

NATURVIDENSKAB OG TEKNOLOGI
DIREKTE FRA FORSKNINGSVERDENEN

AKTUEL *natur* VIDENSKAB

TROPISKE ØER

– naturlige laboratorier til at forstå
naturens skrøbelighed

Livets oprindelse i en RNA-verden
Ny teknologi sætter tal på søens methan-bobler
Møggravere og Darwinhvepse – om danske artsnavne

NR.3 - 2025 JULI 50 KR.

Soldrevet vandhøster

Forskere fra Massachusetts Institute of Technology i USA har udviklet et apparat, der kan skaffe vand fra luften selv i knastørre områder som Atacama-ørkenen i Chile. Fugten absorberes af et porøst materiale kaldet en hydrogel, som forskerne yderligere har fyldt med salt for at øge dets evne til at absorbere fugt. Når gelen har suget fugt i løbet af natten, opvarmes den om dagen via et solpanel, så fugten frigives og opsamles på en kondensator. I en test var systemet i stand til at producere 1,7 liter vand per kvadratmeter solpanel om dagen i et byområde, mens den klarede 0,6 liter per kvadratmeter om dagen i Atacama-ørkenen. Forskerne vurderer, at et sådant apparat vil koste knap 1000 kroner per kvadratmeter og kunne fungere i cirka 20 år.



Foto: Fra Wilson, C.T. et al, j.Device (2025)/CC BY 4.0

Kilde: <https://doi.org/10.1016/j.device.2025.100798>

Når to er 14 gange bedre end 1

Astronomer kan omgå begrænsninger i opløsningen af et astronomisk teleskop ved at kombinere lyset fra to teleskoper, en teknik kaldet intensitets-interferometri. Teknikken sammenligner intensiteten af lys, der rammer hvert teleskop, og analyserer, hvordan intensiteten ændrer sig, når teleskoperne placeres i forskellig afstand fra hinanden. Desværre er teknikken ikke velegnet til studier af objekter, der ikke udsender lys. Ved at kombinere otte lasere og to teleskoper har kinesiske forskere nu skabt et system, der også overkommer den begrænsning. De rettede laserne mod bogstaver printet på en reflekterende overflade og kunne med teleskoperne læse bogstaver med en størrelse af kun 8 mm fra en afstand på 1,36 km. Det var en forbedring på 14 gange i forhold til at bruge et enkelt teleskop. Forskerne mener, at deres teknik for eksempel vil kunne bruges til at opdag rumskrot.

Kilde: Nature/Phys. Rev. Lett. 134, 180201 (2025).

Nye foredrag om naturvidenskab

Offentlige foredrag i Naturvidenskab byder i efterårssæsonen 2025 på følgende foredrag:

- 23/9: Styrk dit tarmmikrobiom, og hold dig rask
- 7/10: Havets kollaps og vejen tilbage
- 21/10: Forædlingen af mennesket – før og nu
- 28/10: DNA og fossiler udvider vores stamtræ
- 11/11: Kan vi finde liv udenfor Jorden?
- 18/11: Kunstig intelligens: fra IT til samfund

Foredragene udbydes af Aarhus Universitet og Carlsbergfondet, og de livestreames gratis til hundredvis af lokationer over hele landet. Læs mere på ofn.au.dk.



Quizzen

Hvad kan man sige om specialiseringen af kolibrier på øer sammenlignet med fastlandet i forhold til, om de er tilpasset til at indtage nektar fra helt bestemte planter?

1. De er i mindre grad specialister på øer
 2. De er i højere grad specialister på øer
 3. Der kan ikke påvises nogen forskel på specialiseringen
- Læs svaret i artiklen side 8.



Foto: Shutterstock

Vulkaner som CO₂-dræn

Når en vulkan går i udbrud, sender den en masse CO₂ ud i atmosfæren. Men samtidig kan den begrave den eksisterende vegetation i området i aske og på den måde virke som et dræn for carbon. Et forskerhold ledet af Pierre Delmelle fra Université catholique de Louvain i Belgien har forsøgt at kvantificere, hvor meget carbon der bliver begravet ved gentagne udbrud af en vulkan. Forskerne undersøgte kemien i askelag skabt af udbrud nær Quito, Ecuador, for omkring 4.400 og 2.270 år siden og beregnede, hvor meget jord der var akkumuleret mellem udbruddene. De kom frem til, at udbruddene overordnet set har begravet mere carbon i form af organisk materiale, end de har udledt som CO₂. Forfatterne anslår, at vulkaner har begravet cirka 1,1 milliarder ton carbon i Ecuador i løbet af de seneste 11.700 år.

Kilde: Nature Commun. 16, 4306 (2025).

Abonnementservice

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.

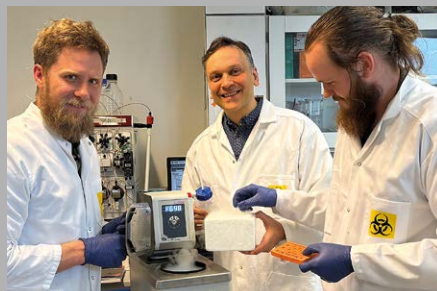
indhold



Tropiske øer er naturlige laboratorier til at forstå naturens skrøbelighed

Dansk forskning viser, hvordan de særlige økosystemer på tropiske øer hænger sammen, og hvorfor øernes dyre- og planteliv er så sårbart.

8



Livets oprindelse i en RNA-verden

Hvordan er livet opstået? Nye metoder puster liv i gamle teorier om, hvordan RNA-molekyler kan have haft en nøglerolle i livets opståen.

20



Møggravere og Darwinhvepse – om danske navne på dyr og planter

Et nyt råd, Taxonrådet, skal hjælpe med at styre processen med navngivning og bidrage med rådgivning.

16



Ny teknologi sætter tal på søens methan-bobler

Ved hjælp af nyudviklet måleudstyr kan vi nu sætte tal på en vigtig proces i naturen, nemlig hvor meget methan der tabes fra søer og damme til atmosfæren.

26

FORSKNING OG NYHEDER

- 4 KORT NYT
- 7 Fysiker søger mørkt stof i universitetets kældere
- 8 Tropiske øer er naturlige laboratorier til at forstå naturens skrøbelighed
- 16 Møggravere og Darwinhvepse – om danske navne på dyr og planter
- 20 Livets oprindelse i en RNA-verden
- 26 Ny teknologi sætter tal på søens methan-bobler
- 31 Bogomtaler
- 32 Kunsten at styre hjernens bølger
- 36 Fra Guldaldermaleri til 3D-modeller af duftmolekyler
- 40 BAGSIDEN: Gør-det-selv i videnskabens tjeneste

OM AKTUEL NATURVIDENSKAB

Ansvarshavende

Poul Nissen, prodekan, Faculty of Natural Sciences, Aarhus Universitet.

Redaktion

Carsten Rabæk Kjaer og Jørgen Dahlgaard
Tlf.: 3036 0660 / 3036 0662 / 8715 2094
E-post: red@aktuelnaturvidenskab.dk

Redaktionsgruppe

- Astrid C. Johansen, Roskilde Universitet
- Birgitte Svennevig, Det Naturvidenskabelige Fakultet, Syddansk Universitet
- Carsten Rabæk Kjaer, Aktuel Naturvidenskab
- Jørgen Dahlgaard, Aktuel Naturvidenskab

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

Abonnementsservice:

Tlf.: 3036 0662 eller abo@aktuelnaturvidenskab.dk

Udgiver

Aarhus Universitet, Faculty of Natural Sciences og Faculty of Technical Sciences, i samarbejde med Det Naturvidenskabelige Fakultet, Syddansk Universitet og Roskilde Universitet

Postadresse:

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

Layout: Jørgen Dahlgaard

Tryk: Jørn Thomsen Elbo A/S

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

Oplag: 3.700

Forsidefoto:

Blåtoppet Kolibri er en supergeneraliseret kolibri fra i De Små Antiller i Caribien. Foto: Bo Dalsgaard



DET NATURVIDENSKABELIGE
FAKULTET



Roskilde Universitet

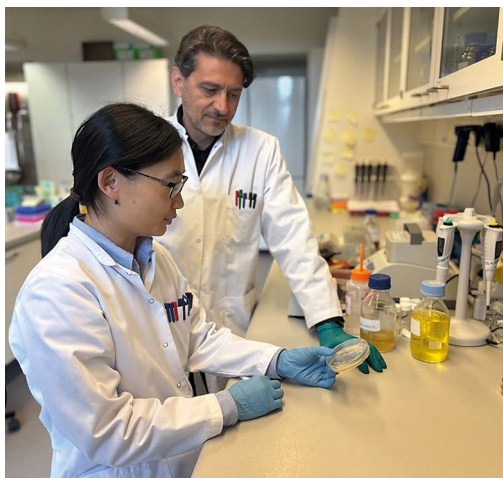
SPONSOR-
ABONNENT



Nyt gennembrud kan gøre kræftmiddel billigere

Stoffet taxol er et af de mest udbredte lægemidler mod en række kræftformer som brystkræft og lungekræft. Fremstillingen af taxol til brug for kemoterapi er dog en kompliceret kemisk proces, der både er meget dyr og miljøbelastende. Taxol kommer oprindeligt fra det vestamerikanske takstræ, og i 30 år har forskere prøvet at forstå, hvordan stoffet dannes i naturen, fordi denne viden vil kunne bruges til at fremstille stoffet bioteknologisk. Nu er det lykkedes professor Sotirios Kampranis og kolleger ved Institut for Plante- og Miljøvidenskab på Københavns Universitet at identificere de manglende brikker: De har identificeret de enzymer, der står for de sidste to afgørende trin i den biologiske syntese af taxol. Opdagelsen er publiceret i tidsskriftet *Nature Synthesis*.

Med fundet af disse enzymer har forskerne nu den fulde forståelse af, hvordan stoffet dannes. Og det har de udnyttet til at udvikle



Sotirios Kampranis og førsteforfatter på studiet, Feiyan Liang, undersøger gærstammer brugt til at fremstille taxol. Foto: Yao-Tao Duan

en bioteknologisk metode, som fremstiller taxol i gærceller. Forskerne har klonet de gener fra takstræet, som koder for dannelsen af taxol, og sat dem ind i gærcellerne. På den

måde bliver gærcellerne små cellefabrikker, der er udstyret med opskriften til at producere taxol.

Taxol koster i dag over 130.000 kroner per kilo og er et af de dyreste aktive lægemiddelstoffer, der findes. Forskerne vurderer, at de ved at forfine deres metode på længere sigt vil kunne reducere omkostningerne til det halve af i dag. Samtidig er den nye fremstillingsmetode betydeligt mindre miljøbelastende, da der ikke er brug for skadelige kemikalier og opløsningsmidler, som er almindelige i kemisk fremstilling af stoffet.

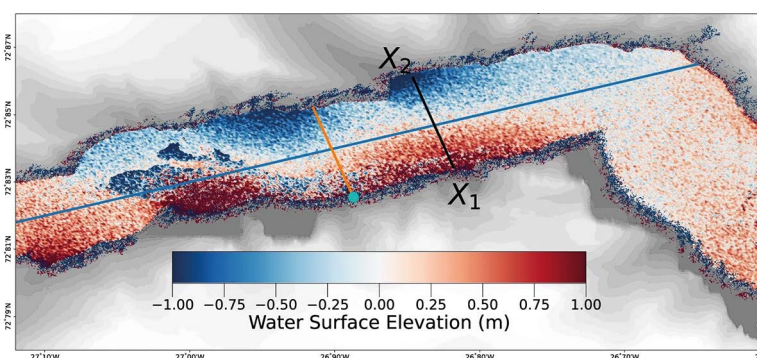
Forskerholdet fra Københavns Universitet har søgt patent på metoden og er i gang med at etablere en spinout-virksomhed, der skal producere biosyntetisk taxol.

CRK. Kilde: *science.ku.dk. Nat. Synth* (2025). doi.org/10.1038/s44160-025-00800-z

Satellitdata spotter grønlandsk tsunami

Den 16. september 2023 skabte et stort klippeskred i den afsides beliggende grønlandske Dickson-fjord en kæmpemæssig flodbølge – en tsunami. Tsunamien er beregnet til at have skyllet hele 200 meter op på den modstående bred. På grund af fjordens udformning opstod derefter et fascinerende fænomen, idet bølgen blev fanget i fjorden lidt ligesom en bølge i et badekar. Tsunamien bevægede sig frem og tilbage over fjorden tusindvis af gange over ni dage – et fænomen kaldet en seiche – eller stående bølge. Ovenikøbet skabte et nyt skred samme sted den 11. oktober samme år endnu en tsunami, der også dannede en stående bølge, som klingede af over en uges tid.

Ingen mennesker så tsunamierne "live", men de blev afsløret, fordi seismiske målestatio-



Figuren viser forskelle på højden af vandoverfladen i Dickson-fjorden cirka en halv dag efter den anden tsunami opstod den 11. oktober. Den blå prik angiver lokationen for selve skredet. Illustration efter Monahan et al, Nat. Commun.

ner over hele verden opfangede signalet fra begivenhederne. Efterfølgende har man så kunne bruge disse data til modellere, hvad der faktisk skete.

I en ny afhandling i *Nature Communication* rapporterer Thomas Monahan og kolleger fra Oxford University, at det er lykkedes dem at "se" de to tsunamier i data fra satellitten

SWOT (Surface Water Ocean Topography), der blev opsendt i 2022. Forskerne brugte data fra satellitten til at lave højdekort for vandoverfladen i fjorden på forskellige tidspunkter efter tsunamienes fødsel. Og disse højdekort viser tydelige hældninger på tværs af fjorden med højdeforskelle op til to meter. Mere afgørende er, at hældningerne optræder i forskellige retninger til forskellige

tidspunkter, hvilket viser at vandet bevægede sig frem og tilbage over fjorden.

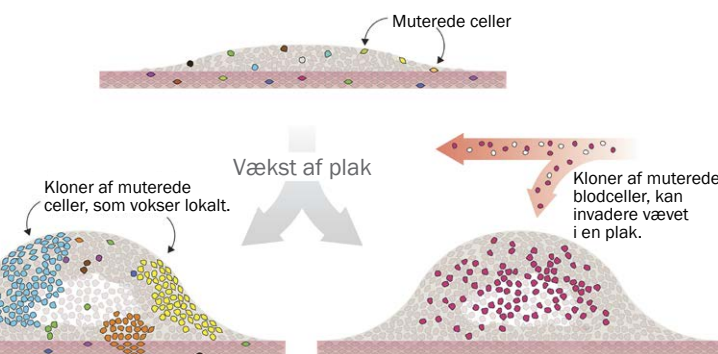
Klimaændringer forventes at medføre flere begivenheder af denne type i fremtiden. Ifølge forskerne viser deres nye studie, hvordan de nye generationer af satellitdata kan bruges til at studere sådanne processer.

CRK. Kilde: *Nat. Commun.* 16, 4777 (2025).

Åreforkalkning kan minde om tumorer

Iet nyt studium har forskere fra Syddansk Universitet og Odense Universitetshospital undersøgt sygdomsramt væv – såkaldte plak – fra patienter med åreforkalkning og sammenlignet dette med væv uden åreforkalkning. Forskerne fandt genetiske mutationer i 12 ud af 13 undersøgte plak, og at over 10 % af cellerne i de sygdomsramte områder (hvilket kan være mange hundredetusinde celler) tilsyneladende stammer fra den samme celle, der har delt sig igen og igen. Det er et mønster, man ellers kender fra udviklingen af tumorer. Til sammenligning fandt forskerne ingen muterede celler i vævsprøverne uden åreforkalkning.

Åreforkalkning, på fagsproget kaldet aterosklerose, er en af de hyppigste dødsårsager i Verden, også i Danmark. Sygdommen starter med, at kolesterolpartikler fastholdes i karvæggen, hvilket immunsystemet opfatter som en skade og udløser en kronisk inflammatorisk reaktion. Over tid fører det til dan-



Figuren viser, hvordan muterede celler spiller en rolle for vækst af plak. At også lokale muterede celler er til stede i plak, er ny viden. Efter JCI Insight/CC BY. 4.0.

nelsen af en vævs- og cellemasse – en plak – som kan vokse og gradvist reducere blodgennemstrømningen. En plak kan også bryde og føre til en hurtig dannelse af en blodprop, hvilket kan medføre alvorlige hændelser som hjerteanfald eller slagtilfælde.

De nye forskningsresultater publiceret i tidskriftet *JCI insight* kaster nyt lys over åreforkalkning som sygdom. Forskerne kan endnu ikke med sikkerhed sige, om de genetiske forandringer direkte påvirker sygdommen, men det ser ikke ud til, at mutationerne forekommer i tilfældige gener. Mange af de berørte

gener kan potentielt påvirke cellerne og derved sygdomsudviklingen.

Ifølge Lasse Bach Steffensen, der er lektor ved Institut for Molekylær Medicin på Syddansk Universitet og første-forfatter på det nye studium kan man ikke ud fra studiet konkludere, at åreforkalkning er en “blodkar-tumor”. Men deres data

peger på et muligt samspil mellem genetiske forandringer og omfattende celledeling – noget, vi normalt forbinder med netop tumorer.

Forskerne arbejder nu på at analysere væv fra mange flere patienter for blandt andet at finde sammenhænge mellem mutationer åreforkalkning og sygdommens udviklingstrin samt patienternes kliniske data. Det vil styrke den biologiske forståelse af åreforkalkning – og måske også kunne give nye idéer til behandling af sygdommen i fremtiden.

CRK. Kilde: SDU.dk. Publikation: 10.1172/jci.insight.188281

Videnskaben i store plask

Ved de olympiske konkurrencer i udspring trækker det fra i karaktererne at ramme vandet på en måde, så man sender et større vandsprøjt op i luften. I den populære sommeraktivitet, Manu jumping, der har sit udspring i Māori-miljøer i New Zealand, forholder det sig lige omvendt. Her gælder det om at frembringe den størst mulige vandsøjle, når man kaster sig ud fra broer, klipper eller platforme.

De halsbrækkende udfoldelser gør sig i sagens natur godt på sociale medier, og det har også fået videnskabens øjne op for fænomenet. Biofysikeren Saad Bhamla ved Georgia Tech i Atlanta, USA, og kolleger har nu undersøgt den underliggende væskedynamik bag de store plask i Manu-jumping

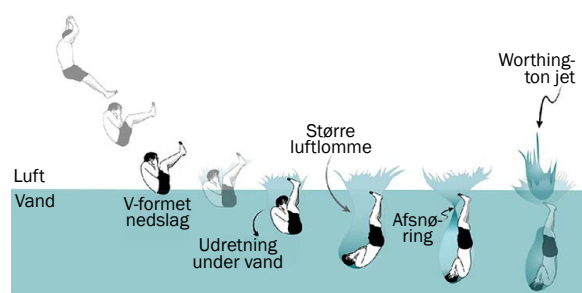


Illustration af kunsten at lave et stort plask. Efter: Rohilla, P et al

og publiceret deres resultater i det videnskabelige tidsskrift *Interface Focus*.

Når en manu-jumper sender en vandsøjle højt op i luften ved nedslaget, sker det, fordi udspringeren trækker en luftlomme med sig ned, som efterfølgende kollapser og sender en strøm af vand – kaldet en Worthington jet – opad. For at opnå den størst mulige effekt

rammer de fleste manu-jumpere vandet med bagenden først og med ben og overkrop vinklet i en V-form, hvorefter de umiddelbart efter kontakt med vandet retter bene ud og bøjer overkroppen bagover. I det nye studium beskriver forskerne, hvordan netop de to nøgleparametre – vinklen mellem ben og overkrop samt timingen af åbningen af kroppen efter nedslaget – fremmer dannelsen af Worthington jets. Forskerne lavede “plaske-forsøg” med både passivt, fast objekt med forskellige vinkler og med en “manu-robot”, der åbnede sig efter nedslaget. Forsøgene viste, at en 45 graders vinkel er optimalt, og at de højeste vandsøjler med manu-robotten blev opnået, når den åbnede sig cirka halvvejs under dens neddykning.

CRK, Kilde: *Interface Focus*, doi.org/10.1098/rsfs.2024.0056

Forsuring af havet har overskredet en planetær grænse

Et nyt studium publiceret i tidsskriftet *Global Change Biology* rapporterer britiske forskere, at endnu en såkaldt planetær grænse er blevet overskredet, nemlig forsuring af verdenshavene.

De planetære grænser blev oprindeligt foreslået af en gruppe internationale forskere tilbage i 2009, blandt dem professor Katherine Richardsen fra Københavns Universitet. De planetære grænser refererer til 9 store jordsystemprocesser – såsom biodiversitet, ferskvand og aerosoler – som kan lede til uacceptable miljøforandringer, hvis disse forskydes udover en vis grænse. I 2023 kvantificerede et internationalt forskerhold de ni planetære grænser og konkluderede, at 6 af dem var overskredet. Dengang befandt forsuring af verdenshavene sig på vippen, men nu er altså også denne grænse overskredet

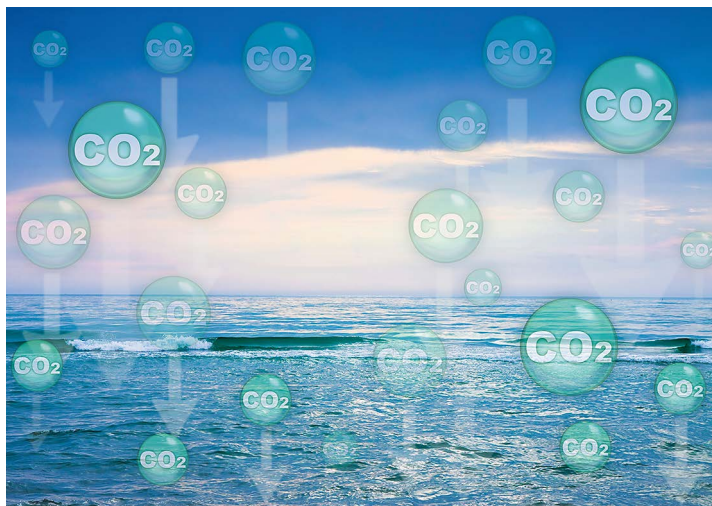


Illustration: Shutterstock

ifølge det nye studium. Det er for så vidt ikke mærkeligt, idet netop denne grænse er direkte koblet til en anden af de planetære grænser, nemlig klimaforandringer på grund af udledningen af klimagasser. Således betyder et højt CO_2 -indhold i atmosfæren, at oceanerne forsures, fordi der dannes kul-

syre (H_2CO_3), når CO_2 opløses i vand. Ved denne proces frigives der hydrogen-ioner (H^+), som gør vandet mere surt.

