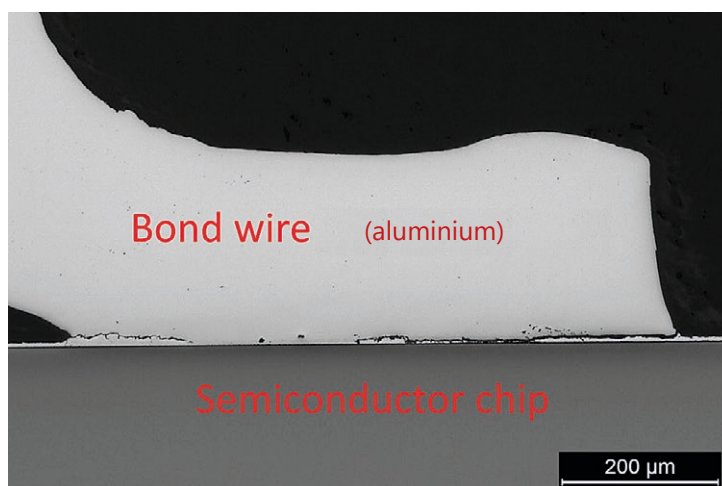


**MAKE IT
REAL**

NY DIPLOMINGENIØR-UDDANNELSE PÅ 3,5 ÅR. DE STUDERENDE LÆRER AT BRUGE DE NYESTE ALGORITMER OG AI-TEKNOLOGIER OG FÅR EN MASSE PRAKTISK ERFARING MED AI. LÆS MERE: [KUNSTIGINTELLIGENS.AAU.DK](https://www.kunstigintelligens.aau.dk)



De to billeder viser tværsnit af et effektelektronikmodul i henholdsvis intakt tilstand og efter belastning, hvor man ser tydelige huller (sorte) i loddelaget. Foto: Aalborg Universitet



Billedet viser et tværsnit af grænsefladen mellem en bond wire og en halvleder nedenunder. Der er tydelige sprækker i grænsefladen, og bond wiren er tæt på at løsne sig helt. Foto: Aalborg Universitet

tabsrelaterede varme, der produceres i komponenterne.

Løse forbindelser

Men hvad er hovedårsagerne til, at effektelektroniske komponenter bryder sammen?

Grundlæggende er der to kategorier af svigt. Den ene type kaldes "bond wire liftoff", hvor de metaltråde (på fagsproget kaldet bond wires), der bruges som ledninger til at skabe elektrisk forbindelse mellem halvleder-komponenterne i de effektelektroniske moduler, løsner sig. Dette sker, fordi kontaktfladen mellem bond wirerne og halvledermaterialerne gradvist svækkes for til sidst at revne. Hovedårsagen til dette fænomen er forskellen i termiske udvidelseskoefficienter for de to materialer, nemlig bond wiren og halvlederen. Når komponenten er i brug, får den kontinuerlige temperaturvariation de to materialer til at

udvide sig, men da forskellige materialer ikke udvider sig på nøjagtig samme måde, giver det mekaniske spændinger i overfladen, som med tiden får grænsefladen til at revne.

Den anden form for fejl sker tilsvarende ved brud, men her mellem halvlederen og det loddelag, som forbinder chippen med underlaget, som typisk er en kobberoverflade. Denne type fejl, som kaldes delaminering af loddelaget, skyldes ligeledes forskel i termiske ekspansionskoefficienter for de to materialer, der er i kontakt med hinanden. Det fører til spændinger ved grænsefladen mellem halvlederen og loddelaget, som i sidste ende kan danne hulrum under halvlederen eller løsne den helt.

Begge typer af fejl skyldes altså, at der opstår spændinger i kontaktfladen mellem materialer på grund af den temperaturdrevne

udvidelse af materialerne, når komponenterne er i drift. Hvis vi vil øge pålideligheden af strømelektroniske komponenter, er det altså nødvendigt at reducere de termiske belastninger, som grænsefladerne bliver udsat for. En mulighed er her at "overdimensionere" komponenten, hvilket betyder at man bruger en komponent af en højere kategori end nødvendigt for at styre det nødvendige effektniveau. Det er dog en dyr løsning og derfor ikke attraktiv.

Flydende forbindelser giver mere pålidelig elektronik

I vores forskergruppe ved AAU Energy forsøger vi derfor at gå en anden vej og finde løsningerne på materialeniveau. Mere specifikt, arbejder vi på at erstatte materialerne i grænsefladerne med metaller i en flydende tilstand, hvilket giver mulighed for total eliminering af stress.

Vi har udviklet en teknologi, hvor vi forbinder en chip med en kobberbro ovenfor chippen ved hjælp af en dråbe flydende galliumlegering (se foto næste side). Deponering af metallet sker gennem et hul lavet i kobberbroen, som tillader fordeling af den mængde metal, der er nødvendig for at etablere kontakten. Forbindelsen til den nederste del af chippen foregår stadig på konventionel vis ved hjælp af et loddelag, men det er dog planen med tiden at undersøge, om også denne forbindelse kan erstattes med en flydende metallegering.

Vi har med denne prototype opnået overraskende resultater med hensyn til pålidelighed. Således kunne

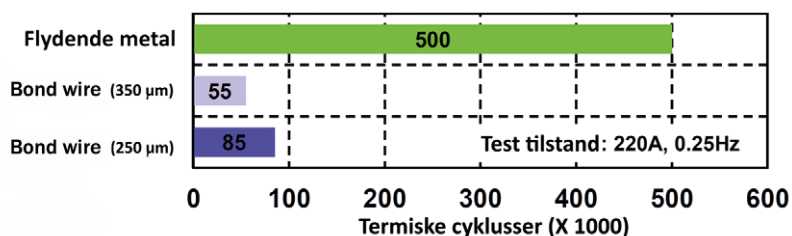
vores teknologi baseret på flydende metal klare 6-10 gange så mange termiske cyklusser – det vil sige gentagen opvarmning og nedkøling – som konventionelle bond wires, før forbindelsen svigtede. Dette lover godt for, at denne teknologi kan fremme udviklingen af effektelektroniske enheder, der er meget mere pålidelige end de hidtil kendte.

Der er dog endnu nogle ulemper ved teknologien, der især handler om, at galliumlegeringer på langt sigt kan reagere med de metalliseringer – dvs. overfladebehandlinger med metaller – der typisk anvendes på den øverste overflade af halvlederchippet. En sådan uønsket reaktion kan i sidste ende beskadige eller ødelægge den effektelektroniske komponent. Af denne grund fokuserer vi nu på at udvikle alternativer til de metalliseringer, der bruges på chipoverflader, der udviser ringe eller ingen reaktivitet med gallium. Vi forventer, at vi indenfor de næste tre år vil kunne få teknologien udviklet i en grad, så det vil være muligt at bruge den i kommercielle produkter. ■



Foto: Aalborg Universitet

Billedet viser vores prototype på en forbindelse baseret på en flydende galliumlegering. I det indrammede udsnit ser man chippen, der er forbundet med en kobberbro ovenfor ved hjælp af en dråbe flydende galliumlegering (her ses den adskilt for en god visnings skyld). Selve chippen er her loddet til underlaget på traditionel vis.



Figuren viser testresultater for en prototype på en forbindelse baseret på en flydende galliumlegering sammenlignet med traditionelle bond wires af to forskellige tykkelser. Pålideligheden kan aflæses som, hvor mange termiske cyklusser (det vil sige gentagen opvarmning og nedkøling) ved en given strømstyrke og frekvens, forbindelsen kan holde til, før den svigter. Det ses, at prototypen kan holde til mange flere cyklusser – 6-10 gange flere – end de traditionelle bond wires.

Mere information
N. Baker, S. Bekzowski, F. Iannuzzo, A. Lemmon, Su Gupta, A. Mshar, A. Jørgensen, T. Aunsborg, K. Pedersen, and R. Garcia, "Use of Liquid-Metal as the Frontside Interconnect in Power Semiconductors", IWIPP 2022 conference, August 24th – 26th, 2022, Toulouse, France.

Få mere at vide om testfaciliteterne for effektelektronik på Aalborg Universitet: www.xpower.aau.dk

Ny bachelor på SDU

Kunstig intelligens

Er du nysgerrig på optimering, logik, maskinlæring, programmering, etik, algoritmer og matematik?

Med en bachelor i Kunstig intelligens fra Syddansk Universitet får du kompetencer, som allerede nu er efterspurgt i virksomheder og organisationer i Danmark og udlandet.

Du behøver ikke kunne programmere, når du starter på uddannelsen. Du skal bare have interesse i at lære det, ligesom du skal have flair for at tænke logisk og matematisk.

Læs mere på sdu.dk/kunstig-intelligens



PROBLEMATISKE FLUORSTOFFER OVERALT

Fluors industriskabte binding til carbon (C-F) er blandt de stærkest mulige.

