

NATURVIDENSKAB OG TEKNOLOGI
DIREKTE FRA FORSKNINGSVERDENEN

A K T U E L
natur **VIDENSKAB**

TANG
KAN BIDRAGE TIL
GRØNNE LØSNINGER

Entropiens mysterium

Modeller for jordkloden viser fremtidens klima

Rewilding – Lad os få bisonokser tilbage
i den danske natur

NR.1 - 2022 MARTS: 50 KR.

NOTER

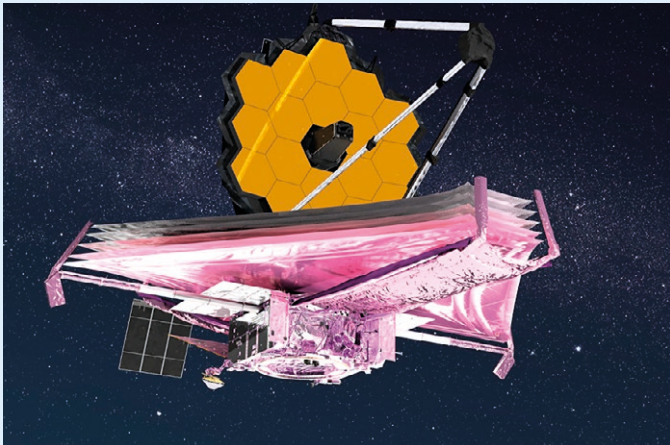


Illustration: NASA GSFC/CIL/Adriana Manrique Gutierrez

Det nye øje i rummet

En af de store rumnyheder siden sidste nummer af Aktuel Naturvidenskab er den succesfulde opsendelse af James Webb-teleskopet, der skal afløse det nu pensionerede Hubble-rumteleskop. Teleskopet blev opsendt den 25. december 2021 og frigivet fra transporttraketten i en højde af cirka 1400 kilometer over Jordoverfladen. Siden har teleskopet bevæget sig ud i sin endelige bane i en afstand af cirka 1,5 millioner kilometer fra Jorden og har fuldt udfoldet både solskjold og sit 6,5 meter store, guldbelagte spejl. Nu mangler der bare en masse finjustering, inden forskerne efter planen kan påbegynde observationer med teleskopet til sommer.

Kilde: NASA



Science-film på CPH:DOX

Klima, biodiversitet, vacciner og det ydre rum er blot nogle af de temaer, der præger programfladen, når dokumentarfilmfestivalen CPH:DOX i år løber af stablen fra den 23. marts til den 3. april. Over de seneste år har det naturvidenskabelige fokus på CPH:DOX vokset sig større og større, og festivalen byder nu på et selvstændigt Science-program. Som eksempel handler dette års åbningsfilm, *Into the ice*, der også er udtaget til festivalens hovedkonkurrence, om et hold af internationale topforskere, der med livet som indsats sætter sig for at finde ud af, hvor hurtigt Grønlands Indlandsis faktisk smelter. Et andet eksempel er *Pleistocene Park*, hvor vi følger geofysikeren Sergey Zimov sammen med sin søn Nikita, som forsøger at genskabe istidens "mammut-steppe"-økosystem i Sibirien ved egenhændigt at importere masser af bisonokser, heste og andre mere eller mindre vilde dyr.

Se hele programmet fra den 1. marts på cphdox.dk/da/

En lidt mindre fast kerne

Jordens kerne er – som danske Inge Lehmann i sin tid opdagede – todelt med en fast, indre kerne og en mere flydende ydre kerne. Kinesiske forskere rapporterer nu i tidsskriftet *Nature*, at den indre faste kerne – der har en vægtfylde en smule mindre end jerns og derfor menes også at indeholde lette grundstoffer som hydrogen, oxygen og kulstof – i virkeligheden kan være jernlegeringer i en såkaldt superionisk tilstand. Det betyder, at jernatomerne sidder stabilt i et gitter som i et normalt fast stof, mens de lette elementer i legeringen er uordnede og diffuse og opfører sig som en væske.



Kilde: *Nature*. Illustration: IGCAS

Quizen

Hvad ville atmosfærens gennemsnitstemperatur cirka være, hvis ikke vi havde den drivhuseffekt, der skyldes drivhusgasser?

- A) -18 grader, B) 0 grader C) 20 grader

Find svaret i artiklen *Modeller for Jorden viser fremtidens klima*

73.300

Så mange arter af træer vurderer en stor international gruppe forskere ifølge et nyt studium udgivet i tidsskriftet *PNAS*, at der findes i hele verden. Det er cirka 14 % flere arter end hidtidige estimater, og af disse mangler de 9.000 arter endnu at blive opdaget. Forskerne vurderer, at cirka 40 % af de endnu uopdagede arter findes i Sydamerika.

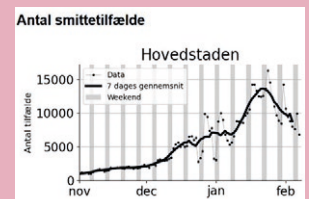
Kilde: *PNAS*



Foto: Colourbox

Corona-kurver

Formidlingen af fakta om covid-19 pandemien har i høj grad handlet om tal og kurver. Du kan nu få et overblik over tal som smittetilfælde, nyindlagte, hospitalsbelægning og dødsfald i form af en række illustrative figurer, som postdoc Rasmus Kristoffer Pedersen ved PandemiX Center ved RUC har lavet. Figurene bygger på data fra Statens Seruminstitut, og figurene opdateres løbende.



Kilde: *RUC.dk*

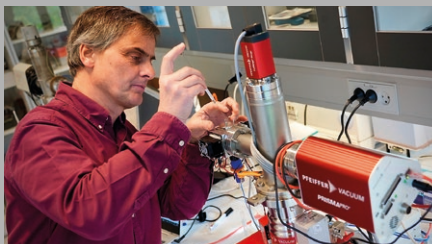
indhold



Tang kan bidrage til grønne løsninger

Dyrkning, høst og anvendelse af tang kan være ét af mange nødvendige virkemidler, vi skal bruge for at dreje verden i en mere bæredygtig retning. Du får her en aktuel status på mulighederne og udfordringerne i at anvende tang til bæredygtige fødevarer og dyrefoder.

8



Et helhedssyn på uønskede stoffer i drikkevandet?

Over hele verden stiger koncentrationerne af medicinrester og andre uønskede stoffer i drikkevandet. Ekspert råder til helhedsanalyser af vand i stedet for at bruge uendelige ressourcer på at analysere og undersøge alle stoffer hver for sig.

26



Entropiens mysterium

At tiden har en retning, opfatter vi alle som indlysende. Denne sandhed udtrykkes ved den fundamentale naturlov, at entropien i et lukket system kun kan stige eller være konstant. Men hvad ligger der bag begrebet entropi, og er det korrekt, at entropien aldrig kan aftage?

14



Rewilding – lad os få bisonokser tilbage i den danske natur

Det går ikke godt med biodiversiteten. I Danmark og mange andre steder er en del af løsningen at få store pattedyr som bisoner, vilde heste og vildsvin tilbage i naturen.

30

FORSKNING OG NYHEDER

- 4 KORT NYT
- 8 Tang kan bidrage til grønne løsninger
- 14 Entropiens mysterium
- 20 Modeller for jordkloden viser fremtidens klima
- 26 Et helhedssyn på uønskede stoffer i drikkevandet
- 30 Rewilding – Lad os få bisonokser tilbage i den danske natur
- 36 Hjernens blå prik – centrum for hjernens sundhed?
- 44 BAGSIDEN: Unboxing i laboratoriet

AKTUEL NATURVIDENSKAB

Udgiver

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

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

Ansvarshavende

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

Redaktion

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



AALBORG UNIVERSITET



AARHUS
UNIVERSITET



KØBENHAVNS
UNIVERSITET



DET NATURVIDENSKABELIGE
FAKULTET



DET TEKNISKE
FAKULTET



Roskilde Universitet

SPONSOR-
ABONNENTER



novo nordisk®

Matematisk fokus på forsikring og pension

De sikrer os mod uheld og sørger for en behagelig alderdom. Forsikringer og pensioner er noget, som de fleste af os har, og som har stor betydning for vores liv. Skandinavien er historisk set et knudepunkt for forskning på området. Og nu skal en ny, stor aftale mellem Institut for Matematiske Fag på Københavns Universitet og otte af landets forsikrings- og pensionselskaber skrue kraftigt op for ambitionerne på området.



Foto: Colourbox

For med 45 millioner kroner på budgettet skal der over de næste 12 år ansættes ti forskere, to lektorer og otte ph.d.-studerende, på Institut for Matematiske Fag, som skal tilvejebringe ny viden om vores forsikringer og pensioner. Forskerne skal også undervise kandidatstuderende i forsikringsmatematik med den nyeste viden på området og udvikle og afholde efter- og videreuddannelseskurser

hos de deltagende forsikrings- og pensionselskaber. Tiltagene skal i sidste ende komme kunderne og samfundet til gode.

»Den grønne dagsorden, machine learning metoder og større inddragelse af kunderne i deres investeringer er nogle af de ting, der i højt tempo reformerer forsikrings- og pensions-

branchen i disse år. Derfor er der behov for ny viden, som kan påvirke hele fødekæden fra universitet til den enkelte kunde i en gavnlig retning, og det kommer vi til i den her aftale, som jeg vil kalde historisk stor,« siger professor Mogens Steffensen fra Institut for Matematiske Fag, der står i spidsen for aftalen.

Hvad forskningsprojekterne præcist skal indeholde, skal nu defineres i et samarbejde med de deltagende selskaber.

»I sidste ende er det os som forskere, der beslutter, hvad vi skal forske i. Men jeg mener, at vi generelt har et medansvar for at bringe forskningen i en retning, der gør den anvendelig. Og det kræver, at vi lytter til, hvad selskaberne og kunderne har brug for,« siger Mogens Steffensen.

Michael Skov Jensen, KU

Robotflokke i marken

Roboter hjælper allerede landmanden i dag på marken, og droner er del af værktøjskassen, når redningsarbejdere skal finde frem til personer i nød. Nu vil et hold forskere udvikle teknologier, der gør det muligt at køre en hel flok robotter i stilling for landmanden eller sende en sværm af droner afsted på redningsmissioner.



Drone på redningsmission - i fremtiden er det måske en hel sværm.

Foto: Robotto/SDU

»Det er en teknologisk udfordring at styre og kontrollere en hel flok af robotter. Dels fordi robotterne skal kunne samarbejde intelligently. Dels fordi slutbrugeren nemt skal kunne specificere, hvilken opgave robotterne skal løse og hvordan,« siger professor Anders Lyhne Christensen fra Mærsk Mc-Kinney Møller Institutet på Syddansk Universitet, der står i spidsen for robotprojektet, der meget passende har fået navnet HERD. Han uddyber:

»Nuværende teknologier fungerer helt fint, når en landmand blot skal styre en enkelt robot, men de er utilstrækkelige, når der er flere robotter i spil samtidigt.«

Udover Det Tekniske Fakultet på SDU deltager også Aalborg Universitet, CBS og Teknologisk Institut, samt to private teknologivirksomheder: Agrolntelli, der udvikler landbrugsrobotter i Aarhus, og Aalborg-firmaet Robotto, som udvikler dronesystemer.

Forskningsprojektet, der har et samlet budget på 17 millioner kroner, gik i luften 1. november 2021 og løber knap fire år. Partnerkredsen har fået 4,5 millioner kroner i støtte fra Innovationsfonden. Yder-

ligere investerer firmaerne lidt over syv millioner kroner i tid og ressourcer i projektperioden.

Målet er at udvikle teknologi, der gør det muligt for robotterne at samarbejde og løse opgaver i flok. En del af opgaven består i at udvikle brugerflader, som sætter en redningsarbejder i stand til at styre en hel sværm af droner under en operation eller en landmand i stand til at kontrollere flere robotter på samme mark.

»Vi er begrænset af, at slutbrugere i dag kun kan styre én robot ad gangen. Hvis vi kan lære robotterne at arbejde sammen i flok, så kan vi udnytte dem til alt fra byggeopgaver til inspektion og produktion i langt højere grad i fremtiden. Det siger sig selv, at du hurtigere kan lave en inspektion eller en eftersøgning, hvis du for eksempel kan sætte 20 droner på opgaven i stedet for én,« siger Anders Lyhne Christensen.

Jakob Haugaard Christiansen, SDU

Pindsvin har haft MRSA-bakterier i 200 år

Opdagelsen af antibiotika for mere end 80 år siden har ført til store forbedringer i menneskers og dyrs sundhed. Men hver gang, man tog et nyt antibiotikum i brug, svarede bakterierne hurtigt igen ved at blive resistente. Derfor har man indtil nu regnet med, at resistens i sygdomsfremkaldende bakterier er et moderne fænomen, der er drevet af vores brug af antibiotika. Det viser sig dog ikke at være hele sandheden.



Foto: Pia Burmølle Hansen

I et nyt studie, der for nyligt blevet offentliggjort i tidsskriftet *Nature*, har forskere fra blandt andet Statens Serum Institut, University of Cambridge, Wellcome Sanger Institute og Aalborg Universitet vist, at *mecC*-MRSA (Methicillin-resistent *Staphylococcus aureus*) har været udbredt blandt pindsvin i mere end 100 år, før mennesker opfandt antibiotika. AAU's pindsvineforsker, Sophie Lund Rasmussen, har deltaget i studiet og er medforfatter på artiklen.

Studiet viser, at MRSA-bakterierne har udviklet et særligt resistensgen, *mecC*, der gør dem resistente overfor methicillin, og at denne proces er foregået i pindsvin. Opdagelsen er overraskende, fordi der er tale om vilde dyr, som ikke er udsat for antibiotikahandling, og det fik forskerne til blandt andet at undersøge pindsvinenes arvemasse for at lede efter forklaringer på tilstedeværelsen af *mecC*-MRSA i de vilde dyr.

Forskningen viser, at resistensgenet *mecC* har været til stede i pindsvin i 200 år, og at det er opstået helt naturligt med pindsvin som værter, fordi pindsvinene har båret bakterien *Staphylococcus aureus* i snuderne og samtidig har haft en særlig svamp i ansigtet. Svampen har produceret et antibiotikum, der minder meget om methicillin, og som derved har udsat bakterierne for antibiotika, så de er blevet resistente. Det udfordrer dermed den gængse opfattelse, at antibiotikaresistens udelukkende sker som følge af et højt forbrug af antibiotika.

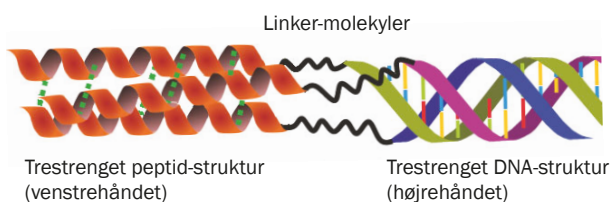
Fundet af MRSA hos pindsvin skal ikke gøre os bange for det lille dyr. Mennesker får nemlig sjældent infektioner med *mecC*-MRSA-bakterier, og pindsvinene har båret denne bakterie i 200 år uden at skabe epidemier. Det er dog vigtigt at holde en god håndhygiejne, når man fodrer og eventuelt rører ved pindsvin og andre vilde dyr.

Sanne Holm Nielsen, AAU, *Nature* vol. 602, pp 135–141 (2022)

Forskere laver supermolekyle

Da DNA blev opdaget, og forskerne lærte at kontrollere det, blev ikke bare videnskaben, men hele samfundet revolutioneret; i dag skaber vi rutinemæssigt kunstige DNA-strukturer til mange formål, for eksempel diagnosticering og behandling af sygdomme. Nu har et internationalt forskerhold skabt et supermolekyle, der har potentiale til at revolutionere videnskaben yderligere. Holdet beskriver deres supermolekyle som et ægteskab mellem DNA og peptider. Peptider består af små kæder af aminosyrer, og de er i lighed med DNA meget vigtige biomolekyler. Peptidstrukturer bruges blandt andet til at skabe kunstige proteiner og forskellige nanostrukturer.

»Hvis man kombinerer disse to, som vi har gjort, får man et meget kraftfuldt molekylært værktøj, der kan føre til den næste generation af nanoteknologi. Med det kan vi lave mere avancerede nanostrukturer, for ek-



sempel til at opdage sygdomme,« siger en af hovedforfatterne, Chenguang Lou, lektor på Institut for Fysik, Kemi og Farmaci på SDU.

I forskningsartiklen beskriver forskerne, hvordan de har kombineret trestrengede DNA-strukturer og trestrengede peptidstrukturer, og de beskriver de mekaniske egenskaber af det resulterende molekyle.

Det lyder måske simpelt at koble DNA og peptider, men det er det langt fra. Det ses kun sjældent i naturen, at DNA- og peptidstrukturer er kemisk forbundet, som det nye supermolekyle er. Selvom der foregår enkelte interaktioner mellem dem, opfører de sig oftest som hund og kat i naturen og går ikke

godt i spænd sammen. En mulig årsag er molekylernes kiralitet – det vil sige, at de ligesom alle biologiske strukturer optræder i en bestemt spejlbilledeform (ligesom venstre og højre hånd har samme struktur, men er rumligt forskellige). DNA er altid

højrehåndet, og peptider er altid venstrehåndede, hvilket gør det til en stor udfordring at kombinere dem. I deres forskning ændrede forskerne peptid-kiraliteten fra venstrehåndet til højrehåndet, så den passer med DNA'ets kiralitet (der jo altid er højrehåndet). Resultatet er, at de to strukturer nu kan matche og arbejde sammen i stedet for at frastøde hinanden.

Ifølge forskerne bidrager deres arbejde også til svaret på, hvorfor den biologiske verden er kiral: Svaret er energi; Den kirale verden er mindst energikrævende og dermed den mest stabile.