Problemet med et surere hav er, at det kan forringe livsvilkårene for organismer, der udnytter kalk (CaCO_3) til at bygge deres skaller eller skelet. Ifølge det nye studium har den gennemsnitlige forsuring af verdenshavene siden 2020 krydset grænsen til det ukendte område. Og forskerne vurderer, at disse ændringer signifikant har reduceret velegnede levesteder for vigtige kalkdannende organismer

– herunder en 43 % reduktion i habitater for tropiske og subtropiske koralrev, op til 61 % for polare, pelagiske havsnegle og 13 % for toskallede bløddyr (som muslinger), der lever nær kysten.

CRK, Kilde: *Glob Change Biol*, 31: e70238.

Læs Naturvidenskabelig Bachelor

Fordyb dig i medicinal biologi, molekylær biologi, matematik, fysik, kemi eller miljøbiologi. Du kan f.eks. arbejde med at undersøge miljøskadelige stoffer i havet, bedre diagnosticering og behandling af sygdomme, antibiotikaresistente bakterier, plastforurening eller måske er du bare nysgerrig på hvordan man udvikler nye naturvidenskabelige metoder og teorier?

Arbejd på tværs af naturvidenskabelige felter.

Arbejd med topforskere i moderne laboratorier.

Uddannelsen kan tages på både dansk og på engelsk, hvor studiemiljøet er mere internationalt.

Læs mere her:



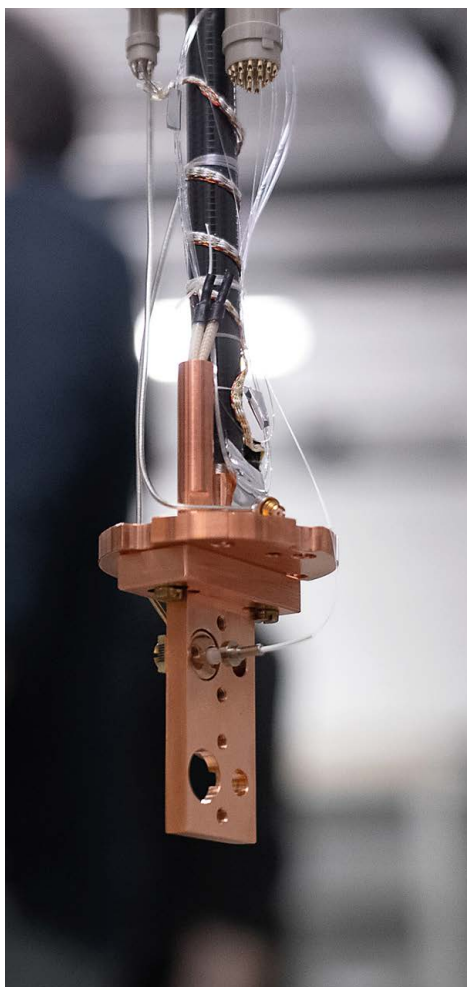
FYSIKER SØGER MØRKT STOF I UNIVERSITETETS KÆLDER

Mørkt stof: Vi kan ikke se det, ikke mærke det og ikke detektere det på nogen måde. Men astrofysiske beviser fortæller os, at mørkt stof eksisterer. 80 % af alt stof i universet består af mørkt stof, mens resten udgøres af det stof, som Jorden og mennesker er lavet af.

I årtier har astrofysikere og partikelfysikere forsøgt at detektere de mystiske partikler, som mørkt stof kunne bestå af. De har bygget gigantiske accelerators som LHC på Det Europæiske Center for Højenergifysik (CERN) for at se, om man kunne skabe en mørkt stof-partikel ved at bringe andre partikler i kollision. De har gennemført universet med teleskoper efter højenergi-stråling, som kunne afsløre, om mørkt stof-partikler har kollideret med hinanden.

Men vi behøver faktisk ikke altid milliarddyre projekter for at søge efter mørkt stof. For et langt mindre beløb vil fysiker og mørkt stof-jæger Manuel Meyer installere en detektor i kælderen under sit kontor på Institut for Fysik, Kemi og Farmaci ved Syddansk universitet. For ham er jagten på mørkt stof en jagt på de fundamentale byggesten, som alting er lavet af.

» At forsøge at forstå, hvad vi er lavet af, er, tror jeg, dybt forankret i mennesket,« siger han.



En meget følsom lysdetektor, der opererer ved kryogene temperaturer. Manuel Meyer planlægger at bruge den til at søge efter en meget sjælden omdannelse af en mørkt stof-partikel til lys.

I kælderen er Manuel Meyer derfor nu ved at opsætte sit detektorsystem, som består af to hovedkomponenter: en kryostat (dvs. et apparat til at opretholde og kontrollere meget lave temperaturer) og en kraftig magnet.

» Idéen er, at en mørkt stof-partikel kunne trænge ind i magneten og

dér omdannes til en millimeterstor elektromagnetisk bølge – ligesom de bølger, vores WIFI eller mobiltelefon bruger til at kommunikere,« forklarer Manuel Meyer.

Signalet vil dog være ekstremt svagt, og for at forstærke det vil Manuel Meyer placere to spejle i præcis den rette afstand fra hinanden for at forstærke bølgen – på samme måde som lydbølger forstærkes i en orgelpibe. De lave temperaturer i kryostaten vil minimere den elektromagnetisk støj, og detektoren vil dermed kunne opfange et muligt tegn på en mørkt stof-partikel.

Ud over sin nye kælder-detektor er Manuel Meyer også involveret i at jage mørkt stof ved Europas næststørste fysiklaboratorium, Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY) i Hamborg og gennem FERMI- og H.E.S.S.-teleskoperne.

De fleste partikelfysikere fokuserer enten på detektorer eller teleskoper i deres søgen efter mørkt stof, men Manuel Meyer vil arbejde med begge dele. Det skyldes, at vi ikke ved, hvad mørkt stof er.

» Hvis det faktisk er en ny elementarpartikel, kender vi ikke dens masse, og vi er nødt til at bruge forskellige teknikker for at undersøge alle muligheder,« siger han. ■



Forfatter
Af Birgitte Svennevig, journalist, Det Naturvidenskabelige Fakultet og SDU Climate Cluster. birs@sdu.dk



Om forskeren
Manuel Meyer er lektor og forskningsleder på Institut for Fysik, Kemi og Farmaci, hvor han forsker i mørkt stof. Dette arbejde støttes af et European Research Council Starting Grant.

Videre læsning:
Læs mere om Manuel Meyers forskning i mørkt stof i artiklen: Hvis lys trænger gennem denne mur, er vi på sporet af mørkt stof. *Aktuel Naturvidenskab* nr. 3-2023.

Blåtoppet Kolibri
(*Orthorhynchus cristatus*) er en lille
supergeneraliseret
kolibri, der besøger
en lang række af
planter i både lavland
og højlandet i De Små
Antiller i Caribien.
Foto: Bo Dalsgaard



TROPISKE ØER

er naturlige laboratorier til at forstå naturens skrøbelighed

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


**DANMARKS FRIE
FORSKNINGSFOND**
INDEPENDENT RESEARCH
FUND DENMARK

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

Danmarks Frie Forskningsfond dækker alle videnskabelige hovedområder og uddeler hvert år godt 1 mia. kr. til forskningsprojekter baseret på forskernes egne ideer. Danmarks Frie Forskningsfond består af 84 anerkendte forskere udpeget på baggrund af deres høje faglige kompetence. Formand for Danmarks Frie Forskningsfond | Natur og Univers er lektor ved DTU, Kirstine Berg-Sørensen. Se mere på www.dff.dk

Dansk forskning viser, hvordan de særlige økosystemer på tropiske øer hænger sammen, og hvorfor øernes dyre- og planteliv er så sårbart over for blandt andet naturkatastrofer, klimaforandringer, menneskeskabte forstyrrelser og introduktion af invasive arter.

Små tropiske øer i verdens oceaner rummer en helt unik natur og unikke økosystemer, som er isoleret fra fastlandet. På mange øer findes der som eksempel dyr og planter, som ikke findes noget andet sted på Jorden. Der findes også dyr og planter i størrelser, som ikke findes andre steder – både miniputter og giganter. De unikke forhold på øer, som er isoleret fra fastlandets

rovdyr, herunder katte og rotter, dannede blandt andet grundlag for udvikling af fortidens dværgelefanter, som ikke blev meget større end højden på et menneske, eller kæmpeøgler som komodoaraner. Mange plante- og dyrearter lever endda eksklusivt (endemisk) på én enkelt lille tropisk ø.

Netop fordi økosystemerne er så unikke og udviklet isoleret fra

fastlandet, og mange dyr og planter ikke findes andre steder, er øernes biodiversitet sårbare. Der skal ikke meget til, før hele arter uddør. For eksempel er landskildpadder uddøde på mange caribiske øer, og det samme er flere arter af papegøjer. De kommer aldrig tilbage.

En af de forskere, som ved mest om dynamikkerne i tropiske øers økosystemer, er lektor Bo Dalsgaard

fra Globe Institute ved Københavns Universitet. Han fortæller, at det er veletableret, at tropiske øer har en helt unik biodiversitet med mange unikke arter, og at en stor del af forklaringen skal findes i, at de er isolerede systemer med mangel på rovdyr. Det skaber muligheder for at både planter og dyr kan udvikle sig i alle mulige retninger. Det gør også økosystemerne sårbare over for eksempelvis ødelæggelse af habitater og introduktion af rovdyr i miljøet. Bringer mennesker rovdyr som katte og rotter til en tropisk ø, går det ofte voldsomt ud over bestanden af fugle, som ikke er vant til at skulle anvende flugt som forsvarsmekanisme.

»Alt det er veldokumenteret gennem mange års forskning, men det, som vi ikke ved så meget om, og som også min forskning drejer sig om, er de økologiske netværk på tropiske øer. Hvordan interagerer arter med hinanden, og hvordan er dette forskelligt fra fastlandet og mellem øer af forskellig størrelse og isolation?« siger Bo Dalsgaard.

Planter har brug for bestøvere og frugtspredere

Bo Dalsgaard er med sine kolleger særligt interesseret i planters samspil med frugtspredende fugle og bestøvere, såsom kolibrier. Bestøvere bringer pollen fra blomst til blomst og er på den måde med til at sikre befrugtning af mange forskellige arter af planter. Frugtspredere er med til at sprede frø fra planter, så de kommer væk fra moderplanten. Bo Dalsgaard fortæller, at omkring 90 procent af Jordens planter har gavn af enten bestøvere eller frugtspredere i deres formering.

»Vores undersøgelser omhandler samfund af bestøvere og planter og undersøgelser af, hvordan de adskiller sig på øer sammenlignet med på fastlandet. Den viden kan gøre os klogere på, hvad der er unikt for øer, og hvor økosystemerne er mere sårbare eller robuste over for forandringer,« siger Bo Dalsgaard.



Om Bo Dalsgaard

Bo Dalsgaard er lektor ved Globe Institute ved Københavns Universitet. Han er uddannet biolog fra Aarhus Universitet, hvor han forsvarede sin ph.d. i 2009. Derefter arbejdede han som postdoc ved først Cambridge University (2010-2011) og sidenhen Københavns Universitet (2012-2013), inden han blev adjunkt og senere lektor ved Københavns Universitet. Han har altid interesseret sig for fugle, og senere kom interessen for bestøvningsbiologi, økologiske netværk, makroøkologi og tropiske øer. Bo Dalsgaard har siden 2003 både boet og lavet feltarbejde på flere forskellige øer i Caribien. For nuværende er hans primære forskningsfokus ø-økologi, makroøkologi, bestøvningsbiologi, og hvordan vi kan bruge bestøvningsbiologien til at øge udbyttet for tropiske bønder. Privat bor han med sin datter Sofie på 12 år. Bo Dalsgaards forskning i økologiske netværk på tropiske øer er siden 2019 finansieret af Danmarks Frie Forskningsfond.

En del af Bo Dalsgaards arbejde har omhandlet at forstå forskelle i generalisering eller specialisering af både dyre- og plantearter på henholdsvis øer og fastland. Specialisering betyder som eksempel, at en art af kolibrier kun spiser nektar fra én eller ganske få blomster, og at disse sjældent besøges af andre kolibrier. En mere generaliseret art vil indtage nektar fra flere blomster og også ofte dele disse med andre arter. Omvendt vil en specialiseret plante gøre sig attraktiv over for én eller kun få arter af kolibrier, mens generaliserede planter vil gøre sig attraktive over for flere arter af kolibrier eller endda andre typer af dyr, såsom flere arter af fugle, flager-

mus, firben og insekter. Planter kan som eksempel gøre sig attraktive ved at ændre på blomstens form og farve. Kolibrier kan blandt andet godt lide røde farver, mens blå og hvide farver er noget for insekter.

Bo Dalsgaard fortæller, at der selvfølgelig er overlap, og tilføjer:

»Vores forskning viser klart, at der er højere grad af generalisering på øer sammenlignet med på fastlandet. Det kan vi se ved, at kolibrierne overlapper mere i deres blomstervalg og bruger flere blomsterarter relativt til, hvor mange der er, på øerne, og fordi blomster i højere grad er hvide og blå på øerne, mens de oftere er røde på fastlandet.



Foto: Colourbox/Kenneth Bagge Jørgensen

Tropisk ø-forskning kan være relevant for dansk naturforvaltning

Forskning i små tropiske øers økosystemer kan ved første øjekast virke fjernt fra en dansk virkelighed. Men faktisk rummer forskning som Bo Dalsgaards vigtig relevans for forståelsen af Danmarks natur. Tropiske øer fungerer nemlig som naturlige laboratorier, hvor forskere kan undersøge, hvordan arter etablerer sig, sameksisterer og forsvinder i isolerede, afgrænsede omgivelser. Mange af de samme processer gør sig gældende i fragmenterede landskaber, for eksempel som Danmarks, hvor naturen i høj grad er opdelt i små "øer" af skov, eng, hede og vådområder adskilt af marker, veje og byer.

Ligesom økosystemer på øer er påvirket af deres størrelse, isolation og tilgængelighed, gælder det også for danske naturområder. Forskning fra tropiske øer kan derfor bruges til at forudsige, hvordan artsrigdommen påvirkes af størrelse og isolation af habitatfragmenter, og hvordan økologiske netværk kollapse, når habitater ødelægges, og forbindelserne mellem habitater svækkes. Ø-økologi kan også bidrage med vigtig viden om, hvordan biodiversitet kan genoprettes, når habitater og adgangen mellem habitater genskabes, for eksempel ved hjælp af korridorer eller grønne forbindelser. Desuden består Danmark jo også af et fastland og en lang række af øer, hvor størrelse og isolation påvirker økosystemerne.

I en dansk kontekst kan tropisk ø-forskning derfor give teoretisk og praktisk indsigt i, hvordan man planlægger naturpleje, naturgenopretning og klimatilpasning. Det, vi lærer fra fjerne øer, kan dermed hjælpe med til at skabe et fundament for at beskytte og genskabe et sammenhængende og artsrigt dansk landskab med velfungerende økosystemer.

Blomsterne er også ofte kortere på øerne end på fastlandet. Vores forskning viser også, at det er det samme med frugterne, som også er tilpasset til at tiltrække forskellige fuglearter. Men på øerne passer fuglenes næb ikke altid så godt til frugterne, mens de på fastlandet er bedre tilpasset størrelsen af frugter,« forklarer han.

Stor forskel på øer

Der er flere perspektiver i at vide, at der mellem fastland og små tropiske øer er forskel i graden af specialisering af økologiske netværk. For det første er det interessant i et evolutionært perspektiv for at forstå, hvordan små tropiske øers natur er kommet til at se ud, som den gør. Bo Dalsgaards forsknings-

gruppe har blandt andet den teori, at ved kolonisering af øer giver det mere mening af være generalist og ikke kræsen, når det kommer til det, som man putter i munden eller næbet. Derfor har mere generaliserede arter større mulighed for at etablere sig på små tropiske øer. Arter kan dog også udvikle generaliserede strategier ude på øerne som resultat af de unikke forhold med færre arter på øerne sammenlignet med fastlandet.

Øer er dog ikke bare øer – heller ikke i Caribien, der har dannet centrum for Bo Dalsgaards forskningsinteresse de seneste mange år. Øer kan både være små og store, og alt derimellem. Cubas areal er godt 110.000 km² eller knap 2½ gange større end Danmark, og Cuba er dermed den største ø i Caribien. I den anden boldgade er Saba, som du formentlig aldrig har hørt om, blot 13 kvadratkilometer stor. Det er en meget lille ø, og så er der alt ind imellem. Øer kan også være bjergrige eller flade, og det har også betydning for de økologiske netværk. Bo Dalsgaards forskning har blandt andet vist, at jo større øer er, og jo tættere de er på fastlandet, des mere opfører de økologiske netværk sig som på fastlandet, altså med større grad af specialisering. Forskningen viser også, at graden af specialisering stiger med højdemeterne. Jo højere op i bjergene man kommer, des mere specialiserede bliver økosystemerne.

»Det kan også have noget at gøre med, at vi mennesker ofte lever i lavlandet, og at højlandet derfor har mere uberørt natur. En anden forklaring kan være, at det at leve i bjergene giver mulighed for større grad af tilpasning, hvilket favoriserer mere specialiserede arter og økosystemer,« siger Bo Dalsgaard.

Forskningen er lavet på 11 øer i De Små Antiller i det Caribiske øhav.

Rotter er et kæmpe problem

Putter vi Bo Dalsgaards forskning ind i en kontekst af den nuværende kamp for at bevare biodiversitet,

Feltundersøgelser af fugle



Foto: Max Vollstädt.

Der udtages en blodprøve fra Violblå Euphonia (*Violaceous euphonia*), en frugtædende fugl på Trinidad. Blodprøverne bruges til genetiske analyser, som foretages i København.



Foto: Fernando Gonçalves.

↑ Her tages der pollenprøver fra en granatstrube-kolibri. Prøverne analyseres i laboratorier i København, hvor pollen identificeres via morfologiske træk og moderne metabarcoding-metoder.



Foto: Andreas Norrild

Alle indfangede fugle tilbringer cirka 30 minutter i papirposer, hvor de ofte "går på toilettet". Forskerne indsamler lorten, som senere undersøges for, hvilke frø fuglene har spist.



Foto Tianying Zhang.

Alle fugle vejes og måles (for eksempel næblængden). Fuglen på billedet er en Antillerrøddrossel (*Margarops fuscatus*), som er en generalist, der indtager en bred kost bestående af alt fra insekter, firben, frøer til en række af frugter.

peger den umiddelbart på, at økosystemerne i bjergene er mere skrøbelige, fordi enkelte arter er mere afhængige af tilstedeværelsen af andre arter for at overleve. De mere generaliserede arter i lavlandet har oftest andre frugter at spise eller blomster at suge nektar fra. Det er dog ikke hele sandheden.

Bo Dalsgaard har i sin forskning undersøgt betydningen af menneskers aktiviteter, herunder introduktionen af nye arter til små tropiske øer i forhold til på fastlandet. Forestil dig, at en ny planteart er blevet fragtet til en ø, hvor den aldrig har været før, eller et nyt

område på fastlandet. I lavlandet, der er fyldt med generalister, vil der hurtigt være nogen til at bestøve den og sprede plantens frugter. Det kan være sværere at finde i bjergene, hvor arterne i højere grad er specialister.

Omvendt fungerer det også sådan, at generalister har lettere ved at etablere sig. Det skyldes, at de nok skal finde noget at spise eller nogen til at sprede deres frø og frugter. Forskningen viser også, at introducerede fugle og firben i højere grad vil være dem, som kaster sig over frugterne af nye introducerede planter.

»Introducerede arter er et stort problem på øer, fordi de kan udkonkurrere de hjemmehørende arter. For eksempel har vi mennesker bragt katte og rotter med ud til rigtig mange øer i hele verden, og begge arter udgør en stor trussel for de små økosystemer. De har højst sandsynligt været årsagen til, at rigtig mange arter er uddøde,« siger Bo Dalsgaard.

Forskerne har lavet forsøg, hvor de har spredt falsk frugt ud på små øer i Antillerne og så undersøgt, hvem der spiser den falske frugt. Denne forskning viste, at rotter spiste i omegnen af 75 procent af den

Kolibriers specialisering

Figuren viser forskningsresultater, der afspejler kolibriers specialisering i forhold til blomsterressourcer i forskellige overordnede geografiske regioner.

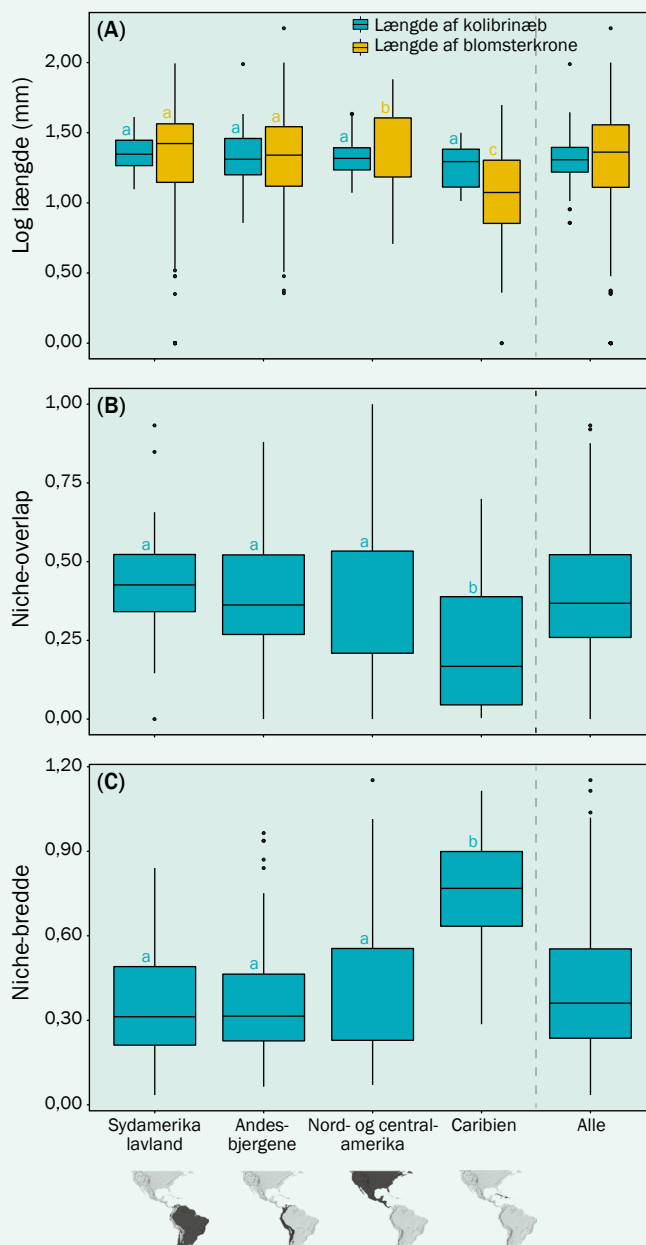
Øverst (A) er der boks-plot baseret på målinger af længden af kolibrinæb og længden af blomsterkroner. Nedenfor er plottet to forskellige mål for resourcespecialisering af kolibrierne.