Det gør fluor-organiske stoffer uhyre anvendelige og holdbare, men gør dem samtidigt til "evighedskemikalier" i miljøet, uanset om de stammer fra kølegasser, regntøj, stegepander eller pesticider.

Mediernes rapporter om forureningen med fluor-organiske stoffer som PFAS minder os om tidligere miljøforureninger med tungmetaller (for eksempel kviksølv) og klorerede kulbrinter (DDT og PCB), der florerede i 1960-1980'erne og som stadig den dag i dag trækker spor i udviklingslandene. Siden er mange flere miljøfremmede stoffer dukket op, så myndighedernes samlede analysepakke i dag dækker flere hundrede. Men, der er mange flere derude, som vi enten ikke måler på eller er ukendte for os.

Fokus er lige nu på fluor-organiske stoffer, som er forskellige kæder og ringformede carbonmolekyler, hvor bindinger til fluor er etableret på et eller flere steder. De mest velundersøgte stoffer indenfor

PFAS (perfluor- og polyfluoralkyler) er perfluoroktansulfonsyre (PFOS) og perfluoroktansyre (PFOA) med otte carbonatomer i kæden. Men der undersøges for flere navngivne PFAS-forbindelser med 2-12 carbonatomer i kæden, heriblandt trifluoreddikesyre (TFA) med blot to. Andre er fluorholdige kølegasser og pesticider, som over de seneste 20-30 år har afløst klorholdige kølegasser og pesticider (som DDT), fordi de som bekendt viste sig at være skadelige for miljøet. Men nu lader historien desværre til at gentage sig med fluor-organiske stoffer.

Jeg er ferskvandsøkolog, ikke miljøkemiker, men øgede opmærksomheden på fluor-organiske stoffer, da fund af høje PFOS-værdier i danske ferskvandsfisk førte til advarsler mod konsum flere steder. Da jeg søgte i litteraturen, fandt jeg mange

beskrivelser af forureningskilder til fluor-organiske stoffer og detailstudier i vores nabolande af toksiske effekter i miljøet og hos mennesker mange år tidligere. Derimod er tilsvarende vurderinger indtil for nylig krøbet uden om Danmark, hvor mediedækningen og forvirringen pludselig eksploderede. I denne artikel vil jeg sammenfatte, hvad den righoldige litteratur afslører om kilder til fluor-organiske stoffer og deres opførsel i miljøet.

Evighedskemikalier

PFAS omfatter omkring 5.000 stoffer, der anvendes i industri og husholdninger til imprægnering, lak, lodning, maling, plastik, smøremidler, teflon og tekstiler. Endvidere markedsføres 430 fluorholdige pesticider.

Når der er grund til at holde et vågent øje på *alle* fluor-organiske

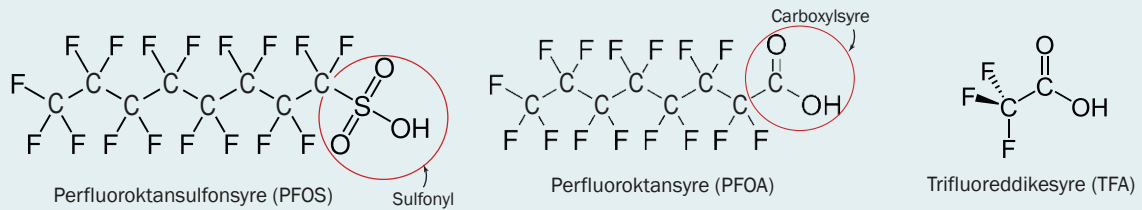
Tæt på Vesterhavet er der målt et højt indhold af PFAS i græs og jordvand. Det ser ud til, at havskum kan indeholde protein med store mængder af PFAS. Der sker en uheldig opkoncentrering. Foto: Jørgen Dahlgaard

Forfatteren



Kaj Sand-Jensen er professor ved Ferskvandsbiologisk Sektion, Biologisk Institut, Københavns Universitet og forfatter til bøger om Danmarks natur og biodiversitet samt lærebøger om økologi. ksandjensen@bio.ku.dk

PFAS



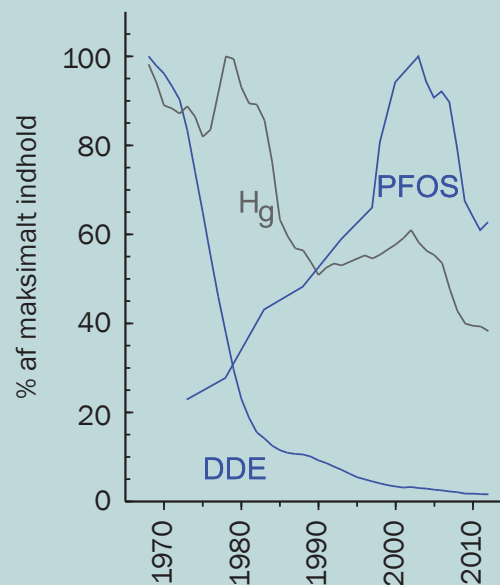
PFAS står for poly- og perfluoralkyl substanser. Især måles oktankæder med otte carbonatomer (for eksempel PFOS og PFOA), hvor hvert carbonatoms øvrige bindinger er til fluoratomer, mens kædens aktive slutning kan være en sulfonyl (PFOS), en carboxylsyre (PFOA) eller en alkohol (PFOH). Målinger kan også dække alle PFAS med 4-16 carbonatomer i kæden. Ved kontrol af grundvand og drikkevand måles TFA, som har to carbonatomer, hvor det ene bærer tre fluoratomer (CF_3) og det andet er carboxylsyre (COOH).

Miljøfremmede stoffer i Sverige

Forureningen med miljøfarligt kviksølv og klorerede kulbrinter som DDT er velbeskrevet i Sverige. I 1960-1970'erne toppede anvendelsen af svampedræbende kviksølvmidler til bejdsning af korn og som tilsætning i papirfremstilling. Det medførte op-hobning af kviksølv i fødekæder, der førte frem til rovfugle, fisk og mennesker. Svenskerne forbød kviksølvmidler, og siden er indholdet i fugle og fisk faldet drastisk, mens metylkviksølv er ført videre til Østersøen.

DDT blev anvendt som et vidundermiddel mod insekter. DDT sætter sig i nervecellernes fedtmembraner og udløser spontane nerveimpulser og muskelkrampe, så dyrene dør. DDT og nedbrydningsproduktet DDE gav anledning til bioakkumulering i lomvie, havørn og vandrefalk i 1970'erne. Stofferne forstyrrer fuglenes formering og kalkdannelse i æggene, så de bliver tyndskallede og går i stykker. Bestandene af lomvie og havørn decimeredes voldsomt, mens bestandene af vandrefalk kollapsede. Efter forbud steg ynglesuccesen og bestandene både i Sverige og Danmark.

Da svenskerne fortsat indsamlede æg fra lomvie og havørn og frøs dem ned, kunne de efterfølgende analysere æggene for PFOS, som havde det højeste indhold i 2005, hvorefter det faldt efter begrænsninger i anvendelsen.



Procent af maksimalt indhold af kviksølv (Hg), DDE og PFOS i lomvie-æg fra Store Karlsø ved Gotland i Østersøen. Figur efter Bignert & Helander 2015.

forbindelser, skyldes det, at bindingen mellem fluor og carbon er den stærkeste kendte og næsten ubrydelig for bakterier og svampe i miljøet. De mangler både enzymer til at spalte bindingen og får i givet fald også for lidt energi ud af at gøre det. Det gør organiske fluorforbindelser og mange nedbrydningsprodukter til "evighedskemikalier". De spredes og ophobes i jord, ferskvand, grundvand, havet og indlandsis, og de kan skade vitale processer hos planter, dyr og mennesker.

Produkter med PFAS er øget voldsomt i antal og mængde siden starten i 1950'erne. Så myndighedernes målinger, risikovurderinger og reguleringer halter uhjælpeligt efter kemigiganternes udvikling og salg af nye stoffer.

Siden 2000 har man internationalt især været opmærksom på bioakkumulering af PFOS og PFOA-relaterede stoffer med otte eller flere carbonatomer i kæden, som anses i højere grad end PFAS med færre carbonatomer at udvise

stærkt stigende koncentrationer i fisk, fugle, pattedyr og mennesker placeret højt i fødekæden. Da PFOS og PFOA er vand- og fedtafvisende, knytter de sig især til proteiner, og indholdet er størst i cellemembraner, lever, milt og nyrer samt i blodplasma. EU regulerede anvendelsen af PFOS i 2006. I Stockholm-direktivet, et internationalt regelsæt, anbefales i 2019 helt stop for produktion og anvendelse af PFOS og PFOA. Men afløserne kan sagtens være lige så problematiske.