Birgitte Svennevig, SDU. Se også *Nature Communications* vol. 13, Art. No.: 76 (2022)

Røntgenmetode skal kigge dybt i maden

Med røntgenstråle-metoden kaldet SAXS (Small Angle X-ray Scattering) kan vi undersøge vores fødevarer helt ned på nano-niveau og på den måde udvikle velsmagende plantebaseret kost til gavn for klimaet, lyder det fra forskere på Københavns Universitet.

Derfor har universitetet indkøbt et Nano-inXider instrument, der netop bruger røntgenstråling på blandt andet mælk for at undersøge muligheden for at kopiere mælkenes lækre tekstur til planteproteiner.

»Vores viden om, hvordan komponenterne i mælk giver en særlig smag, mundfølelse og tekstur, kan vi bruge til forskning i plantebaserede proteiner. For hvis vi kan kortlægge præcis, hvad der gør, at mælken giver os god næring, føles blød i munden og smager sødt og salt, kan vi kopiere de egenskaber til nye plantebaserede og mere klimavenlige produkter og på den måde få flere til at spise dem,« forklarer Lilia Arhné, der er

professor på Institut for Fødevarer videnskab på Københavns Universitet.



SAXS-metoden kan få en positiv indvirkning på folkesundheden i fremtiden, lyder det også fra Jacob Kirkensgaard, der er lektor på Institut for Fødevarer videnskab og Niels Bohr Institutet på KU.

»Med metoden kan vi kigge ind i strukturen og funktionen på mad og eksempelvis bedre designe fødevarer, der nedbrydes på en måde, så vi optager flest mulige næringsstoffer. På den måde kan vi hjælpe til at forebygge fedme og forbedre sundheden,« siger han.

De to forskere har allerede mødt stor interesse i SAXS-metoden fra den danske industri:

»Vi har for nylig holdt møde med en række store danske fødevarerproducenter og ingrediensvirksomheder, der især er nysgerrige på, hvordan de kan lave lækre plante-baserede fødevarer, uden at gå på kompromis med smag og struktur,« slutter Jacob Kirkensgaard.

Ida Eriksen, KU

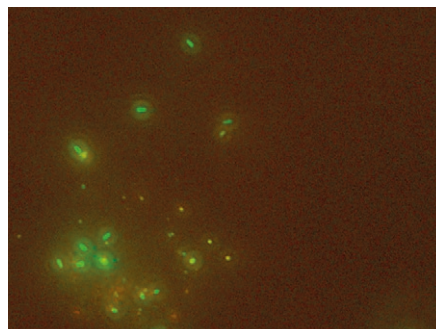
← Det nye røntgeninstrument på Københavns Universitet. En røntgenkilde i bunden af instrumentet producerer røntgenstråler, der rammer en prøve i det centrale kammer, og den spredte stråling opfanges på to særskilte detektorer i midten og i toppen af instrumentet. Foto: Jacob Kirkensgaard

Sådan trives mikroorganismer ved 120°C

I 2016 opdagede et internationalt forskerhold med deltagelse af forskere fra Aarhus Universitet, at der 1,2 km nede i havbunden ud for Japans kyst findes samfund af mikroorganismer (bakterier og arkæer), som trives ved temperaturer helt op til 120 °C. Efter lange og grundige laboratorieanalyser er forskerne nu nået frem til, at disse mikrober har et meget hurtigere energistofskifte end andre mikrober, der lever i lige så store, men køligere, dybder. Det hurtige energistofskifte sætter dem i stand til at reparere de skader på proteiner og andre følsomme molekyler i cellerne, som varmen medfører.

Fundet er overraskende, for som en af forskerne, professor Bo Barker Jørgensen fra Institut for Biologi på Aarhus Universitet, siger:

»Vi har altid ment, at mikrober i den dybe biosfære er et ekstremt trægt samfund, der langsomt fortærer de sidste rester af organisk stof, som blev begravet for millioner af år siden. Men den dybe biosfære er altså fuld af overraskelser. At opdage, at livet



Bakterierne blev fundet ved hjælp af radioaktive sporstoffer. Målestokken er 10 µm.

Foto: JAMSTEC/IODP

blomstrer med høje stofskiftehastigheder ved disse høje temperaturer så dybt nede under havbunden, giver stof til vores fantasi om, hvordan liv kan udvikle sig eller overleve i lignende miljøer på andre planeter.«

Forskerne fandt frem til antallet af celler i sedimentet og deres stofskiftehastigheder ved at bruge en meget følsom teknik, der med kulstof-14 og svovl-35 som radioaktive sporstoffer kunne måle, hvordan sulfat blev forbrugt til respiration og metan blev produ-

ceret. En teknik, som Bo Barker Jørgensen var med til at udvikle.

Når de målte på netop sulfat og metan, er det fordi mange mikroorganismer i ilt-fri miljøer har et stofskifte, der omdanner sulfat til svovlbrinte eller producerer metan (nøjagtigt som nogle af de første mikroorganismer på Jorden gjorde for milliarder af år siden, da der ikke var ilt på kloden). Normalt er stofskiftet for disse organismer dybt nede i havbunden imidlertid så lavt, at det er svært at måle. Der kan gå tusind år mellem, at deres celler deler sig.

De nyfundne mikroorganismer kan opretholde et meget højt stofskifte ved at spise acetat, som forskerne har målt ekstraordinært høje koncentrationer af i porevæsken mellem sedimentkornene dernede. Acetat er organiske molekyler, der dannes ved geotermiske processer dybere nede, hvor temperaturen er endnu højere.

Peter Gammelby, Aarhus Universitet. *Nature Communications* vol. 13, Art. No: 312 (2022)



KØBENHAVNS
UNIVERSITET



Mange naturvidenskabelige uddannelser giver dig gode jobmuligheder. Der er især mangel på kandidater inden for IT og de matematiske fag.

En naturvidenskabelig uddannelse giver dig også generelle kompetencer, du kan bruge mange steder. Fx lærer du at arbejde metodisk og at analysere og formidle data.



ÅBENT HUS 2. - 4. MARTS KØBENHAVNS UNIVERSITET

Mød studerende på de naturvidenskabelige uddannelser. Få hjælp og vejledning til dit studievalg.

aabenthus.ku.dk

Om forfatterne:



Annette Bruhn er seniorforsker ved Aarhus Universitet, Center for Cirkulær Bioøkonomi og AlgeCenter Danmark. Hun forsker i dyrkning af tang og interaktioner mellem tangproduktion og havmiljø. anbr@ecos.au.dk



Lone Thybo Mouritsen er leder for forskning og fundraising i Kattegatcentret, og arbejder med formidling, undervisning og erhvervsudvikling med tang som omdrejningspunkt i AlgeCenter Danmark. lm@kattogatcentret.dk



Susan L. Holdt er lektor og leder af algeteamet på DTU Fødevarerinstitutionen og arbejder med dyrkning, tilberedning/processering, ekstraktion og anvendelse af ingredienser fra tang. suho@food.dtu.dk



Marianne Thomsen er professor på Københavns Universitet i bæredygtighedsanalyse, bæredygtig fødevarerforarbejdning og -produktion og har en bred økologisk og miljømæssig systemforståelse for bæredygtighed. mth@food.ku.dk



Martin Riis Weisbjerg er professor på Aarhus Universitet. Han forsker især i malkækøers ernæring og fordøjelsesfysiologi samt fodringsstrategier, grovfoderkvalitet, og kvægs miljøpåvirkning og klimaaftryk. martin.weisbjerg@anis.au.dk

TANG KAN BIDRAGE TIL GRØNNE LØSNINGER



Dyrkning, høst og anvendelse af tang kan være ét af mange nødvendige virkemidler, vi skal bruge for at dreje verden i en mere bæredygtig retning.

Du får her en aktuel status på mulighederne og udfordringerne i at anvende tang til for eksempel bæredygtige fødevarer og dyrefoder.

Hvert år bliver der produceret over 30 millioner ton tang i verden.

Mere end 99 % dyrkes i Asien og mere end 80 % bruges til fødevarer. I den vestlige verden finder vi i dag tang i nicheprægede kvalitetsprodukter, kosttilskud til mennesker og dyr eller som konsistensregulerende tilsætningsstoffer blandt andet i kakaomælk,

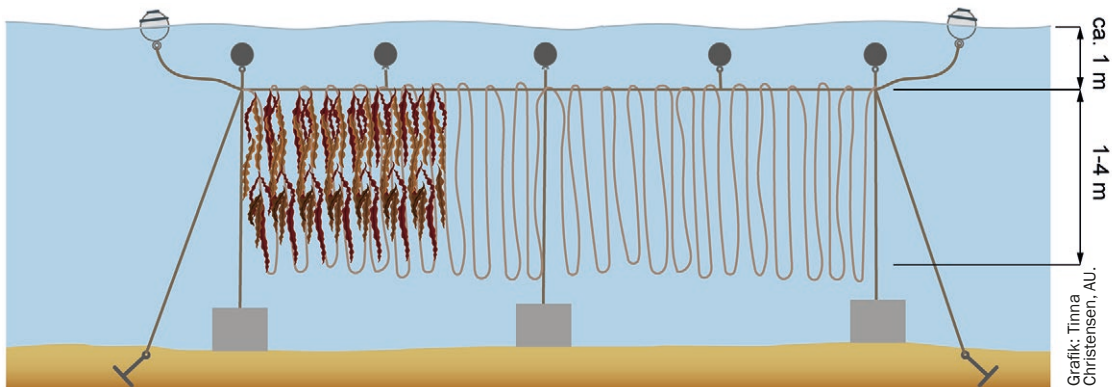
is og tandpasta. Men der er langt større perspektiver i tang! Dyrkning og høst af tang bidrager med en alsidig og bæredygtig ressource, som kan bruges til for eksempel nye plantebaserede fødevarer og til klimavenligt dyrefoder. Samtidig har selve dyrkningen positive sideeffekter: Tangdyrkning fjerner kvælstof og fosfor fra et havmiljø belastet af udledning af næringsstoffer fra land

og modvirker klimaforandringer, idet tangens fotosyntese binder CO₂ i biomasse og modvirker forsuring lokalt. På den måde kan tang bidrage til fremtidens grønne løsninger og understøtte opfyldelse af adskillige af FN's mål for bæredygtig udvikling. Men hvis det skal batte noget for miljø, klima og spisebord, skal vi dyrke, høste og anvende meget mere tang, end vi gør i dag.

← Høst af sukkertang på Aarhus Universitets test-farm i Kattegat ud for Grenaa.
Foto: Teis Boderskov.



En grødehøst-maskine fra søerne i København høster søsalat i Skive fjord i sommeren 2019. Foto: Michael Bo Rasmussen.



Sukkertang dyrkes typisk ved, at tang-sporer sås på liner eller net. Efter ca. 6 ugers vækst fra sporer til spirer hænger man spire-linerne ud i havet på systemer, der minder om tørresnore spændt ud under havoverfladen – forankret i bunden og holdt oppe af overfladebøjer. Spire-linerne sættes ud om efteråret, og tangen høstes den efterfølgende sommer.

Tang i Danmark

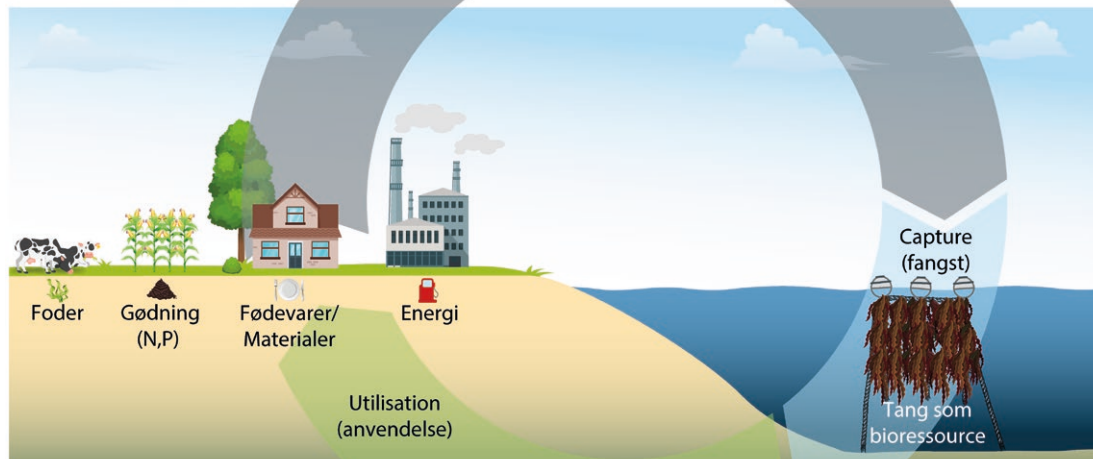
I Danmark vokser cirka 400 arter af tang, men det er reelt kun fire af dem, vi dyrker, høster og anvender i dag: Sukkertang, søsalat, søl og blæretang. Sukkertang er én af vores største tangarter. Den er en stor flerårig brunalge, kan blive 3 meter lang og dyrkes på liner eller net i havet. Der er flere dyrkningsanlæg i Danmark – både kommercielle og private – og sukkertang dyrkes også i havhaver rundt om i landet. Sukkertang trives bedst i havvand med en saltholdighed over 20 ‰, temperaturer under 20 grader, en del strøm og klart vand. De bedste udbytter, vi har opnået i Danmark på liner, svarer til over 21 ton frisk tang per hektar.

Grønalgens søsalat trives under helt andre forhold end sukkertang – nemlig i lavvandede fjordområder med masser af sol, varme og næringsstoffer. Under optimale betingelser kan søsalat fordoble sin egen vægt på under en uge og danne det, man kalder “green tides” – store opblomstringer, hvor grøn søsalat dækker vandet, så langt øjet rækker. Det ser flot ud, men er tegn på et havmiljø med alt for store udledninger af næringsstoffer fra land, og når søsalaten rådner om efteråret, bidrager det til iltsvind i fjordene og lokale lugtgener. I stedet for at lade søsalaten rådne kan den høstes med en sejlene høstmaskine, der er i stand til at høste 15 ton om dagen. Det har

man gjort i Skive Fjord, og forskere og virksomheder udnytter den høstede søsalat til protein til fødevarer og foder. Søsalat kan også dyrkes i systemer på land og oprense næringsstoffer fra for eksempel landbaseret fiskeopdræt.

Søl – også kaldet “Havets Bacon” er en rødalge, der kan dyrkes både på liner i havet eller i systemer på land. Den vokser langsommere end sukkertang, men har en fantastisk umami-smag og er derfor meget eftertragtet som fødevarer. De seneste år har dyrkningsteknologien indenfor søl virkelig rykket sig i Danmark, og den nødvendige produktion af søl-spirer til begge systemer er i dag effektiv og stabil.

Cirkulær bioøkonomi



Grafik: Tinna Christensen, AU.

Dyrkning og høst af tang kaldes også en *Emission Capture and Utilisation teknologi* – altså en teknologi, der fanger og udnytter spildstrømme som næringsstoffer og CO_2 udledt til havet og atmosfæren fra landbrug, spildevand og fossile brændsler. Spildstrømmene kan herved genbruges til at skabe ny biomasse, der kan bruges igen i fødekæden på land, og dermed understøtte en cirkulær bioøkonomi.



Foto: Finn Bak.

Søl "Havets Bacon" er en efterspurgt rødalge. Forskere på DTU Aqua har udviklet mere effektive metoder til produktion af søl-spirer. Her ses Peter Schmedes med søl dyrket i samarbejde med Fjordhaverne i Nykøbing Mors.



Blæretang bruger sine luftblærer som "svømmevinger" til at løfte sig op mod lyset.

Foto: Lone Thybo Mouritsen

Blæretang er en brunalge, som også er eftertragtet til fødevarer. Arten kan endnu ikke dyrkes, men den kan høstes fra de tætte undervandsskove af blæretang, der vokser i et bælte langs mange danske kyster. Blæretangskovene skaber grobund for liv og biodiversitet, og derfor bør høst af blæretang reguleres, så det kan ske bæredygtigt og uden at skade de kystnære økosystemer.

Klima, havmiljø og bioresource på én gang

Når tang vokser, optager den CO_2 og næringsstoffer fra det omgivende vand. Derfor kan dyrkning og høst af tang bruges som en teknologi, der optager de spildstrømme, som vores produktionssystemer på land producerer. Det gælder næringsstoffer, som udledes til havmiljøet, og CO_2 -emission til atmosfæren, der forsure havmiljøet. Vi ved, at dyrkning og høst af sukkertang årligt kan optage og fjerne op til 45 kg kvælstof, 3 kg fosfor og næsten 2 ton CO_2 pr. hektar. På baggrund af studier af flere søsalat-hotspots i Danmark anslås det, at der i sommerperioden gennemsnitligt kan høstes omkring 13 ton frisk søsalat per hektar fra "green tides" i næringsbelastede fjorde. Det svarer til cirka 50 kg kvælstof, 5 kg fosfor

Tang.nu

I projektet Tang.nu har danske forskere, virksomheder og myndigheder sammen sat tang på dagsordenen i Danmark – både som en ny bio-ressource til fødevarer og foder, og som en håndsrækning til havmiljø og klima. Partnerne fra Aarhus Universitet, DTU Fødevarerinstitutionen, DTU Aqua, Roskilde Universitet, Kattegatcentret, Multidyk, SEGES, Comida, Bisserup Havbrug, Seaweed Société, Nordisk Tang, Havhaverne i Ebeltoft Vig, Fjordhaverne og Teknologisk Institut, har sammen med en følgegruppe fra Fødevarerstyrelsen, Kystdirektoratet, Miljøstyrelsen, Danmarks Naturfredningsforening, Havh  st og Skive Kommune samlet, skabt og formidlet viden om tang i Danmark. Tang.nu blev støttet med 10 millioner kroner fra VILLUM FONDEN og VELUX FONDEN. Projektet startede i 2017 og blev afsluttet i 2021.



og 2,7 ton CO₂. Ved at bruge tang – sukkertang eller søsalat – som redskab til at opsamle næringsstoffer og CO₂ recirkulerer vi tabte næringsstoffer og CO₂ til nye biobaserede produkter, der kan erstatte produkter med et højere klimaaftryk – for eksempel importeret soya.