B er "niche-overlap", som reflekterer i hvilken grad, kolibrierne deler de samme blomsterressourcer; en værdi tæt på 1 indikerer kolibrier med specialiserede nicher, mens værdier tæt på 0 indikerer kolibrier med generaliserede nicher.

C er "niche-bredde", som reflekterer antallet af blomsterarter, kolibrierne bruger; høje værdier indikerer generaliserede kolibrier, mens værdier tæt på 0 indikerer specialiserede kolibrier. Begge mål er relative mål, som for eksempel tager højde for observerede interaktionsfrekvenser og antallet af blomsterarter i de forskellige økologiske netværk.

De firkantede bokse viser 1. og 3. kvartil af målingerne, mens den horisontale streg inden i boksen angiver medianen. De lodrette streger angiver spredningen på data, mens de sorte punkter er "outliers". Bogstaverne angiver signifikante forskelle. Som det ses, er caribiske kolibriers næb lige så lange som på fastlandet, mens caribiske kolibri-besøgte blomster har en tendens til at være kortere, og de Caribiske kolibrier er mere generaliserede i deres resourcespecialisering end på fastlandet, både i form af niche-overlap (Panel B) og niche-bredde (Panel C).

Figur efter Dalsgaard B, Maruyama PK, Sonne J, et al, Functional Ecology (2021)



falske frugt, og på øer, hvor rotterne spiste de fleste af frugterne, blev tilsvarende færre frugter spist af hjemmehørende fugle. Dette og andre studier viser, at rotter er supertilpassede til at invadere og kapre økosystemer fra hjemmehørende dyr.

Naturkatastrofer truer de tropiske øers natur

Det er klart, at når man som art kun lever på en enkelt eller ganske få små øer, er man mere sårbar og i risiko for at uddø. Truslen fra invasive arter er én problemstilling.

En anden er naturkatastrofer. Bo Dalsgaard har med sine kolleger lavet undersøgelser, hvor forskerne geografisk har kortlagt verdens truede pattedyr, fugle, padder og krybdyr. Herefter har de tilsvarende lavet et geografisk kort over de steder i verden, hvor der ofte er vulkanudbrud, tsunamier, jordskælv og orkaner. Denne kortlægning viste, at der, hvor de to kort overlappede hinanden, lå de tropiske øer, for eksempel i Caribien, der hvert år bliver ramt af netop store og voldsomme orkaner. Hele 70 procent af de truede arter, der lever i områder

med hyppige naturkatastrofer, findes på øer, og det hjælper ikke på tingene, når økosystemerne i forvejen er under pres fra menneskers introduktion af invasive arter, jagt, habitatdelæggelse som skovfældning og så videre.

Bo Dalsgaard uddyber, at problemet med naturkatastrofer blot bliver værre i fremtiden, i takt med at klimaforandringerne tager til. For eksempel når orkaner anno 2025 ofte en vindstyrke på omkring 250 kilometer i timen. Det vil stige til omkring 300 kilometer i timen i

fremtiden, og er man en lille kolibri på en flad ø midt ude i Det Caribiske Hav, kan det være mere end almindeligt svært at holde klørerne i en gren og undgå at blæse væk. Allerede nu er der eksempler på, at nogle flade små øer, som en orkan passerede direkte hen over, blev stort set ryddet. Det meste var blæst ud i havet.

Når kraftige orkaner rusker rundt i små øer med unikke dyre- og plantearter, kan det ikke undgås, at det kommer til at koste arter. Et andet eksempel er papegøjearten Puerto Rico-amazone, som kun lever på Puerto Rico i Caribien. Arten, der førhen var vidt udbredt over hele øen, var i forvejen bragt godt ned i bestand på grund af skovrydning mm., og efter en orkan ramte øen, faldt bestanden til blot tre eksemplarer. Bevaringsindsatser med blandt andet yngleprogrammer har sidenhen bragt bestanden tilbage fra udryddelsens rand.

»Det samme gælder den unikke spætmejs fra Bahamas, som levede på nogle af de mindre flade øer i Bahamas. I 2019 kom der en orkan forbi, og så er Bahamas-spætmejsen ikke set siden. Man regner nu med, at den er uddød. Problemet er, at vi med menneskets aktiviteter og naturkatastrofer, der endda bliver værre og værre, har fået skabt en ekstremt destruktiv cocktail, som i fremtiden kommer til at koste arter, især på mindre tropiske øer. Er en art i forvejen presset, kan en tropisk orkan være det, som endelig skubber den ud over kanten,« siger Bo Dalsgaard.

Kolibrier døde af sult efter orkan

Orkaner og andre naturkatastrofer kan også ad andre veje skabe problemer for planter og dyr, der lever i blandt andet bjergene på de små tropiske øer. Den tropiske orkan Maria bragede i 2017 igennem De Små Antiller med voldsom kraft, hvilket havde stor indflydelse på bestanden af specielt Granatstrube-kolibrien, som levede af at drikke nektar fra især to bestemte nærtbe-



Heliconia-planter er i De Små Antiller specialerede til bestøvning af granatstrube-kolibrien (*Eulampis jugularis*; den øverste fugl); et eksempel på, hvordan specialiserede samspil eksisterer i bjergene i Caribien. Efter orkanen Maria i 2017 døde omkring 75% af granatstrube-individerne på øen Dominica, og derefter er en lang række af kolibrier samt banansmutten (*Coereba flaveola*; nederste fugl) begyndt at bestøve og drikke nektar fra Heliconia-planterne. Det viser, hvordan orkaner kan ødelægge ellers stærkt specialiserede samspil, men også at naturen tilpasser sig den nye situation med nye og mere generaliserede interaktioner. Illustration: Tianying Zhang.

slægtede blomster oppe i bjergene. Da orkanen kom forbi, flåede den blade og blomster af planterne, og det betød, at kolibrierne ikke længere kunne finde nektar. Forskere observerede efterfølgende, hvordan kolibrierne i desperation for at få deres dosis sukker i stedet prøvede på at få energi ved at stikke deres næb ned i frugt og suge frugtsaft. Det er kolibrier ikke egnede til, og det betød, at mange af kolibrierne døde af sult. I alt døde omkring 75 procent af Granatstrube-kolibrien på den lille ø Dominica i De Små Antiller. Planterne manglede derfor nogle nye bestøvere, og det betød, at nye arter af kolibrier og også spurvefugle kom ind og overtog

efter kolibrien. Man kan sige, at økosystemet tilpassede sig den nye virkelighed, men det er stadig et åbent spørgsmål, hvor godt økosystemet fungerer her otte år efter orkanen.

»Her er problemet også, at vi ikke ved, hvor gode de andre fugle er som bestøvere. Det kan være, at de mest bare drikker nektaren uden at bringe meget pollen videre til den næste blomst. Det vil over tid betyde, at disse planter også er i risiko for at uddø. Det vil fremtiden vise, men faktum er, at orkaner kan true skrøbelige økosystemer på flere forskellige måder, enten direkte ved at dræbe en stor bestanddel af en

Videre læsning:

Dalsgaard B, Maruyama PK, Sonne J, et al. (2021): The influence of biogeographical and evolutionary histories on morphological trait-matching and resource specialization in mutualistic hummingbird-plant networks. *Funct Ecol.* 2021; 35: 1120–1133.

Dalsgaard B, Temeles EJ. 2024. Hurricanes threaten species and alter evolutionary trajectories on tropical islands. *Current Biology* 34, R1115-R1120.

Zhu C, Dalsgaard B, Li W, et al. 2025. Interconnecting fragmented forests: Small and mobile birds are cornerstones in the plant-frugivore meta-network. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 122, e2415846122.

Huang X, Dalsgaard B, Chen SC. 2025. Weak-er Plant-Frugivore Trait Matching Towards the Tropics and on Islands. *Ecology Letters* 28, e70061.

Vollstädt MGR, Galetti M, Kaiser-Bunbury CN, et al. 2022. Plant-frugivore interactions across the Caribbean islands: Modularity, invader complexes and the importance of generalist species. *Diversity and Distributions* 28, 2361-2374.

TSO Schröder, F Gonçalves, MGR Vollstädt, et al. 2024. Hurricane-induced pollinator shifts in a tightly coadapted plant-hummingbird mutualism. *New phytologist* 244, 16-20.

Kinas store biodiversitetseksperiment

Thousand Island Lake i Kina er et af verdens mest unikke naturlige laboratorier til at studere biodiversitet og ø-økologi. Søen blev dannet i 1959, da en dæmning oversvømmede et kuperet landskab i Zhejiang-provinsen og efterlod 1.000 små øer (tidligere bjergtoppe) i den enorme sø. Hver ø har sit eget økosystem, og da de alle blev dannet samtidigt og ligger i samme klima og geografiske område, udgør de et ideelt sted at undersøge, hvordan størrelse på øer og isolation påvirker artsrigdom, samspil mellem arter og økologiske processer.

Thousand Island Lake har blandt andet gjort det muligt at afprøve forskellige teorier indenfor ø-biogeografien og for eksempel validere, at artsrigdom falder med størrelsen på øerne og øget grad af isolation, altså hvor langt der er til nabooen. Forskningen har også vist, at økologiske interaktioner som bestøvning og fødekæder forandres dramatisk, når nøglearter forsvinder fra små øer. Blandt andet viser studier fra Thousand Lake Island, at specialiserede frugtspisende fugle ikke længere lever på de små øer, kun de store og på fastlandet. Det betyder også, at de planter, der kræver store frugtædende fugle til at sprede deres frugter, også har meget svære kår på de små øer.

Et centralt fund fra Thousand Island Lake er også, at når større dyr eller vigtige funktionelle arter forsvinder fra de små øer, opstår der kaskadeeffekter. Plantearter bliver i mindre grad bestøvet, fødenetværk bliver simp-



Thousand Island Lake i Kina – et af verdens mest unikke naturlige laboratorier til at studere biodiversitet og ø-økologi. Foto: Jingcao Pan

lere, og biodiversiteten falder yderligere. På mange af øerne har man observeret, at artsudryddelsen ikke sker med det samme, men gradvist over årtier. Det har givet vigtig indsigt i, hvordan økosystemer reagerer over tid på pludselig isolation og fragmentering.

I en global kontekst, hvor naturlige levesteder i stigende grad fragmenteres af infrastruktur, landbrug og bebyggelse, fungerer Thousand Island Lake som en model for, hvordan biodiversitet påvirkes i små, adskilte naturfragmenter. Forskningen fra søen hjælper Bo Dalsgaard og forskerkollegerne med at forstå, hvordan man bedst beskytter arter og økologiske netværk i en fragmenteret verden.

art eller indirekte ved at ødelægge samspillet mellem arter,« forklarer Bo Dalsgaard.

Han fortæller, at målet med forskningen er at forstå skrøbeligheden i økosystemerne på tropiske øer, og hvordan blandt andet klimaforandringer med flere og kraftigere orkaner kommer til at ramme dem hårdt. Helt overordnet er målet at identificere, på hvilke typer af øer naturen

rammes hårdest, og hvilke dyr og planter der ser ud til at være mest i risiko for at uddø i fremtiden. Ved at kende til de relevante risici, kan man også i naturforvaltning mindske risikoen for, at arter forsvinder. Det kan man for eksempel gøre ved at sikre, at relevante habitater er til stede, at have bevarings- og yngleprogrammer eller at sætte ind med fokuseret genopretning og fodring, når først naturkatastrofen har været der.

»Rent forskningsmæssigt vil vi også gerne blive klogere på disse økosystemer og deres sårbarhed. Vi tror, at økosystemer og arter på små, flade øer er mest sårbare, men det skal vi gerne have undersøgt. Vi har derfor søgt om midler til at undersøge dette vigtige område af, hvordan klimændringer påvirker økosystemer. Derudover vil vi i fremtiden også gerne kigge nærmere på, hvilken rolle genetisk diversitet spiller for, hvor tæt specialiserede arter er på hinanden, og hvordan øernes størrelse og isolation påvirker dette. Indtil videre har vi kigget på sammenhænge mellem areal, isolering og generalisering/specialisering. Men vi mener, at genetisk diversitet formentlig spiller en central rolle i tilpasnings- evnen mellem planter og dyr, og at genetisk diversitet også kommer til at spille en rolle i, hvordan arter og økosystemer kommer til at klare sig i fremtiden, når orkaner bliver kraftigere,« siger Bo Dalsgaard. ■



En del af det internationale team, der indsamlede data omkring bestøvende og frugtspredende fuglearter i De Små Antiller i Caribien. På fotoet ses Bo Dalsgaard med postdocs og kandidatstuderende fra Københavns og Aarhus Universitet samt ph.d.-studerende fra Miami University i USA. Foto: Fernando Gonçalves.



LIVESTREAMS FRA AARHUS UNIVERSITET

Forskning i øjenhøjde – direkte til din klasse

Aarhus Universitet tilbyder livestreamede forelæsninger i undervisningstiden – målrettet gymnasieelever.

Forelæsningserne formidler aktuel forskning med høj faglighed og formidling i øjenhøjde. De er oplagte som supplement til din undervisning og giver dine elever mulighed for at møde forskere i deres rette element.

Brug dem fx som fagligt input i temaforløb om klima, demokrati, medicin eller teknologi.

FORELÆSNINGER I 2025

Der er meget mere i mælk

Hvad smager verden af – og hvorfor?

Det danske demokrati i dag: Status fra Magtudredningen 2.0

Bakterier i munden – ven eller fjende?



AARHUS UNIVERSITET



Tilmeld jer de kommende livestreams
– eller gense tidligere foredrag
au.dk/gymnasielivestream

MØGGRAVERE OG DARWINHVEPSE

- om danske navne på dyr og planter

Foto: Ole Ohm Lundager



Der er ingen regler for brugen af danske navne modsat de videnskabelige, og opfindelsen af nye navne er ofte det vilde vesten. Et nyt råd, Taxonrådet, vil hjælpe med at styre processen og bidrage med rådgivning.



Om forfatteren

Lars Skipper er artslisteansvarlig på den officielle danske artsportal Arter og tovholder på det nyoprettede Taxonråd i regi af Statens Naturhistoriske Museum. Han har arbejdet med flere artsgrupper, men mest intensivt med tæger, hvilket blandt andet er mundet ud i tre bøger om forskellige tægegrupper i serien Danmarks Dyreliv. lars.skipper@get2net.dk

Vi kender i skrivende stund i størrelsesordenen 40.000 danske arter, et tal der dog konstant må opjusteres. Et øget fokus på ikke mindst mindre kendte artsgrupper er nok den vigtigste grund. Andre vigtige årsager er klimaforandringer samt indslæbte og forvildede arter. Også de sociale medier spiller en vigtig rolle. Ofte går der kun få timer fra en ny ukendt art er observeret og fotograferet, til den er artsbestemt af en ekspert.

Alle arter har et videnskabeligt navn, men kun cirka halvdelen har et dansk navn. Næsten alle hvirveldyr har danske navne, og det samme gælder planter, men retter

vi blikket mod insekter og andre smådyr, "orme" samt alger, ser billedet, med enkelte undtagelser, unægteligt noget anderledes ud.

For den artsrigeste familie i dyreriget i Danmark er der således kun fire ud af mere end 1.600 arter, der har et dansk navn i skrivende stund. Ikke engang selve familien med det videnskabelige navn Ichneumonidae, har et dansk navn. Indtil nu! Det nye navn, Darwinhvepse, er godkendt og anbefalet af det nyoprettede Taxonråd i regi af Statens Naturhistoriske Museum, hvis primære opgave vil være at rådgive om brugen af danske navne. Dette arbejde vil blive formidlet via artsportalen Arter, mere herom senere.

Men hvorfor skal vi overhovedet bekymre os om danske navne, når alle arter allerede har et videnskabeligt navn? Videnskabelige navne er svære at huske og svære at forholde sig til, medmindre man forstår latin og græsk. Det er unægtelig også lettere at føle et tilhørsforhold til et navn, som man kan forholde sig til, og lettere at formidle et budskab til lægmand om for eksempel sommerfuglen blodplet frem for *Tyria jacobaeae*. Et godt dansk navn kan desuden være en god hjælp til bestemmelse, hvis det er beskrivende for pågældende art.

Det giver dog ikke nødvendigvis mening at forsyne alle danske arter med dansk navn. For mange arts-

← Den artsrigeste insektfamilie i Danmark, ja faktisk i hele dyreriget, bærer det videnskabelige navn Ichneumonidae, men har ikke haft noget dansk navn. Det bliver der hermed rådet bod på med introduktionen af navnet Darwinhvepse. Navnet er en oversættelse af det engelske navn Darwin wasps. Disse hvepse spillede en vigtig rolle i forbindelse med udviklingen af Darwins evolutionsteori. Darwinhvepse, og langt hovedparten af de øvrige danske hvepse, er såkaldte parasitoider. De lægger æg i insekter og andre smådyr, der klækker og bliver til larver, som spiser værten op indefra. Darwin kunne ikke overbevise sig selv om, at en velgørende og almægtig gud skulle have skabt noget så gruopvækkende.



grupperes vedkommende er der kun få (eller ingen) danske eksperter, og da arbejdet med disse artsgrupper ofte foregår på tværs af landegrænser, vil det være de videnskabelige navne, der benyttes. De danske navne vil blot blive endnu et sæt navne, som man skal forsøge at holde styr på.

I takt med vores øgede viden om arternes slægtskab bliver arter konstant splittet, slået sammen eller flyttet til andre slægter, hvilket ofte giver udfordringer hvad angår de danske navne.

Hvor kommer de danske navne fra?

De eksisterende danske navne kommer fra mange forskellige kilder. Mange navne stammer fra gammel tid, hvoraf flere er baseret på overtro. Disse gamle navne er på forbilledlig vis beskrevet i bogværkerne *Folk* og *Fauna* samt *Folk* og *Flora*. Navnene var dog ikke altid lige stuerene og omfatter navne som lortesnapper (kjove), Peder laddenrøv (lomvie), pissepotte (ager-snerle) og dem, der er værre.

En lang række navne stammer fra eksisterende eller tidligere navneudvalg. Sådanne udvalg findes for blandt andet planter, fugle, svampe og skadevoldende insekter. I årene omkring årtusindskiftet blev der udgivet en håndfuld publika-

tioner i regi af *Projekt Danske Dyrenavne* med anbefalede navne på biller, edderkopper og andre smådyr.

For flere andre grupper har enkelte eksperter udarbejdet samlede navnelister over større eller mindre artsgrupper. Det gælder grupper som svirrefluer, springhaler og galmyg.

Ind imellem opfindes navne til lejligheden, for eksempel i forbindelse med udgivelsen af bøger og artikler, eller når nye arter dukker op i landet og bliver annonceret via sociale medier.

Hvad er et godt navn?

Et godt navn er beskrivende for den pågældende art, slægt, familie eller andet såkaldt taxonomiske niveau, uden at være for langt. Det er mundret, let forståeligt og følger officiel dansk retstavning.

Som eksempel på et godt navn kan nævnes sommerfuglen humle-dværgmåler. Dette navn siger noget om både værtsplante, størrelse og adfærd. Et andet eksempel er svampen klæbrig jordtunge, hvis navn beskriver konsistens, substrat og form.

En begrænset brug af sjove, eksotiske og på anden vis afvigende navne kan være kærkomment, så det

hele ikke bliver for kedeligt. Enkelte navne kan give et smil på læben på grund af et ords dobbeltbetydning. Punkteret jordbi har således ikke mistet luften, men bagkroppen hos begge køn er besat med tydelige punkter. Skør pudemos er skør i betydningen skrøbelig, og pilfinger er en fingerformet svamp, der vokser på piletræer.

Det er ikke altid let at gætte, hvilken artsgruppe en art tilhører ud fra navnet, som det fremgår af følgende eksempler: den lille mus (sommerfugl), flæsketerning (snegl), paddeleg (alge), kæmpeklat (svampedyr), cigarruller (bille) og pletlet langebarn (fisk).

En del navne er mere eller mindre intetsigende eller direkte misvisende. Navnet fiskehejre er måske nok beskrivende for arten, men også for andre danske arter af hejrer. Gråhejre ville være mere sigende i forhold til lige netop denne art. Gulstribet egetæge er ganske rigtigt gulstribet, men findes kun sjældent på eg, modsat en hel række af beslægtede arter. Langt hyppigere findes den på tjørn.

Navne, der angiver hyppighed eller geografisk udbredelse, kan være rammende, når de opfindes, men blive misvisende over tid på grund af ændringer forårsaget af klimaforandringer eller introduktion.

Praktisk taget alle danske arter af pattedyr, fugle, krybdyr og padder samt fisk, tilsammen kaldet hvirveldyr, har danske navne. Det samme gælder de danske planter såsom den blå anemone.

Foto: Lars Skipper.



Mange plantearter har fået deres navne på basis af signaturlæren. Den går ud på, at planternes udseende har synliggjort hvilke sygdomme, de kan helbrede. Det gælder arter som lungeurt, leverurt og milturt. Sidstnævnte (billedet) har således, med lidt god vilje, miltformede blade. Foto: Lars Skipper.

Vortebideren er en anseelig græshoppe efter dansk standard. Hvis du placerer den ved siden af en vorte, vil den bide vorten i stykker og udskille en væske, som får vorten til at forsvinde. I hvert fald ifølge gammel folketro. Foto: Flemming Bornholdt.



Det er således langt fra alle eksisterende navne, der lever op til kriterierne for gode navne, men det måske vigtigste kriterie for brugen af danske navne er hævdprincippet. Har en art et navn, som har været benyttet i lange tider, bør det som udgangspunkt bibeholdes.

Udseende, lyd og lugt som inspiration

Inspiration til danske navne hentes fra mange kanter såsom udseende, de sanseindtryk de forårsager hos os, deres levested, udbredelse og biologi. Indimellem får de navn efter betydningsfulde personer, og i mange tilfælde hentes inspiration i deres videnskabelige navne eller nationale navne fra vores nabolande.

Synssansen er vores vigtigste sans, og ikke underligt indeholder en meget stor del af danske navne et eller

flere elementer, der afspejler artens udseende. Det kan være farver, former, størrelse, pletter eller striber.

Navne, der indikerer skønhed, omfatter for eksempel prægtig nøgenhat, smuk tanglus og elegant rødfer. Mindre iøjnefaldende arter inkluderer uanselig jordløber og fesen fladhat. Blandt navne baseret på størrelse kan nævnes mikrocikade og kæmpekradser (parasitisk "orm"). En stor del af de danske mariehøns er opkaldt efter antallet af pletter eller prikker fra toplettet mariehøne over den velkendte syvpletlet og mindre kendte syvprikket mariehøne til fireogtyvepletlet mariehøne.