En forurening med PFOS-holdigt brandslukningsskum fra et tidligere øvelsesareal for Korsør Brandskole satte for alvor PFAS på dagsordenen i Danmark.

PFAS i det danske miljø

I 2022 undersøgte Miljøstyrelsen indholdet af 12 PFAS i 278 grundvandsboringer ud over Danmark. 24 % indeholdt PFAS, og heraf overskred 4 % grænsen på 100 nanogram/liter (ng/L) for summen af de 12.

I regionernes foreløbige undersøgelser af grundvand under grunde mistænkt for forurening lå 1161, hver syvende, over den nye lave grænseværdi på 2 ng/L for summen af de fire med otte carbonatomer (PFOS, PFOA og to øvrige). Men flere end 100 indeholdt over 100 ng/L. Flere steder er grundvandet på vej mod drikkevandsboringer.

Siden 2021 er drikkevandet blevet undersøgt for summen af PFAS med otte carbonatomer. En landsdækkende undersøgelse af 7000 indvindingsboringer havde få målinger (79 eller 1 %) over grænseværdien på 2 ng/L. Værst ramt var Skagen med 29 ud af 31 boringer, selv om alle ligger i et beskyttet naturområde. Blanding med PFAS-frit vand fra Tolne bragte drikkevandet i Skagen under grænseværdien.

I november 2022 indløb den seneste lovpligtige indberetninger summen af de fire PFAS i drikkevandet fra 1744 vandværker, mens 227 var forsinkede. Eksperters skrev for

nylig, at der flere steder (for eksempel på Fanø) er problemer med at overholde grænseværdien, og det ikke altid er muligt at blande med helt rent vand for at komme under grænseværdien, så man måske må ty til at rense drikkevandet.

Siden 2007 har det været kendt, at spildevand nogle steder har et højt PFAS-indhold. Høje værdier er også målt i spildevand fra kemikaliefabrikken Cheminova på Harbøre Tange mellem Lemvig og Thyborøn. Overfladevand, grundvand og nedlagt fuglevildt på tangen indeholdt også meget PFAS. Drikkevandet i Thyborøn pumpes derfor ind udefra, og der advares mod konsum af hjemmedyrkede grøntsager, mens al jagt på tangen er forbudt.

Andre steder tæt på Vesterhavet blev der i 2023 målt højt indhold af PFAS i græs og jordvand. En rapport foreslog, at forureningen kunne stamme fra havet, idet havskum er beriget med protein og tilknyttet PFAS. Men de oprindelige kilder til PFAS findes selvfølgelig på land eller måske i anvendelser som smøremiddel i olie- og gasboringer i Nordsøen, men denne anvendelse er ikke oplyst. PFAS dannes ikke naturligt, hverken i havet eller andre steder. Betydningen af havskum som PFAS-kilde er uafklaret.

Analysen af gammel indlandsis i Arktis indeholder ikke PFAS. 700 år gammelt grundvand fra Grønland og Danmark er også frit for PFAS. Til gengæld er PFAS til stede i ny is og nyt grundvand. Resultaterne understreger, at PFAS er menneskeskabt, og forureningen er øget. Derfor finder man PFAS, og især PFOS, i fisk, fugle og pattedyr overalt på Kloden.

PFAS i organismer

På Grønland og i Østersøen har man i perioden 2000-2017 målt det samlede indhold af 36 PFAS (4-16 carbonatomer) i leveren fra isbjørn og sæler. Indholdet var højest i isbjørnen (cirka 4000 ng/gram), mens det var markant lavere i sæler og gennemgående lavere i grønlandske sæler (100 ng/g) end i Østersøens grå sæl (300 ng/g) og ringsæl (1000 ng/g).

Isbjørne har generelt forhøjet indhold af miljøfremmede carbonforbindelser med brom, fluor og klor, og denne cocktail mistænkes for at have en negativ effekt på bjørnenes hormonregulering, fedtstofskifte og nervekemi. Stoffer, hvis udledning er reduceret i Nordamerika og Europa, viser faldende indhold i isbjørnene i de seneste år. I Østersøen har man også målt markant faldende indhold af PFOS over de seneste år i æg fra lomvie og fjer fra havørn efter nationale forbud mod anvendelse af PFOS. Det hjælper altså at begrænse udledninger, så eksponeringen falder, hvorefter fuglene over tid afgiftes.

Hos mennesker mistænkes langkædet PFAS for at forstyrre fedtstofskifte, hormonbalance, hæmme immunforsvaret, øge risikoen for fosterskader og cancer i skjoldbruskkirtlen, prostata- og testikler samt nedsætte fertiliteten. Andelen af europæiske teenagere med PFAS-eksponering over de vejledende sundhedsgrænser estimeres til mellem 1,3% i Spanien og 23% i Sverige. I Danmark er der målt højt indhold af PFOS og PFOA i blodet hos folk udsat for tidligere anvendelse af stofferne i brandskum.

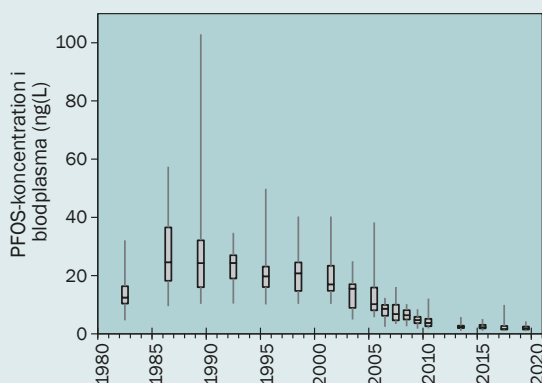
PFAS i menneskers blod

Tyske sundhedsmyndigheder har undersøgt indholdet af PFOA og PFOS i blodplasma fra omkring 100 tyskere. Efter restriktioner i anvendelsen er indholdet af PFOA faldet fra i gennemsnit omkring 6 ng/milliliter (ml) i 1990 til 1,5 ng/ml i 2019, mens indholdet af PFOS i samme tidsrum faldt fra 25 til 2 ng/ml.

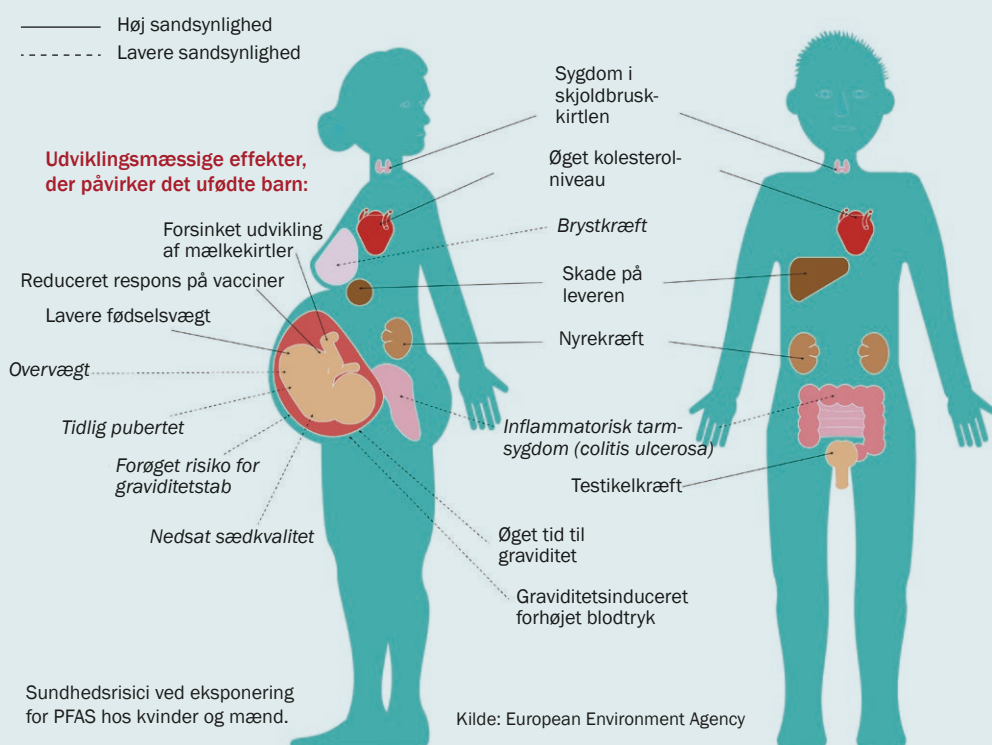
PFOS i blodplasma hos 30 år gamle borgere i Tromsø var højere end i den nævnte undersøgelse fra Tyskland. I Tromsø fordobles medianindholdet fra 1986 til et maksimum i 2001 på 28,1 i kvinder og 41,6 ng/ml i mænd. Efter nationale forbud mod PFOS-anvendelse faldt indholdet i 2007 til henholdsvis 10,6 og 20,1 ng/ml. Samme forløb har man fundet i et studie fra Uppsala, Sverige.