Vi bruger enorme ressourcer på at skaffe næringsstoffer til gødning i landbruget. Kvælstof, der udvindes fra luften, kræver cirka 1 % af klodens samlede energiforbrug hvert år, og fosfor er en begrænset ressource, der udvindes ved minedrift. Ved at opsamle og genanvende næringsstoffer, som er tabt til havmiljøet, kan samfundet også spare ressourcer til produktion af nye næringsstoffer. Samtidig bidrager tanghøst til at bringe havmiljøet tilbage i balance – eller god økologisk status – som vi har forpligtet os til gennem EU's vandrammedirektiv.

Der er stadig mange ubekendte parametre i spillet mellem tangdyrkning, havmiljø, biodiversitet og atmosfære. I de nye vandplaner, som skal gælde for 2022-2027, er det foreslået at bruge 34 millioner kroner på at udvikle såkaldte "marine virkemidler", blandt andet dyrkning af tang og udplantning af ålegræs, som redskaber til at reducere mængden af næringsstoffer i det kystnære havmiljø.

Fra klam til cool – tang er grøntsager fra havet

Tang er en ny biologisk ressource, som på grund af smag, indholdsstoffer og konsistens er eftertragtet til gastronomi og plantebaserede fødevarer. Både smag og konsistens varierer mellem tangarterne, nogle er sprøde som råkost, nogle er seje som beef jerky, andre er som blød lakrids. Den slimede konsistens, som nogle arter har, er meget værdsat i Østen, men knap så eftertragtet herhjemme. Smagen kan variere fra umami, over hav og fisk, til ærter og grøn the, lakrids, tobak og bacon. Og lige som med grøntsager fra land gælder det, at tilberedningen er nøglen til velsmag. Bare tænk på, hvor forskelligt en



Foto: Lone Thybo Mouritsen.

Blandet frisk opskyllet tang med bl.a. savtang, søsalat og forskellige fine rødalger.

Gode råd, når du gerne vil samle og spise tang

Saml friskt tang, der har vokset i rent vand. Undgå havne, spildevandsudløb eller områder med industri. Tangen skal være klar i farven og dufte friskt af hav. Pluk gerne kun spidserne af tangen, og tag ikke hele tangplanten, så den kan vokse videre. Der er ingen tangarter, der er giftige, men nogle arter kan indeholde meget jod eller arsen.

Se Fødevarestyrelsens retningslinjer og anbefalinger omkring tang som fødevarer her: www.foedevarestyrelsen.dk/Leksikon/Sider/Tang-som-foedevare.aspx

kartoffel kan smage, afhængig af om det er en rå kartoffel, sprøde chips og pomfritter, smørblød kartoffelmos eller faste, nye kartofler i smør.

Selvom sushirestauranter med tangindpakket ris på menuen er skudt op over hele landet, og fiskehandlerne langer irgrøn, asiatisk tangsalat over disken i stor stil, er det stadig ikke blevet almindeligt at bruge tang i madlavningen hjemme i danskernes egne køkkener. Måske fordi tang endnu ikke er fast inventar i supermarkedets køledisk. Men i dag har mange danskere smagt tang, og der er stigende opmærksomhed på, at tang er sundt og

noget, vi nok burde spise mere af. Og det giver god mening. Tang indeholder både vitaminer, mineraler, proteiner, sunde kulhydrater, essentielle fedtsyrer og bioaktive stoffer. Men er det sikkert at spise dansk tang? Omfattende danske undersøgelser viser, at tang, der har vokset i rent vand, normalt ikke overskrider grænseværdierne for indhold af tungmetaller, mens tang, der har vokset i nærheden af havne, industri eller spildevandsudløb har større risiko for høje koncentrationer af tungmetaller som cadmium, bly og kviksølv. Samtidig har især store brunalger, som sukkertang og fingertang, naturligt høje koncentra-



Foto: Kattegatcentret

Yderligere læsning:
Christensen & Høgslund. 2011. Havets planter – på oplevelse i en ukendt verden. Aarhus Universitets forlag.

Petersen m.fl. 2021. Marine virkemidler – potentialer og barrierer. DTU Aqua-rapport nr. 385-2021.

Petersen m.fl. 2021. Videnssynthese om blå biomasse. DTU Aqua-rapport nr. 387-2021.

Duarte m.fl. 2021. A seaweed aquaculture imperative to meet global sustainability targets. *Nature Sustainability*

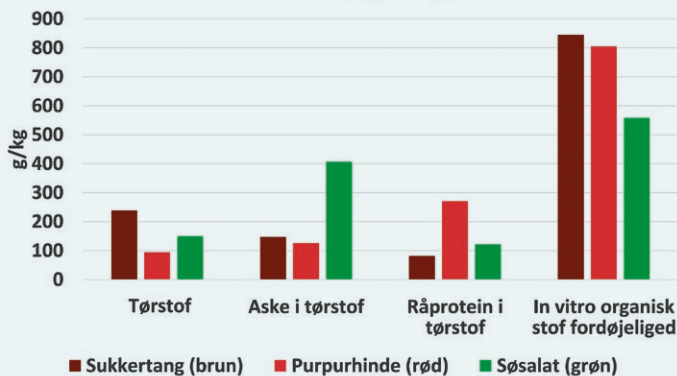
Bruhn et al. 2020. Høst af eutrofieringsbetingede masseforekomster af søsalat – status på viden om miljøeffekter og økonomi. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi. Notat nr. 2020/20.

Tang i menneskeheden's tjeneste, *Aktuel Naturvidenskab* nr. 6/2009

Værdifulde alger, *Aktuel Naturvidenskab* nr. 6/2014

Tang. *Kasketot* nr. 238/2021

Eksempler på sammensætning og fordøjelighed for brun-, rød- og grønalger



Udfordringer ved tang som dyrefoder

Tang har et højt vandindhold og kort holdbarhed uden konservering. Tørstoffet i tang består af mineraler, protein, kulhydrater og ganske lidt fedtstof. Proteinerne ligner landbaserede grovfodermidler med hensyn til aminosyreandel af råprotein og aminosyresammensætning. Protein fra nogle tangarter er naturligt beskyttet mod nedbrydning i vommen hos drøvtyggere. Kulhydraterne i tang er anderledes end kulhydrater i planter. Nogle kulhydrater (polysakkarider) indeholder svovlgrupper, der kan give forskellige bioaktive egenskaber, men foderværdien er ukendt. Der er stor variation i mineralindholdet og sammensætningen af mineraler mellem forskellige tangarter. Nogle tangarter har et naturligt højt indhold af problematiske mineraler – blandt andet arsen, cadmium og jod.

tioner af arsen og jod. Jodindholdet kan man reducere ved for eksempel at koge eller blanchere tangen.

Tang i fremtidens klimavenlige dyrefoder

Tang har traditionelt været brugt som dyrefoder i kystnære egne. Fritgående husdyr har ædt opskyllet tang på stranden, eller dyrene er blevet fodret med indsamlet tang, især ved mangel på landbaseret foder. Viden om næringsværdien i tangen var tidligere meget begrænset, så anvendelsen har været baseret på observationer og overlevelser, og dyrenes egen opsøgning af opskyllet tang. Men vores viden er i de senere år øget betydeligt.

Det mest slående ved tang er den enorme variation, der findes både indenfor og imellem arter. Vi ved nu, at forskellige arter af tang ernæringsmæssigt spænder fra dårligt foder til kvægfoder med stort potentiale. Men vi ved også, at anvendelse af tang til foder ikke er uden udfordringer. Det er blandt andet udfordrende, at tang har et højt

vandindhold, et højt askeindhold, og at visse arter – især de store brunalger – har et højt indhold af problematiske stoffer som jod og arsen. Derudover har man endnu en begrænset viden om kulhydraterne i tang – både ernæringsværdien af kulhydraterne og deres potentielt sundhedsfremmende egenskaber.

Tre nordiske tangarter (søsalat, sukkertang og buletang) er for nyligt testet i foder til spæde grise og kalve, uden at man kunne påvise klare sundhedsfremmende effekter. Fra udenlandske forsøg ved man, at den tropiske rødalge, *Asparagopsis*, kan reducere metanproduktionen i vommen på køer med op til 99 %. Effekten skyldes artens indhold af bromoform og lignende halogenforbindelser. Desværre kan halogenforbindelser være problematiske, både hvad angår sundhed, miljø og klima. Det forventes, at der findes andre metanreducerende stoffer i danske tangarter, og i projektet Climate Feed, screenes en række nordiske tangarter for effekter på metanproduktion.

Er tang så fremtidens foder til kvæg? Måske, men den nuværende pris på tang betyder, at anvendelse som reelt fodermiddel i dag kun er realistisk, hvis flere af tangens komponenter udnyttes hver for sig i en form for bioraffinaderi, og/eller hvis tangen samtidig dyrkes eller høstes som led i en naturforbedrende indsats. Ellers kan prisen på tang lige nu ikke konkurrere med traditionelle foderstoffer.

Tang og de grønne løsninger – tænk på tværs

Lige nu er der stor interesse for at producere og anvende tang i Danmark. Men hvis tang skal være mere end fancy tilbehør til laksebøf-ferne eller et dyrt specialfoder, som særligt nytænkende landmænd fodrer deres dyr med, er der behov for at opskalere og effektivisere både produktion og anvendelse.

Lige nu er vi i en slags 'hønen - og -ægget' situation, hvor der er økonomisk usikkerhed for både dem, der skal producere tangen og dem, der skal aftage tangen og producere f.eks. foder eller fødevarer: Fordi der er så få tangproducenter, er prisen høj og leveringssikkerheden lav - og fordi, der er så få aftagere, er det en usikker investering at etablere et dyrkningsanlæg, som kræver store investeringer. Samtidig kræver en opskalering af tangdyrkning store arealer til havs, og en løsning kunne være sameksistens mellem forskellige aktiviteter på havet, som tangdyrkning i eller omkring havvindmølleparker.

Tang kan bidrage til de grønne løsninger på flere områder. Dyrkning og høst af tang bidrager med en alsidig og bæredygtig ressource, der ikke optager plads på landjorden. Tangdyrkning har positive sideeffekter, der hjælper os til at leve op til flere af de mål, Danmark har forpligtet sig til inden for både havmiljø og klima. Hvis vi skal løse udfordringerne og bidrage til en bæredygtig, klimaneutral cirkulær bioøkonomi i Danmark, kræver det, at forskere, virksomheder, myndigheder og beslutningstagere tænker på tværs af miljø, klima og fødevarer. ■

OPLEV UNIVERSITETET INDEFRA

BLIV STUDERENDE FOR EN DAG

Kom med og følg hverdagen som studerende på Aarhus Universitets naturvidenskabelige uddannelser og ingeniøruddannelser.

Oplev studielivet, kom med til undervisning og stil dine spørgsmål til den universitetsstuderende, som du følger, mens du er 'studerende for en dag'.



Fotografer: Anders Trærup og Lars Kruse, AU Foto

Læs mere og tilmeld dig på

NAT.AU.DK/STUDERENDEFORENDAG



TECH.AU.DK/STUDERENDEFORENDAG



ENTROPIENS MYSTERIUM

Illustration: Shutterstock

Om forfatterne



Trond Ingebrigtsen er lektor i fysik. Han anvender computer-simuleringer til at forstå fx universelle egenskaber ved væsker. I perioden 2013–2018 var han JSPS postdoc ved University of Tokyo, Japan, hvor han arbejdede med reologi og krystallisering af sejtflydende væsker. trond@ruc.dk



Jeppe Dyre er professor i fysik. Han arbejder teoretisk med at forstå grundlæggende egenskaber af væsker og faste stoffer, oprindeligt med fokus på sejtflydende væsker. I perioden 2005–2015 ledte han grundforskningscentret Glas og Tid, nu er han VILLUM Investigator. dyre@ruc.dk

Begge er tilknyttet Glas og Tid centret, Institut for Naturvidenskab og Miljø, RUC

At tiden har en retning, opfatter vi alle som indlysende. Denne sandhed udtrykkes ved den fundamentale naturlov, at entropien i et lukket system kun kan stige eller være konstant. Men hvad ligger der egentlig bag begrebet entropi, og er det 100% korrekt, at entropien aldrig kan aftage?

Dyr, planter, mennesker – alle ældes de og ender med at dø. Det samme gælder for en stjerne, som “fødes” ud af en stor gas-sky og ender sine dage, når den er brændt ud, som regel efter nogle milliarder år (men hurtigere for tunge stjerner). Dette er alt sammen velkendt. I fag som biologi og geologi er tidsudvikling et helt centralt begreb, hvad enten man taler om en celled eller et individs livscyklus, skabelsen af bjerge og geologiske aflejringer, eller evolutionen i det hele taget. Det, at tiden kun kan gå én vej, kaldes *irreversibilitet*. Omvendt er en *reversibel* proces et forløb, som godt kan gå baglæns. Selvom nogle processer er reversible, så kan der ikke være tvivl om, at Verden som sådan er irreversibel.

Ellers ville vi en gang imellem opleve at døde dyr kom til live og blev yngre med tiden for at ende med at blive født.

Hvad er så mysteriet? Det er, at fysikkens helt grundlæggende naturlove alle er reversible. Det gælder, hvad enten vi taler om mekanikkens grundligninger (opstillet af Newton i 1680'erne), elektromagnetismens grundligninger (opstillet af Maxwell i 1860'erne) eller kvantemekanikken, som blev udviklet af en række fremragende fysikere i løbet af 1920'erne.

Vi kender det godt fra hverdagen: Tænk på et pendul, som er sat til at svinge frem og tilbage. Her har tiden ingen retning – om pendulet svinger “forlæns” eller “baglæns”

kan ikke afgøres. Hvis man filmede pendulet og viste filmen baglæns, ville man ikke kunne se forskel. Pendulet er altså reversibelt. Dette afspejler, at Newtons anden lov, som beskriver bevægelsen, er reversibel.

Og dog. Vi ved jo alle, at pendulet efterhånden går i stå, så tiden *har* altså en retning. Vi ved også, hvorfor pendulet går i stå. Det er fordi, der er gnidningsmodstand, som langsomt og løbende omdanner pendulets mekaniske energi til varme. Energien forsvinder ikke, for varme er en energiform. Det, der sker, er, at atomerne i pendulophænget (og i luften) kommer til at bevæge sig lidt hurtigere i takt med, at pendulet går i stå. *Entropien* stiger, siger man. Einstein kunne angri-



veligt forestille sig, at alle naturlove eventuelt må justeres, efterhånden som forskerne bliver klogere, ligesom han selv modificerede Newtons gravitationslov. Bortset fra loven om, at entropien aldrig kan aftage for et isoleret system (det vil sige et, som ikke vekselvirker med sine omgivelser). Denne lov må stå uforandret til evig tid, mente han: Det er umuligt at forestille sig, at entropien kan aftage for et makroskopisk system.

Entropi og sandhed

Ovenstående er ikke bare snak – entropi er en veldefineret størrelse, der kan bestemmes ved hjælp af eksperimenter ligesom for eksempel vægten af en ting. Står du med et glas vand i hånden, har vandet en bestemt entropi. Opvarmes vandet, stiger entropien. Disse erkendelser har været en grundlæggende del af fysikken og kemien siden anden halvdel af 1800-tallet.

Utallige eksperimenter har bekræftet, at entropien aldrig falder for et isoleret system. Blander man 1 liter koldt vand med 1 liter varmt vand, fås 2 liter lunkent vand. Det ved vi

alle, men de færreste tænker på, at universets entropi herved stiger og aldrig kommer tilbage til, hvad den var. Vandblanding er en irreversibel proces, for man har aldrig oplevet, at 2 liter lunkent vand pludselig opdeler sig i koldt vand til venstre og varmt vand til højre. Et andet eksempel er, hvis du taber et glas, og det går i stykker. Man har aldrig observeret, at stumperne spontant samler sig, og glasset hopper tilbage i hånden, selvom det ikke i sig selv ville være i modstrid med loven om energiens bevarelse.

Hvordan kan det være, at entropien aldrig kan aftage, når atomers og molekylers opførsel er styret af naturlove, hvor tiden lige så godt kan gå baglæns som forlæns? Nu bliver det lidt filosofisk, for her er det nyttigt at skelne mellem to forskellige sandhedsbegreber: *ontologiske sandheder* og *pragmatiske sandheder*.

En ontologisk sandhed er udsagn, som umuligt kan være forkert. For eksempel kan man ikke forestille sig en verden, hvor 3 gange 4 er 13. En pragmatisk sandhed er en erken-

delse, som er rigtig for alle praktiske formål, for eksempel at man ikke overlever, hvis man falder ud af en flyvemaskine i 8 kilometers højde. Det er en interessant diskussion, om eksempelvis kvantemekanikkens grundligning er en ontologisk eller en pragmatisk sandhed. Men de fleste fysikere er enige om, at paradokset om entropiens vækst, der trods de underliggende loves reversibilitet, skyldes, at denne lov *ikke* er en ontologisk sandhed. Med andre ord: Entropien *kan* godt aftage. Det er ikke principielt umuligt, men bare helt enormt usandsynligt. At glasset, som er tabt på gulvet, samler sig og hopper tilbage i hånden *kan* godt ske, men det er bare så usandsynligt, at det aldrig er observeret – og heller aldrig vil blive det, selv ikke i løbet af mange milliarder år.