Et onomatopoietikon er et vanskeligt ord, som benyttes om ord, der er dannet på basis af en lyd. Det gælder blandt andet navnene på en række fuglearter såsom vibe,

krage, råge, ryle og klyde. Gransanger hedder chiffchaff og zilpzalp på henholdsvis engelsk og tysk, hvilket ikke er en indikation af forskellige dialekter, men forskellig tolkning af den samme lyd.

Hvinand har fået navn efter den hvinende lyd, som hannens vinger frembringer under flugten, og smældere er en familie af biller, der, hvis de lægges på ryggen, foretager et hop suppleret med et lille smæld i forsøg på at komme på ret køl.

Mange arter er opkaldt efter deres lugt. Det gælder enkelte dyr såsom løgfrø, men i højere grad planter og i særdeleshed svampe. Mange svampenavne taler således for sig selv såsom latrin-vokshat, marcipan-korkpigsvamp, og pelargonie-slørhat. Tæge-mælkehat vil færre nok kunne relatere sig til, da den har fået navn efter lugten af "stinktæger", en populærbetegnelse for visse tægearter, der som forsvaret udskiller en karakteristisk lugt.

Andre kilder til danske navne

Smag indgår ligesom lugt i mange artsnavne, og igen især blandt planter og i endnu højere grad svampe.

Mange arter er bitre eller beske, som det fremgår af navne som bitter mælkeurt og besk slørhat. Spiselig rørhat, der nok er bedre kendt under navnet Karl Johan, er mild og behagelig, og det samme gælder spiselig stenmorkel. Sidstnævnte er imidlertid dødelig giftig i rå tilstand, hvilket har ført til en navneændring til ægte stenmorkel. Omvendt er manddraber-mælkehat langt fra dødelig, men skarp og brændende stærk, og én man bør holde sig fra.

Også struktur og tekstur danner grundlag for mange navne. I den behagelige ende har vi arter som blød storkenæb og fløjlsgræs og i den knap så behagelige ende klæbrig limurt, slimet vokshat og tornet salat.

Begreber som biotop, habitat, substrat og værtsplante kan alle sige noget om en arts levested.

Det afspejles i navne som klitrose, barktæge, træflisagerhat og aspargesbille.

Stednavne indgår ikke sjældent i danske navne. Danske stednavne indgår i for eksempel Rømø-kalktuemos og Rønne-kulskorpe (svamp), og kigger vi udover landets grænser, finder vi navne som Laplands-svirreflue, Bermuda-slimfisk og Karpaterklokke. Sådanne navne bør som udgangspunkt undgås, da de ofte bliver misvisende over tid i takt med øget viden, klimaforandringer eller introduktion.

Som eksempel på et navn, der beskriver adfærd, kan nævnes vagabonderende møgbille. Anvendelse indgår også af og til i artsnavne, som for plantearterne farve-vajd og farve-reseda, der bliver benyttet til garnfarvning.

En del arter er navngivet efter personer. Mortensens rutrød er navnet på en alge, og Konrad og Jensen har lagt navn til hver deres vokshat.

I enkelte tilfælde benyttes de videnskabelige navne eller en "fordansking" af disse som danske navne. Det gælder blandt andet dagsommerfuglene iris og ilia samt symfyer og pauropoder, to grupper af små tusindben ukendt af de fleste.

Taxonrådet og artsportalen Arter

Som nævnt i indledningen er der oprettet et såkaldt Taxonråd med ophæng på Statens Naturhistoriske Museum. Dette råd vil tage sig af opgaver med relation til blandt andet navne og klassifikation med primær fokus på danske navne. I skrivende stund er der 17 medlemmer med tilknytning til blandt andet Københavns Universitet, Aarhus Universitet, Naturhistorisk Museum Aarhus og artsportalen Arter. Tilsammen råder de over en bred viden og erfaring indenfor en lang række forskellige artsgrupper.

Det er som udgangspunkt ikke rådets opgave at finde på nye navne. Det vigtigste er at bidrage til, at vi



Artsnavngivningens "ti bud"

Taxonrådets vejledende kriterier for gode, danske navne på arter:

1. Eksisterende navne skal som hovedregel bibeholdes (hævdprincippet)
2. Navne bør så vidt muligt sige noget væsentligt om egenskaber, såsom udseende, adfærd, levested eller eventuelt anvendelse
3. Navne bør være korte, mundrette, og nemme at forstå
4. Navne på arter i Danmark bør være tidløse i forhold til udbredelse. Således bør "almindelig" undgås. Det samme gælder geografiske betegnelser
5. Interessevækkende navne bør tilstræbes frem for navne, som giver uheldige associationer
6. Det samme navn bør som udgangspunkt ikke benyttes mere end én gang
7. Nye navne bør dannes på grundlag af officiel dansk retstavning
8. Nye navne bør så vidt muligt være i overensstemmelse med gængs overordnet taxonomi
9. Kun i helt specielle tilfælde bør det videnskabelige navn benyttes som dansk navn. Men udenlandske populærnavne og videnskabelige navne kan være inspirationskilde
10. Navne, der stimulerer fantasien, kan benyttes i oplagte tilfælde, selv om de afviger fra eller direkte går imod et eller flere af de øvrige kriterier.

får nogle gode, blivende navne, som så mange som muligt vil bruge. Rådet vil bidrage med rådgivning, hvor der opstår ønsker om nye navne eller forviklinger omkring eksisterende navne, og hjælpe med kontakt til og mellem eksperter.

Til brug for dette arbejde har Taxonrådet udarbejdet et sæt kriterier, "De ti bud", på basis af en række tidligere og eksisterende navneudvalg.

Rådets arbejdsopgaver og beslutninger samt godkendte og anbefalede navne vil fremgå af den offentlige artsportal Arter, hvor alle

kan indsende egne fund af danske organismer og søge på andres. Udover Arter-brugernes egne fund rummer portalen over 50 millioner fund fra en lang række eksterne datasæt fra foreninger, museer, offentlige registreringer, engagerede privatpersoner og meget mere.

Til sidst blot en opfordring til at komme ud i naturen. Vær nysgerrig, iagttag, fotografer, fordyb dig og del dine oplevelser og erfaringer med andre. Der er uanede mængder af oplevelser, som venter på at blive oplevet, arter, der er til stede, men endnu ikke fundet, og viden, der venter på at blive afdækket. ■

Mange danske navne gives på basis af vores sanseindtryk. Det kan være rent visuelt eller pga. en lydytring, en lugt, en smag eller en taktil fornemmelse. På billedet ses en løgfrø, der har fået sit navn, fordi den udskiller et hvidløgslugtende sekret, hvis den føler sig truet. Foto: Mette Kirkebjerg Due.

Yderligere læsning
Artsportalen Arter: arter.dk

De ti bud. Vejledende kriterier vedrørende danske navne: om.arter.dk/media/213lcyf/de-ti-bud.pdf

Brøndegaard, V.J. 1978-80. Folk og flora. Bind 1-4. Rosenkilde og Bagger

Brøndegaard, V.J. 1985-86. Folk og fauna. Bind 1-3. Rosenkilde og Bagger

Teksterne fra Brøndegaards bogværker er tilgængelige via de respektive arter i Artsbogen på Arter.dk

Forfatterne med deres egen RNA-kopimaskine, som er placeret i en mindre fryser, hvilket stabiliserer kopieringsprocessen.
Foto: Fie Noer Christensen. GAI er anvendt til røgeffekt på billedet.



Om forfatterne



Emil Laust Kristoffersen er adjunkt ved iNANO og forsker i RNA-nanoteknologi og RNA's rolle i livets oprindelse. emillk@inano.au.dk



Niels Rysgaard Sørensen er specialestuderende fra molekylærbiologi og forsker i RNA-ribozymer. nielss@inano.au.dk



Ebbe Andersen er lektor ved iNANO og forsker i design af biomolekyler, syntetisk biologi og syntetisk liv. esa@inano.au.dk

LIVETS OPRINDELSE I EN RNA-VERDEN

Liv er overalt på jorden; lige fra mørke undersøiske grotter til himlen over hovedet på os. Men hvordan er det opstået? Nye metoder og resultater puster liv i gamle teorier om, hvordan RNA-molekyler kan have haft en nøglerolle i livets opståen.

Spørgsmålet om, hvordan livet er opstået på vores planet, har til alle tider optaget mennesket, og det har udmøntet sig i et væld af skabelsesmyter. Gennem de seneste 300 år har naturvidenskaben i stigende grad givet os indblik i, hvordan dette kunne være sket, blandt andet gennem studier af jordens sten og mineraler og ikke mindst deres alder. Den forskning har vist, at Jorden opstod for hele 4,6 milliarder år siden, sandsynligvis efter et sammenstød af kosmiske pro-

portioner. Den tidlige jord og dens søsterplanet, Theia, spiralerede ind i hinanden og lavede i sammenstødet den planet, vi bor på samt vores måne.

De første millioner af år efter Theia-kollisionen var Jorden et ildsprudlende helvedeslandskab med bombardementer af meteoritter, der bragte nye kemiske stoffer til Jorden. Men med tiden kølede planeten stille og roligt ned, hvilket tillod dannelsen af oceaner og søer, og heri var der opløste salte og andre

kemiske stoffer. I denne "ursuppe" forestiller man sig, at livet opstod ud fra kemiske byggesten for mere end 3,8 milliarder år siden. Geologer finder nemlig flere og flere klare tegn på, at livet i form af simple livsformer fra det tidspunkt og frem var vidt udbredt på jorden. Men hvad satte gang i livets udvikling?

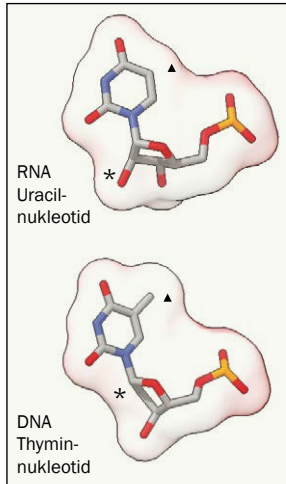
Livets kemi i en ursuppe

Tilbage i 1950'erne undrede forskerne Stanley Miller og Harold Urey sig over livets kemi. Som gode

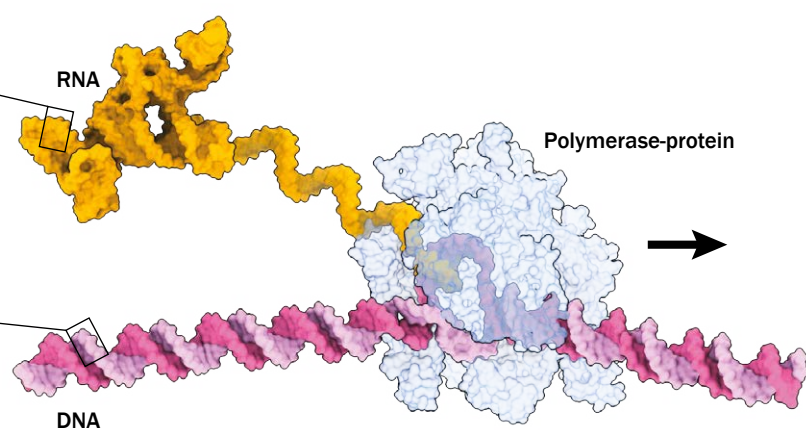
Om RNA-molekylet

RNA-molekylet er kun lidt forskelligt fra sin fætter DNA. RNA har et ekstra oxygenatom på sin sukker-del og en uracil-base i stedet for en thymin-base. Til forskel fra DNA, der bliver kopieret af DNA-polymerase som lange dobbelt-strenger, bliver RNA kopieret af RNA-polymerase som lange enkelt-strenger, der kan base-parre med sig selv og danne interne foldninger. RNA kan danne komplekse strukturer, der har egenskaber i lighed med enzymer – kaldet ribozymmer. I visse tilfælde kan RNA-molekyler også skifte form, når det binder til et andet molekyle, eller når dets fysiske betingelser ændrer sig (en såkaldt ribokontakt). Det gør det let at tænde og slukke for RNA-aktiviteter.

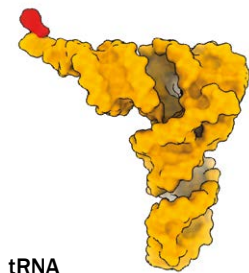
RNA-nukleotider



Transskription af DNA til RNA ved hjælp af en polymerase

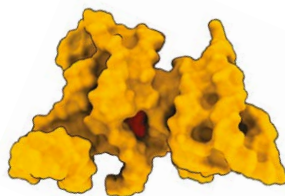


RNA-molekyler med struktur og funktion



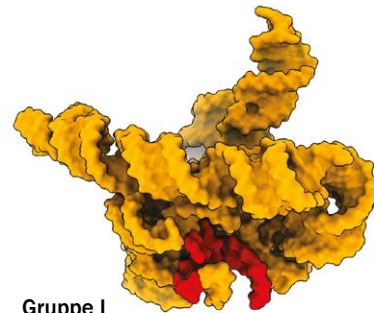
tRNA

Transfer (t)RNA binder en aminosyre (rød) og hjælper til med at oversætte den genetiske kode gennem translations-processen. Den L-formede struktur af tRNA er essentiel for denne funktion.



SAM-ribokontakt

SAM-ribokontakten, sidder som en del af et mRNA-molekyle og kan, ved at binde det lille molekyle SAM (rød), forhindre translationen. Det er en ændring i strukturen, der gør, at en ribokontakt på den måde kan tænde og slukke translationen.



Gruppe I

selv-splejsende intron

Gruppe I intron er en gruppe af RNA-sekvenser, der klipper sig selv ud af messenger (m)RNA-molekyler. En lille del af mRNAet (rød) er vist her.

kemikere lavede de et eksperiment med kolber, bunsenbrændere og elektriske udladninger for at simulere det fysiske miljø på den tidlige jord med varmekilder, lynnedslag osv. Ved at cirkulere simple kemiske stoffer igennem deres system kunne de vise, at nogle af livets vigtigste byggesten såsom aminosyrer og DNA-baser kunne dannes ud fra disse simple komponenter.

Senere forskning er kommet frem til lignende resultater, og i dag ved man, at nukleotiderne, byggestene-

ne i DNA og RNA, kan opstå under såkaldt "præbiotiske" forhold, altså i en verden uden liv.

Tilstedeværelsen af livets kemi er dog ikke lig med liv! For at nå dertil skal nukleotider eller aminosyrer sættes sammen til kæder, der har komplekse kemiske funktioner. Det er sådan, livet fungerer i dag: Informationsbærende kæder af DNA afskrives til kæder af RNA, der oversættes til funktionelle kæder af proteiner, som udfører livets reaktioner. Men hvordan kan disse

kæder opstå, og hvilket molekyle opstod først: DNA, RNA eller protein?

Skjulte spor af en RNA-verden

Ved at gå på opdagelse i den grundlæggende molekylærbiologi kan vi som detektiver finde spor efter RNA's rolle i livets oprindelse. RNA har oprindeligt været en smule undervurderet i molekylærbiologien, da dets rolle har været set som messenger (budbringer) mellem DNA og protein. Men da man i 1980'erne blev i stand til at under-

søge RNA's funktion nærmere, viste der sig en mere grundlæggende rolle. RNA kan nemlig både indeholde genetisk information (ligesom DNA) og udføre kemiske reaktioner (ligesom proteiner), og RNA kunne derfor muligvis være selve nøglen til livets oprindelse (se faktaboks om RNA-molekylet).

Det første spor, der peger i den retning, finder vi i molekylærbiologiens centrale dogme, der handler om, hvordan cellen får den genetiske kode i DNA oversat til funktionelle proteiner med RNA som messenger. Her viser det sig, at ribosomet, den molekylære maskine, der klarer oversættelsen fra messenger-RNA til protein, er dannet af to store RNA-molekyler. Dermed er ribosomet faktisk en RNA-maskine, der laver proteiner. Det faktum tyder på, at RNA kom før proteiner og måske endda, at RNA "opfandt" proteinerne. Ud over ribosomet findes der også andre katalytisk aktive RNA-molekyler. Tilsammen kaldes de aktive RNA-molekyler for ribozymet.

Det andet spor, der peger på en nøglerolle for RNA i livets oprindelse, finder vi i byggestenene for RNA. RNA bruges både som cellens centrale energi-molekyle (ATP) og som udgangspunkt for at danne byggestenene til DNA. RNA-byggestenen bliver modificeret af et protein-enzym via en kompliceret kemisk proces for at danne DNA-byggestenen. Det tyder på, at RNA og proteiner kom før DNA.

Men denne logik har også problemer. For DNA og RNA bliver i cellerne kopieret af polymerase-proteiner, hvilket antyder at proteiner kom først. Vi er derfor endt i et problem svarende til, om det er hønen eller ægget, der kom først.

Løsningen på dette "hønen eller ægget-problem" kan være et katalytisk aktivt RNA, der kan kopiere RNA – et såkaldt RNA-polymerase-ribozym (eller en RNA-kopimaskine). Med sådan en kopimaskine kan proteiner og DNA nemlig helt undværes. Ideen om, at RNA

kan kopiere RNA, er central for hypotesen om, at livet opstod i en såkaldt "RNA-verden". Ideen opstod første gang allerede i 1950'erne, efter at James Watson og Francis Crick havde opdaget strukturen af DNA, men blev først rigtig udbredt i 1980'erne, da man opdagede ribozymerne. Hypotesen om en RNA-verden postulerer, at livets oprindelse startede med RNA, og derefter opfandt DNA og protein.

Som ovenfor beskrevet ved vi, at ribosomet kan danne proteiner, men kan et ribozym også danne RNA? Det er et godt spørgsmål, for ingen har hidtil fundet en sådan RNA-baseret RNA-kopimaskine i naturen. Men det udelukker ikke, at den har eksisteret en gang.

Jagten på den forsvundne RNA-kopimaskine

Tilhængere af RNA-verden-hypotesen lod sig ikke stoppe af den manglende RNA-kopimaskine – for det kan jo være, at den har eksisteret tidligere i livets historie, men er blevet udkonkurreret af de mere effektive polymerase-proteiner. Ligesom de store dinosaurer kan RNA-baseret liv tænkes at have fundet sit endeligt på et tidspunkt i Jordens lange historie i den skarpe konkurrence med andre livsformer.

I 1990'erne satte forskerne David Bartel og Jack Szostak sig for at udvikle en RNA-kopimaskine i laboratoriet. De brugte "kunstig evolution" til at udvikle et RNA-molekyle med helt nye egenskaber (se faktaboksen på næste side). Til deres store overraskelse fiskede de et ribozym ud af deres eksperiment, der kunne sætte to RNA-molekyler sammen. De viste dermed, at RNA kan udføre den reaktion, som skal til for at bygge RNA-kæder. Og de sandsynliggjorde samtidig, at en RNA-kopimaskine kunne have eksisteret.

Siden dette gennembrud er ribozymet blevet videreudviklet i forskellige laboratorier verden over for at gøre det mere og mere effektivt til at kopiere RNA. En interessant udvikling skete i 2018, hvor Philipp

Holliger, James Attwater og andre ved Cambridge University i England fik RNA-kopimaskinen til at kopiere lange RNA-streng. I deres udviklingsforsøg brugte de større byggesten (tri-nukleotider), der gjorde processen mere effektiv. Og så satte de RNA-kopimaskinen i fryseren, hvilket førte til opkoncentrering og stabilisering af kopierings-processen.

Under forsøgene blev RNA-kopimaskinen bedre og bedre, men så skete noget uventet. RNA-kopimaskinen blev pludselig dobbelt så stor. Det viste sig, at den havde "kapret" en misfoldet version af sig selv, og overraskende nok var dette dobbelte RNA-polymerase-ribozym nu endnu mere effektivt. Man kan sige, at der skete en form for "symbiose", da et samarbejde opstod mellem to RNA-molekyler, der gjorde dem begge mere effektive. Forskerne viste, at RNA-polymerase-ribozymet kunne producere kopier af sig selv, og på den måde så de første selv-kopierende RNA-kopimaskiner dagens lys.

RNA-kopimaskinen under mikroskopet

For at få en dybere forståelse af RNA-kopimaskinen har vi studeret den med såkaldt kryoelektronmikroskopi (se faktaboks). Det skete som et samarbejde mellem Philipp Holligers gruppe i Cambridge og Ebbe Andersens gruppe på Aarhus Universitet. Ud fra mikroskopibillederne kunne vi rekonstruere en 3D-model af RNA-polymerase-ribozymet, hvilket gav os et unikt indblik i, hvordan det var sammensat og virkede. Overordnet har ribozymet form som en hånd og ligner dermed protein-baserede polymeraser. Vi kunne også observere, hvordan de to enheder af ribozymet sidder sammen og forklare, hvordan de tilsammen understøtter, at den RNA-streng, der skal kopieres, placeres og bindes i reaktionscenteret. Denne opbygning ser man også i visse polymerase-proteiner og forklarer, hvorfor samarbejdet mellem to enheder gør ribozymet bedre.

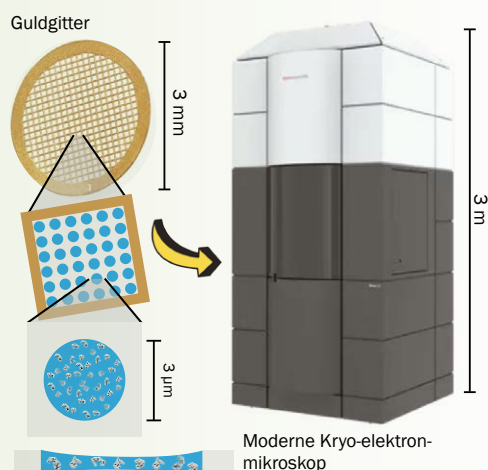
Vores 3D-model afslørede også RNA-kopimaskinens "korrekturlæs-

Kryogen elektronmikroskopi

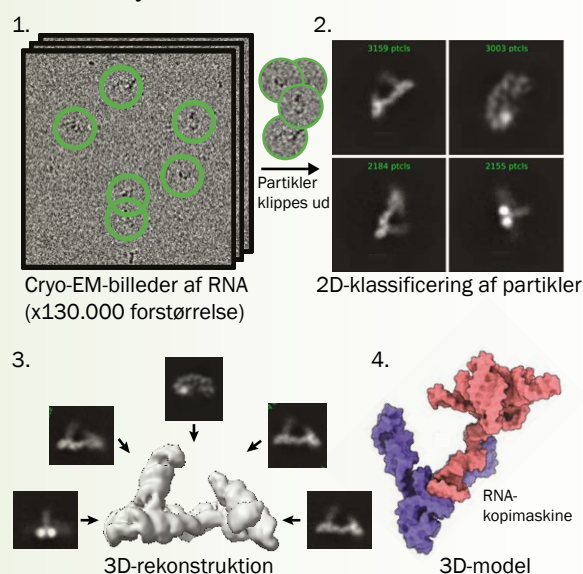
Kryogen elektronmikroskopi er en populær metode til at bestemme den 3-dimensionelle struktur af biomolekyler. Metoden fungerer ved, at en prøve af biomolekyler dryppes på et gitter og hurtigfryses til meget lave temperaturer (-200 °C). På den måde opnår man, at biomolekylerne fanges i en gennemsigtig is. I mikroskopet skydes elektroner på prøven, og de afbøjes, når de rammer biomolekylerne. Derved får man et billede, der er mørkt, hvor biomolekylerne har afbøjet elektronerne, og lysere hvor der kun er is.