Til sammenligning viste danske målinger i 2021, at de 187 borgere, der havde spist kød fra køer, der afgræssede et areal, der havde været udsat for forurening med PFOS-holdigt brandslukningsskum fra et tidligere øvelsesareal for Korsør Brandskole, i gennemsnit havde 48 og maksimalt 600 ng/ml i blodet. Indholdet forventes at falde til det halve på fire-fem år. Brandskum med PFOS blev forbudt i 2011.

PFAS mistænkes for at kunne forstyrre fedtstofskifte, hormonbalance, hæmme immunforsvaret, øge kolesterolindholdet, øge risikoen for fosterskader og cancer i skjoldbruskkirtlen, prostata og testikler samt give lav sædkvalitet



Lineært PFOS i blodplasma hos udvalgte tyskere mellem 1982 og 2019. Boksene dækker intervallet mellem 25-75% af målingerne, mens stolperne strækker sig til minimum og maksimum. Plottet kaldes også for et boksplot.
Efter Göckner et al. 2020.



hos mænd. De fleste PFAS betragtes som moderate til meget toksiske. Årlige helbredsudgifter ved PFAS i EU estimeres til omkring 500 milliarder kroner. Andelen

af europæiske teenagere med PFAS-eksponering over de vejledende sundhedsgrenser vurderes til mellem 1,3% i Spanien og 23% i Sverige.

I Tyskland har man fulgt personer over en årrække og påvist markant faldende værdier efter nationale forbud mod stofferne. Den samme tendens har man set i Uppsala og Tromsø.

TFA i miljøet

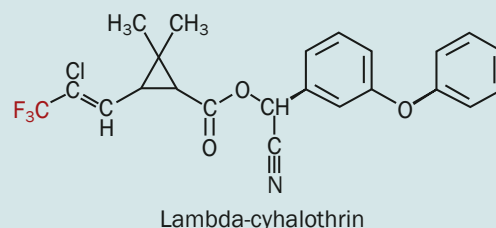
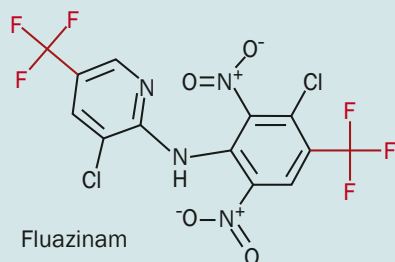
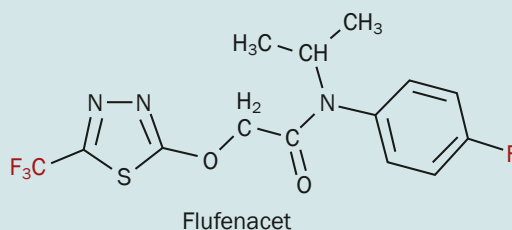
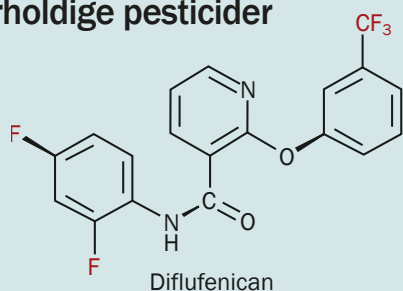
Mens opløseligheden af PFAS med mange carbonatomer er lav i vand, er TFA med blot to carbonatomer

vandopløseligt og kan dermed bevæge sig gennem jorden og videre til grundvandet og havet. Til gengæld ophobes TFA næppe i fødekæderne. TFA er udbredt overalt i miljøet både herhjemme og i udlandet.

Miljøstyrelsens undersøgelse i 2021 påviste TFA i 219 ud af 249 grundvandsindtag. I 212 tilfælde

var indholdet over 0,1 mikrogram/liter ($\mu\text{g/L}$), som er grænseværdien, hvis TFA stammer fra pesticider. Tyske udredninger angiver pesticider som en potentielt vigtig kilde og nedbrydning af kølegasser fra køleskabe og "air condition"-anlæg som endnu vigtigere kilder. I Danmark er "air condition" anlæg få, og bidraget fra pesticider sandsynligvis vigtigere.

Fluorholdige pesticider



Fire hyppigt anvendte fluorholdige pesticider med fluorgrupper og enkelte fluoratomer mærket med rødt indsat på især ringformede organiske forbindelser. Ukrudtsmidlerne, diflufenican og flufenacet og svampemidlerne, fluazinam og lambda-cyhalothrin. Ifølge middeldatabasen anvendes 13 fluorpesticider i Danmark. Carbon, C, optræder i nøglepunkterne, hvor linjer støder sammen.

Herhjemme er TFA-indholdet i drikkevand højt visse steder. Tyskland har en grænseværdi på 10 µg/L. Styrelsen for Patientsikkerhed har sikkert skelet til Tyskland, da man fastsatte en foreløbig administrativ grænseværdi på 9 µg/L. Forklaringen på den 90 gange højere TFA-grænseværdi for drikkevand af hensyn til patientsikkerheden sammenlignet med grænseværdien ved pesticidpåvirkning, kender jeg ikke.

Tyskland har omfattende målinger af TFA i blade fra bøg og poppel tilbage i tiden. De viser uden undtagelse kraftigt stigende værdier over de sidste 30 år svarende til typisk 4-7 gange højere værdier i bladene i 2020 end i 1990. Da bladene tabes efter et år modsvarer det en tilsvarende stigning i TFA-tilførslen med nedbøren. Den beregnede potentielle frigørelse af TFA fra pesticider, når de fordampes eller spaltes af UV-lys, mens de stadig sidder på sprøjtede afgrøder, udviser præcis samme markante stigningstakt. Desværre har vi ingen opgørelser i Danmark, der vurderer pesticidernes bidrag til tilførslen af TFA fra luf-

ten og nedbøren. Tab af pesticider til luften ved sprøjtning er store og medfører TFA nedfald over et større område på samme måde som TFA fra nedbrydning af kølegasser i atmosfæren, så TFA's jævne fordeling overalt i det terrænnære grundvand fortæller ikke noget om kildernes relative betydning.

Fluorholdige pesticider

Der har eksisteret fluorholdige pesticider siden slut-1940'erne. Det første var fluor-DDT, som er DDT med en CF₃-gruppe. Fluor-DDT og DDT blev forbudt i de fleste lande efter 1960'ernes massive forurening med DDT, hvor fugle døde, og rovfuglebestande kollapsede.

Efter 2000 er fluorholdige pesticider blevet stadig mere populære, og de udgør i dag mere end 70% af nye midler mod ukrudt, svampesygdom og insekter. Industrien kan nu producere billigere, mere potente, specifikke og længerevirkende fluorprodukter. Samtidigt er nye fluorprodukter i modsætning til gamle pesticider ikke omfattet af patenter, eventuelle forbud og udviklet resistens hos målrettede organismer.

Ofte indsættes fluorenheder (CF₃, CHF₂, CHF₂O eller (CF₃)₂FC) eller enkelte fluoratomer i ringformede organiske enheder, enten alene eller suppleret med kloratomer. Flere pesticider efterligner planters naturlige organiske kampstoffer mod insekter, eller de forfiner tidligere udviklede pesticider; for eksempel udskiftedes klor i det forbudte chlorodane med fluor i et nyt persistent pesticid med tilsvarende virkning, men forventet mindre bioakkumulering.

Giftigheden hviler på forskellige principper. Ofte ligner pesticidet et naturligt nøglestof såsom det centrale væksthormon auxin hos planter, et nøgleenzym eller en generel syntesevej såsom dannelse af fedtstoffer. Men disse effekter kan så række videre til organismer, man ikke vil ramme. Mange insektgifte i afgrøder fortsætter deres giftvirkning på insekter i nabolaget og på smådyr og fisk efter udvaskning til vandløb og søer.

Behandlingshyppighed kan reduceres takket være fluorstofferne stabilitet og C-F bindingens "ubryde-



lighed". Omvendt udgør persistens et miljøproblem, når de oprindelige moderstoffer eller delvis nedbrudte stoffer ophobes i miljøet og påvirker ikke-målede organismer. Nogle pesticider har halveringstider på ét år, så halvdelen er stadig i miljøet året efter oven i den nye mængde, der tilføres hver år.