Et spørgsmål om orden

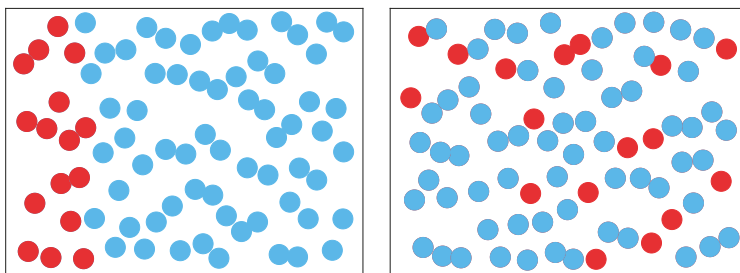
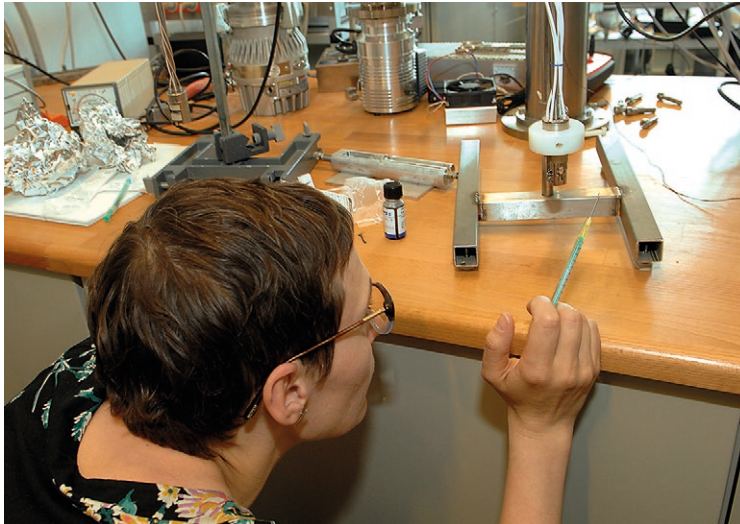
Lad os tage et andet eksempel. Luft består som bekendt primært af cirka 80 % nitrogen (kvælstof) og 20 % oxygen (ilt), som begge er to-atomige molekyler. Hvis man har en beholder med oxygen og nitrogen i hver sin ende adskilt af en væg, som man derefter fjerner,

Glas og Tid centret omfatter ikke kun computer-simuleringer, men også en række eksperimentelle aktiviteter der måler mekaniske, elektriske og termiske egenskaber af meget sejtflydende væsker. Nogle af disse målinger tester om excess-entropien også for "rigtige" væsker styrer relaxationstiden.

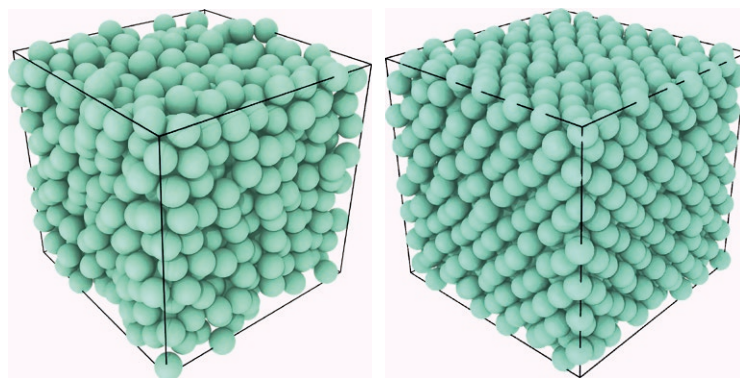
Foto: Hanne Engelstoft Lund

Billedet viser hvordan en væske med en kanyle føres ind mellem lagene i den såkaldte mikroregulator, en kondensator hvis temperatur kan holdes konstant inden for få milliKelvin. Dermed kan væskens relaxationstid ved en given temperatur bestemmes nøjagtigt.

Foto: Hanne Engelstoft Lund



Figur 1. Luft består af cirka 20 % oxygen- (røde) og cirka 80 % nitrogen-molekyler (blå). Den første figur viser en tænkt situation med oxygen og nitrogen adskilte. Med tiden vil molekylerne uvægerligt blandes, og man havner i situationen til højre. Dette er en irreversibel proces, for man vil i praksis aldrig se det modsatte ske, altså at en blanding spontant "ordner sig". Det er ikke principielt umuligt, men enormt usandsynligt. Entropien er mindre til venstre end til højre, hvor der er mere uorden.



Figur 2. Figuren til venstre viser en såkaldt "random close packing" af kugler. Kuglerne rører hinanden, så de ikke kan bevæge sig og systemet kan derfor ikke trykkes yderligere sammen. Til højre er kuglerne sat op i et krystalgitter (en såkaldt fladecentreret krystal) i det samme volumen. Selvom denne situation fremtræder mere ordnet end den til venstre, er entropien her faktisk større, fordi kuglerne har plads til at rasle lidt mellem hinanden. Eksemplet viser, at man skal være forsigtig med udsagnet: "Entropi er et mål for uorden".

vil alle molekylerne bevæge sig tilfældigt rundt mellem hinanden. Efter kort tid havner man i en situation, hvor oxygen og nitrogen er blandet (figur 1). Entropien er herved blevet større, og man kan endda beregne, hvor meget den er vokset. Pointen er nu, at man i praksis aldrig ser det

modsatte ske. I princippet *kunne* det ske, at din næste vejtrækning kun trak nitrogen-molekyler ned i lungerne – hvilket straks ville kunne mærkes! – i praksis sker det aldrig. Det er langt mere usandsynligt end for eksempel at vinde 10 milliongevinster i Lotto 10 uger i træk.

Som sagt er de fleste fysikere enige om ovennævnte forklaring. Men den er dog ikke mere oplagt end, at emnet stadig diskuteres. For eksempel har nobelpristagerne Ilya Prigogine (kemi) og Roger Penrose (fysik) begge givet udtryk for tvivl om denne forklaring på, hvorfor verden er irreversibel, er fuldt ud dækkende.

Ser vi igen på eksemplet med blanding af nitrogen og oxygen, illustrerer det, hvad man sædvanligvis siger, nemlig at *entropi er et mål for uorden*. Jo større uorden, jo større entropi. Hvis man kaster brikkerne til et puslespil op i luften, skulle det være mærkeligt, hvis de lander, så puslespillet er lagt, for uorden er meget mere sandsynlig end orden. Det er derfor, entropien stiger med tiden. Dette er den gængse forklaring, og den er vi enige i. Man skal dog være skarp på at definere "uorden".

Således kan et system af runde partikler pakkes sammen i en terning ved samme tæthed på forskellige måder, sådan at det system, der umiddelbart ser mest ordnet ud, i virkeligheden er det mest uordnede i den fysisk-kemiske forstand, der definerer entropi (se figur 2).

Svært at bestemme entropi i en simulering

Ethvert system har en entropi, og for alle praktiske formål kan entropien ikke falde, medmindre systemet vekselvirker med omgivelserne, som når man for eksempel putter "systemet" i et køleskab, hvorved entropien falder.

Noget, der så kan undre én – og som har relevans for vores egen forskning – er, hvorfor det skal være så svært at bestemme entropien i en computer-simulering. I en simulering kender man alle molekylers positioner og hastigheder, som fremskrives løbende ved brug af Newtons love. Man har fuld information om systemet i en sådan simulering. Til hver en tid kan man bestemme systemets energi, dets temperatur, tryk, varmelednings-



Glas og Tid centrets computere, som siden 2008 primært har været baseret på grafikkort. Disse såkaldte GPU-kort regner meget hurtigt, men har den udfordring at de er svære at programmere optimalt, fordi der kræves særlige instruktioner for at udnytte den enorme regnekraft (se <http://rumd.org>). I dag råder Glas og Tid over en regnekapacitet på godt 1000 TeraFlop. Foto: RUC

evne, viskositet (hvis det er en væske), hvordan neutroner vil spredes på systemet, osv. Alt, hvad man kan finde på at spørge om, har man information til at kunne besvare.

Bortset fra entropien!

Selvom man kender alle molekylers positioner og hastigheder til et givet tidspunkt, kan man ikke bestemme entropien herudfra. Det er ikke en gang muligt at få et groft overslag over, hvor stor entropien er. Hvordan kan man have fuldt kendskab til alle positioner og hastigheder og så alligevel ikke kunne beregne entropien herudfra? Kender systemet overhovedet sin egen entropi? Det er da mærkeligt.

En mulig løsning er, at entropi er et begreb, som er mere subjektivt end for eksempel energibegrebet. Altså at entropien afhænger af, hvilke spørgsmål iagttageren stiller til systemet. Dette er synspunktet, som informations-teorien indtager, en teori, som blev udviklet af matematikeren Claude Shannon i løbet af 1940'erne, hvori entropi-begrebet er centralt.

Men hvis entropi er subjektiv, hvad så med den sædvanlige entropi i fysikken og kemien – er den også

mere "in the mind of the spectator" end den eksisterer i virkeligheden? Og hvis det er tilfældet, hvordan kan man så være sikker på, at entropien altid stiger med tiden? Afhænger det også af iagttageren?

Hvordan definerer man egentlig entropi?

Vi har ikke skråsikre svar på disse spørgsmål. Måske er det på sin plads her at nævne, hvordan man definerer entropi i den såkaldte "statistiske mekanik", som er standard-pensum ved universiteters fysik- og kemi-studier verden over. Energien er som bekendt bevaret for et isoleret system. Hvis det betragtede system er i termisk ligevægt, er entropien et mål for, hvor mange mikrotilstande, der har den givne energi – mere præcist er entropien logaritmen til dette antal. Jo flere tilstande, der har samme energi som systemet, jo højere er entropien. Dermed er entropien et udtryk for vores uvidenhed om systemet, *når det kommer til størrelsen energi*. Men man kan godt definere andre entropi-begreber, hvert med relation til en specifik størrelse – således at entropien altid udtrykker, hvor mange mikrotilstande, der har samme værdi af denne størrelse. Energi spiller imidlertid en særlig

rolle. Det skyldes dels, at energien er bevaret i tid, dels at energi er en additiv størrelse (dvs.: har man to systemer, er energien af det hele summen af de to systemers energi). Det er formentlig på grund af disse to egenskaber ved energi, at den sædvanlige entropi er vigtigere end de mange andre entropier, man kan forestille sig.

Vi har i vores forskning faktisk haft brug for et lidt anderledes entropi-begreb end det sædvanlige, nemlig ét som kun refererer til den potentielle energi. Husk, at en sten, der kastes gennem luften, har både en kinetisk energi givet ved hastigheden og en potentiel energi givet ved stenens højde over jorden. Generelt har alle atomer og molekyler en potentiel energi, som afhænger af, hvordan de er positioneret i forhold til hinanden (tyngdekraften spiller ingen rolle her og ignoreres i computer-simuleringer af gasser, væsker eller faste stoffer). Den entropi, som kun vedrører den potentielle energi, kaldes "exces-entropi". I 1977 opdagede den israelske fysiker Rosenfeld, at denne størrelse bestemmer en væskes relaksationstid, som udtrykker hvor længe væsken er om at komme i ligevægt efter en lille forstyrrelse. Dette er i dag anerkendt

Videnskabelige artikler:

T. S. Ingebrigtsen, J. R. Errington, T. M. Truskett, J. C. Dyre: "Predicting how nanoconfinement changes the relaxation time of a supercooled liquid", *Phys. Rev. Lett.* 111, 235901 (2013).

C. Rovelli: "Is time's arrow perspectival?" *arXiv:1505.01125* (2015).

J. C. Dyre: "Perspective: Excess-entropy scaling", *J. Chem. Phys.* 149, 210901 (2018).

I. H. Bell, J. C. Dyre, T. S. Ingebrigtsen: "Excess-entropy scaling in supercooled binary mixtures", *Nat. Comm.* 11, 4300 (2020).

Populært:

I. Prigogine: "From being to becoming – Time and complexity in the physical sciences" (W. H. Freeman and Company, New York, 1981)

J. M. Hansen: "Stregen i sandet, bølgen på vandet: Stenos teori om naturens sprog og erkendelsens grænser" (Gyldendal, 2000).

R. Penrose: "The road to reality – A complete guide to the laws of the universe" (Jonathan Cape, London, 2004)

J. S. Hansen, N. P. Bailey, J. C. Dyre, T. B. Schrøder: "Grafikkort sætter Newton på speed", *Aktuel Naturvidenskab* 1, 42 (2013).

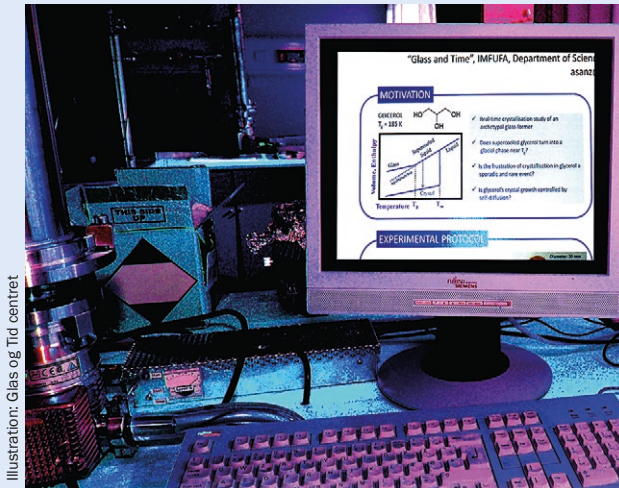
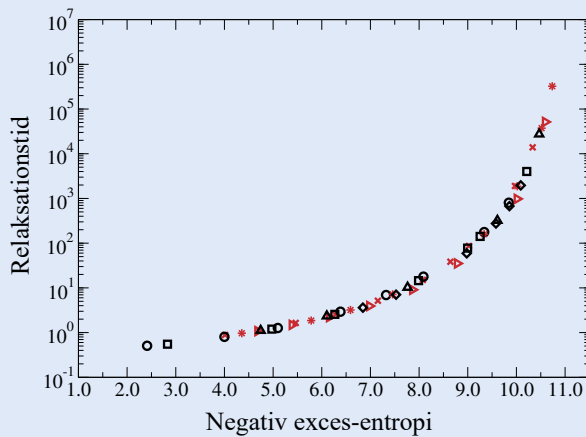
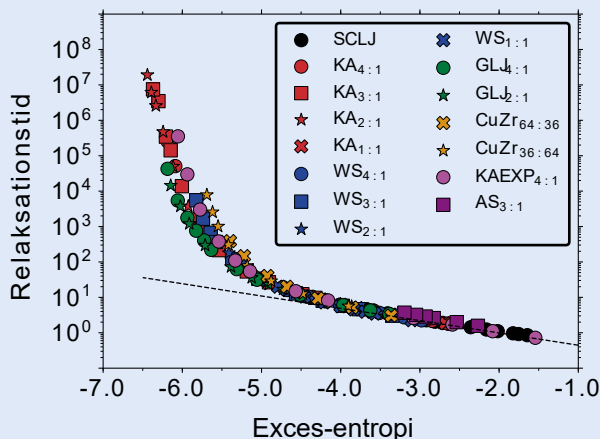


Illustration: Glas og Tid centret



Figur 3: Figuren viser resultater fra studier af en væske-model ved omfattende computer-simuleringer. Man ser sammenhængen mellem relaksationstid (i et særligt enhedssystem) – det vil sige den tid, det tager for væsken at komme i ligevægt efter en ydre forstyrrelse – og exces-entropien, som er den entropi, der kun vedrører den potentielle energi. De sorte symboler gælder for en større mængde væske ved forskellige tryk og temperaturer, mens de røde symboler er for den samme væske begrænset til en nano-kanal. Overraskende ser man, at der ingen forskel er! Figuren bekræfter og udvider "Rosenfelds exces-entropi skalering", ifølge hvilken entropien bestemmer relaksationstiden.

Fra T. S. Ingebrigtsen, et al 2013



Figur 4: Figuren viser samme type plot som i figur 3, men her for en række forskellige model-væske-blandinger. Igen ser man, at exces-entropien bestemmer relaksationstiden på en (næsten) universel måde, hvilket endnu ikke er fuldt forstået rent teoretisk.

Fra I. H. Bell et al 2020.

som en vigtig opdagelse, selvom der indtil år 2000 stort set ingen interesse var for Rosenfelds idé.

Fortsat plads til undren

Da Rosenfeld gjorde sin opdagelse, var det på baggrund af studier af væsker med kun én type partikler, og han havde i øvrigt i 1977 slet ikke adgang til de hurtige computere, man råder over i dag. Vi har i Glas og Tid centret på RUC computere baseret på grafik-kort (som oprindeligt er udviklet til spil) og råder over en regnekapacitet på godt 1000 Tera-flop, det vil sige 10^{15} regneoperationer per sekund. Vores computer-simuleringer har bekræftet Rosenfelds opdagelse, men også vist, at denne gælder mere generelt, end man hidtil har troet. Således er sammenhængen mellem exces-entropi og relaksationstid/viskositet den samme for en væske-model, uafhængigt af om væsken begrænses af en rand i kanaler af nano-størrelse eller ej (figur 3). Exces-entropien bestemmer også relaksationstiden for en række blandingsvæsker, oven i købet på en næsten universel måde (figur 4). Begge dele er overraskende og ikke fuldt ud forstået teoretisk selvom den såkaldte "isomorf-teori" udviklet på RUC giver en delvis forklaring.

Vi synes, det er spændende, at man fortsat kan undre sig over et helt grundlæggende begreb som entropi. Med denne artikel håber vi om ikke andet at have "forvirret læseren på et højere niveau". At entropien af et isoleret system ikke kan aftage opfattes inden for naturvidenskaben som en fundamental naturlov, og det er den naturlov, der ligger bag det faktum, at verden fremtræder irreversibel for os. Men entropien kan faktisk godt aftage en lille smule som en kort fluktuation – det er bare utroligt svært at måle. Loven om entropiens vækst er en pragmatisk sandhed, ikke en ontologisk sandhed. Om det samme er tilfældet for andre fundamentale naturlove, eller om entropiens lov har særstatus rent erkendelsesteoretisk, er et yderst interessant filosofisk spørgsmål. ■



Lone Simonsen, professor i folkesundhedsvidenskab ved Roskilde Universitet

”
Med matematiske
og statistiske modeller
undersøger vi historiske
og nutidige pandemier
for at forstå fremtidens
trusler.”