Nu tager man tusindvis af billeder, som analyseres med en computer, hvor molekylerne bliver identificeret i isen som små mørke partikler (se trin 1). Disse partikler bliver klippet ud og klassificeret i 2D ud fra de forskellige orienteringer af partiklerne (trin 2). Man skal gerne have mange partikler i alle de forskellige orienteringer, som molekylet kan have, og til denne proces skal man bruge tusindvis af partikler set fra alle retninger. Efterhånden som 2D-klassificeringen forløber, ser man sit molekyle bedre og bedre. Til sidst bestemmes den 3-dimensionelle struktur ud fra de forskellige orienteringer i 2D (trin 3). Under optimale betingelser kan man med denne teknik se de enkelte atomer i biomolekylet og bygge en atomar model (trin 4).

Vi har brugt denne teknik til at bestemme strukturen af RNA-kopimaskinen, der her vises som rød og lilla (nederst til højre). Den lilla enhed repræsenterer den støtte-enhed, der som støtter funktionen af den røde enhed, som er ribozymet. Sammen gør de reaktionen mere effektiv. Det er i den røde enhed, at den katalytiske kerne findes – altså den, som giver ribozymet sin funktion og gør det i stand til at kopiere RNA.



Dataanalyse:



nings"-domæne, som er med til at sikre, at der ikke opstår fejl under kopieringsprocessen. Strukturen forklarede, hvordan dette domæne genkender de nye tri-nukleotider og sørger for, at de bliver indbygget i RNA-kopien på den rette måde.

Ved at koble 3D-modellen med mutationsdata kunne vi se, præcis hvilke områder der var vigtige for kopieringen og dermed opstille en mere præcis model for, hvordan RNA-kopimaskinen fungerer.

En fascinerende opdagelse ved dette var, at et RNA-molekyle, der er udviklet i et reagensglas, har adopteret så mange egenskaber som også findes i naturligt udviklede

protein-baserede polymeraser.

Gennem kunstig evolution har forskere altså lavet en RNA-kopimaskine og vist, at RNA besidder de funktioner, der skal til for at gøre RNA-verdenen mulig. Vores forskning har bidraget til dette og kastet lys over de underliggende processer, der giver kopimaskinen sin funktionelle struktur. Men – for der er et stort men – den nuværende RNA-kopimaskine er ikke i stand til at kopiere sig selv effektivt nok til, at vi kan hævde, at RNA-verdenshypotesen er bekræftet. Godt nok kan kopimaskinen kopiere sig selv, men den er så dårlig til det, at det svarer til, at alle mennesker i Danmark tilsammen kun kunne producere ét

barn. Det er klart, at den effektivitet er ikke bæredygtig, og med tiden vil populationen bukke under. Vi skal derfor have effektiviteten op med mere end tusind gange, før vi endegyldigt kan sige, at RNA-kopimaskiner kunne have udgjort livets oprindelse.

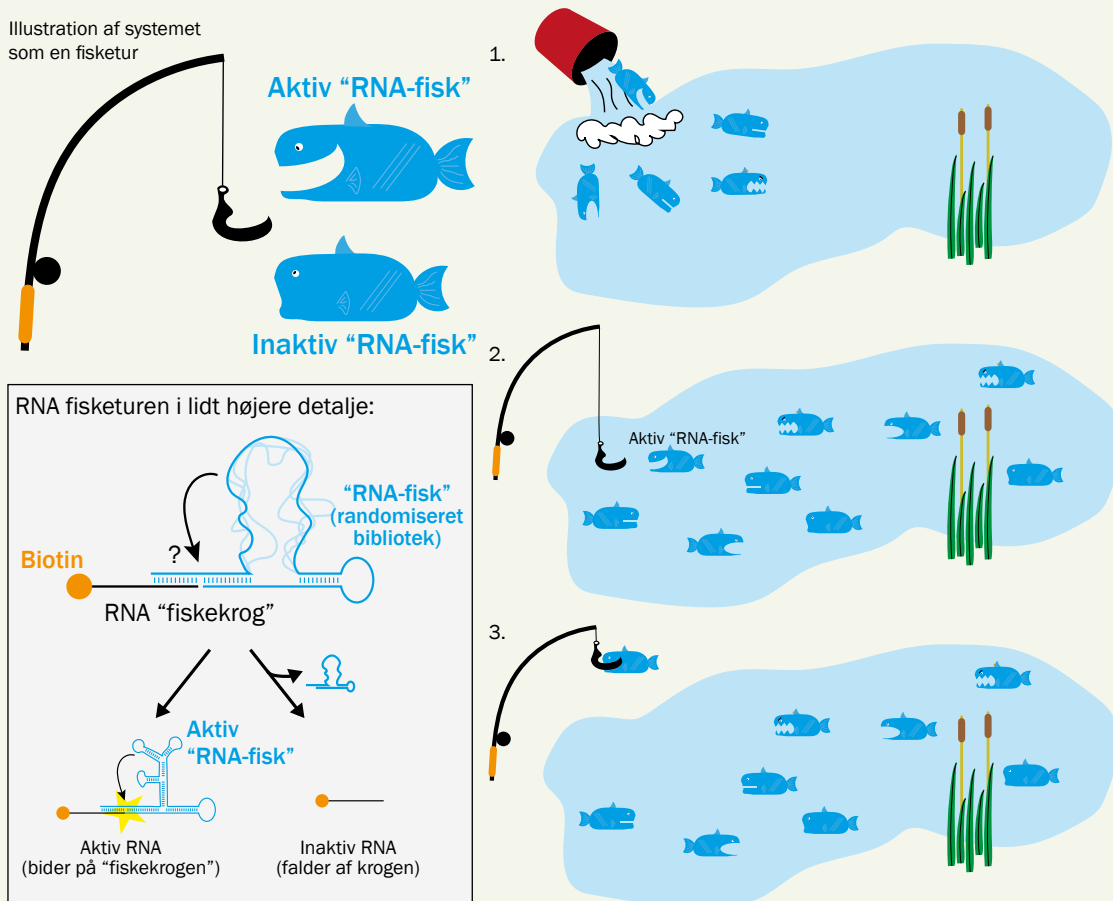
Arbejder på at gøre RNA-kopimaskinen mere effektiv

Nogle vil måske hævde, at RNA, der kan kopiere sig selv, ikke er levende. Men som vi har argumenteret ovenfor, indeholder et sådant selv-kopierende system et af de vigtigste elementer for liv, nemlig at det kan udvikle sig evolutionært.

Hvad skal der ellers til for at danne

Kunstig evolution – udvikling af funktionelle RNA-molekyler

Illustration af systemet som en fisketur



En vigtig metode til at udvikle molekyler med nye egenskaber i laboratoriet kaldes kunstig evolution. Denne metode kan sammenlignes med en molekylær fisketur – i denne sammenhæng i en sø fyldt med RNA-fisk. I praksis er søen med RNA-fisk et enormt bibliotek af forskellige RNA-sekvenser. I Bartel og Szostaks eksperiment med at udvikle en RNA-kopimaskine tilbage i 1990'erne var disse RNA-sekvenser op til 220 baser lange, og de bestod af helt tilfældige baser. Det skabte en helt enorm mulighed for variation i sekvenserne (husk på, at der er fire forskellige baser, der kan sidde på hver plads, så en 220 baser lang sekvens giver altså 4^{220} mulige kombinationer). Spørgsmålet var, om der fandtes et aktivt RNA-molekyle i biblioteket, som kunne overleve Bartel og Szostak's kunstige evolution.

Konkret søgte Bartel og Szostak efter RNA, der kan sætte RNA-molekyler sammen, og de fremstillede derfor en "RNA-fiskekrog", der binder sig til de aktive RNA-sekvenser i søen, der har netop den egenskab.

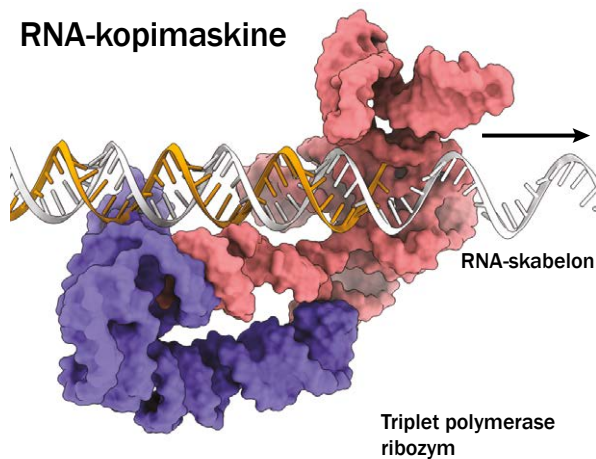
Når en RNA-fisk på den måde bed på krogen, kunne Bartel og Szostak undersøge dens RNA-sekvens, og de kunne også kopiere RNA-molekylet og indføre nye mutationer for derved at lave et nyt bibliotek, der indeholdt variationer af den oprindelige RNA-sekvens. Ved at gentage denne fiskeproces mange gange selekterede Bartel og Szostak hver runde for de "RNA-fisk", der var

bedst til at bide på krogen. I processen blev Bartel og Szostaks RNA-molekyler en milliard gange bedre til at sætte sig på krogen, inden de stoppede.

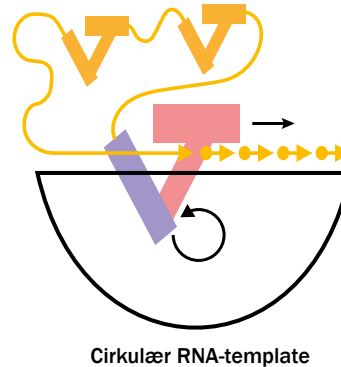
Selv hvis der i starten kun havde været ét RNA-molekyle i hele bibliotekets milliarder af sekvenser, der bare besad en smule aktivitet, kan man med fisketur-strategien fange og udvikle de funktionelle RNA-sekvenser, så de bliver bedre og bedre. Til sidst vil man, hvis man har lavet sine forsøg ordentligt, stå med et effektivt ribozym, der er specialiseret til den proces, man har selekteret for.

Som allerede nævnt er der et helt enormt antal mulige RNA-sekvenser. En kun 10 baser lang sekvens har således 1.048.576 mulige kombinationer, og i biblioteker større end cirka 50 baser er det ikke praktisk muligt at have alle de mulige sekvenser. Ved 150 baser skulle man i så fald bruge alle atomer i hele universet. Alligevel blev den oprindelige RNA-kopimaskine (på 220 baser, som har 10^{132} mulige sekvenser) fundet i et bibliotek, hvis praktiske størrelse kun var på cirka 10^{15} forskellige sekvenser, altså en lille bitte fraktion af de mulige sekvenser. Men alligevel hev Bartel og Szostak en RNA-kopimaskine ud. Det tyder på, at RNA-kopimaskine-funktionen slet ikke er så sjælden, som man kunne tro, og det siger derfor også noget om sandsynligheden for, at sådanne molekyler kunne opstå i en RNA-verden.

RNA-kopimaskine



Cirkel-kopiering



Til venstre ses RNA-kopimaskinen (rød og lilla), som kan forlænge en RNA-streng (gul) på en RNA-skabelon (hvid). Pilen indikerer den retning, som RNA-kopimaskinen er ved at forlænge den gule streng.

I fremtiden kan kopimaskinen måske blive så aktiv, at den kan lave flere af sig selv gennem en proces, der hedder rullende cirkel-kopiering (til højre), og som er kendt fra simple vira. I illustrationen er RNA-kopimaskinen (rød og lilla) ved at forlænge en streng (gul) på en cirkulær RNA-skabelon-streng (sort). På en lineær skabelon-streng vil kopi-maskinen stoppe, når den kommer til enden af strengen og falde af. Men på en cirkel vil den kunne fortsætte rundt og rundt og få cirklen til at rulle. RNA-kopimaskinen vil da kunne køre flere omgange omkring cirklen. Hvis RNA-kopimaskinen er kodet i cirklen, vil flere og flere af disse dannes i den forlængede streng og kan i princippet hjælpe med til kopieringen af sig selv.

et levende system? Her kan vi blive inspireret af NASA's definition af liv som "et selv-opretholdt kemisk system i stand til darwinistisk evolution", som fortæller os, at livet ud over at skulle kunne udvikle sig evolutionært også skal være selv-opretholdende.

For at nå dertil kræves, at RNA-kopimaskinen bliver effektiv nok til, at hver RNA-kopimaskine laver mindst én funktionel kopi af sig selv. For først i det tilfælde vil der kunne opretholdes en stabil population af kopimaskiner, som evolutionen kan "virke på".

Denne udfordring kan måske overkommes ved at udvikle yderligere på RNA-kopimaskinen i laboratoriet. I Emil L. Kristoffersens forskningsgruppe på Aarhus Universitet arbejder forskerne netop med at gøre det, hvor viden om virus' simple kopieringsstrategier udnyttes til at øge effektiviteten. Hvis dette lykkes, og et sådant system fodres med RNA-nukleotider bygget af præbiotisk, kemiske synteseveje, vil en RNA-kopimaskine både være selv-opretholdende og have evnen til at

udvikle sig evolutionært (og derved kunne siges at være levende).

Kan vi skabe liv i laboratoriet?

For at danne et selvopretholdende kemisk system, som ligner livet, som vi kender det i dag, er det dog ikke nok med en RNA-kopimaskine. Man skal også danne en celle med en metabolisme, som kan dele sig til nye celler. Men hvornår opstod cellen? Var det før eller efter livet? Eller er cellens opståen lig med livets opståen?

Flere forskningsgrupper over hele verden arbejder med den teori, at livet opstod sammen med cellen. For at kunne besvare dette spørgsmål forsøger de at efterligne cellulære processer og metabolisme ved at bygge dem fra bunden. En stor udfordring i den forbindelse er at få de enkelte cellulære elementer integreret i ét system, som derved kan kaldes levende. Denne forskning kan være med til at afdække, hvor komplekst et system der skal til for i sin tid at starte livet, og hvor mange komponenter af eksisterende biologi, man er nødt til at genopfinde for at kunne genopfinde livet i laboratoriet.

Vi vil slutte med at gentage, at videnskaben stadig ikke har afdækket, hvordan livet er opstået på Jorden. Men RNA-verdshypotesen giver et godt bud på, hvordan præbiotisk kemi kan have lavet RNA-kæder, der kunne kopiere sig selv og derved danne det første selvopretholdende evolutionære system.

Men da dette originale liv desværre er forsvundet, må vi studere de betingelser, dette RNA-baserede liv kan være opstået under ved at forsøge at genskabe det fra bunden. Det første trin er RNA-kopimaskinen, næste en celle og til sidst – muligvis – en hel RNA-baseret organisme, hvor kopiering og metabolisme varetages udelukkende af RNA-molekyler hjulpet på vej af kemiske forbindelser, der optages fra omgivelserne. Hvis vi lykkes med det, kan det vise en vej til, hvordan RNA-verdenen har ført til liv.

Præbiotisk kemi og RNA-verdner på andre planeter vil i så fald måske have givet det samme udfald. Og måske er livet slet ikke så unikt, som vi går og tror? ■

Videre læsning
Morten Busch. RNA-forskere tager os tilbage til livets oprindelse. sciencenews.dk, den 20. februar 2024.

Emil Laust Kristoffersen: Da livet opstod. 2024. Aarhus Universitetsforlag. En bog i serien ScienceFaction.

Ewan K. S. McRae et al.: Cryo-EM structure and functional landscape of an RNA polymerase ribozyme. PNAS January 11, 2024. doi.org/10.1073/pnas.2313332121

Emil Laust Kristoffersen, Matthew Burman, Agnes Noy, Philipp Holliger (2022): Rolling circle RNA synthesis catalyzed by RNA. eLife 11:e75186. doi.org/10.7554/eLife.75186

E. Kristoffersen, E. McRae, N. Sørensen, P. Holliger, E. Andersen (2025): Roles of dimeric intermediates in RNA-catalyzed rolling circle synthesis. Nucleic Acids Research. doi.org/10.1093/nar/gkaf057

Om forfatterne



Jonas Stage Sø er postdoc ved Biologisk Institut, Syddansk Universitet. I sin forskning undersøger han methan og CO₂-frigivelse fra ferske vande samt deres lagring af kulstof ved sedimentation. Jonas er fokuseret på kulstofbudgetter i søer og damme, og hvordan de spiller en aktiv rolle i klimadebatten.

jonassoe@biology.sdu.dk



Kaj Sand-Jensen er professor i ferskvandsøkologi ved Biologisk Institut, Københavns Universitet. Forfatter til bøger om biodiversitet, Danmarks natur, planters evolution, almen økologi og ferskvandsøkologi.

ksandjensen@bio.ku.dk



Theis Kragh er lektor i ferskvandsøkologi ved Biologisk Institut, Syddansk Universitet. Han forsker i kulstof- og fosforomsætning i søer samt fiskeøkologi.

tkragh@biology.sdu.dk

Forskningen er støttet af bevillinger fra Det Frie Forskningsråd og Aage V. Jensens Natufond.

Ny teknologi sætter tal på SØENS METHAN-BOBLER

Ved hjælp af nyudviklet måleudstyr kan vi nu sætte tal på en vigtig proces i naturen, nemlig hvor meget methan der tabes fra søer og damme til atmosfæren.

Vi kan endda skelne mellem, om dette tab foregår som bobler af methan eller ved diffusion.

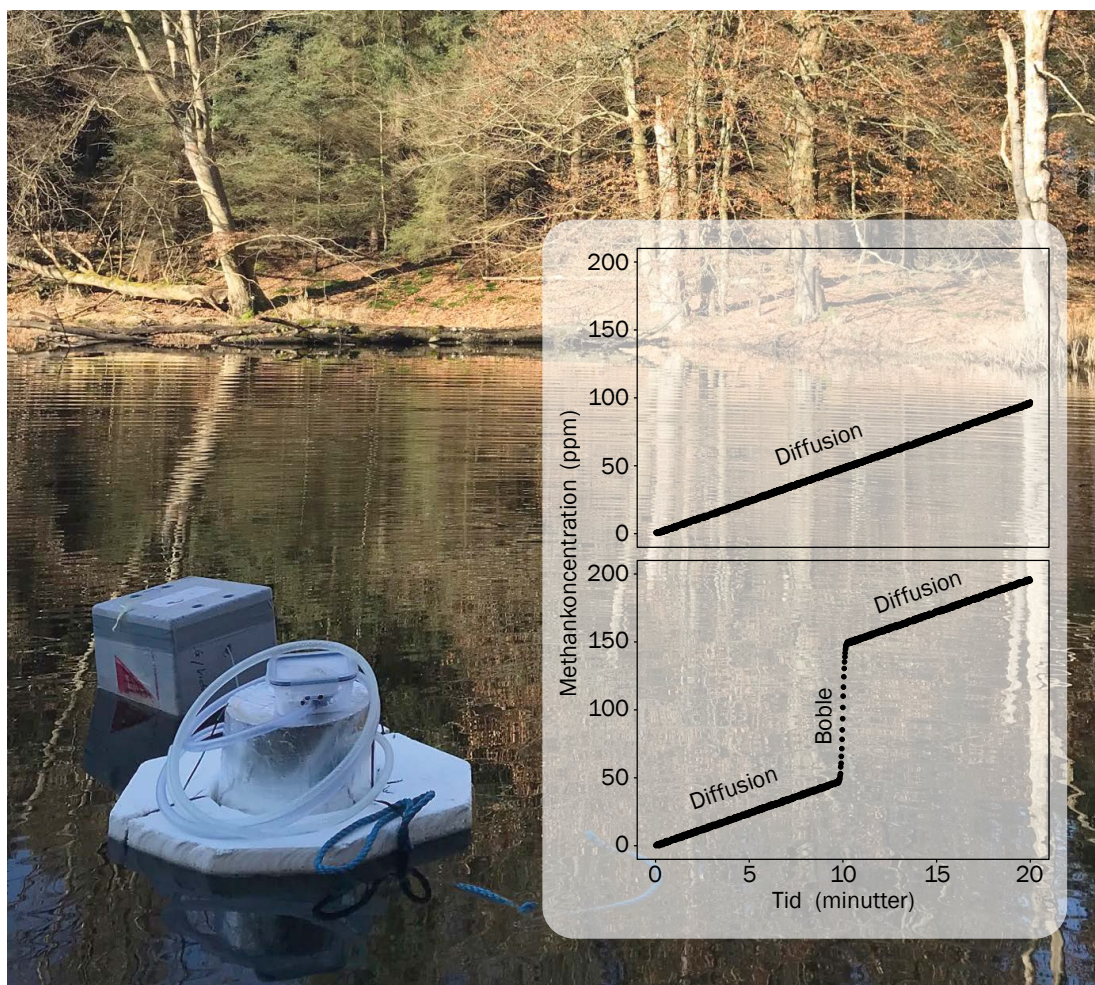
Methan (CH₄) dannes under iltfrie forhold i sedimentet på bunden af søer og damme, hvorefter det stiger op til overfladen og tabes til atmosfæren fra overfladen. Da methan er en kraftig drivhusgas, er det vigtigt at vide, hvor stor dette tab af methan til atmosfæren er for at kunne vurdere effekten på klimaet. Hidtil har det dog været vanskeligt at måle methantabet direkte. Men nu har vi udviklet udstyr, som hurtigt og billigt kan klare opgaven.

Tabet af methan til atmosfæren sker som methan opløst i vandet, der "diffunderer" fra vandover-

fladen assisteret af turbulens i overfladen. Men methan tabes også som bobler, der frigives fra sedimentet og hurtigt stiger op gennem vandsøjlen og undviger til luften. Mens den turbulente diffusion af molekyler fra overfladen ikke kan ses, kan methanbobler ofte observeres som en vedvarende strøm af bobler fra sedimentet på bestemte steder. Med en tændt lighter lige over vandet i et lokalt område med store bobler, kan methangassen endog påvises, fordi flammen blusser op. Om vinteren fanges methanboblerne i isen, og i takt med, at isen bliver tykkere, fanges stadigt flere bobler, igen på bestemte steder.