Pesticidernes miljøpåvirkninger

Nogle pesticider og nedbrydningsprodukter er vandopløselige og kan derfor føres til vandløb og søer eller nedrive til grundvandet. Andre er mere fedtopløselige eller proteintilknyttede og kan derfor akkumulere i fødekæderne eller knyttes tæt til organisk stof i jorden. Få danske feltstudier undersøger fluorholdige pesticiders mængder og opførsel i dyrket jord og organismer, mens der forskes mere i spildevand og grønlandske dyr. Da der anvendes store pesticidmængder hvert år på halvdelen af Danmarks areal, og da pesticiderne, efterfølgende bindes i jorden eller spredes til luft, grundvand og overfladevand, burde denne viden eksistere som grundlag for en risikovurdering på samme måde som for langkædet PFAS.

En illustrativ undtagelse udgør danske miljøkemikeres undersøgelser af det populære ukrudtsmiddel diflufenicans opførsel i eksperimenter med en sandet dyrkningsjord og en grusjord. Diflufenican og dens svagt nedbrudte stoffer

binder sig hårdere i sandjorden, der indeholder organisk stof, end i grus. I begge tilfælde kan stofferne udvaskes. Opsigtsvækkende nedbrydes diflufenican næsten ikke over 150 dage i både gruset (1,4 %) og sandjorden (cirka 10 %), så generelle nedbrydningstider, der angives for dette og andre pesticider, kan være endnu længere i den konkrete jord. Diflufenican hæmmer planters dannelse af karotenoider og aminosyrer og dermed også deres fotosyntese og vækst. Stoffet kan endvidere bioakkumuleres.

Ifølge et nyt spansk feltstudie reducerer ukrudtsmidlerne flufenacet, diflufenican og chlorotyloron mikroorganismernes aktivitet i jord, mens tilsætning af organisk grøngødning binder stofferne, modvirker ændringerne og begrænser udvaskningen, dog uden helt at forhindre det. Ukrudtsmidlet terbutryn hæmmer bakterie- og svampevækst i jorden med 25-75% endog stadig 40 dage efter behandlingen. Begge studier peger altså på længerevarende og ofte ukendte effekter af pesticiderne på dyrkningsjordens mikroorganismer.

Endelig viser studier i Italien meget høje indhold af en lang række fluorholdige pesticider i honningbier og stor dødelighed i bistaderne, som lægges oven i vidt udbredte dødelige nerveeffekter af andre pesticider (for eksempel pyrethroider).

Videnskab og myndigheder kommer til kort

Overordnet er jeg efterladt med det indtryk, at videnskab og miljømyndigheder er kommet til kort over for de 20.000 nye stoffer, som kemiindustrien producerer hver eneste år til industri, husholdninger og landbrug. Fluorstofferne accepteres alligevel vel vidende, at de aldrig forsvinder fra miljøet, mens deres påvirkning af miljøet og os er usikre. Flere eksempler illustrerer, at nye stoffer er lige så problematiske, som de gamle stoffer, de afløser.

I diskussionen holder landbruget sig ansvarsfri for pesticidanvendelse med henvisning til, at stofferne er godkendte. Men erfaringsmæssigt bliver der til stadighed udviklet nye pesticider, som anvendes nogle år, hvorefter de dukker op i grundvandet eller i organismer med generelle skadevirkninger og derefter forbydes, for at blive erstattet af andre med ukendte langtidsvirkninger. Tilsvarende kan København Lufthavn holdes ansvarsfri for tidligere brandøvelser med dengang tilladt PFAS-skum, som i dag har lukket drikkevandsboringerne i Dragør, så beboerne må betale for drikkevand fra København.

Fluorforureningen er kun et af mange uløste miljøproblemer, der farver den grønne omstilling ildrød. Men i betragtning af, at det drejer sig om "evighedskemikalier", burde alarmklokkerne nok høres tydeligere hos politikere og myndigheder. ■

Fluorholdige pesticider udgør mere end 70% af nye midler mod ukrudt, svampesygdom og insekter. Foto: Shutterstock

Anbefalet litteratur

Alexandrino DAM et al. 2022. Revisiting pesticide pollution: the case of fluorinated pesticides. *Environmental Pollution* 292: 118315.

Berg V. et al. 2021. Time trends of perfluoroalkyl substances in 30-year old Norwegian men and women in the period 1986-2007. *Environmental Science Pollution Research* 26: 43891-43907.

Bignert A & Helander B 2015. Monitoring of contaminants and their effects on the common Guillemot and the White-tailed sea eagle. *Journal of Ornithology*. Doi: 10.1007/s 10336-015-1240-3,

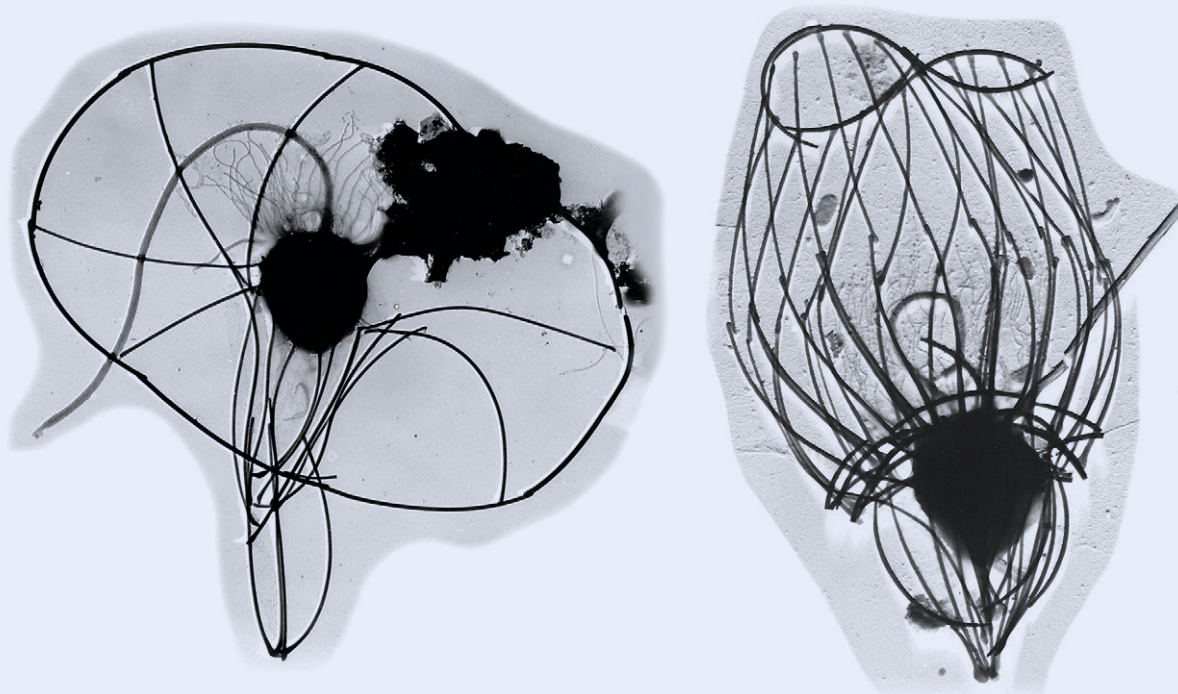
eea.europa.eu/publications/zeo-pollution/cross-cutting-stories/pfas

Göckner B et al. 2020. Human biomonitoring of per- og polyfluoroalkyl substances in German blood plasma samples from 1982 to 2019. *Environmental International* 145: 106123

Spaan KM et al. 2020. Fluorine mass balance and suspects screening in marine mammals from the Northern hemisphere. *Environmental Science Technology* 54: 4046-4058.

Svensen SB et al. 2020. A comparison of the fate of diflufenican in agricultural sandy soils and gravel in urban areas. *Science of the Total Environment* 715: 136803.

Billeder af heterotrofe flagellater, *Parvicorbicula manubriata* (tv) og *Stephanoeca elegans* (th), taget med transmissions-elektronmikroskop. Cellerne er hos begge arter udstyret med en enkelt flagel omgivet af en "filterkrave". Cellerne er desuden ophængt i et eksoskelet af løse stave. Fotos: Helge Thomsen.



FLAGELLATER

– havets mikroskopiske prædatorer

De fundamentale livsfunktioner – at æde og overleve – er hos alle organismer i konflikt med hinanden.

Denne konflikt hos såkaldte flagellater er en nøgle til at forstå de mikrobielle økosystemers funktion i havet og dermed havets rolle i det globale kulstofregnskab.

Vi er alle rundet af en flagellat: sædcellen der med sin piskende flagel svømmer mod ægget minder os om vores marine urform. Den encellede, fritlevende flagellat opstod for mere end 1 milliard år siden og gav ophav til alle nulevende *eukaryoter* (det vil sige alt liv, der ikke er bakterier og vira). Flagellater findes stadig i alle vandige miljøer og i mange forskellige varianter. Dyr og planter er alle små sidegrene på det centrale eukaryote stamtræ, og langt den største evolutionære diversitet findes blandt flagellater. Faktisk findes flagellater i alle stamtræets hovedgrene, og det er således den mest diverse gruppe organismer på jorden.