Bliv cand.scient. i Mathematical Bioscience på Roskilde Universitet
Læs om uddannelsen på ruc.dk

MODELLER FOR JORDKLODEN VISER FREM TIDENS KLIMA

Af Henrik Bendix,
videnskabsjournalist.
Vidmere.dk



Om forskeren

Jens Hesselbjerg Christensen er professor i klimafysik på Niels Bohr Institutet ved Københavns Universitet.

Efter at have taget en ph.d. i astrofysik blev han i 1990 ansat ved Danmarks Meteorologiske Institut, hvor han fra 2006 til 2017 var forskningsleder. En del af FN's klimapanel (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change) siden 1995. Ekspert i modellering af det fysiske klimasystem. hesselbjerg@nbi.ku.dk

I tre årtier har Jens Hesselbjerg Christensen forsøgt at forstå Jordens klima ved hjælp af stadig mere avancerede modeller. Han er optimist på klodens vegne, for han oplever, at der i stadig højere grad bliver lyttet til klimaforskere som ham.

Professor Jens Hesselbjerg Christensen tager imod i sit hyggelige kontor højt oppe i en ældre bygning på Tagensvej i København. Her holder Niels Bohr Institutets sektion for Is, Klima og Geofysik midlertidigt til, indtil Københavns Universitets stærkt forsinkede skandalebyggeri Niels Bohr Bygningen engang bliver klar til indflytning.

For ham personligt betyder det ikke det store, hvor han sidder. Han er ikke blandt de klimaforskere, der har brug for sofistikeret laboratorieudstyr til analyse af luftbobler, der har været fanget i isen i tusindvis af år. I stedet benytter han supercomputere til at modellere Jordens klimasystem for at blive klogere på,

hvorfor klimaet rundt omkring på kloden opfører sig, som det gør, og hvordan det bliver i fremtiden. Det gør han så godt, at han har været medlem af FN's klimapanel siden 1995.

»Klima er vejret over tid. Jeg prøver at forstå, hvordan vejret altid re-præsenteres på den samme måde, men med variationer og udsving, over en periode på mange år,« fortæller Jens Hesselbjerg og uddyber forskellen på vejr og klima:

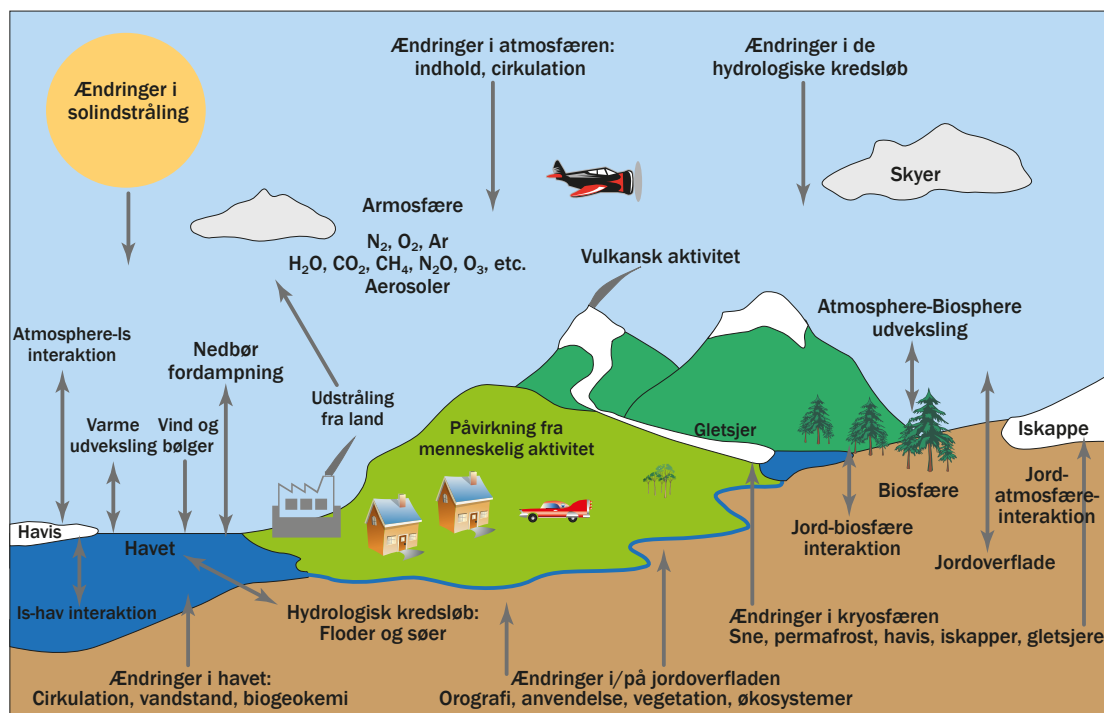
»Man kan sige, at klimaet er det, vi forventer, mens vejret er det, vi får. På en ferie vil vi måske gerne sidde og dase på en strand, og så tager vi et sted hen, hvor der er sol og varme. Hvis vi hellere vil stå på

ski, tager vi et sted hen, hvor der er koldt og sne. Klimaet på destinationen afgør, hvordan temperaturer, fugtighed og vejrforhold forventeligt vil være.«

»Men vi kan blive grueligt skuffede – der kan være regn og tordenvejr på den strand, hvor vi havde tænkt os at dase i solen, eller skiområdet er ramt af en varmebølge, som giver plusgrader og ingen sne. Tager vi afsted 10 år i træk, skal vi dog nok få ni gode ferier.«

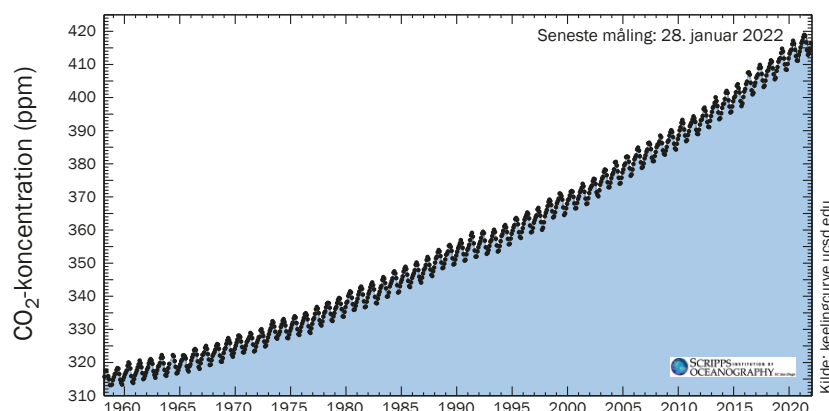
Drivhuseffekten har været kendt længe

Vejret kan ændre sig fra dag til dag, men klimaet er sværere at rykke ved. Alligevel er det lykkedes os mennesker at få klodens



Figuren viser en lang række faktorer, der påvirker jordens klima, og som forskerne skal have med i deres modeller, hvis de skal kunne modellere klimaets udvikling. Kilde: IPCC

Den såkaldte Keeling-kurve viser målinger af atmosfærens CO₂-indhold ved Mauna Loa Observatoriet på Hawaii, som Scripps Institution of Oceanography har foretaget siden 1958.



klima til at forandre sig ganske hurtigt. Der er ikke længere tvivl om, at afbrændingen af fossile brændstoffer (olie, kul og gas) er årsagen til det øgede CO₂-indhold i atmosfæren, som giver global opvarmning. Det har taget lang tid at nå den erkendelse i offentligheden, selv om teorien bag drivhuseffekten og betydningen af stigende mængder af CO₂ i atmosfæren har været på plads i mere end et århundrede.

»De vigtigste drivhusgasser er vanddamp, kuldioxid, metan og lattergas. Og de tre sidste piller vi ved. Større koncentrationer af disse gasser betyder alt andet lige, at temperaturen på kloden stiger. Det har man vidst i meget lang

tid, faktisk allerede før Arrhenius,« fortæller Jens Hesselbjerg.

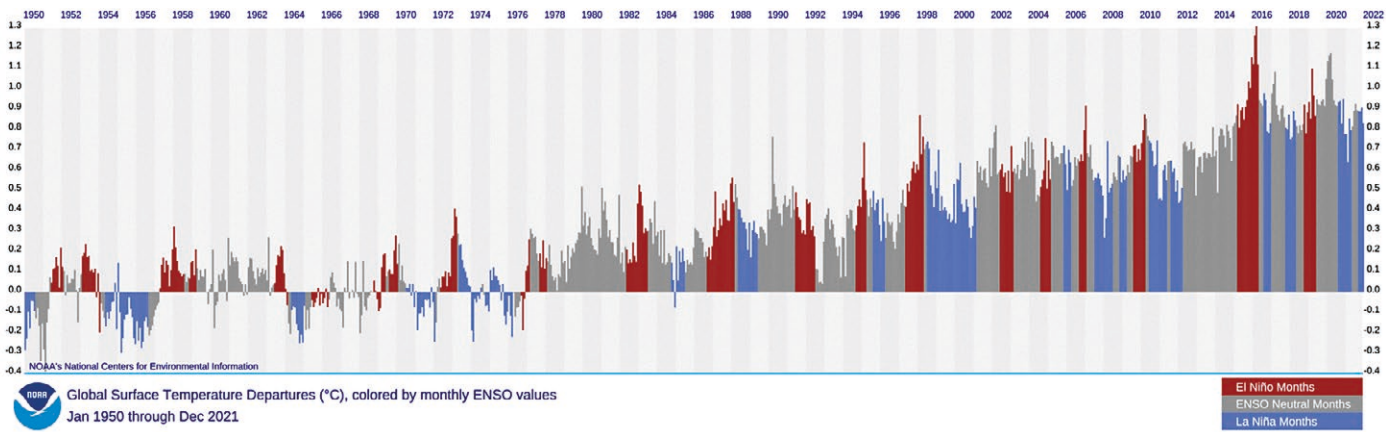
Den svenske fysiker og kemiker Svante Arrhenius var den første, der helt tilbage i 1896 satte tal på, hvor meget en øget koncentration af CO₂ i atmosfæren betyder for klodens temperatur. I de følgende år forfinede han sine beregninger og kom frem til, at en fordobling af mængden af CO₂ ville øge den globale gennemsnitstemperatur med cirka fire grader.

Netop beregningen af, hvor meget temperaturen stiger, hvis mængden af CO₂ i atmosfæren fordobles i forhold til det førindustrielle niveau, er et standardeksperiment, som klimaforskerne stadig udfører

ved hjælp af nutidens avancerede klimamodeller. Temperaturstigningen kaldes modellens klimafølsomhed. De nyeste modeller er ikke helt enige om klimafølsomheden, men et godt bud er en temperaturstigning på tre grader.

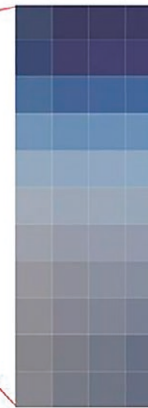
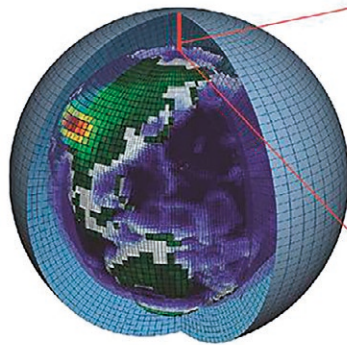
»Det kan meget vel være, at man kan påpege regnefejl i Arrhenius' udregninger, men de fire grader er jo ikke skævt i forhold til den klimafølsomhed, modellerne giver i dag – han fik jo ikke en temperaturstigning på 40 grader, for eksempel,« siger Jens Hesselbjerg.

»De menneskeskabte klimaforandringer har allerede givet en temperaturøgning på én grad i global middeltemperatur, og resten af år-



Kurven viser afvigelsen i den globale temperatur ved jordoverfladen målt siden januar 1950 til december 2021. Farvekodeerne angiver, om perioden har været præget af vejrphænomenerne El Niño og El Niña eller der har været tale om neutrale måneder. Kilde: NOAA

Klimamodeller er typisk systemer af differentialligninger. For at køre en simulation opdeler forskere planeten i et tredimensionelt gitter, anvender de grundlæggende ligninger og evaluerer resultaterne. Atmosfæremodeller beregner fx vind, varmeoverførsel, stråling, relativ fugtighed og overfladehydrologi inden for hvert punkt og evaluerer interaktioner med de tilstødende punkter.



Modellernes opløsning i dag.



Det ideelle mål.

Illustration: Meghan Moran / Juan Botella

hundredet vil de sandsynligvis give to grader yderligere – eller måske mere, alt efter hvor effektivt vi kan bremse CO₂-udledningen og indfri målsætningen i Parisaftalen. Rigtig meget af den udvikling er fanget af den type modeller, vi havde for 30 år siden – modeller som dem, Syokoro Manabe og Klaus Hasselmann fik Nobelprisen i fysik for i 2021. Det står til troende, hvad de fandt frem til; det er ikke radikalt lavet om.»

»Men nu har vi tilført modellerne flere detaljer, og vi får stadig det samme resultat. Med de avancerede modeller har vi fået belæg for, at det konceptuelle billede er korrekt. Vi har fået mange flere data, og vores data er af højere kvalitet. Vi er gået fra at have termometre stående et begrænset antal steder til at måle alle mulige bølgelængder fra satellitter, der kan måle overalt på kloden. Så vi har fået et meget stærkere fundament for at sige, at tingene ændrer sig.«

Energiregnskabet skal gå op

Udgangspunktet for en klimamodel er den energi, kloden modtager fra Solen. Vinklen på Jordens rotationsakse styrer årstiderne på vores breddegrader, men også klimaet i troperne, hvor man ikke har sommer og vinter, men typisk en eller to regntider og tørt vejr resten af året.

Temperaturen på Jorden er i bund og grund givet af vores position i forhold til vores lokale stjerne. Strålingen fra Solen opvarmer den solbeskinnede side af jordkloden, og samtidig afgiver Jorden varme ud til verdensrummet fra både dagsiden og nattesiden.

En simpel beregning ud fra afstanden til Solen og balancen mellem den indgående og udgående energi giver en jordklode en gennemsnits-temperatur på cirka 18 minusgrader. Så kold ville vores klode være, hvis det ikke var for drivhusgasserne, som hæver temperaturen til de cirka 15 grader, vi har i dag.

På lange tidsskalaer skal man tage hensyn til, at Jordens bane om Solen og hældningen af klodens rotationsakse i forhold til banen om Solen ikke er helt konstant. Som den serbiske geofysiker Milutin Milanković fandt ud af, har den naturlige, periodiske variationen i solindstrålingen stor betydning for klimaet.

Når først den elementære energibalance er på plads, kan man begynde at regne på, hvordan energi transporteres rundt på kloden af vind og havstrømme, og så begynder det for alvor at blive kompliceret, og computere bliver uundværlige.

I en klimamodel deles Jordens atmosfære op i tredimensionalt net af celler, så vind, temperatur, fugt og tryk kan beregnes for alle steder på kloden. Jo mindre de forbundne celler er, desto flere beregninger skal computeren udføre.

Da den unge Jens Hesselbjerg



Ud for Sydamerikas kyst bringer den såkaldte Humboldtstrøm koldt vand op til overfladen, og der dannes derfor et lavthængende, tyndt skydække. Det har været en udfordring for forskerne at få deres klimamodeller til at gengive dette skylag og den relaterede ringe nedbør i området. Paracas National Reserve/CC BY-SA 2.0

skiftede fra astrofysik til klimamodellering for tre årtier siden, var han lidt af en computernørd, og netop kendskab til computere og programmering var noget, der kunne bruges i det nye fagområde.

»I de første klimamodeller for 30 år siden opererede man på horisontalskalaer på 500 x 500 km, så hele Europa var måske 12 referencepunkter,« fortæller han.

»På global skala kan vi i dag regne på en horisontal celle, der er cirka 1 x 1 km, og så med et tykkelseslag fra en halv snes meter op opefter i atmosfæren. Det giver rigtig mange beregningspunkter og kan kun lade sig gøre med de ypperste computere.«

Havstrømme og vandets kredsløb skal med

Men det er ikke nok at regne på atmosfæren, når havstrømme også transporterer energi og har stor betydning for klimaet. Atmosfærefysikere og oceanografer, der havde udviklet modeller uafhængigt af

hinanden, var nødt til at sætte sig sammen og få modellerne til at snakke sammen.