Nyt udstyr måler både bobler og diffusion

Længe har det været svært at måle methantabet både ved diffusion og som bobler. Det udstyr, vi nu har udviklet, består af flydekamre, der placeres på vandoverfladen. De er udstyret med en automatisk methansensor – og tillige med sensorer til at måle temperatur og vanddamp for at kunne udføre beregningerne – så vi løbende hvert andet sekund kan beregne methanindholdet i luften inde i flydekammeret. Kammeret er desuden udstyret med en pumpe, så vi med valgte intervaller (for eksempel hver time i døgnet) kan udskifte luften i kammeret med ny atmosfærisk



1. På billedet ses udstyret i form af et flydekammer fyldt med atmosfærisk luft; i luften findes en methansensor. (Se også figuren på næste side.) Kassen ved siden af indeholder batteri. Figuren viser målinger af methanfrigivelsen fra en dam. Graferne viser henholdsvis methantab ved diffusion (øverst) og methantab ved diffusion og en boble (nederst). Enheden ppm angiver antal methanmolekyler per million luftmolekyler i kammerluften. Til tiden 0 er kammerluften netop blevet udskiftet med atmosfærisk luft, som har et meget lavt methanindhold. Foto/Illustration: Jonas Stage Sø

luft fra omgivelserne. Målingerne kan således startes på ny med det naturlige udgangspunkt af methan i kammerluften som i atmosfæren.

Nu ses den diffusive frigivelse af methan fra vandet som en lineær stigning i koncentrationen i kammerluften. Ankommer en methanboble, stiger kammerets koncentration pludseligt (se figur 1). Forløbet registreres løbende, og efterfølgende kan de to typer af methantab beregnes ved hjælp af programmer, vi har udviklet til formålet og som kan tilgås via internettet.

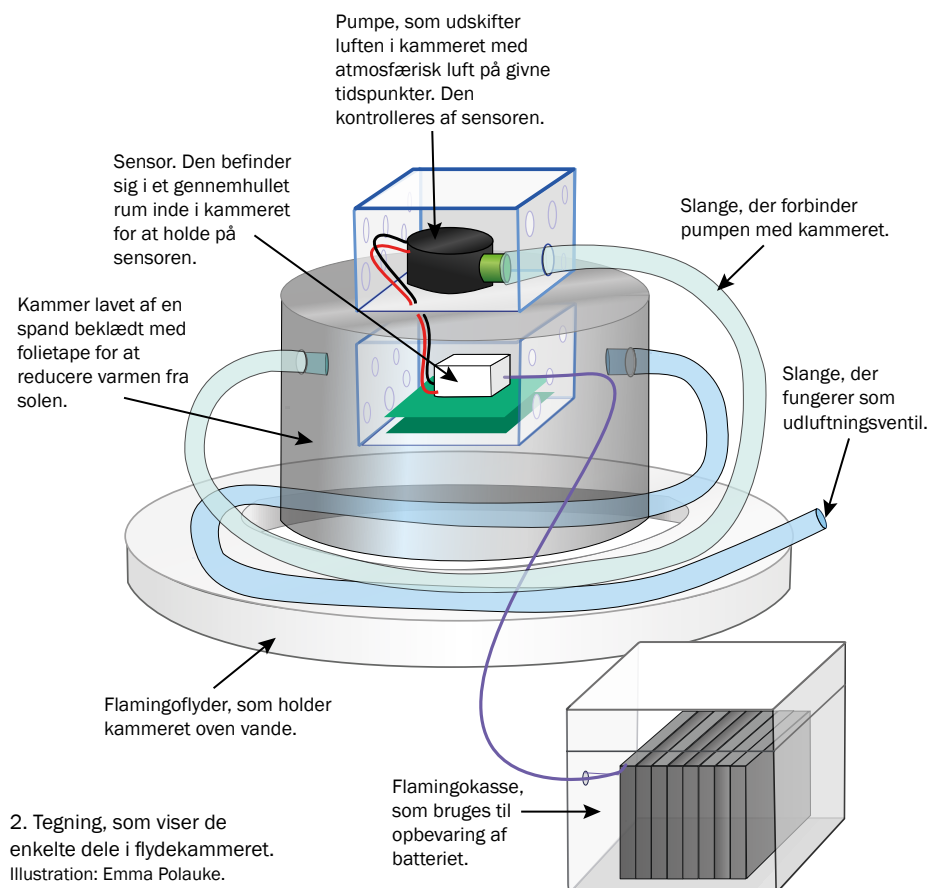
Det er vigtigt, at luften i kammeret kan udskiftes løbende (som den

netop kan i vores udstyr), for ellers opstår der med tiden ligevægt mellem koncentrationen af methan i vandet og luften i kammeret. Og så stopper udvekslingen og muligheden for at beregne den naturlige afgasning. Kamre uden udluftning kan således ikke måle methanafgasning med mindre, man manuelt løfter og lægger kammeret på vandet igen med korte mellemrum dag og nat.

Udstyret måler methantabet både ved diffusion og som bobler. Metoden er både meget hurtigere, har høj tidsopløsning og er uden de problemer, som hidtidigt udstyr til måling af methanbobler, såkaldte boblefælder, har.

Methanens veje fra sedimentet til atmosfæren

Transporten og omsætningen af methan undervejs fra sedimentet gennem vandet til atmosfæren er forskellig, afhængig af om methan findes i opløst form i vandet eller som bobler. Ved lav methanproduktion i sedimentet kan den langsomme molekyllære transport ved diffusion fra sediment til bundvandet følge med produktionen i sedimentet, uden der dannes bobler. Men ved høj methanproduktion kan tabet ved molekyllær diffusion ud af sedimentet ikke følge med, hvorfor der dannes bobler. Tab af methan via bobler er derfor knyttet til høj produktion af de methandannende

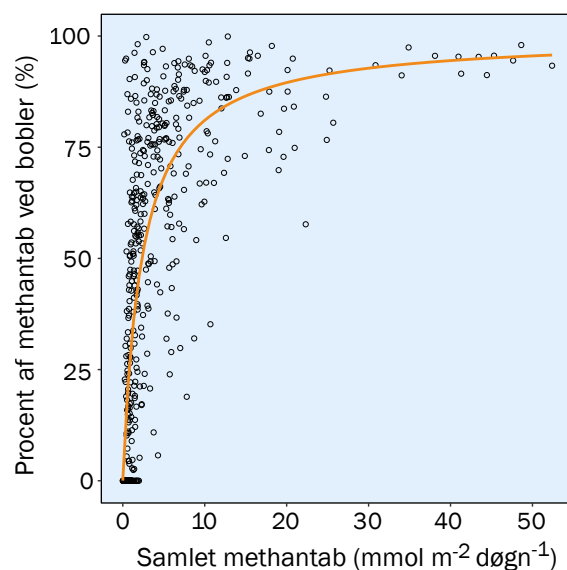


2. Tegning, som viser de enkelte dele i flydekammeret.
Illustration: Emma Polauke.

3. Figuren viser procentdelen af det samlede methantab, som sker ved bobler. Den orange linje beskriver en hyperbolsk sammenhæng mellem disse.

Det fremgår af grafen, at methantabet som bobler udgør en stadig større andel, jo større det samlede tab er, og nærmer sig 100% for de største værdier.

Methantabet er angivet i mmol per kvadratmeter per døgn. Da methan (CH_4) har molekyelvægten 16, svarer 1 mmol til 16 mg methan.



bakterier. Og bakteriernes aktivitet og produktion fremmes af let omsætteligt organisk stof i sedimentet og høje temperaturer.

Når methanen frigives fra sedimentet ved diffusion til vandet, er der både mulighed for, at det oxideres af bakterier til CO_2 i sedimentets overflade og i selve vandet; eventuelt på overfladen af vandplanter. Methanbobler vokser sig til gen-

gæld store i sedimentet, indtil deres opdrift overvinder den fysiske modstand i sedimentet. Herefter stiger boblerne hurtigt op gennem vandet. På lavt vand (< 10 m), opløses blot en mindre del af boblen under opstigningen – mindst for store bobler med lille overflade i forhold til volumen, mest for små bobler med stor overflade i forhold til volumen.

Vi kan derfor logisk forvente, at

bobletabets andel af det samlede methantab fra vandoverfladen til atmosfæren stiger med øget methanproduktion. Og det er netop, hvad vi ser i vores målinger.

Når bobletabet tager over

Så længe det samlede methantab til luften er lavt, sker tabet som nævnt især ved diffusion fra vandoverfladen assisteret af turbulente hvirvler i overfladen (se figur 3). Ved et samlet dagligt methantab på 1,5–1,6 mmol methan per kvadratmeter er tabene ved diffusion og som bobler lige store, men ved et dagligt tab på 5–6 mmol methan per kvadratmeter udgør boblerne 75% af det samlede tab. Ved endnu højere methantab stiger boblernes andel til 90% eller mere.

Størrelsesfordelingen af de målte methantab afspejler den øgede betydning af methantab fra bobler. Det indebærer, at de samlede bobletab fra de undersøgte danske søer og damme på årsbasis markant overstiger tabene ved diffusion. De samme markante forskelle finder vi ved at inddrage alle udenlandske målinger, der findes i litteraturen. I de næsten 1000 målinger, vi har samlet fra Danmark og resten af verden, udgør methan som bobler 75–83% af det samlede tab.

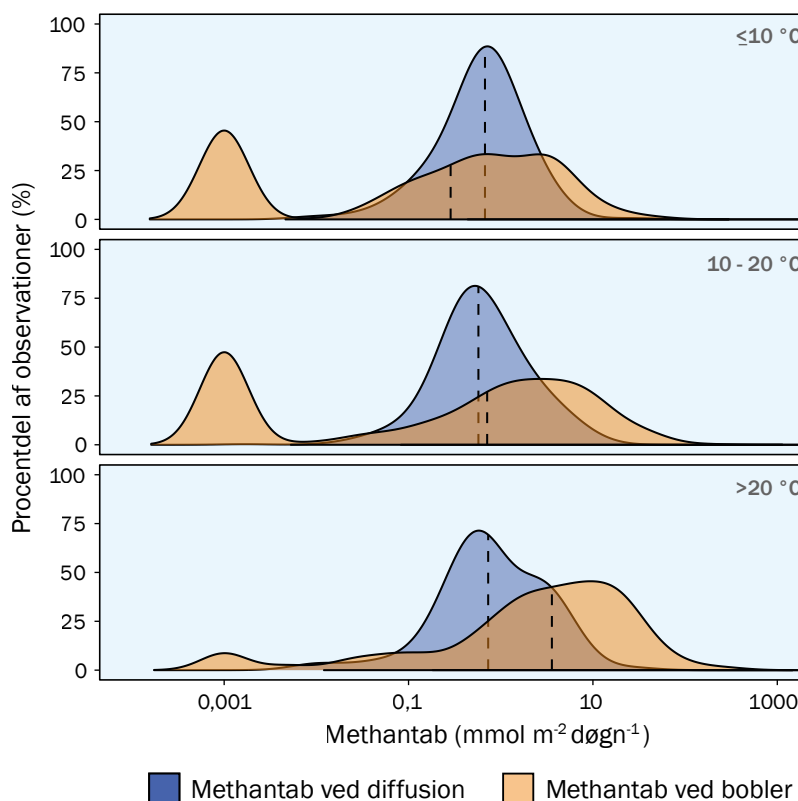
Fra Danmark til troperne

Højere temperaturer øger markant nedbrydningen af organisk stof i sedimentet, og methandannelsen stiger forholdsvis mere end CO_2 -dannelsen ved øgede temperaturer. Typisk stiger methandannelsen 4–5 gange og CO_2 -dannelsen 2 gange, når temperaturen øges med 10 grader (se figur 4). Om sommeren herhjemme udgør methantabet derfor en samlet større andel af gastabet end om vinteren. Men methan tabes fortsat om vinteren og fortsat også som bobler, især i næringsrige damme, der dækkes af is, hvor bundvandet overalt bliver iltfrit.

Ser vi fra Danmark og andre tempererede områder mod troperne, foregår langt det største tab i de varme

4. Fordeling af methantabet ved diffusion og som bobler ved tre forskellige temperaturintervaller. Methantabet er vist på logaritmiske akser for at kunne vise hele spændvidden på 1 million fra laveste til højeste værdier. Men da logaritmen kun er defineret for positive tal, har vi lagt 0,001 til, for at nul-værdier kan komme med. Toppen, der ses ved 0,001, betegner derfor procentdelen af observationer, hvor der ingen bobletab er observeret. De lodrette stiplede linjer viser medianen med 50% af værdierne under og 50% over.

Under 10 °C ligger medianen for bobletabet lavere end medianen for diffusionstabet, men omvendt over 20 °C ligger medianen for bobletabet markant over diffusionstabet. Medianen for diffusionstabet varierer meget lidt med øget temperatur, mens medianen for bobletabet stiger særdeles meget (mere end 12 gange) med øget temperatur. Bemærk også, at bobletab nær nul stort set forsvinder ved høje temperaturer.



lande som bobler, fordi methanproduktionen fremmes så kraftigt af de øgede temperaturer. Målingerne er fortsat ret få i tropenerne. De er derfor de områder på Kloden, hvor det er særlig vigtigt at få flere målinger af methantabene for derved mere præcist at kunne angive størrelsen af de samlede globale methantab.

CO₂-udvekslingen måles med

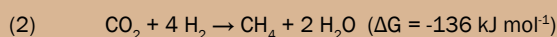
Vores flydekamre er også udstyrede med CO₂-sensorer, som måler koncentrationen i kammerluften, så udvekslingen mellem vandet og luften kan beregnes. Da CO₂ i modsætning til methan er meget opløseligt i vand, dannes der ikke CO₂-bobler i sedimentet. Udvekslingen mellem vandet og luften sker udelukkende ved diffusion.

Mens methan altid frigøres fra vandet til luften, kan CO₂ gå begge veje. På forårs- og sommerdage med intensiv fotosyntese er vandet i søer og damme ofte undermættet med CO₂, som derfor optages fra luften. Men det meste af året og om natten med overvejende respiration, CO₂-dannelse og overmætning, tabes CO₂ fra vandet til luften. På denne vis kan flydekamrene sætte

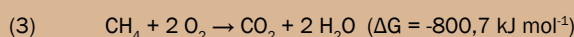
Processer der danner og fjerner methan

Methan både dannes og fjernes i søer og damme. Methandannelsen skyldes methandannende bakterier, som nedbryder dødt organisk stof for at skaffe sig energi til vækst. Methandannelsen sker især under iltfrie forhold nede i bunden. Endvidere må andre elektron-acceptorer såsom nitrat, sulfat og jernoxid ikke være til stede, da de foretrækkes af andre bakterier, fordi de leverer mere energi ved nedbrydning af det organiske stof, end methandannelsen gør. Først når oxygen, nitrat, sulfat mv. er opbrugt, vil methandannelsen begynde. Energiudbyttet for mikroorganismerne ved methandannelse er blot mellem 1 og 5% af den energi, der opnås ved nedbrydning med oxygen af et molekyle glukose.

I ferskvand er de to vigtigste methandannende processer den acetoclastiske (1) og den hydrogenotrofiske (2). Den acetoclastiske udnytter acetat (eddikesyre) og står sandsynligvis for størstedelen af methandannelsen, mens den hydrogenotrofiske udnytter hydrogen. Forholdet mellem de to processer varierer alt efter tilgængeligheden af acetat og hydrogen.



ΔG , Gibbs frie energi, angiver energiudbyttet per mol af substratet. Methan, der dannes i søer og damme, vil med tiden enten tabes til atmosfæren eller, hvis det kommer i kontakt med oxygen, nitrat eller sulfat i vandet, vil det kunne nedbrydes (3; oxideres) til CO₂. Som navnet siger, kræver det et oxidationsmiddel, i eksemplet er benyttet oxygen (3). Når methan brændes af i et gasfyr, udnytter man den store varmeenergi, der frigøres.



Der findes op mod 200 substrater, som enten kan eller menes at kunne være med til at danne methan, men de to nævnte processer er de vigtigste.

På billedet ses et udsnit af den tilfrosne Bøllemosen. I isen opsamles der i bestemte områder methanbobler fra sedimentet umiddelbart under. Når isen vokser, fanges boblerne på nogenlunde de samme steder over tid. Så selv om de lave temperaturer om vinteren dæmper methanproduktionen, stopper den ikke fuldstændigt. Foto: Søren Jessen

Videre læsning:

Resultaterne fra denne artikel er fra en nyligt udgivet artikel i Biogeochemistry: Sø, J.S., Martinsen, K.T., Kragh, T. et al. Ebullition dominates high methane emissions globally across all lake sizes. Biogeochemistry 168, 43 (2025). doi.org/10.1007/s10533-025-01233-8

Læs mere om de processer, der producerer methan i søbunden i artiklen: På jagt efter methan-ventilen i verdens søer. Aktuell Naturvidenskab nr. 6/2023, side 30-35.



tal på den samlede gasudveksling for de to vigtigste klimagasser.

Da udstyret bygger på egenproduktion af kamre, samling af elektronik, pumpe, batterier mv. for en samlet pris på omkring 3000 kr. per kammer, har vi kunnet bygge mange kamre. Antallet er en anden forudsætning for at få gode opgørelser, da det er nødvendigt at kunne dække både de rumlige og tidslige variationer i udvekslingen af

methan og CO_2 . Det bliver derimod alt for dyrt, hvis det skal ske med kommercielt måleudstyr, der koster 300.000 kr. per kammer.

Methantabet er vigtigt, men kun en del af debatten

Vi er interesseret i at kende methantabet, fordi varmeeffekten af methan per vægt er 28 gange større end for CO_2 . Selv om atmosfærens methanindhold er meget lavere end indholdet af CO_2 , så udgør methans varmeeffekt 26% af CO_2 's varmeeffekt. Vores særlige interesse for søer og damme skyldes – udover, at vi er ferskvandsbiologer – at methantabet fra søer og damme skønsmæssigt udgør 15–19% af det samlede globale tab til atmosfæren, selv om det globale areal af søer og damme kun udgør 3% af det samlede landareal. Det forholdsvis store tab fra søer og damme skyldes, at de modtager meget organisk stof med vandet fra landjorden, og deres sedimenter er ofte iltfrie, så methan kan dannes.

Derimod er det et forkert at opfatte søer og damme som "skurke" i

klimadebatten – et synspunkt, vi har mødt. Det er helt naturligt, at de modtager meget organisk stof med vandet fra hele deres opland, der ved nedbrydning frigør CO_2 og eventuelt methan. Men samtidig tilbageholder de også permanent meget organisk stof med nitrogen og fosfor, som indbygges i et stadigt tykkere sediment. Sedimentationen forhindrer, at stofferne transporteres videre til kystvandene og der skaber iltvind og danner methan og svovlbrinte (dihydrogensulfid, H_2S).

Samtidigt opmagasinerer søer og damme vand ved kraftig nedbør og mindsker risikoen for oversvømmelser og kostbare tab længere nede i vandsystemerne. Endelig beriger vandet i landskabet naturen samtidig med, at biodiversiteten er høj og arterne ofte forskellige mellem de enkelte søer og damme. Så ved at omdanne dyrkede lavbundarealer til moser, søer og damme i forbindelse med Trepartsaftalen, mindsker man det samlede tab af drivhusgasser, skaber natur og biodiversitet og mindsker belastningen af de hårdt trængte kystvande. ■

Bliv studerende for en dag

Som **Studerende for en dag** følger du undervisningen på den uddannelse, du er interesseret i. Du spiser frokost med en studerende, som viser dig rundt - og du bliver klogere på, om uddannelsen er den rigtige for dig.

Besøg **Anvendt matematik, Biokemi og molekylær biologi, Biologi, Biomedicin, Datalogi, Farmaci, Fysik, Kemi, Medicinalkemi, Matematik, Matematik-økonomi** eller **Kunstig intelligens** på SDU i Odense.

Tilmeld dig på sdu.dk/nat/studerendeforendag

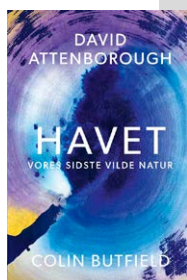
F A K T A



Henrik Kragh Sørensen og Mikkel Willum Johansen: *Algoritmer og ansvar*. Samfundslitteratur 2025. 280 sider, 349,- kr.

Algoritmer og ansvar

Hvordan og hvorfor er de computere, som findes i vores telefoner, biler m.m. blevet udviklet? Hvordan virker de – og kan vi stole på dem? Computere og informationsteknologi findes i dag alle steder i vores moderne liv. Det har givet dataloger og it-professionelle en central rolle i samfundet, men også et større ansvar. I den nye bog undersøger de to forfattere, hvad der videnskabssteoretisk karakteriserer de datalogiske fag, og hvad der adskiller dem fra andre områder af menneskelig viden. Bogen henvender sig til studerende på IT-uddannelser, men vil med sine etiske diskussioner også være relevant for mange IT-professionelle.



F A K T A

David Attenborough og Colin Butfield: *Havet – vores sidste vilde natur*. Forlaget Klim 2025. 376 sider, 349,95 kr.

Havet

David Attenborough går længere i sin bog, end han har gjort før, i sin kritik af vores grænseløse udnyttelse af klodens ressourcer med overfiskeri og bundtrawl. Havet er planetens "lunge", og hvis vi ikke tager vare på den sidste vilde natur, går det ud over hele kloden.



F A K T A

Jes Olaf Pepke Pedersen: *Fra lys til liv*. Forlaget Eksistensen 2025. 135 sider, 199,95 kr.

Fra lys til liv

En sejlivet myte siger, at naturvidenskab og kristendom udelukker hinanden. Man må vælge side i forståelsen af verden: Tror du på Big Bang? Eller tror du på, at Gud har skabt universet? For atomfysiker Jes Olaf Pepke Pedersen er der ikke tale om et enten-eller. I bogen udfordrer han myten om det stridbare forhold mellem naturvidenskab og kristendom, og han viser, hvordan man meningsfuldt kan leve med begge forklaringsmodeller.

F A K T A

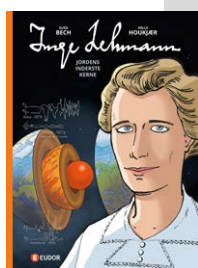


Gunver Lystbæk Vestergård: *Vores levende univers*. Videnskabens søgen efter rumvæsner og alt livs oprindelse. People's 2025. 300 sider, 249,95 kr.

Vores levende univers

Videnskabsjournalist Gunver Lystbæk Vestergård giver i bogen 'Vores levende univers' et unikt indblik i den nyeste viden om liv i rummet. Viden, der peger på, at liv måske er noget helt andet, end vi går og tror, og at vi muligvis står på kanten af et nyt verdensbillede. Aldrig før i historien har vi været så ivrige efter at vide, om der er liv i rummet. Og aldrig før har videnskaben taget jagten på det så alvorligt. Men måske vi hellere skulle spørge, hvilken form for liv der findes derude? I bogen følger Gunver Lystbæk Vestergård forskere fra hele verden og spørger: Hvad er liv? Hvor kan det være i rummet? Og hvordan finder vi det?