Fritlevende flagellater spiller en central rolle for reguleringen af havets *mikrobiom*, det vil sige de mikrobielle økosystemer, der står for hovedparten af den biologiske carbonomsæt-

ning i havet. Flagellater lever af bakterier, og de fleste er tillige i stand til at lave fotosyntese og dermed optage CO₂. De ernærer sig altså både som dyr og planter. Flagellaterne er de største konsumenter af bakterier i havet og vigtige primærproducenter af organisk carbon. De spiller altså en central rolle for havets bidrag til det globale carbonregnskab og dermed for vores klima.

Modellering af økosystemer

For at vurdere havets rolle i det globale carbonregnskab – og hvordan denne rolle påvirkes af blandt andet klimændringer – bruger vi modeller af marine økosystemer.

Men modellering kræver forenkling: Det er i praksis ikke muligt at beskrive alle arter, og hvordan de vekselvirker med hinanden og det omgivende miljø. Derfor slår man ofte arter, der ligner hinanden, sammen i funktionelle grupper, som

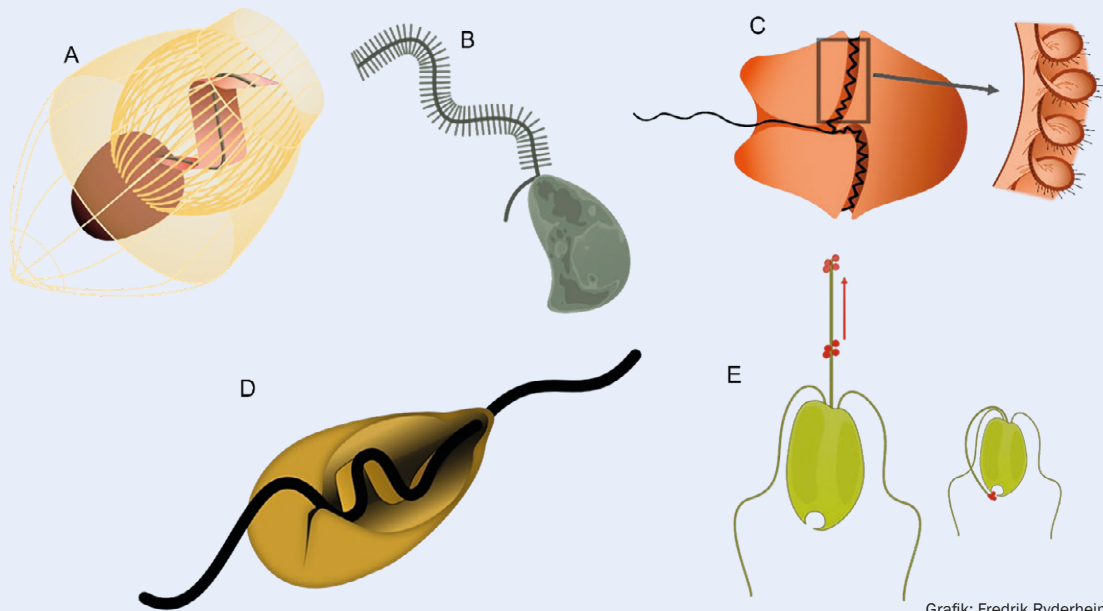
man behandler som var det én art. Således beskriver man i mange matematiske modeller flagellater som én funktionel gruppe: De er alle små, encellede og udstyret med nogle få flageller. Derved ser man bort fra, at de indbyrdes er meget forskellige: De varierer kolossalt i størrelse (de største vejer mere end en million gange mere end de mindste); de varierer i form – flade, runde, aflange og med diverse udvækster; deres flageller kan variere i antal og være forsynet med hår og sejl, og deres slagmønstre kan være meget forskellige. At behandle flagellater som én gruppe svarer omtrent til at behandle alle dyr og alle planter som hver én gruppe i beskrivelsen af økosystemers sammensætning og funktion.

Derfor bruger moderne "træk-baserede" modeller et andet forenklingsprincip. I stedet for at slå arter sammen i funktionelle grupper,

Om forfatteren



Thomas Kiørboe er professor, dr. scient. og leder af Centre for Ocean Life ved DTU-Aqua. Han forsker i samspillet mellem planktonorganismer og det omgivende miljø. tk@aqu.dtu.dk



Grafik: Fredrik Ryderheim

Figur 1. Flagellater har forskellige tilpasninger til at drive en effektiv fødestrøm.

A. Kraveflagellat: flagellen er omgivet af en "filterkrave", der består af tætsiddende filamenter. Flagellen driver en bred hinde, der fungerer som en effektiv pumpe. Mange kraveflagellater er, som denne, desuden omgivet af et åbent eksoskelet, der består af sammenhæftede stave.

B. Flagellat med stive hår på den ene flagel. Hårene 10-dobler den kraft, flagellen producerer og vender kraftens retning, så fødestrømmen kommer ind mod cellen.

C. Dinoflagellat (furealge) med én nøgen flagel og én flagel, der indpakket i en hinde løber i en fure rundt om cellen og producerer en kolossal kraft, der skaber en meget effektiv fødestrøm.

D. Excavat flagellat med to flageller, hvoraf den ene driver en bølgende hinde på cellens underside.

E. Haptofyt udstyret med to flageller samt en "snabel", hvorpå bakterier opsamles og føres til flagellatens mund. Tegningerne er ikke til skala – de afbillede flagellater måler mellem 4 og 30 µm i diameter.

fokuserer man på individuelle organismers vigtigste egenskaber (træk) på tværs af arter. Der skal ikke mange egenskaber til for at få en god beskrivelse af en organismes vigtigste livsfunktioner, at æde og overleve. Ved at kvantificere de indbyggede modsætninger mellem de fundamentale livsfunktioner kan man konstruere simple modeller, hvor fødenettets komplicerede struktur og funktion opstår som et resultat af interaktioner mellem individer og miljø. Modelbyggeren skal ikke selv specificere "hvem der æder hvem". Spørgsmålet er, om vi kan kvantificere modsætningerne – *trade-offs* – mellem at æde og overleve for flagellater i modelleringen af marine mikrobielle fødenet?

Flagellaternes modsætningsfyldte liv

Flagellater bruger flagellen til at skabe en vandfødestrøm, hvorfra den kan høste bakterier. Men når

flagellaten forstyrrer det omgivende vand med sin fødestrøm, tiltrækker den samtidig sine fjender, og der bliver derfor en konflikt (*trade-off*) mellem at æde og selv blive ædt.

I flagellatens mikromiljø fremstår vand så sejt som sirup. Det vil sige at den svømmende flagellat slæber en tyk kappe af sejt vand med sig, og hvis den nærmer sig et bytte, vil dette alt andet lige blive skubbet væk. Der skal altså ganske store kræfter til for at skabe en effektiv fødestrøm, der trækker byttet til sig.

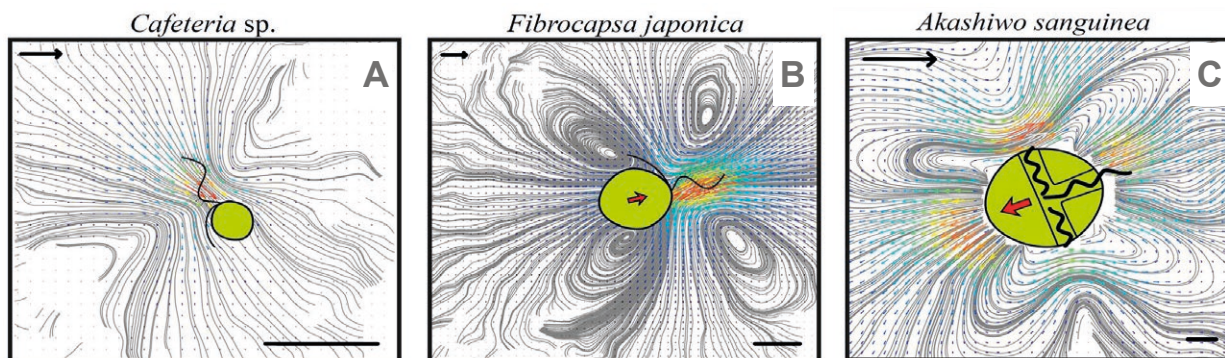
Hvordan skaber en flagellat en kraftig fødestrøm?

Den arketypiske flagellat, der drives frem af en enkelt flagel, finder vi hos den gruppe, hvortil dyrene hører. Sædcellen hos dyr er et godt eksempel; sværmerstadiet hos kraveflagellaterne (vores nærmeste slægtninge blandt flagellaterne) et

andet. Men den nøgne flagel kan ikke skabe en tilstrækkelig kraft til at drive en effektiv fødestrøm, og vi finder derfor en række tilpasninger hos det stadie, der æder.