»Det var dømt til at gå galt, for begge slags modeller havde systematiske fejl, og modellerne gav helt forkerte forudsigelser,« siger Jens Hesselbjerg og bruger upwelling – når koldt vand fra dybhavet bringes op til overfladen, fordi fralandsvind fører overfladevandet til havs – som eksempel:

»Vi har Humboldtstrømmen ud for Sydamerika og også en strøm ud for Namibias kyst, hvor der kommer forholdsvis koldt vand op. Hvor det kølige vand møder atmosfæren, fortættes vanddampen, og der dannes et lavthængende, ret tyndt men udbredt skydække, der igen er med til at holde temperaturen nede i havet. Her var det svært at få modellen til at lave skylaget, og så gik det galt. Man blev nødt til at have mange flere lag i atmosfæren, så man får opløst skyerne rigtigt, og det tog lang tid at finde ud af og få

til at virke i modellerne.«

Vand findes ikke bare i havet, men falder også ned på landjorden i form af regn, og vandets kredsløb er også med i modellerne. Her er det også vigtigt med en høj opløsning, så alle detaljerne kommer med, lyder det fra Jens Hesselbjerg:

»Se bare på forskellene på den skandinaviske halvø; Skånes øverste lag minder meget om Danmarks, men længere oppe i Sverige har vi skov, og i Norge har vi fjelde – en anden undergrund. Det betyder noget for vandets kredsløb, for vandet løber hurtigere af en klippe, ikke mindst hvor der er højdeforskelle.«

»Og hvad sker der i Lyng Å ved Allerød, hvor jeg bor? Det er måske meget at kalde den en å, for der er vand i den under halvdelen af året, men så er det jo en vandtransport – en del af den regn, der kommer ned, ryger den vej ud i havet i stedet for at sive ned i jorden. Det kan vi regne på og løse numerisk inden



I juli 2021 var der et usædvanligt langvarigt og kraftigt skybrud over Rheinland-Pfalz og Nordrhein-Westfalen i Tyskland samt dele af Holland og Belgien. Ødelæggelserne var omfattende med mange omkomne. Her ses den belgiske by Pepinster. Forekomsten af disse ekstreme vejrhendelse vil blive hyppigere og med risiko for at blive endnu kraftigere fremover pga. klimaændringer.

Foto: Christophe Licoppe, the European Commission, European Union, 2021.

for skalaen 1 x 1 km. Vi er tæt på, at en lille å som Lyng Å er med i klimamodellerne.«

Klimamodeller er blevet til modeller for Jorden

Stadig flere elementer tilføjes de avancerede klimamodeller, som forskere fra mange forskellige forskningsområder i dag arbejder sammen om. Udover atmosfæren, oceanerne, jordoverfladen og vandkredsløbet er iskapperne også ved at komme med, og de biokemiske kredsløb, specielt kulstofkredsløbet, er blevet inkluderet. Så taler forskerne ikke længere om klimamodeller, men om jordsystemmodeller (Earth System Models).

»På verdensplan er der omkring 15 Earth System Models. Fra dansk side er vi med på en europæisk model, der kaldes EC-Earth, hvor specielt de meteorologiske tjenester i mindre lande og forskningsgrupper, der vedligeholder modellens forskellige komponenter, arbejder sammen,« siger Jens Hesselbjerg.

»De forskellige klimamodeller og jordsystemmodeller har ikke helt samme klimafølsomhed. Nogle af dem laver skyerne lidt anderledes eller beskriver landoverflader på en anden måde, for eksempel i forhold til, hvor meget sollys, de reflekterer. Det er nuancer, men de spiller en rolle,« fortsætter han og peger på, at vi jo er i fuld gang med at eksperimentere med jordsystemet, og at modellerne og måledata skal passe sammen:

»Det videnskabelig miljø bruger rigtig meget tid på at dokumentere kvaliteten af modellerne ved at sammenligne med den virkelige verden. Det er vigtigt, at modellerne er tro imod en række af de observerede ændringer, vi ser.«

Jordsystemmodeller spiller sammen med observationer og forståelsen af de fysiske sammenhænge en hovedrolle i de rapporter, FN's klimapanel udgiver om klimaets tilstand før, nu og i fremtiden. Og da det selv med de hurtigste supercomputere er svært at spå om fremtiden, må forskerne nøjes med at sige, at en fordobling af CO₂ i atmosfæren sandsynligvis vil øge den globale temperatur med mellem 2,5 og 4 grader i forhold til 1850. Bedste bud fra eksperterne er en temperaturstigning på tre grader.

Vi får mere ekstremt vejr

Modellerne bliver hele tiden bedre, men teknologien sætter grænser for opløsningen. Det er ikke nemt at finde en computer, der er kraftig nok til at håndtere de ekstremt mange beregninger, og forskerne har også svært ved at finde pengene til computertiden. Desuden er der grænser for, hvad computerne kan gøre, fortæller Jens Hesselbjerg:

»Hvis vi kan computermodellere hele Jorden på fuld skala – af nogle kaldet en digital tvilling – så mangler vi kvalificerede mennesker, der kan analysere resultatet dybt nok. Jorden opløst med én km, det er virkelig mange punkter. Modellerne skal

kunne reproducere de atmosfæriske bevægelser i stor skala, men vi skal også kunne kigge på, hvad der sker i Danmark eller på en græsk ø eller langt ude i Stillehavet. Den kapacitet findes ikke i tilstrækkelig grad.«

En stigning i temperaturen giver stigning i havniveauet, for vand udvider sig, når det bliver varmere, og dertil kommer afsmeltning fra gletsjere og fra iskapperne i Grønland og Antarktis. Desuden får vi mere ekstremt vejr, for eksempel i form af kraftig nedbør eller tørke, og den nye generation af klimamodeller tillader forskerne at dykke ned i forskellige geografier og undersøge, hvad den globale opvarmning får af konsekvenser i specifikke områder.

»Vi kan ikke altid sige, om en konkret begivenhed som eksempelvis det voldsomme skybrud over København 2. august 2011 havde med klimaforandringer at gøre, men vi ved, at ekstreme begivenheder bliver mere sandsynlige og endnu kraftigere. For store, udbredte ekstremer som hedeølger og tørke kan vi faktisk godt sige, at de er meget mere sandsynlige nu, hvor det er varmere end tilbage i tiden før industrialiseringen. Så derfor kan vi bedre italesætte de billeder, vi ser for fremtiden.«

»Vi kan bede folk om at forestille sig et skybrud, der starter en time før, slutter en time senere og kulminerer med dobbelt så høj intensitet som det skybrud, vi havde i 2011. Hvordan forbereder man sig på sådan en begivenhed?« spørger Jens Hesselbjerg og indrømmer, at klimaforskerne måske nok har fokuseret lidt for meget på talknuseri frem for at komme med eksempler på, hvad vi kan vente os. Han er ikke et øjeblik i tvivl om, at klimamodeller kan bruge til at konkretisere de ekstreme vejrbegebenheder, så vi bliver bedre klædt på til at håndtere dem.

Iskapperne er svære at forudsige

Den globale overfladetemperatur var 1,09 °C højere i 2011-2020 end 1850-1900, og klimaforskerne

kan nu sige helt utvetydigt, at det er menneskets afbrænding af fossile brændstoffer, der har forårsaget opvarmningen. Klimamodellerne giver simpelthen ikke andre muligheder.

Men hvor meget varmere, det bliver i fremtiden, det kan klimaforskerne ikke sige, for det afhænger af, hvor meget og hvor hurtigt vi kan begrænse udledningen af CO₂. Sikkert er det, at der skal ske store reduktioner, hvis vi skal holde os under en temperaturstigning på to grader frem mod 2100.

Omvendt kan vi se frem til mere end en fordobling af CO₂-niveauet og dermed en temperaturstigning på mere end fire grader før 2100, hvis vi bliver ved med at være afhængige af fossile brændsler som kul i en verden med stigende befolkningstal og økonomisk vækst.

Hvor meget vandstanden vil stige som konsekvens af de stigende temperaturer er endnu sværere at spå om, specielt fordi klimaforskerne har svært ved at forudsige iskappernes opførsel. Men fortiden kan give et hint, for ved at analysere luftbobler i iskerner og boreprøver fra havbunden kan forskerne finde ud af, hvordan klimaet var for hundredtusinder af år siden.

I en del af den seneste mellemistid for mellem 130.000 og 115.000 år siden, Eemtiden, var den globale gennemsnitstemperatur cirka en grad højere, end den er i dag, og havet stod cirka seks meter højere. Det meste af indlandsisen på Grønland – men ikke det hele – var smeltet væk, og de store ishylder, der sidder fast på isen ved Antarktis, men flyder på havet, må være kollapsede.

»Vi ved, at det kan gå forholdsvis hurtigt i Antarktis, når ishylderne bryder op, for så lukker man op for gletsjere fra iskappen, så de kan kælve. Men vi ved ikke, om det kan ske på 10 år eller 100 år, for selv om vi kender mekanismerne, har vi stadig ikke god nok forståelse for, hvordan isen flyder i de zoner, hvor



Antarktisk kæmpegletsjer får opmærksomhed

Isen ved polerne er vanskelig at modellere, og derfor er det svært at regne på de fremtidige stigninger i vandstanden, der skyldes afsmeltning fra isen. Forskerne har brug for flere data, og dem får de for eksempel fra den enorme gletsjer Thwaites i Vestantarktis. I et stort, femårigt forskningsprojekt er mere end 100 forskere i fuld gang med at undersøge, hvordan gletsjeren reagerer på de stigende temperaturer.

Gletsjerne er næsten fem gange så stor som Danmark, og i løbet af de seneste 20 år har den mistet mere end 1000 milliarder tons is på grund af opvarmningen af luften og vandet omkring den. I løbet af få århundreder kan vi opleve et totalt kollaps af Thwaites-gletsjeren, hvilket vil medføre en stigning af vandstanden på 65 cm. Endnu værre bliver det, hvis kollapsede åbner op for, at resten af isen i Vestantarktis kan flyde ud i havet.

Ved hjælp af målinger fra fly, satellitter, vejrstationer, borer, undervandsrobotter og sensorer på havpattedyr prøver forskerne at blive klogere på, hvordan havvandet gnaver sig ind under gletsjeren, så de får et bedre billede af, hvordan den påvirkes af stigende temperaturer. Alle data bidrager til at forbedre modellerne af gletsjeren, så forskerne lettere kan forudsige dens skæbne. (Kilde: thwaitesglacier.org).

Udsnit af den kælvende front af Thwaites-gletsjeren. Foto: NASA ICE / James Yungel/CC BY 2.0



Videre læsning

Mere om klimamodeller: Klimaforskernes krystalkugle – *Aktuel Naturvidenskab* nr. 3/2007

den knækker og brækker,« siger Jens Hesselbjerg.

Det er nok tvivlsomt, om vi kan holde os under en temperaturstigning på to grader i forhold til den førindustrielle tid, når nu vi allerede har passeret den ene grad og fortsætter med at lukke CO₂ ud i atmosfæren. Men Jens Hesselbjerg er trods alt optimist, fordi klimaet nu har verdens opmærksomhed, og fordi han har oplevet, at politikerne rent faktisk lytter til videnskaben, når parterne mødes til de store klimatopmøder (Conference of the Parties, COP):

»I dag ved ethvert skolebarn,

hvad det handler om. Det er positivt, at Greta Thunberg findes og gør, som hun gør, for det er et udtryk for, at diskussionen ikke længere bare foregår mellem akademikere. Både politikere og den brede befolkning er med i diskussionen nu.«

»Politikerne er i dialog med klimaforskerne nu. Paris-aftalen viser, at der har været en refleksion af, hvad der er blevet sagt fra forskernes side. Det tog lang tid, før der blev lyttet, men det gør der nu, hvor det er blevet mainstream at tale om klimaforandringer. Nu skal politikerne bare sætte handling bag ordene,« slutter han. ■

Dyk ned i fremtidens klima

Som led i arbejdet for FN's klimapanel har Jens Hesselbjerg været med til at skabe et globalt klimaatlas, hvor man kan se, hvordan klimaet vil ændre sig forskellige steder på kloden. Så kan man selv undersøge, hvor den globale opvarmning rammer hårdst. Ved at kombinere de globale klimamodeller med mere detaljerede regionale modeller, har forskere fra Danmarks Meteorologiske Institut på tilsvarende vis skabt et klimaatlas for Danmark alene. Her kan man for eksempel se, hvor stor stigningen i temperatur eller vandstand bliver, eller hvor mange flere skybrud, vi kan forvente forskellige steder i landet.

Klimapanelets klimaatlas: interactive-atlas.ipcc.ch

DMI's klimaatlas: dmi.dk/klimaatlas

ET HELHEDSSYN PÅ UØNSKEDE STOFFER I DRIKKEVANDET

Over hele verden stiger koncentrationerne af medicinrester og andre uønskede stoffer i drikkevandet. Ekspert råder til helhedsanalyser af vand i stedet for at bruge uendelige ressourcer på at analysere og undersøge alle stoffer hver for sig.

Hvad enten vi drikker vand fra hanen eller fra købeflasker, vil vi aldrig få helt rent vand; det vil altid indeholde et mylder af forskellige stoffer.

»I dag er det sådan, at vi drikker pesticidrester, når vi drikker vand. De er under grænseværdierne, men de er der. Vi finder også stadig flere og flere medicinrester, og vi kan formentlig i snarlig fremtid også finde medicinrester i alt det vand, vi drikker,« siger Frants Roager Lauritsen, der er professor ved Syddansk Universitet og ekspert i de kemiske forbindelser, der opstår i forbindelse med rensning af vand.

Det gælder både det danske postevand, der pumpes op fra undergrunden og det rensede overfladevand, som næsten alle andre lande forsyner sig med.



Foto: Colourbox

Det store spørgsmål er så, om det gør noget – når bare stofferne holder sig under grænseværdierne?

»Det er der ingen, der ved. Men vi ved, at de aktive stoffer i for eksempel pesticid- og medicinrester kan interagere med hinanden, og de kan ved rensning blive nedbrudt til andre kemiske forbindelser, som kan være mere sundhedsskadeligt end det oprindelige lægemiddel eller pesticid,« siger Frants Roager Lauritsen.

Kombinationsmulighederne for nye forbindelser og biprodukter, der kan optræde i drikkevandet, er altså tæt på uendeligt mange.

Vi bør se på helheder frem for enkeltstoffer

På den baggrund mener Frants Roager Lauritsen, at det er nødvendigt at forbedre de metoder, vi i dag bruger til at vurdere, hvor effektivt et vandrensningsanlæg reelt renses vandet.

»Der sker så meget og så hurtigt

Medicinrester i drikkevandet

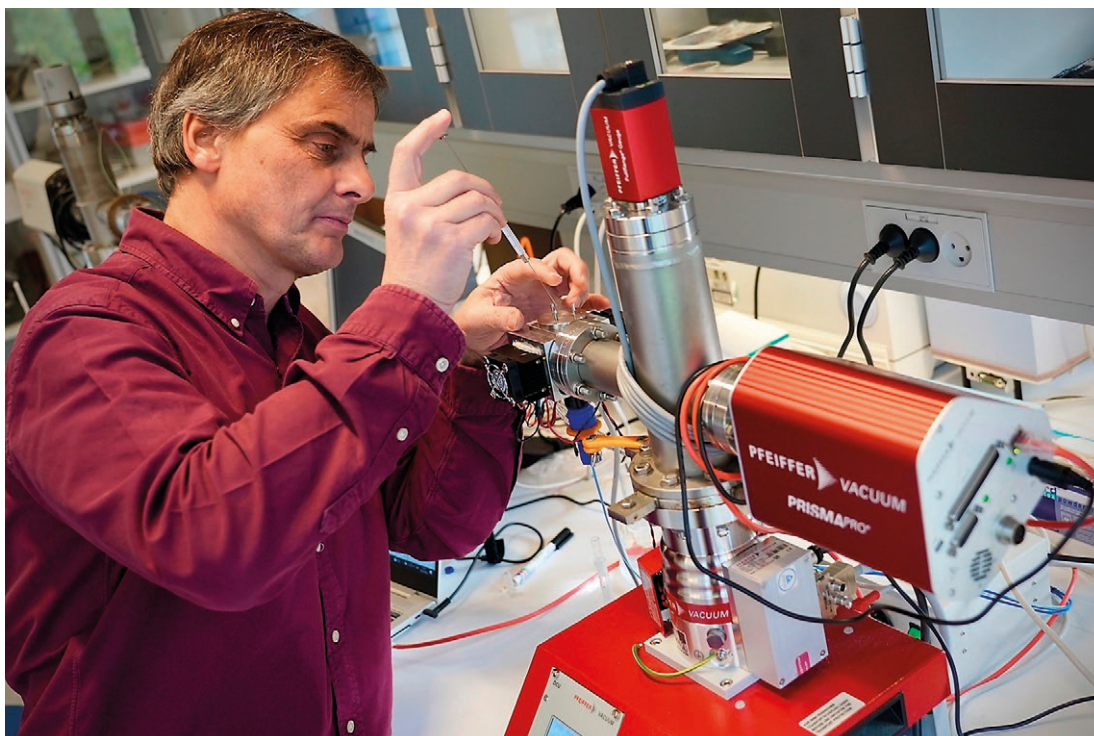
Der optræder flere og flere fremmede stoffer i drikkevandet, og det er primært pesticider og lægemidler. Lige nu har pesticiderne størst fokus, eftersom flere og flere af disse 20-30 år efter brug er trængt så langt ned gennem jorden, at de nu når frem til det grundvand, vi bruger. Mens pesticiderne hører til gruppen af kendte forurenere, optræder lægemidler i stort tal på lister over det, som kaldes "Emerging Organic Contaminants". Altså lister, som omfatter stoffer, der endnu ikke er omfattet af lovgivning, men som er under observation. For eksempel har et nyt omfattende review angivet en liste over de 10 hyppigst fundne Emerging Organic Contaminants i europæiske grundvandsstudier, og her udgør lægemidler 6 ud af de 10. Størstedelen af lægemidlerne bliver skyllet ud med urinen i toiletet af mennesker, der tager medicin. Ifølge en rapport fra DANVA fra 2021 er der i Danmark især tale om medicinrester fra antibiotika, antidepressiva, hormonstoffer, antiinflammatoriske midler og medicin mod hjerte/kar-sygdomme.