F A K T A

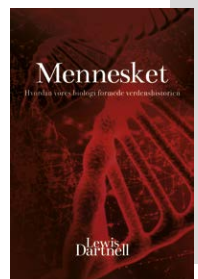


Sussi Bech og Helle Houkjær: *Inge Lehmann – Jordens inderste kerne*. Forlaget Eudor 2025. 96 sider, 250,- kr.

Inge Lehmann – Jordens inderste kerne

Inge Lehmann er en af Danmarkshistoriens allerstørste forskere: I 1936 opdagede hun Jordens inderste kerne. En ny dansk tegneserie af Sussi Bech og Helle Houkjær fortæller nu Inge Lehmanns liv i tekst og billeder, om hendes banebrydende forskning i jordskælv og om de hindringer, samtiden søgte at sætte for en kvindes forskerkarriere.

F A K T A

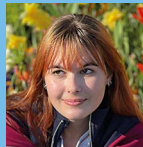


Bogdata: Lewis Dartnell: *Mennesket – hvordan vores biologi formede verdenshistorien*. Klim 2025. 364 sider, 299,95 kr.

Mennesket

Den unge, britiske professor Lewiss Dartnell dykker i denne bog ned i menneskehedens evolutionære historie og undersøger, hvordan de fundamentale aspekter ved os som menneskeart – vores iboende menneskelighed – har haft omfattende og vidtrækkende konsekvenser for verdenshistorien.

Om forfatterne



Antonina Kuziemska
stud-kuziemska@ruc.dk



Chaymaa El Eter
stud-chaymaa@ruc.dk



Nikol Mlynarcikova
stud-nikol@ruc.dk



Sagal Ali
stud-iimaan@ruc.dk

Alle fire er studerende på uddannelsen International Bachelor in Natural Sciences ved Roskilde Universitet

Vejleder:



Pia Nyeng er lektor, ph.d. Hun forsker i dannelsen af organer under fosterudviklingen, og underviser i celle- og molekylærbiologi.
pnyeng@ruc.dk

Alle ved Institut for Naturvidenskab og Miljø, Roskilde Universitet.



KUNSTEN AT STYRE HJERNENS BØLGER

Forskellige tilstande og tankeprocesser i hjernen afspejles i mønstret af hjernebølger, som man kan måle ved hjælp af elektroder sat på hovedbunden. Neurofeedback-terapi er en teknik, der går ud på at lære at kontrollere hjernebølge-aktiviteten – for eksempel for at dæmpe angstsymptomer.

Mange historier fra fiktionens verden har gennem tiden udforsket idéen om at påvirke hjernen gennem teknologi. I dag gør såkaldt neurofeedback den vision til virkelighed. Neurofeedback, eller elektroencefalografisk biofeedback (EEG-biofeedback), er en computer-baseret terapeutisk teknik, der er designet til at hjælpe folk med at regulere deres hjerneaktivitet med det formål at reducere generende symptomer. Teknikken indebærer at placere elektroder på hovedbunden for at måle hjerneaktiviteten, som

derefter analyseres af en computer. Klienten modtager feedback i realtid, såsom en video eller en lyd, der ændrer sig baseret på deres hjerneaktivitet. Når hjernen producerer de ønskede mønstre, opmuntrer feedbacken dem til at fortsætte. Over tid hjælper dette klienten med at lære at kontrollere sin hjerneaktivitet, hvilket fører til bedre fokus og større mental kontrol.

I denne artikel vil vi fortælle om de opdagelser, der ligger til grund for teknikken, og om vores projekt på bacheloruddannelsen i Naturvi-

denskab ved Roskilde Universitet, hvor vi undersøgte evidensen for at neurofeedback-terapi kan være en god mulighed for behandling af generaliseret angstlidelse.

Måling af hjernens aktivitet

I 1929 udførte den tyske psykiater Hans Berger eksperimenter, der viste, at den menneskelige hjerne har elektrisk aktivitet. Han placerede elektroder på hovedbunden, forstærkede signalerne og registrerede spændingsændringer fra hjerneaktiviteten. På den måde skabte han det første elektroence-

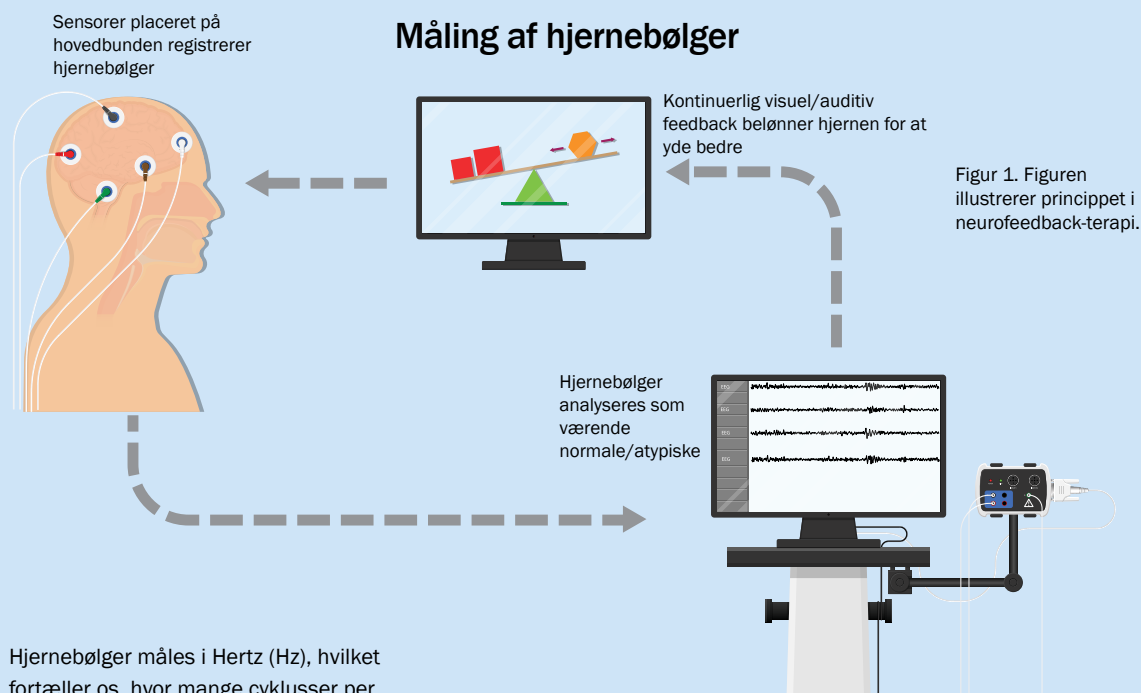


Illustration: Modificeret fra Shutterstock

Hjernebølger måles i Hertz (Hz), hvilket fortæller os, hvor mange cyklusser per sekund en bølge har (x-aksen viser tid), mens amplituden, vist på y-aksen (enhed mikrovolt), viser bølgens styrke eller intensitet. Forskellige hjernebølger er forbundet med forskellige mentale tilstande. Forskere og klinikere kan anvende forskellige definitioner af frekvensområderne afhængigt af deres metode eller formål. For eksempel bruges betegnelsen "høj beta" nogle gange om frekvenser helt op til 40 Hz, hvilket er relevant netop i forbindelse med tilstande som stress og angst. Men herved overlapper området med lav gamma (~30–40 Hz). Nogle modeller klassificerer endda "lav gamma" som en del af betaområdet, især inden for neurofeedback, hvor man lægger mere vægt på praktiske forskelle end på strenge definitioner.

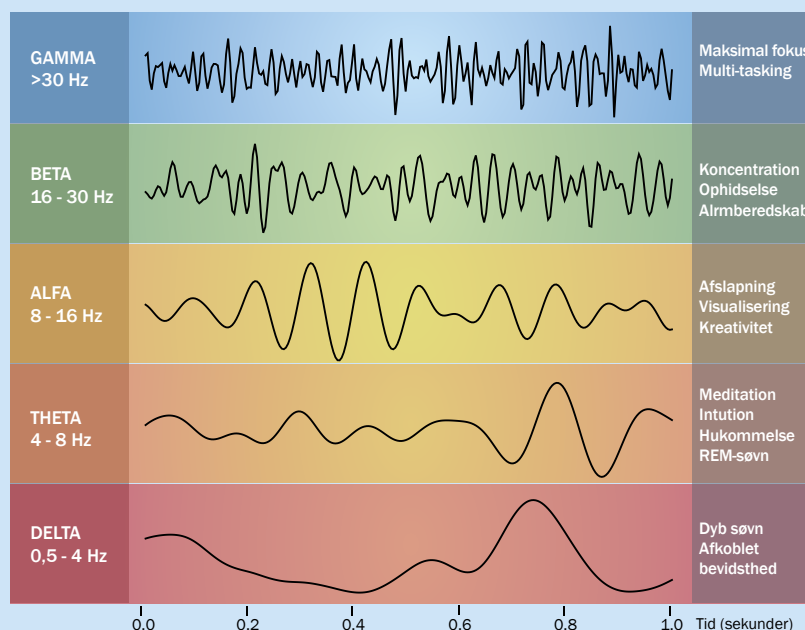


Illustration: Modificeret fra Shutterstock

falogram (EEG). Berger opdagede også, at mønstrene i EEG-signaler er forbundet med menneskets tankeprocesser.

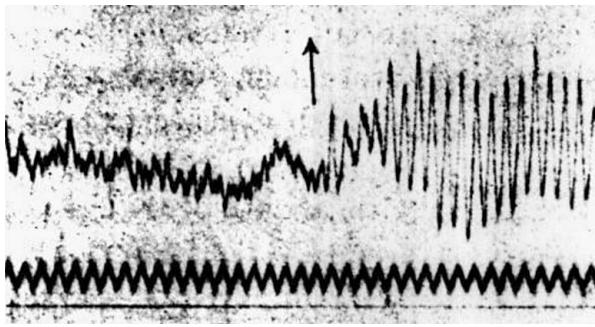
I dag er EEG et af de vigtigste ikke-invasive værktøjer til at danne billeder af hjerneaktivitet indenfor neurovidenskab og medicin. Man optager normalt hjerneaktivitet i 20-40 minutter ved hjælp af flere elektroder på hovedbunden. EEG-signalet måles ved at sammenligne en "aktiv" elektrode (placeret over et hjerneområde af interesse) med en referenceelektrode på et neutralt

punkt, for eksempel mastoidknoglen (den hårde knold på kraniet bag øret). En mere avanceret variant af teknikken er såkaldt kvantitativ EEG, også kaldet Brain Mapping. Her bruger man specialiseret software til at analysere, hvordan hjernen fungerer under forskellige opgaver. Det hjælper med at identificere, hvilke hjerneområder der er aktive og fungerer godt.

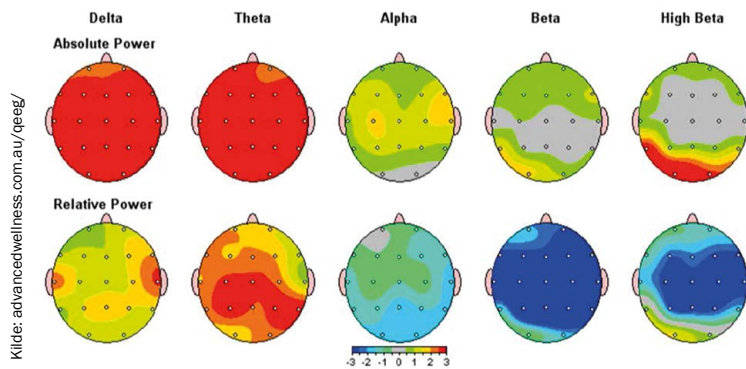
Sådanne hjernekort viser med forskellige farver, hvor der er højere og lavere aktivitet end normalt. Og det, der konkret måles, er såkaldte

hjernebølger. Hjernebølger er elektriske impulser, der inddeles i typer afhængig af hvor hurtigt de svinger, dvs. deres frekvens, som angives i Hertz (Hz); Delta-bølger (0,5-4 Hz), Theta-bølger (4-8 Hz), Alfa-bølger (8-13 Hz), Beta-bølger (13-30 Hz) samt Gamma-bølger (over 30 Hz).

De forskellige typer af hjernebølger afspejler forskellige tilstande i hjernen, hvor for eksempel Theta-bølger opstår under dyb søvn, mens Beta-bølger er aktive, når man fokuserer, tænker og – vigtigt i denne sammenhæng – har angst.



Figur 3. Billedet viser en tidlig EEG-optagelse lavet af Hans Berger, hvor han måler på sin 14. årige datter. Før pilen løser hun en regneopgave (196 divideret med 7), og her er hjernebølgerne små og hurtige. Man ser en tydelig ændring i hjernebølgerne, hvor hun er færdig med regnestykket, og hjernen går ind i en mere afslappet tilstand, hvor hjernebølgerne bliver større og langsommere. Efter Niedermeyer, E. (1997).



Figur 4: Figuren viser oversigtskort over hjernebølgefrequenser (Delta, Theta, Alfa, Beta og Høj Beta) med både absolutte og relative effektmålinger. Den øverste række viser absolut effekt, som angiver det rå aktivitetsniveau for hvert frekvensområde, mens den nederste række viser relativ effekt, som sammenligner styrken af den enkelte frekvens med den samlede hjerneaktivitet. De farvekodede kort viser afvigelser fra gennemsnittet, hvor rød angiver over-gennemsnitlig aktivitet og blå viser under-gennemsnitlig aktivitet.

Hjernebølger måles desuden også i forhold til, hvor kraftige de er – dvs. deres amplitude målt i mikrovolt.

Fra Pavlovs hunde til neurofeedback-træning

I en normalt fungerende hjerne er der en balance mellem bølgefrequenserne, som det er vigtigt at opretholde. Når én type hjernebølge dominerer for meget, kan det reducere hjernens fleksibilitet. Neurofeedback-terapi går således i praksis ud på at hjælpe patienten med at lære at kontrollere sine hjernebølger. Og måden, det foregår på, har udgangspunkt i to andre grundlæggende opdagelser kaldet klassisk og operant betingning. Klassisk betingning er en læringsproces opdaget af den russiske videnskabsmand og psykolog Ivan Pavlov i 1890'erne. I sine berømte forsøg med hunde lærte han dem at forbinde en neutral stimulus – i det konkrete tilfælde lyden fra en klokke – med noget meningsfuldt, nemlig mad. Ved at ringe med klokken, før hundene blev fodret, endte det med,

at hundene begyndte at savle blot ved lyden af en klokke, mens de før træningen kun savlede, når maden faktisk var til stede. Dette eksperiment viste, hvordan adfærd kan læres gennem associationer.

Princippet om klassisk betingning er blevet anvendt indenfor forskellige områder, herunder neurofeedback-træning, hvor folk lærer at kontrollere deres hjernebølger på nye måder, ligesom Pavlovs hunde lærte at forbinde klokken med mad.

En anden vigtig læringsteori er operant betingning, introduceret af den amerikanske adfærdspsykolog Burrhus Frederic Skinner. Inspireret af Pavlovs arbejde udførte Skinner eksperimenter med rotter og duer, hvor han brugte belønning og straf til at studere adfærd. Han identificerede forstærkning som en nøgelfaktor i læring og delte den op i to typer: positiv forstærkning, hvor belønning gives efter en handling for at øge sandsynligheden for, at handlingen gentages, og negativ

forstærkning, hvor en straf i form af en ubehagelig stimulus fjernes for at opnå samme effekt.

Skinners forskning viste, at både dyr og mennesker har en tendens til at gentage handlinger, der fører til positive resultater, og undgå dem, der medfører negative konsekvenser. For eksempel, hvis en rotte får mad efter at have trykket på et håndtag, vil den sandsynligvis trykke på håndtaget igen. Her er det at trykke på håndtaget den operante adfærd, mens maden fungerer som forstærkning.

På baggrund af disse principper undersøgte professor ved University of Chicago Joseph Kamiya i 1963, om mennesker bevidst kunne genkende og kontrollere deres egen hjernebølgeaktivitet. Han trænede deltagere i at registrere udbrud af afslappede alfa-hjernebølger ved at give dem verbal forstærkning, når de med succes kom ind i en alfa-tilstand. Dette eksperiment viste, at mennesker kan lære at regulere deres hjernebølgemønstre ved hjælp af positiv feedback, og det lagde grunden til neurofeedback-træning.

Neurofeedback mod mentale lidelser

Kamiyas arbejde banede vejen for træning i alfa-bølgeforstærkning, og kort efter begyndte forskere at anvende lignende teknikker på theta-bølger. Dette gjorde det muligt for deltagerne at opnå endnu dybere afslapningstilstande, hvilket fremmede følelsesmæssig indsigt og psykologisk udvikling. Herefter blev neurofeedback gradvist mere populært som en behandlingsmetode indenfor mental sundhed, hvor teknikken er blevet anvendt til en række lidelser.

Der mangler dog stadig grundige studier af neurofeedback-terapi med mange deltagere, men den foreliggende forskning tyder på, at neurofeedback-terapi kan hjælpe med at regulere hjerneaktiviteten forbundet med overdreven bekymring eller stress ved angstlidelser. Når det gælder depression, kan terapien muligvis bidrage til at balancere hjernebølger, der er knyttet til lavt humør og følelsesmæssig regulering. For personer med Attention Deficit Hyperactivity Disorder (ADHD) indikerer visse studier, at neurofeedback-terapi kan forbedre koncentration og opmærksomhed ved at støtte hjernens opmærksomhedsnetværk. Terapien er også blevet undersøgt som en potentiel behandling af afhængighed, hvor den kan have en positiv effekt på at reducere trang og forbedre selvregulering.

For at sundhedsprofessionelle kan anvende neurofeedback-terapi, kræves der særlig træning, typisk gennem kurser i neurofeedback og neurovidenskab. Terapien kræver hyppige sessioner – ofte tre gange om ugen – fordi den arbejder med at ændre hjernens bølgemønstre. Hvis sessionerne ikke er regelmæssige, kan hjernen vende tilbage til sine gamle mønstre. Behandlingen indebærer typisk 15-20 sessioner, hvorefter en evaluering afgør, om flere sessioner er nødvendige, eller om målene er opnået. Patientens hjernedata sammenlignes med en stor EEG-database fra raske personer i samme aldersgruppe for at vurdere, hvordan deres hjerneaktivitet bør se ud. Denne database kaldes den normative database.

Sammenligning af terapier

I vores projekt på bachelordannelsen i Naturvidenskab ved Roskilde Universitet har vi som nævnt undersøgt evidensen for, at neurofeedback-terapi er velegnet til behandling af generaliseret angstlidelse. Generaliseret angstlidelse er en psykisk lidelse, der er kendetegnet ved overdreven og vedvarende bekymring samt angst over forskellige aspekter af hverdagen, ofte

Kognitiv adfærdsterapi

Kognitiv adfærdsterapi er en struktureret, forsknings-underbygget psykoterapi, der hjælper individer med at identificere og ændre negative tankemønstre og adfærd. Den anvendes ofte til behandling af angst, depression og andre psykiske lidelser, hvor patienten lærer strategier til håndtering, problemløsning og mere hensigtsmæssige måder at tænke på. Kognitiv adfærdsterapi fokuserer på sammenhængen mellem tanker, følelser, krop og adfærd (den såkaldte "kognitive diamant") og opmuntrer individer til at udfordre uhensigtsmæssige overbevisninger og udvikle et mere afbalanceret perspektiv. Terapien er som regel kortvarig og målrettet, hvilket gør den til en effektiv metode til behandling af mange psykiske lidelser.

uden en specifik årsag. Personer med generaliseret angstlidelse kan opleve rastløshed, træthed, koncentrationsbesvær og atypiske hjernebølgemønstre (øget beta-aktivitet og reduceret alfa-aktivitet). Den kroniske angst kan forstyrre dagligdagen og påvirke relationer, hvilket kan gøre selv rutineopgaver overvældende.

Den traditionelle terapi-behandling mod generaliseret angstlidelse er såkaldt kognitiv adfærdsterapi, og vi satte os for at undersøge, om neurofeedback-terapi er lige så effektiv eller måske endda mere effektiv end denne traditionelle behandling. Vores undersøgelse var en såkaldt meta-analyse, hvor vi samlede data fra 75 videnskabelige artikler, der vurderer effektiviteten af henholdsvis neurofeedback-terapi og kognitiv adfærdsterapi i forhold til at reducere angstsymptomer hos patienter med generaliseret angstlidelse.

Nogle af disse studier fokuserede på at reducere Beta- og Høj-Beta-bølger (hvor sidstnævnte er bølger med en frekvens mellem 20-30 Hz), som er forbundet med stress og overtænkning, mens andre havde til formål at øge forekomsten af Alfa-bølger i den lave ende af spektret, der er kendt for at fremme afslapning og ro. I nogle studier blev neurofeedback-terapien endda tilpasset individuelt til den enkelte patients hjerneaktivitet.

Vores analyse viste, at både neurofeedback-terapi og kognitiv

adfærdsterapi opnår gode resultater i forhold til at reducere angst, og at der er ikke signifikant forskel på de to metoders effektivitet. Med andre ord er ingen af de to metoder tilsyneladende bedre end den anden.

Det er dog vigtigt at være opmærksom på, at der er betydelig usikkerhed knyttet til resultaterne af denne type studier, da en række faktorer, såsom deltagernes karakteristika, behandlingens varighed og måden, hvorpå fremskridt måles, kan påvirke effektiviteten.

Kognitiv adfærdsterapi betragtes i dag stadig som den foretrukne behandling, men neurofeedback-terapi viser altså også lovende resultater. Især i studier, hvor der var mange deltagere, behandlingsvarigheden var tilstrækkelig lang, og feedbacken under terapien var præcis og målrettet den specifikke klient.

Adgangen til neurofeedback-terapi via det offentlige sundhedssystem i Danmark er i øjeblikket begrænset. Men i fremtiden kan valget mellem de to terapiformer måske komme an på personlig præference. Foretrækker du at arbejde med dine tanker og adfærd i samspil med et andet menneske? Så kan kognitiv adfærdsterapi være den rette vej. Kan du bedre lide en teknologibaseret hjerneudfordring? Så kan neurofeedback-terapi være værd at udforske. Og hvem ved? Måske kan fremtidig forskning lægge grunden til endnu flere og endnu mere effektive metoder til at hjælpe mennesker med angst til at få det bedre. ■

Videre læsning

Niedermeyer, E. 1997: International Journal of Psychophysiology, Vol. 26, Iss. 1-3, PP 31-49

Stjernholm, O: Neurofeedback til behandling af ADHD. Ugeskrift for læger 16. aug. 2010. [ugeskriftet.dk/videnskab/neurofeedback-til-behandling-af-adhd](https://www.ugeskriftet.dk/videnskab/neurofeedback-til-behandling-af-adhd)

Salama, A. M., Abdel-Latif, S., Omar, T., & Abou El Wafa, H. (2022). Neurofeedback training and cognitive behavior therapy for treatment of generalized anxiety disorder in children and adolescents: A comparative study. *NeuroRegulation*, 9(1), 29-29.