Ernæringsstadiet hos kraveflagellater etablerer således en krave omkring flagellen (fig. 1A). Kraven består af tætsiddende stave og fungerer som et filter. Når flagellen slår, drives der vand gennem dette filter, og her tilbageholdes bakterier. Kun ved at antage, at flagellen er udstyret med brede hinder, har man kunnet forklare væskestrømmen gennem filtret. Det er først for nylig lykkedes at visualisere denne skrøbelige hinde.

Andre flagellater har stive hår på flagellen (fig. 1B). Men hårene stikker ud fra flagellen i slagplanet, ikke vinkelret, som man ville forestille sig mere virkningsfuldt. Og tilstedeværelsen af hår vender strømmen,



Figur 2. Fødestrømmens arkitektur varierer på karakteristisk vis mellem arterne, som alle fordeler sig i 4 forskellige generiske grupper (her er vist 3; den 4. gruppe minder i sin arkitektur om typen vist i C). Linjerne er "strømlinjer", som er den bane en vandpartikel følger. Længdeskala i nederste hjørner er 10 µm, og flowskalapile i øverste venstre hjørne er 0,1 mm/s.

så den løber modsat den retning, flagellen slår, og samtidig øges flagellens kraft med en faktor 10. Uforståeligt? På denne skala, hvor vand opfører sig mærkeligt, kan man ikke bruge sin intuition til at forstå det, man observerer. Ved hjælp af formel fysik kan vi imidlertid forklare observationen. Strømning *ind mod* i stedet for *væk fra* cellen har store fordele. Flagellaten scanner ved hjælp af flagellen den indkommende fødestrøm for bakterier og transporterer herefter opsnappet bytte til cellen, godt hjulpet af fødestrømmen. Denne effektive type flagellater syntes at være den dominerede form i havet.

Furealger (dinoflagellater) har et andet unikt arrangement (figur 1C): de har to flageller, den ene minder om sædcellens og skubber cellen fremad, mens den anden flagel lø-

ber i en fure rundt om cellen. Denne flagel ligger desuden i en hinde, som den driver i en bølgende bevægelse rundt om cellen. Endelig er den tillige udstyret med hår. Igen kan vi kun ved hjælp af formel fysik forstå, at dette system producerer en endog meget stor kraft, som dels driver cellen fremad, og dels skaber en effektiv fødestrøm, der fører vand og bytte gennem den seje vandkappe helt ind til cellens overflade.

De "excavate" flagellater (figur 1D) har ligeledes to flageller, hvor den ene, forsynet med en hinde, driver en strøm gennem en fure på cellens underside, hvor byttet indfanges. Systemet synes ikke at være særlig effektivt, og de fleste nulevende former findes enten i havbunden, eller fasthæftet på svævende partikler ("marin sne"), hvor koncentrationen af føde er

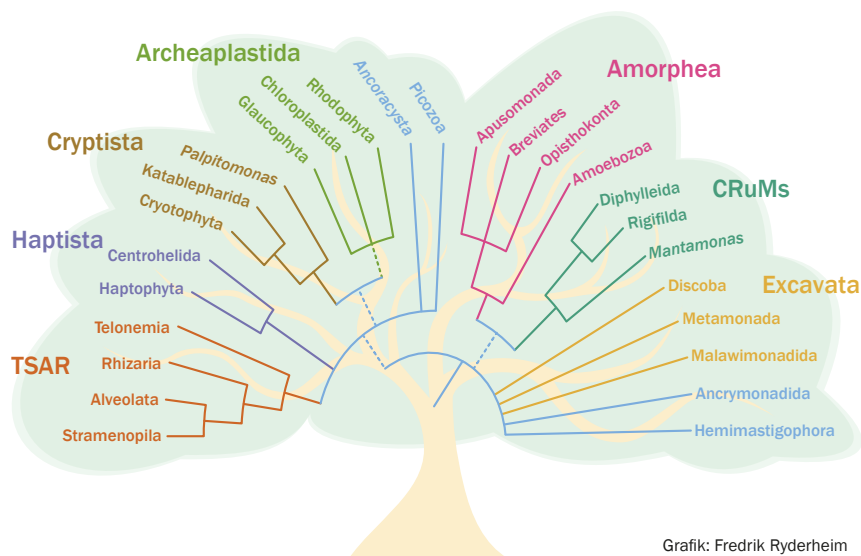
høj. Excavaterne anses af nogle forskere for at være nært beslægtet med den fælles stamform for alle nulevende eukaryoter. I ur-havet var behovet for en effektiv fødestrøm mindre end i det moderne hav, fordi der var færre prædatorer.

Endelig er der "haptofytterne" (figur 1E), som er celler, der ud over to flageller er udstyret med et "haptone": en lang, tynd udvækst, hvor cellen opsamler bakterier og som en snabel kan føre byttet til "munden" i cellens anden ende.

Der findes mange andre typer flagellater i havet. Mange af dem kender vi kun fra det eDNA, man kan isolere i vandprøver, og mange andre kan ikke dyrkes og studeres i laboratoriet. Men vi må forvente, at de alle har tilpasninger til at producere tilstrækkeligt effektive fødestrømme.

Prædations-risiko

Jo kraftigere og jo længere væk, fødestrømmen rækker, des mere bytte kan høstes, men des større er også flagellatens risiko for at blive opdaget af et rovdyr, for eksempel en vandloppe. Vandlopper er udstyret med små sansehår, der som en pick-up på en gammeldags pladespiller opsnapper bevægelser i vandet. Fødestrømmens udbredelse og arkitektur varierer på karakteristisk måde mellem forskellige typer flagellater (figur 2). Den er relateret til, hvor og hvordan flagellen fungerer og kan forklares med simple hydrodynamiske principper. Hvis flagellaten er fasthæftet, er fødestrøm-

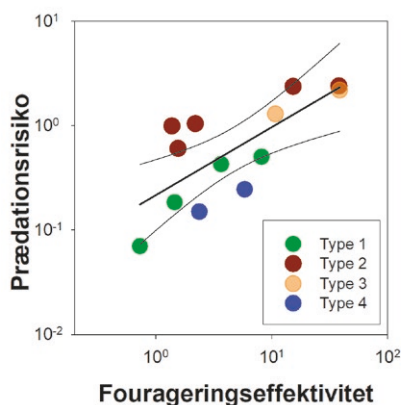


Grafik: Fredrik Ryderheim

Det Eukaryote stamtræ. Der findes flagellater i alle stamtræets hovedgrene. Dyr og planter er ubetydelige sidegrene i grupperne Amorphea og Archaeplastida.

Figur 3. Flagellater med den mest effektive fødesøgning udsættes også for den største prædationsrisiko. Skalaerne på de to akser er logaritmiske og relative: for eksempel vil en organisme med en prædationsrisiko på 10^0 (= 1) løbe en 10 gange så stor risiko for at blive ædt af en prædator, som en med risiko 10^1 (= 10). Tilsvarende med fourageringseffektivitet på X-aksen.

Symbolerne refererer til de 4 principielle arkitekturer af fødestrømmen, som flagellater kan inddeles i. Den faktiske risiko og fourageringseffektivitet afhænger af, hvor mange prædatorer, og hvor meget føde, der er i det omgivende miljø. Der er karakteristiske forskelle i forholdet mellem risiko og fødesøgningseffektivitet mellem de 4 grupper.



mens udbredelse større, end hvis den svømmer, og hvis flagellens kraft primært virker omkring cellens "ækvator", som hos dinoflagellater, aftager forstyrrelsen hurtigt med afstanden til cellen. Hos dinoflagellaterne kompenserer det i nogen grad for den usædvanligt store kraft og effektive fødestrøm, flagellen producerer.

Analysen af fødestrømmens udbredelse og dens effektivitet illustrerer den fundamentale konflikt mellem at æde uden selv at blive ædt: Individet, der er effektivt til at samle føde, udsættes også for den største

prædationsrisiko (figur 3). De hydrodynamiske modeller hjælper os til at forstå de forskelle mellem gevinst og risiko, man kan se mellem de forskellige arkitekturer.

Hvordan kan vi forenkle?