Forfatter

Birgitte Svennevig, kommunikationsmedarbejder, Syddansk Universitet
birs@sdu.dk

Om forskeren

Frants Roager Lauritsen er professor ved Institut for Fysik, Kemi og Farmaci, Syddansk Universitet
frl@sdu.dk



Frants Roager Lauritsen i færd med at betjene den eksperimentelle laboratoriesimulator (reaktor), han har udviklet sammen med sine kolleger. Foto: Mikkel Linnemann Johansson.

med vores drikkevand, at vi har brug for at kunne få hurtige svar på, om vandet er toksisk – og om vores rensningsmetoder virker,« siger han og fortsætter:

»Med den traditionelle tilgang, hvor en vandforsyning kvalitetssikrer drikkevandet ud fra analyser og screeninger for kendte stoffer, kan der let gå år, før man opdager et nyt forurenende stof. Herefter kan der igen gå år, før man har klarlagt det nye stofs toksikologiske effekt, og hvor effektivt rensningsanlægget fjerner det.«

Derfor mener Frants Roager Lauritsen, at vi skal ændre kurs og gå over til at bruge nogle metoder, som hurtigt og bredt kan vurdere, om en given drikkevandsressource – det kan være en sø – udgør en toksikologisk fare.

»Hvis det er tilfældet, skal vi kunne afgøre, om en forhåndenværende renseteknologi kan fjerne gift-faren, og vi skal også kunne afgøre, om rensningen skaber uønskede biprodukter; om ét farligt stof bare bliver transformeret til nogle andre,« siger han.

Biprodukter ved desinficering af vand

Globalt set skal vand til drikkevandsbrug stort set altid desinficeres, før det kan drikkes. Der findes mange forskellige måder, hvormed vandet kan desinficeres. Oftest gøres det ved hjælp af klor, fordi klorering effektivt neutraliserer de fleste patogener, og så er det forholdsvist billigt og let at håndtere.

Når råvand desinficeres med klor, er det ikke bare patogenerne, som neutraliseres. Både naturligt forekommende og menneskeskabte organiske stoffer i vandet reagerer også med det aktive kloreringsstof (hypoklorsyre/hypoklorit, HOCl/OCl) og danner små nedbrydningsprodukter, som kan være harmløse, men potentielt også kan være endnu mere sundhedsskadelige end det oprindelige stof. Disse nedbrydningsprodukter kaldes desinfektionsbiprodukter. Mest kendt er de sundhedsskadelige trihalometaner (for eksempel kloroform, CHCl_3), som stort set altid dannes i forbindelse med en klorering af vand. I mange år har de skabt stor bekymring i forbindelse med svømmehaller, hvor kloreringen kan føre til forholdsvist høje koncentrationer af trihalometan (> 10 µg/L), og i dag er der fastsat grænseværdier for trihalometan.

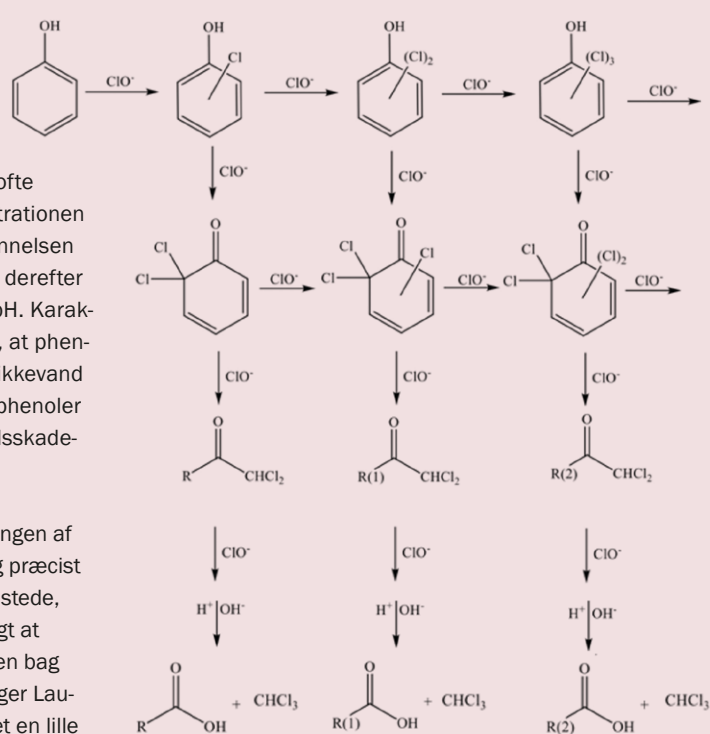
Ud over trihalometaner er haloaminer, haloeddikesyrer, nitrosaminer, haloaldehyder og haloaromatiske stoffer eksempler på almindelige desinfektionsbiprodukter, der er potentielt sundhedsskadelige. Det er dog vigtigt altid at huske, at gevinsten ved at neutralisere patogener langt overstiger ulempen ved de dannede desinfektionsbiprodukter.

Selv arbejder han på at udvikle en bærbar reaktor, der kan monitorere kemiske og biologiske processer, mens de sker. Reaktoren kan

i løbet af kort tid fortælle, om det kan lykkes at omdanne de skadelige stoffer til uskadeligt vand og kuldioxid, når vandet desinficeres,

Reaktor giver mulighed for at overvåge desinfektionsprocesser

Phenol (C_6H_5OH) er et godt modelstof til at illustrere reaktionerne, når vand desinficeres ved klorering, da både naturligt forekommende organiske stoffer i råvand såvel som sprøjtemidler og lægemidler ofte indeholder stoffer afledt af phenol. Illustrationen viser et muligt reaktionsforløb for omdannelsen af phenol til først klorerede phenoler og derefter trihalometaner (kloroform) ved neutral pH. Karakteristisk for de dannede klorphenoler er, at phenolerne med 1-2 kloratomer ofte giver drikkevand en særdeles dårlig lugt og smag, mens phenoler med flere kloratomer er stærkt sundhedsskadelige.



Som det fremgår af figuren, følger kloreringen af phenol et kompliceret reaktionsforløb, og præcist hvilke mellem- og slutprodukter, der er tilstede, hvornår og i hvilke mængder, er vanskeligt at sige, medmindre man kan følge kinetikken bag reaktionen. Til det formål har Frants Roager Lauritsen sammen med sine kolleger udviklet en lille laboratoriereaktor, hvori en desinfektionsproces kan gennemføres, mens man kontinuerligt måler, hvilke klorerede forbindelser, der dannes.

de individuelle desinfektions-biprodukter bestemmes som funktion af tiden under selve reaktionsforløbet.

Råvandet, som skal undersøges for dannelse af desinfektions-biprodukter, kommes direkte ned i reaktoren, hvorefter desinfektionsprocessen startes ved injektion af et eller flere aktive rensesubstanter, eventuelt kombineret med bestråling med UV-lys. Reaktoren er monteret på et transportabelt massespektrometer på en sådan måde, at flygtige biprodukter i reaktionsblandingen diffunderer igennem en polymermembran ind i massespektrometret, hvor de ioniseres og adskilles efter vægten af de intakte ioniserede molekyler eller fragmenter deraf. På denne måde kan koncentrationen af

Det er planen at udvide den nuværende laboratoriereaktor med teknologi, der gør det muligt at analysere den totale mineralisering af de organiske forureninger i vandet, for eksempel via en total organisk kulstofanalyse. Herudover skal der indbygges fiberoptik i reaktoren, således at der samtidigt kan udføres online absorptions- og fluorescens-analyser, for eksempel af haloaminer. Ambitionen er, at laboratoriereaktoren eksperimentelt skal kunne validere en drikkevandsbehandlingsteknologi til en specifik vandrensningssopgave indenfor 2 timer.

eller om desinficeringen i stedet fører til dannelsen af skadelige biprodukter.

Med en sådan reaktor kan man både overvåge et vandrensingsanlæg og rent forskningsmæssigt bruge reaktoren til at teste og optimere helt nye, avancerede rensningsteknologier.

Kunstig intelligens skal holde øje med vandkvaliteten

Mens Frants Roager Lauritsen arbejder på at udvikle reaktoren

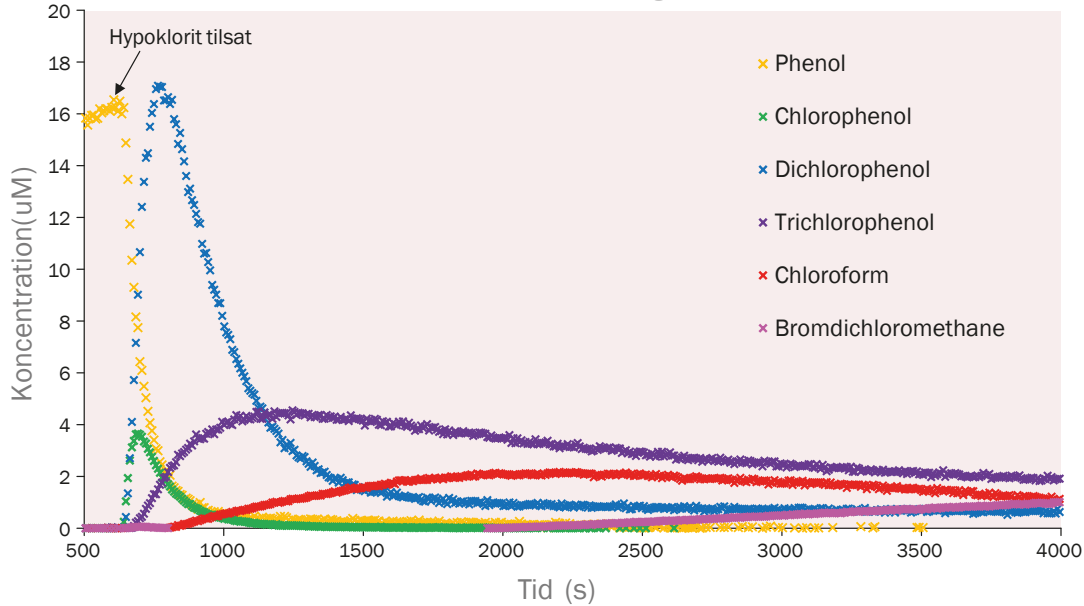
til kemisk karakterisering af vandrensingsprocesser, arbejder andre forskere på at udvikle metoder til bredspektret karakterisering af vands toksikologiske fare, hvor man forudsiger en vandprøves toksikologiske effekt ud fra vekselvirkninger mellem specifikke biologiske receptorer og de molekyler, der optræder i vandprøven.

Til sammen kan reaktoren og sådanne bredspektrede karakteriseringsmetoder levere tilstrække-

lig information til at kvalitetssikre drikkevand, også når der opstår nye forureningsfarer. Og hvis man kobler kunstig intelligens og machine learning på de store mængder data, som indsamles ved overvågning, kan fremtiden komme til at byde på effektiv overvågning af vores drikkevand.

»En computer kan så hurtigt og præcist fortælle os, om vandet er sikkert at drikke eller ej – og hvad der skal til for at rense det,« siger Frants Roager Lauritsen. ■

Vandhanevand med 1,5 mg/l phenol



Figuren viser et typisk kloreringsforsøg, hvor en phenolopløsning (1,5 mg/L) i almindeligt postevand kloreres ved tilsætning af natriumhypoklorit (12 mg/L). Selve reaktionen startes ved 600s, hvor natriumhypoklorit tilsættes, og der ses en hurtig (sekunder) dannelse af klorphenol, som når et maksimum efter cirka 1 minut, hvorefter koncentrationen falder. Den dannede klorphenol videreomdannes til diklorphenol med en maksimal koncentration efter cirka 3 min, hvorefter koncentrationen falder, efterhånden som diklorphenolen

omdannes til triklorphenol med maksimum efter cirka 8 minutter, hvorefter triklorphenolen langsomt forsvinder. Frants Lauritsen har ikke kunnet påvise en videre klorering til tetra- og pentaklorphenol. Kort efter phenoldannelsen ses en produktion af trihalometanen kloroform, som når et maksimum efter cirka 30 minutter, hvorefter en videreomdannelse af kloroform til trihalometanen bromdiklorometan ses. De hidtidige undersøgelser har vist en stor variation i reaktionsforløb afhængig af forsøgsomstændighederne.

Videre læsning

Medicinrester i spildevand og vandmiljø. Rapport af COWI for DANVA, 2021. Kan downloades på www.danva.dk

Kristensen G.H. et al. On-line monitoring of the dynamics of trihalomethane concentrations in a warm public swimming pool using an unsupervised membrane inlet mass spectrometry system with off-site real-time surveillance. *Rapid Commun. Mass Spectrom.* 2010, 24, 30-34.

Gilca A.F. et al. Emerging disinfection byproducts: A review on their occurrence and control in drinking water treatment processes. *Chemosphere* 2020, 259, 127476.

Chaukuraa N. et al. Contemporary issues on the occurrence and removal of disinfection byproducts in drinking water - A review. *J. Environ. Chem. Eng.* 2020, 8, 103659.

T. Kotiaho et al. Membrane Introduction Mass Spectrometry. *Analytical Chemistry*, 1991, 63, 875A-883A.

Bliv studerende for en dag

SDU

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 så bliver du klogere på, om uddannelsen er den rigtige for dig.

Besøg Anvendt matematik, Biokemi og molekylær biologi, Biologi, Biomedicin, Datalogi, Farmaci, Fysik, Kemi, Matematik eller Matematik-Økonomi på SDU i Odense.

Tilmeld dig på sdu.dk/nat/studerendeforendag



REWILDING

– Lad os få bisonokser tilbage i den danske natur

Af Kristian Sjøgren,
videnskabsjournalist

Om forskeren



Jens-Christian Svenning er professor ved Institut for Biologi ved Aarhus Universitet. Her leder han Center for Biodiversity Dynamics in a Changing World.

Hans forskning kombinerer grundvidenskabelige studier af biodiversitet og økosystemer med undersøgelser af effekter af klimaændringer, naturbeskyttelse og – genopretning, globalisering samt naturens betydning for mennesker. JCS' forskningstilgang involverer både Big Data-studier, fx baseret på satellitdata og store databaser for biodiversitet, mennesker og klima, og feltbaserede undersøgelser, både i Danmark og ude i verden, bl.a. Afrika og Sydamerika.
svenning@bio.au.dk

Det går ikke godt med biodiversiteten i hverken Danmark eller i resten af verden. I Danmark og mange andre steder er en del af løsningen at få store pattedyr som bisoner, vilde heste og vildsvin tilbage i naturen.

Biodiversiteten i verden og i Danmark er i mangel af en bedre formulering "i krise", og der er risiko for en massedøen.

Det står skidt til, og det vil kræve markante ændringer i vores prioritering og beskyttelse af naturen at rette op på situationen. Sagen er den, at naturen mister dyre- og plantearter i et fortsat rasende tempo.

Skal vi redde den tilbageværende biodiversitet eller måske endda drømme stort om at få vendt den nedadgående kurve til en opadgående af slagsen, er det nødvendigt at prioritere meget større arealer til funktionel natur – det vil sige natuarealer med høj værdi for biodiversitet. Her spiller de store dyr en særlig rolle – eller populært sagt, det er en god idé at slippe en masse vilde bisonokser, vilde heste og vildsvin løs i store danske naturområder.

Det er i hvert fald det, som professor og centerleder Jens-Christian Svenning fra Institut for Biologi ved Aarhus Universitet drømmer om i stille stunder.

Store pattedyr kan ifølge forskeren noget, som ellers er meget svært at opnå på andre måder. De kan skabe grundlaget for en meget sundere biodiversitet med flere arter af alt fra mikroskopiske biller og fluer til blomster og fugle.

»Flere store dyr i naturen er i sig selv øget biodiversitet, men de store dyr er også nøglearter for den øvrige biodiversitet, fordi de skaber nogle rammer, som andre dyr, planter og svampe kan trives i. De store dyr kan ikke undværes, hvis vi reelt skal forbedre forholdene for biodiversiteten. Hvis vi vil øge biodiversiteten i eksempelvis Danmark, er vi nødt til at hjælpe tingene og ikke mindst de store dyr på vej. Store dyr som bisoner og heste kan

jo ikke vandre frit i det europæiske landskab på grund af veje, marker, byer mm.« fortæller Jens-Christian Svenning.

Danmark blev ødelagt for længst

Hvis vi skal starte med at gøre brættet op, så har naturen det mange steder i verden skidt.

Nogle steder bruges landskabet så intensivt, at der er meget lidt plads til noget, der minder om vild natur med den dertilhørende mulighed for en mangfoldig biodiversitet. Det gælder blandt andet i Danmark, hvor de danske skove ofte er så velplejede, at de minder mere om golfbaner end vild natur.

I et land som Danmark gælder det derfor om at genetablere noget, der er blevet tabt for lang tid siden, da det meste af vores lille smørhul blev afskovet, drænet for vand og udlagt til marker. En gul rapsmark

Disse arter af store dyr ser Jens-Christian Svenning som oplagte i store dele af den danske natur:

Europæisk bison – Bisonokser er særligt interessante, fordi de afbarker træer og æder meget på buske. Derved har de et særligt potentiale for at give modspil til vedplanterne og fremme en varieret vegetation med levesteder for mange arter. Bison findes allerede i to danske naturområder



Vilde heste – Vilde heste er ifølge Jens-Christian Svenning oplagte at få tilbage i store dele af den danske natur, fordi de er gode til at græsse på de grove græsser, som mange andre dyr ikke spiser. Derudover tygger de ikke drøv og bevæger sig derfor mere end for eksempel køer. Det bidrager til at gøre heste til gode frøspredere, da de er meget mobile. Vildtlevende heste findes allerede i flere danske naturområder.



Vilde okser – Vilde okser er en anden oplagt mulighed. De spiser andre græsarter end heste, og vilde okser og vilde heste vil på den måde kunne supplere hinanden. Den oprindelig vilde okse i Europa, uroksen, er uddød, men arten overlever i form af de mange racer af tamkvæg. Mange racer er tilpasset til at klare sig selv uendørs året rundt, og okser etablerer sig nemt i naturen, hvis de får lov. Naturnært levende okser findes allerede i en del danske naturområder.