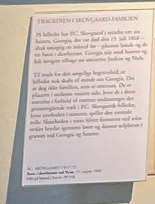
Hou, Y., Zhang, S., Li, N., Huang, Z., Wang, L., & Wang, Y. (2021). Neurofeedback training improves anxiety trait and depressive symptom in GAD. *Brain and Behavior*, 11(3), e02024.

Micoulaud-Franchi, J. A., Jeunet, C., Pelissolo, A., & Ros, T. (2021). EEG neurofeedback for anxiety disorders and post-traumatic stress disorders: A blueprint for a promising brain-based therapy. *Current psychiatry reports*, 23, 1-1

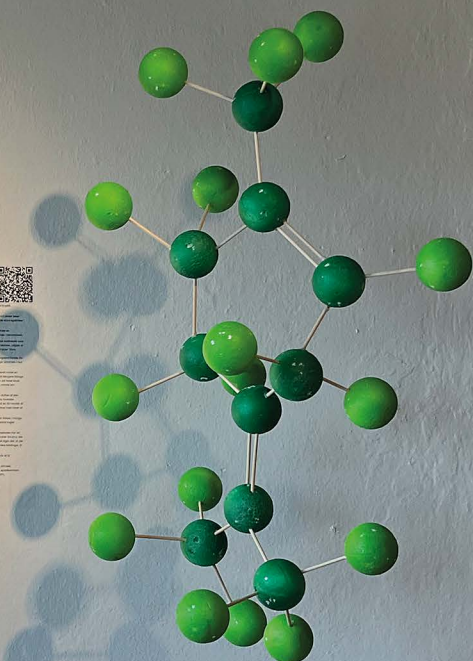
På billedet ses værket *Børn i skovbrynet ved Nysø* fra 1868 af P. C. Skovgaard og ved siden af en 3D-model af duftmolekylet terpinolen, som også har det mere formelle kemiske navn 1-Methyl-4-(propan-2-yliden)cyclohex-1-en. De mørkegrønne flamingokugler repræsenterer carbonatomer, og de lysegrønne hydrogenatomer.

Fotoet illustrerer, hvordan det usynlige (dvs. duft) kan gøres synligt, og hvordan uventede bonus-effekter kan opstå. Molekylemodelens skygge taler ind i lys/skygge-effekter fra værket og det synlige/usynlige.

Foto: Skovgaard Museet



Informational text block next to the QR code, providing details about the artwork and the chemical model.



Forfatterne



Tanja Toft Rix-Nielsen er overinspektør på Skovgaard Museet



Lone Møller Nielsen er gymnasielærer i kemi, biologi og bioteknologi på Viborg Gymnasium LN@vghf.dk



Stine Vølund er gymnasielærer i dansk, billedkunst og informatik på Viborg Gymnasium. SV@vghf.dk

FRA GULDALDERMALERI TIL 3D-MODELLER AF DUFTMOLEKYLER

Kan man bruge kemiundervisning i duftmolekyler i gymnasiet til at revitalisere en samling guldaldermalerier og igangsætte nye samtaler om menneskets forhold til naturen?

De fleste af os har en grundlæggende, basal viden om den danske nationalromantik. Guldaldermaleriernes landskaber og den danske nationalsang: "Der er et yndigt land", skrevet af Adam Oehlenschläger, er jo nærmest fast pensum i de danske folkeskoler og gymnasier. Guldaldermalerierne genkender vi på deres forskønnelse af og hyldest til det danske landskab. Bøgetræerne er højere,

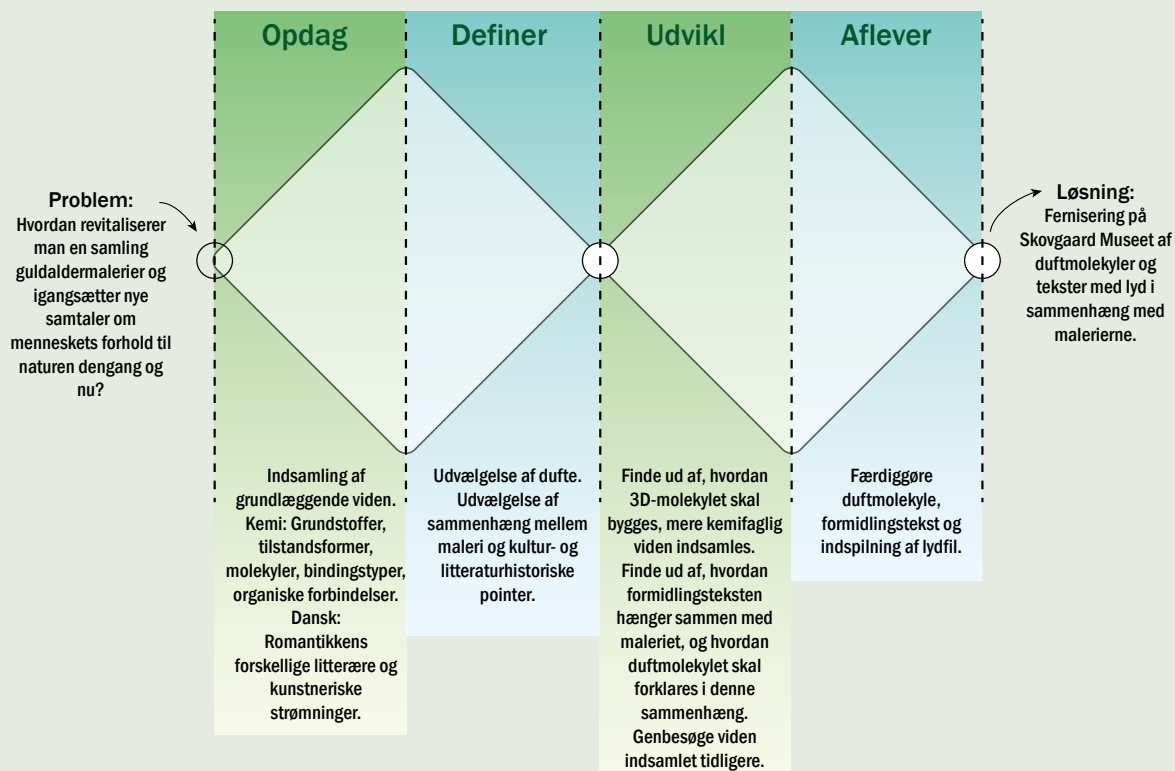
dalene dybere og himlen mere blå, end i det landskab maleren reelt betragtede. Selv dyrene er flotte, velnærede og rene. Forskønnelsen havde til formål at højne den danske selvforståelse i en tid præget af krise. Nok var der kun bakker og dale, men sikke bakker og dale!

Hvis du har stået foran et sådant landskabsmaleri, har du måske bemærket, hvordan du bliver suget ind i et dybt og højt landskab, mens du

samtidig beundrer maleteknikken. Du har genkendt, hvad bøgetræet, bondens rene tøj og den tilfredse ko på marken skal signalere. Eller også har du kedet dig gudsjammerligt over forudsigeligheden i naturgengivelsen, fordi det ligner en gentagelse af maleriet ved siden af.

Hvad end du har den første eller den anden oplevelse med dig i bagagen, kan du muligvis genkende, at værkernes betydning og mening

Den dobbelte diamant i undervisningen



At arbejde STEAM-fagligt kræver en tydelig proces i undervisningen, så faglighed og den røde tråd er synlig for eleverne. I projektet STEAM på museer har vi tacklet denne udfordring ved at planlægge processen efter den såkaldte Double Diamond-model. Det er en proces-model oprindeligt udviklet af britiske Design Council i

2005, som beskriver en professionel designproces, hvor man vægter problemforståelse højt i arbejdet med at udvikle og kvalificere en løsning. Modellen er også velegnet til at strukturere et undervisningsforløb. Processen er opdelt i fire hovedfaser indenfor to diamanter, som det fremgår af illustrationen.

efterhånden er fasttømret og måske udtømt.

Den oplevelse kunne eleverne i en 1.g-klasse fra Viborg Gymnasium i hvert fald ikke genkende til, da de blev præsenteret for idéen om at skulle revitalisere formidlingen af Skovgaard Museets faste udstilling med guldaldermalerier. Eleverne havde jo allerede haft om nationalromantikken i folkeskolen.

Fra idé til undervisning

Sammen med Skovgaard Museets overinspektør Tanja Toft Rix-Nielsen, fandt vi frem til problemstillingen: "Hvordan revitaliserer man en samling guldaldermalerier og igangsætter nye samtaler om menneskets forhold til naturen dengang og nu?"

Revitaliseringen skulle tage udgangspunkt i et sanseindtryk, som

altid gør indtryk, når vi bevæger os rundt i faktiske landskaber, men ikke er en del af formidlingen, når vi står i den eksisterende udstilling, nemlig: Dufte.

Derfor skulle eleverne ende med at tilføje en selvbygget 3D-model i stor skala af et duftmolekyle, de havde forestillet sig i et af guldaldermalerierne. 3D-molekylet skulle udformes af store spraymalede flamingokugler og blomsterpinde. Eleverne måtte selv vælge farver til modellens atomer og kovalente bindinger, så de med farvevalg kunne tale sammen med værket. Modellens størrelse blev dermed en visualisering af det usynlige i maleriet og en formidlingsmæssig overgang fra mikro- til makroskala.

De skulle yderligere formidle sammenhængen mellem den national-

romantiske periode, landskabsmalerierne og de fundne dufte gennem både formidlingstekst og lydfil. Formidlingsteksten skulle både formidle viden om den kulturhistoriske periode, koble det konkrete kunstværk til litterære strømninger og give udvalgte kemifaglige informationer om duftstoffets kemi. Alt sammen formuleret på en måde, så en besøger på besøg i udstillingen netop ville føle sig holdt i hånden, underholdt og beriget. Lydfilen skulle indeholde en oplæsning af formidlingsteksten tilføjet lydeffekter, der havde til hensigt at lade beskueren koncentrere sig om at lytte, mens vedkommende står og fordyber sig i værket og 3D-modellen af duftmolekylet.

For eleverne har projektet skilt sig ud fra den typiske gymnasieopgave – både ved de omfattende krav

Om STEAM på museer

Ideen om at revitalisere udstillingen på Skovgaard Museet er opstået ud af Viborg Gymnasiums og Skovgaard Museets fælles deltagelse i det regionale projekt *STEAM på museer*, der ligger i regi af Foreningen Intrace og er støttet af midler fra Kulturudviklingspuljen og Uddannelsespuljen ved Region Midtjylland.

Kunstneren Joakim Skovgaards monumentale kirkekunst er fundamentet for Skovgaard Museets oprettelse. I dag udgør de faste udstillinger, som breder sig over to etager, værker af Joakim Skovgaard (1856–1933), hans søskende Niels (1856 – 1938) og Susette Skovgaard (1863 – 1937) og deres fader, den kendte guldalermaler, P.C. Skovgaard (1817 – 1875). Museet arbejder løbende med at udfordre og forny formidlingen af den permanente samling. STEAM-projektet peger på en vigtig udvikling i museets praksis, hvor det bevæger sig fra at være kulturarvsforvaltere til at være eksperimenterende medskabere af ny viden og tværfaglig forståelse. De udstillede modeller og lydværker i udstillingen blev således ikke kun formidlingsprodukter, men erkendelsesværktøjer for både elever og publikum.

Set fra lærersiden var det bedste ved forløbet, at det går op for både os og eleverne, hvordan vi ofte taler om de samme fænomener i vores fag: tid, natur, krop osv., men vi forholder os til det på meget forskellig vis. Og den måde at forholde sig til fænomenerne på kan, når de kombineres, i høj grad berige hinanden og styrke elevernes forståelse for verden.

At dømme efter elevernes egen evaluering af forløbet, har den høje grad af frihed og de løsere rammer end den normale undervisning for nogle elever virket udfordrende, mens det for andre har været motiverende. For mange af dem var det særligt motiverende, at deres produkter skulle udstilles på museet.

til produkter, der ovenikøbet skulle præsenteres for offentligheden, og ved, at de skulle arbejde med at skabe en fusion af dansk- og kemifaglig terminologi i formidlingen.

Som det måske fremgår, er projektet hverken snævert dansk- eller kemifagligt – forsøget har været at gøre det STEAM-fagligt.

STEAM på museer

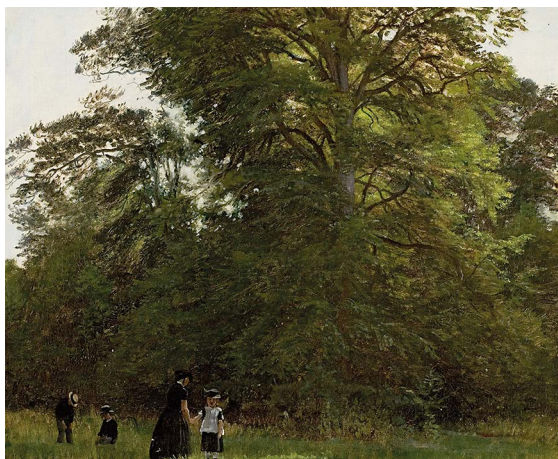
STEAM er en forkortelse for Science-Technology-Engineering-Arts-Mathematics og i forbindelse med dette projekt repræsenteret ved kemi (Science) og dansk (Arts).

Ideen med STEAM-undervisning er at opløse faggrænser og i stedet anskue de fænomener eller

problemstillinger, man arbejder med, som noget, der kan løses af forskellige, men forbundne vidensdomæner. Hvis eleverne skal forstå natur og kunne forstå, hvordan de kan revitalisere Skovgaard Museets samling, kan de godt gøre det med forskellige fag (kemi og dansk), men fagenes fagdomæner, skal ses som forbundne. Man kan sige, at STEAM-undervisning bygger på antagelsen om, at verden ikke er opdelt i fag, og derfor skal man i forsøget på at løse virkelige problemstillinger også se ud over denne opdeling. Derfor har dette forløb udfordret den silotankegang, der ofte kan herske i gymnasiet, og som helt konkret manifesterer sig for eleverne, når de ser på deres skema. Først har vi dansk. Så har vi kemi. Og det er afgrænset fra hinanden, som om det ingenting har med hinanden at gøre.

En ting er dog skemateknik og planlægning af et fælles STEAM-fagligt forløb, noget andet er at se ud over fagenes metoder og acceptere en mere holistisk tilgang til problemstillingen, der udfordrer fagene metodisk og begrebsligt.

Den holistiske tilgang betyder også, at vi som undervisere er blevet udfordret, fordi vi er nødt til at tænke anderledes i planlægningen for at kunne forholde os til elevernes proces fra problem til løsning. I projektet har vi tacklet den udfordring ved at gøre brug af en metode til at strukturere forløbet kaldet Double Diamond-modellen. Det er en metode til at arbejde kreativt og struktureret med problemløsning, som ofte bruges i design og innovation, men også kan anvendes i undervisning og projektarbejde. Metoden hjælper med at dele processen op i forskellige faser – fra at undersøge og forstå problemet til at udvikle og afprøve løsninger (se faktaboks). Efter forløbene har vi så vurderet, hvad eleverne har fået ud af det, ved at se på, hvordan de har arbejdet i de forskellige faser, og om der undervejs har været tegn på, at de har lært noget, der relaterer sig til de enkelte skolefag.



På billedet ses værket *Børn i skovbrynet ved Nysø* fra 1868 af P. C. Skovgaard
Foto: Skovgaard Museet

Det usynlige bliver synligt

Men hvad er der så kommet ud af elevernes arbejde? I et af eksemplerne arbejdede eleverne ud fra værket *Børn i skovbrynet ved Nysø* fra 1868 af P. C. Skovgaard, som de valgte at koble med duftmolekylet terpinolen. Deres molekylemodel illustrerer, hvordan værk og model kan "tale sammen" både visuelt og igennem teksten.

I deres formidlingstekst kan man blandt andet læse: "Du tager en dyb indånding, og selvom du står og ser på egetræerne, så er det duften af den nåleskov, du netop er trådt ud af, der dominerer. Det kan være svært at forklare, hvordan nåletræer dufter, og hvordan der mon dufter på maleriet. Foran dig ser du en 3D-model af et duftmolekyle. Det er molekylet terpinolen, som ofte beskrives som en mild citrus med noter af blomster og nåletræer". Samtidig har de med molekyldmodellens farver forsøgt at skabe en kobling til de dele af værket, de gerne vil fokusere på: det grønne, træerne.

Eleverne synliggør med modellen, hvordan naturen ser ud, når vi beskriver den vha. molekyler; noget vi måske slet ikke overvejer, når vi ser på landskabsmalerierne eller taler om dufte, fordi de normalt ikke kan berøres eller ses.

Fredensborgidyl med butansyre

I formidlingsteksten til et andet værk af P.C. Skovgaard: *Et sielandsk Landskab, hvortil Motivet er taget ved Fredensborg* fra 1841 arbejdede eleverne i særlig grad med at lede tankerækken hos betragteren af værket. I formidlingsteksten skriver de blandt andet:

»Forestil dig, at du står og ser ud over landskabet på billedet foran dig. Du kan høre fuglene synge og mærke solens varme på dine kinder.....Landskabet kunne være lige præcis det, som vi synger om i Oehlenschlägers digt: "Fædrelandssangen", også kendt som "Der er et yndigt land". Her står der: "Det bugter sig i bakke, dal."«



Billedet viser P.C Skovgaards maleri *Et siellandsk Landskab, hvortil Motivet er taget ved Fredensborg*, fra 1841. Ved siden af ses en molekylmodel af butansyre, som har den kemiske formel $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$ (nogle kender måske også forbindelsen under trivialnavnet smørsyre). Foto: Skovgaard Museet

..... Dyrkelsen og ophøjelsen af landskabet var afgørende i nationalromantikken, hvor både digt og maleri blev til..... Det meget tydeligt nationalromantiske maleri står i skarp modsætning til vores duftmolekyle butansyre. Butansyre er nemlig et molekyle, som indgår i lugten af gylle og opkast, hvilket nok ikke er det, du forbinder med P.C. Skovgaards romantik og idyl.«

I den kemifaglige del af teksten knyttes beskrivelsen hele tiden til molekylemodellen: "Navnet butansyre er bestemt ud fra antallet af carbonatomer (de blå kugler) og dens vigtigste gruppe, carboxylgruppen. Carbonatomet med tallet 1 indgår i carboxylgruppen. I butansyre er der 4 carbonatomer, og det passer med, at butan er navnet på den organiske forbindelse med 4

carbonatomer. En carboxylgruppe består af ét carbonatom med en enkeltbinding til en OH-forbindelse (grøn og gule kugler) og en dobbeltbinding til et oxygenatom (gule kugler). Dobbeltbindingen mellem carbon- og oxygenatomet er farvet lyseblå. Carboxylgruppen er den, som afgør, at vores molekyle er en syre, og dermed kommer navnet butansyre".

På den måde inviterer eleverne beskueren ind i en ny oplevelse af værket og åbner for en anden samtale om den naturgengivelse, der udgør værkets motiv.

Formidlingsteksten illustrerer samtidig, hvordan der arbejdes med de to fag – faktisk kunne den godt ses som en slags logbog over elevernes egen proces under arbejdet. ■

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

Gør-det-selv i videnskabens tjeneste

Af Carsten R. Kjaer, Aktuel Naturvidenskab

Grundlæggende er en forskers opgave at undersøge nye ideer – eller “gamle ideer”, som man af forskellige årsager ikke har været i stand til at undersøge. Før man som forsker kan gå i gang med at undersøge noget som helst, må man forholde sig til, om der overhovedet findes instrumenter, der er velegnet til at undersøge netop de spørgsmål, man er interesseret i. For det er langt fra altid tilfældet. Men det behøver ikke stoppe den ihærdige forsker. Naturvidenskabens historie er således rig på eksempler på naturforskere, der har haft teknisk snilde og selv har udviklet det udstyr, de lige stod og manglede. Tag bare August Krogh som et prominent, dansk eksempel.

Martin Reinhard Rasmussen er en af de forskere, der har fortsat denne stolte tradition for “Ole-opfinder-typer” i naturvidenskabens. Han har i sit ph.d.-projekt på Aarhus Universitet selv udviklet og bygget et transportabelt minilaboratorium, som løbende kan måle pH-værdi og oxygenindhold i jord.

»Det er relevant i jordbruget, fordi det i realtid giver mulighed for at følge med i, hvordan jordens kemiske forhold ændrer sig – for eksempel efter gødning eller når afgrøderne vokser«, fortæller Martin.

Martin er uddannet som biolog, men det er ikke tilfældigt, at han endte med at nørde med 3D-printer, elektronik, loddekolber, motorer og kodning i Python i sit projekt – noget, man måske nærmere vil forbinde med et ingeniørstudium.

»Jeg er vokset op ved et bilophug og værksted, og her har der altid været stor frihed til at lege med mekanik og elektronik. Jeg købte også for sjov en 3D-printer, som samlede støv i nogle år, men i min ph.d. kunne jeg endelig bruge den til noget fornuftigt«, siger han.

Interessen for mikrobiologi, som har været den faglige drivkraft i projektet, fik Martin på biologistudiet. Og netop undersøgelse af den mikrobielle verdens mange processor ude i naturen, kræver ofte specielt måleudstyr. Et område, som forskere på Aarhus universitet gennem mange år i særdeleshed har bidraget til.

»Jeg fik muligheden for at forbinde både teknik og biologi da jeg mødte Klaus Koren, som underviste på kurset bio-entrepreneurship. Han ved alt det om sensor-teknologi, som jeg gerne ville lære, og han blev min vejleder, både på kandidatspecialet og min ph.d.« fortæller Martin.

Med lidt teknisk snilde kan man selv bygge det minilaboratorium, som Martin har udviklet. For hele opskriften er open source, og komponenterne er enten hyldevarer eller noget, man selv kan 3D-printe. Systemet fungerer ved hjælp af såkaldte planar optoder – tynde sensorer, der skifter lys intensitet, når de påvirkes af bestemte kemiske stoffer som oxygen, ammoniak eller pH-ændringer. Som kommercielt produkt er apparatet ikke færdigudviklet, men Martins drøm er gøre det mere brugervenligt – en samlet pakke, hvor man ikke behøver rode med ledninger og lodninger. Og måske kan det på sigt blive til et spinout-firma.



Foto: Peter F. Gammelby.