Ovenfor har jeg beskrevet noget af den store funktionelle variation, vi finder mellem forskellige grupper af flagellater. Der er mange arter, men relativt få typer, der kan karakteriseres ved fødestrømmens arkitektur på tværs af arter. Og vi kan herudfra kvantificere den fundamentale konflikt mellem at æde og overleve. Sådanne konflikter er

den naturlige selektions substrat, det vil sige kilden til artsrigdom, og dermed bestemmende for økosystemers sammensætning og funktion. Ved i første omgang på nørdet vis at fokusere på forskelle mellem arter og på de underliggende mekanismer kan vi efterfølgende på meningsfuld måde forenkle og generalisere uden at skulle beskrive alle arter. Og vi kan formulere vores indsigt ved hjælp af simple matematiske modeller, som så igen egner sig til at indgå i de globale modeller af marine mikrobielle systemer, som vi har under udvikling. Men det er en anden historie. ■

Yderligere oplysninger: Kiørboe T (2020) Havets økologi på formel. Carlsbergfondets Årsskrift 2020: 16-19.

Kiørboe T, Nielsen LT (2015) Hvordan fanger flagellater deres føde? Videnskab.dk 13 juli 2015, <http://videnskab.dk/miljo-naturvidenskab/forskere-afslorer-flagellaternes-hemmelighed>

Kiørboe, T. (2015) Planktons svømmeteknik er uovertruffen. Videnskab.dk 28 Februar. <https://videnskab.dk/miljo-naturvidenskab/opdagelse-planktons-svoemmeteknik-er-uovertruffen>

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



SubUniversity

GIV DINE ELEVER EN MENTOR
OG LAD DEM OPLEVE
UNIVERSITETET INDEFRA

LAD DINE ELEVER BLIVE KLOGERE PÅ LIVET SOM STUDERENDE MED EN UNIVERSITETSSTUDERENDE SOM MENTOR

DET SIGER DELTAGERNE OM SUBUNIVERSITY

95% vil anbefale SubUniversity

88% føler sig mere afklaret i forhold til at træffe et studievalg

"Det har givet mig mere blod på tanden til at læse på universitetet, og jeg er blevet mere afklaret med, hvad der er noget for mig"

"Jeg ved, hvilken retning jeg vil gå i nu, og mine mentorer har været vildt gode til at vise, hvordan en hverdag er, når man er studerende"

"Jeg har set, at universitetet slet ikke er så skræmmende som jeg troede"

DET FÅR DINE ELEVER UD AF AT DELTAGE

SubUniversity er et tilbud til gymnasieskoler, der giver udvalgte elever mulighed for at møde det faglige og sociale liv på Aarhus Universitet. Gymnasieeleverne inddeles i grupper efter faglig interesse og får tilknyttet to universitetsstuderende som mentorer.

Gymnasieeleverne får på den måde mulighed for at opleve universitetet indefra, så de bedre vil kunne træffe et studievalg og komme godt på vej til næste uddannelsestrin.

Et forløb strækker sig over halvandet skoleår, fra eleverne udvælges i slutningen af 1. g til slutningen af 2. g.

KONTAKT

Du kan læse mere om SubUniversity på au.dk/subuniversity
eller kontakte koordinator Laura Munk Petersen på subuniversity@au.dk.





Undervisningsmaterialer

Du kan finde ekstramateriale på aktuelnaturvidenskab.dk, som er beregnet på undervisningen i gymnasieskolen.

Arbejdsark: Citater om kvantemekanik

I dette arbejdsark præsenteres 9 citater af berømte fysikere, der reflekterer over kvantemekanikken. Disse citater kan bruges til at indlede en snak om kvantemekanik og i forbindelse med læsning af artiklen *Fra kvantefysik til kvantecomputere*, som knytter an til Klaus Mølmers foredrag i foredragsserien Offentlige foredrag i Naturvidenskab i efteråret 2022.

Niveau: Fysik B/A-niveau

Escaperoom – fra kvantefysik til kvantecomputere

I denne opgave skal eleverne finde frem til en firecifret kode ved at bevæge sig igennem et interaktivt "escaperoom" i form af et slideshow i Powerpoint. Svarene på spørgsmålene kan findes ved at læse artiklen *Fra kvantefysik til kvantecomputere*.

Arbejdsark om virus

Arbejdsarket knytter an til artiklen *Tilbage til fremtiden - En virusforskers syn på tre år i pandemiernes tegn*, som har udgangspunkt i overlægge Anders Fomsgaards foredrag i serien Offentlige foredrag i Naturvidenskab i efteråret 2022.

Arbejdsarket berører overordnede temaer som smittemekanismer, vacciner samt virusvarianter og sekventering. Der findes også en ny quiz, der knytter an til samme artikel.

De nævnte materialer er udarbejdet af projektgruppen på Viborg Katedralskole i forbindelse med projektet Brobygning på første række finansieret af Novo Nordisk Fonden.

Quizzer

Find nye quizzer om henholdsvis narkolepsi og myrer på hjemmesiden.

ABONNEMENTS-SERVICE

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

Kontakt os på telefon:
3036 0662 / 8715 2094
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

- **Astrid C. Johansen**, kommunikationskonsulent Roskilde Universitet
- **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
- **Astrid C. Johansen**, kommunikationskonsulent 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: 5.100



Redaktionsgruppe

- **Astrid C. Johansen**, Roskilde Universitet
- **Birgitte Svennevig**, Det Naturvidenskabelige Fakultet, Syddansk Universitet
- **Carsten Rabæk Kjaer**, Aktuel Naturvidenskab
- **David André Højlund Graff**, Aalborg Universitet
- **Jørgen Dahlgaard**, Aktuel Naturvidenskab
- **Michael Skov Jensen**, Københavns Universitet
- **Sune Holst**, Det Tekniske Fakultet, Syddansk Universitet

Redaktionen:

Telefon: 3036 0660 (Carsten) / 3036 0662 (Jørgen)

E-mail: red@aktuelnaturvidenskab.dk

Hjemmeside: aktuelnaturvidenskab.dk

Postadresse:

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

Omslagsfoto:

En gruppe af vævermyrer samarbejder om at nå op til en attraktiv blomst.
Foto: Shutterstock.

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



Benedicte Marie Berg Svendsen og sikkerhedsleder Peter Hald optrådte ved Kemishows jubilæum den 29. marts. Foto: Lars Kruse, AU

25 år med festlig kemi

Tilbage i 2001 bragte vi i Aktuel Naturvidenskab en artikel om en ny trend på universiteterne med at sætte naturvidenskab på showform. Og artiklen sluttede med den næsten profetiske forudsigelse: »... mon ikke aktiviteterne er kommet for at blive?« Her i 2023 kan vi vist roligt konkludere, at det er de! Den 29. marts i år kunne Kemishowet ved Aarhus Universitet således fejre sit 25 års jubilæum med et stort jubilæumsshow på Kemisk Institut.

Kemistuderende står for den daglige drift af Kemishowet, og de er gennemsnitligt afsted halvanden gang om ugen i sæsonen. »Formentlig er det i alt blevet til flere end 2000 shows gennem tiden,« anslår de to "kemishow'ere", Benedicte Marie Berg Svendsen og Christian Lund Rasmussen, der begge er kemistuderende.

Opskriften på et kemishow følger grundlæggende tre simple regler: Ingredienserne skal så vidt muligt bestå af hverdagskemikalier. Forsøgene skal nemt kunne udføres hjemme i køkkenet eller haven. Og man skal huske sikkerhedsbriller! Ifølge Benedicte og Christian har denne grundopskrift været bærende gennem alle årene, og traditionerne sikres ved, at nye show'ere oplæres af de "gamle". »Men selvfølgelig sker der hele tiden udvikling – for eksempel er vi begyndt at have mere fokus på yngre publikum de seneste år ud fra den filosofi, at glæden ved naturvidenskab skal vækkes i børn,

mens de er små, hvis det skal blive til en passion senere i livet«, siger de.

Kemishow blev startet i 1998 af de to kemistuderende Jacob Thorhauge og Martin Larsen. Kort efter blev også Peter Hald involveret, som i dag er sikkerhedsleder ved instituttet og stadig konsulent for showet. At han også har en baggrund som sprængstofekspert i forsvaret fornægter sig ikke, da showet byder på en del kontrollerede eksplosioner!

Benedicte og Christian fortæller, at enhver kemishow'er har sit favorit-forsøg. »Men vi er alle meget enige om, at et særligt dejligt forsøg er luminol-kolben, som vi udviklede i sidste år. Forsøget består af en kemiluminescens-reaktion, der sættes i gang af undertryk i kolben, hvilket opstår når en masse ammoniakgas opløses i et par dråber vand. Kemisk er det et fascinerende forsøg, og resultatet ser absolut spektakulært ud!«

Succesen med Kemishow fik hurtigt ideen til at brede sig, og derfor kan også andre danske scienceshows i de kommende år fejre 25 års jubilæum. At flere nye shows dukkede op affødte også en årlig begivenhed – DM i Scienceshow – som har været med til at holde traditionerne i hævd og deltagerne skarpe. Om kort tid (den 22. april) afholdes DM i Scienceshow i Aarhus. Det bliver helt sikkert festligt! CRK