Elg – En fjerde art, som mangler i den danske natur, er elgen. Elgen spiser i modsætning til bison, vilde heste og okser slet ikke græs, men derimod primært blade, kviste og bark fra træer og buske. Arten kaldes derfor "nordens giraf" og har en helt anden effekt i naturen end de store græssere. En udfordring ved elgen er dog, at hvis man vil indhegne den, skal den have meget høje hegn på cirka 2,5 meter, idet ingen af os har lyst til at ramme en tre meter høj og 700 kilo tung elg med 120 kilometer i timen på motorvejen en mørk aften. Alternativt må man hegne sårbare vejstrækninger ligesom man gør i for eksempel Sverige. Arten findes pt. i dansk natur kun i Lille Vildmose.

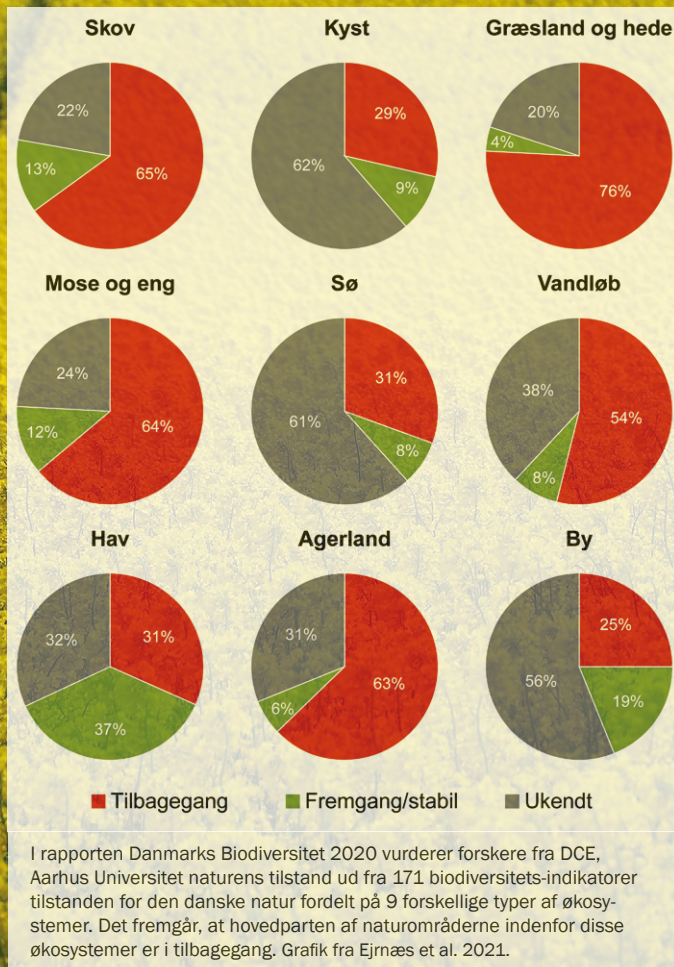


Vildsvin – Vildsvin er faktisk slet ikke velkomne i den danske natur, som tingene ser ud i dag. Det skyldes frygten for, at de skal bringe svinepest eller andre sygdomme til de danske tamgrise, hvilket frygtes at være ødelæggende for svineproduktionen. Ikke desto mindre ser Jens-Christian gerne, at vi finder løsninger, der tillader vildsvinene at komme tilbage – ligesom der jo lever masser af vildsvin i Tyskland, Holland, Sverige og Polen. Det er trods alt en naturligt hjemmehørende art. Vildsvinene spiller den meget vigtige økologiske rolle, at de roder op i jordbunden, hvilket er gavnligt for rigtig mange insekter og planter. Samtidig lever de nemt i landskaber á la det danske. Der findes blandt andet tusindvis af vildsvin i Berlin. Arten findes under hegn i enkelte danske naturområder.



Ud over top fem på Jens-Christian Svennings liste over dyr, som han gerne ser udbredt i den danske natur på kort sigt, findes der også en del andre, mere udfordrende dyr, som også kunne have en plads, hvis vi en dag vil realisere en ambition om at gøre Danmark til et foregangsland, når det gælder biodiversitet. Det gælder naturligt hjemmehørende rovdyr som **losser** og **bjørne** – i tilgift til ulven, som jo allerede er kommet tilbage af sig selv. Skulle der en dag blive plads til **elefanter** og **næsehorn**, vil man heller ikke høre Jens-Christian Svenning brokke sig.

Fotos: Jens-Christian Svenning



naturarealer til andre formål.

Beslutter man sig for, at et område skal omdannes til vild natur til gavn for den danske biodiversitet, nytter det med andre ord ikke noget, at det samme område bliver forvaltet til skov- og landbrug, eller at sportsaktiviteter bliver prioriteret højere end naturgenopretning.

Den anden side af problemet er, at områder, som man kunne forestille sig at lave om til vild natur, allerede er drænet, flade, homogeniseret og mangler mange af de arter, der skal give naturen indhold. Det er her, at bisonokser og andre store, vilde planteædere bør komme i spil.

»Hvis man holdt op med at slå græsset på en mark, ville der ske det, at den hurtigt ville vokse til med krat. Her kan bisonokser være med til at give træerne og buskene et modspil, da bisonokser i særlig grad afbarker træer og æder af buskene. Det er deres vigtigste funktion. Det er rigtig godt at få en masse træer og buske, men det er i modspillet med dyrene, at man får variation i vegetationen. Netop denne variation gør det muligt for mange forskellige arter, for eksempel lyskrævende planter, at finde de levesteder, de har behov for,« forklarer Jens-Christian Svenning.

Store dyr har flere vigtige økologiske funktioner

Bisonokser har levet i Europa i mere end én million år og ofte i et tempereret klima á la det nuværende danske. De yngste danske fund er fra for mellem 10.000 og 12.000 år siden med et enkelt fra for cirka 2.500 år siden. Europæisk bison var dog vidt udbredt i Central- og Østeuropa helt op i Middelalderen, men blev presset mere og mere tilbage af jagt. Over de senere årtier er europæisk bison blevet genudsat mange steder, mest i Østeuropa, men også i Tyskland og i Holland. De forsøg har vist, at arten sagtens kan leve her.

Faktisk har vi allerede bison i flere danske naturområder, nemlig

Rapsmarker giver ikke meget biodiversitet. Foto: Colourbox.

ser måske smuk ud i den synkende sommersonne, men det danske landskab er alt for homogent til at kunne understøtte den bred vifte af planter og dyr.

Andre lande har stadig meget vild natur med stor biodiversitet. Det gælder eksempelvis i et land som Ecuador, hvor det i langt højere grad handler om at bevare de store eksisterende områder med rig og vild biodiversitet – også selvom naturen selv der bestemt ikke altid er intakt og for eksempel ofte har mistet de store dyr.

»Biodiversitetskrisen skyldes flere forskellige faktorer, men en central del af det er i Danmark, at vi for lang tid siden har ødelagt de fleste naturlige habitater og bliver ved med at fastholde arealerne som ikke-natur, der har meget ringe værdi for biodiversiteten,« forklarer Jens-Christian Svenning.

Han uddyber, at en sund biodiversitet kræver masser af plads. Det nytter med andre ord ikke noget at have et lille stykke vild skov hist og her i Danmark og så tro, at det må være nok. Der skal mange, mange flere hektarer land til, som ikke har andet formål end at være naturens legeplads. Og det skal være funktionel natur, der byder på rig muligheder for biodiversiteten.

»Jo større arealer, man har, des flere arter findes der. Det er altså ikke nok, at en enkelt landmand hist og her lader én af sine marker vokse til. Beslutningen om at forsøge at redde og genetablere en sund biodiversitet i Danmark skal ske politisk, og det bliver ikke en gratis omgang,« siger Jens-Christian Svenning.

Naturen skal have en hjælpende hånd

Hvad kan vi så gøre? Jens-Christian Svenning peger for det første på, at man skal stoppe med at bruge



I Danmark bryder vi os ikke om at se ådsler af store dyr i naturen, og derfor bliver de som regel fjernet. Men ådsler bidrager til biodiversiteten ved at udgøre fødegrundlaget for et mylder af organismer. Her er det et bisonådsel med to prærieulve i Yellowstone National Park, USA. Foto: NPS/Jim Peaco, via Wikimedia Commons.

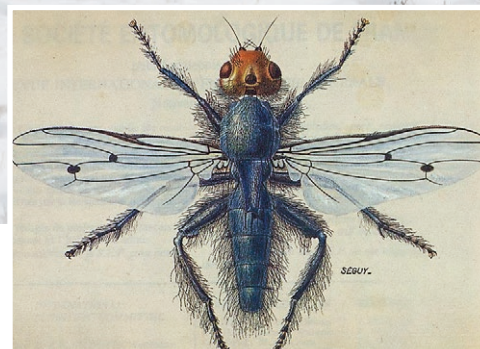


Illustration: Eugène Séguy

Almindingen på Bornholm og i Lille Vildmose. Der er de et bidrag til at sikre artens overlevelse og gavner også biodiversiteten.

Hvis det stod til Jens-Christian Svenning, gjorde man det samme mange steder i Danmark. Arten har nemlig en sårbar bestand og kan på flere forskellige måder bibringe noget til den danske biodiversitet.

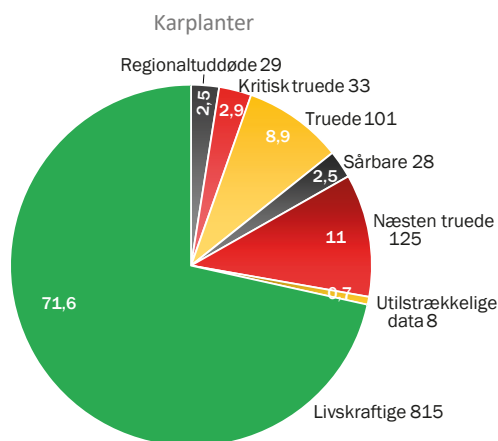
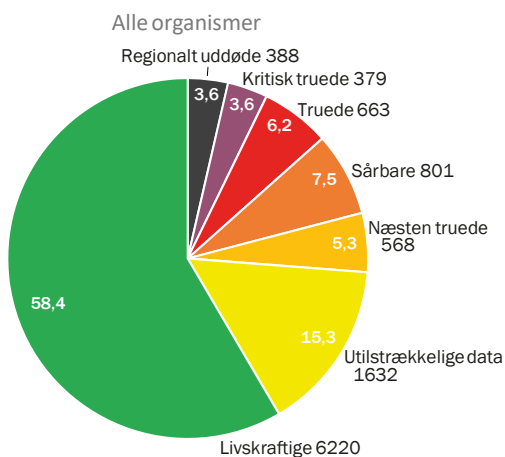
For det første er bisonerne i sig selv biodiversitet, og det er vigtigt at sikre artens fremtid bedst muligt. Helt simpelt bidrager bisonens genetablering som minimum med én art mere i den danske natur, nemlig arten selv.

For det andet fremmer bisonen en varieret vegetation, som andre arter kan trives i.

For det tredje er store dyr som bisoner også gode til at skabe mikrohabitater, som andre arter kan leve af eller leve i.

Et eksempel er kokasser, som mange arter af fluer og gødningsbiller ikke kan leve uden. Når bisoner går og klatter i naturen, følger et liv af smådyr efter, og smådyrene kan etablere et fødegrundlag for større dyr.

Tegning af fluen knogle-springer - (*Thyreophora cynophila*), der lever af døde dyr og har fået sit navn, fordi larverne "hopper" hen over kadaveret ved i hurtige bevægelser at bøje og strække kroppen. Arten blev anset for uddød indtil 2009, hvor den blev genopdaget i Spanien, hvor døde dyr i større grad får lov at ligge i naturen.



Figurerne viser status for henholdsvis alle undersøgte arter og karplanter ifølge den seneste danske rødliste fra 2019, hvor eksperter har vurderet trusselsstatus for 10.662 arter i den danske natur. Tallene på cirklerne er i procent.



Vilde heste i Mols Bjerge

På et 120 hektar stort areal i Mols Bjerge lever der i dag 25 vilde heste og 14 vilde kreaturer. Formålet med projektet er at skabe bedre forhold for biodiversiteten ved at genoprette naturlige økologiske processer med så begrænset menneskelig indgriben som overhovedet muligt. De første heste blev sluppet fri i området i 2016 på det, som hedder Molslaboratoriet. Hestene lever, som de ville gøre det i en verden uden mennesker, men jo begrænset til et ret lille areal og med løbende tilsyn og velfærdsmæssig forvaltning, som loven kræver det.

Læs mere på Naturhistorisk Museums infoside om projektet: www.naturhistoriskmuseum.dk/rewilding-1

De frie heste i Mols Bjerge falder dog ikke i alle menneskers smag. Hestene har blandt andet været genstand for flere verserende sager, hvor dyrevelfærdsaktivister og nogle hestedyrlæger har klaget over, at dyrene angiveligt sulter i løbet af vinteren. Dyrene tilses dog løbende for at sikre, at lovgivningen vedrørende dyrevelfærd overholdes, for eksempel ved at overføre dyr, der nærmer sig ikke at have god huld, til andre arealer. Molslaboratoriet er blevet tjekket mange gange af embedsdyrelæger, og der har aldrig været påtaler vedrørende dyrenes ernæring.

Til venstre exmoorponyer med føl og til højre gallowaykvæg på Molslaboratoriet i Mols Bjerge.
Fotos: Jens-Christian Svenning

Et andet eksempel er, at mange små insekter er specialiseret i at leve i kadavere fra store dyr. En interessant historie i den sammenhæng er knoglehopper-fluen, som man kender fra Frankrig og Tyskland i 1800-tallet. Fluen lever, som navnet nok antyder, af at spise og lægge æg i knoglemarven i knoglerne af store døde dyr – det kunne eksempelvis være døde bisonokser. De døde dyr skal helst have ligget i tre til seks måneder, før knoglehopperne vil have noget med dem at gøre.

Da kadavere af store dyr er stort set forsvundet fra naturen i hele Europa, troede man, at knoglehopper-fluen for længst var uddød. Den forestilling holdt også vand, indtil man i 2009 fandt den ellers heden-gangne flue i La Rioja i Spanien, hvor den en dag dukkede op i en biologs insektfælde. Med en mere vild natur, hvor døde dyr også får lov til at være i fred, vil eksempelvis knoglehopper-fluen kunne komme tilbage.

Bisoner spreder planter rundt i landskabet

Et fjerde vigtigt aspekt af at have store dyr som bisonokser i naturen er, at de er meget mobile. Helt generelt er der en stærk relation mellem størrelsen på et dyr, og hvor stort et areal dyret bevæger sig over på daglig basis.

Når det gælder de store planteædere som bisonokser, gør deres mobilitet, at de er med til at sprede næringsstoffer og frø fra planter rundt om i landskabet og ikke bare lige der, hvor planten eller træet stod i forvejen.

Mange planter er dybt afhængige af, at deres frø først kommer ind ad den ene ende på et stort dyr for en dags tid senere at komme ud i den anden ende langt derfra. Det er vigtigt, at arterne kan "bevæge" sig. Det kan være, at forholdene er gode det ene sted det ene år, men at forholdene er bedre et andet sted det næste år. Der kan det være afgørende, om planterne kan få

et lift af de store dyr. Spredning er også altafgørende for, om arter kan følge med klimaændringer. Det har de gjort i fortiden, og det kommer de i den grad til også at have brug for i fremtiden.

»I det historiske kulturlandskab har husdyr som tamheste, tamkøer og får bidraget med lignende spredningsprocesser, men sådan er det ikke mere. Når vi holder vores husdyr på små marker eller indendørs på stald, kan de ikke længere spille en rolle i forhold til at sprede frø rundt i landskabet. Her vil genetablering af store, vilde græssere som eksempelvis bisonoksen også spille en stor rolle,« siger Jens-Christian Svenning.

Omlæg landbruget for klimaets og biodiversitetens skyld

Én ting er selvfølgelig at lave en ønskeliste. En anden ting er at finde plads til de store dyr i det danske landskab. Som tingene ser ud i dag, er størstedelen af Danmarks areal udlagt til landbrug og anden inten-



Natur på Molslaboratoriet i Mols Bjerge. Foto: Jens-Christian Svenning

siv brug, men sådan behøver det måske ikke at være i fremtiden.

Jens-Christian Svenning ser selv et scenarie, hvor der bliver skåret gevaldigt ned på kødproduktionen i Danmark og i stedet kommer langt større fokus på en plantebaseret kost. Da kødproduktion kræver meget mere plads end planteproduktion, vil det kunne frigive en masse plads til vild natur – med store fordele for også klimaet.

»Der et stort potentiale i at flytte en stor del af landbrugets produktion over til planteproduktion. Så bliver landbruget mere klimavenligt og effektivt, og samtidig bliver der plads til naturgenopretning i det store omfang, der er nødvendigt,« siger Jens-Christian Svenning.

Danmark er faktisk i et vist omfang i gang med udtage lavbundsjord fra landbrugsproduktion for at mindske klima- og kvælstofbelast-

ningen fra landbruget – og netop med mål om også at genskabe eller forbedre naturforholdene.

»I det omfang det overhovedet er muligt, bør man indtænke de vilde, store planteædere i disse nye naturområder. Det er vigtigt, for at de får mest mulig værdi for biodiversiteten. Alternativt er der stor risiko for, at lavbundsområderne får ringe værdi for biodiversiteten« siger Jens-Christian Svenning. ■

Videre læsning

I artiklen *Fremtidens biodiversitet* fra *Aktuel Naturvidenskab* nr. 2/2020 kan du læse mere om, hvordan verdens plante-diversitet har udviklet sig og hvad vi kan forvente i fremtiden.

Evan C. Fricke, Alejandro Ordonez, Haldre S. Rogers and Jens-Christian Svenning: *The effects of defaunation on plants' capacity to track climate change*. *Science* 13 Jan 2022, Vol 375, Issue 6577, pp. 210-214.

Sun, Z., Scherer, L., Tukker, A. et al. *Dietary change in high-income nations alone can lead to substantial double climate dividend*. *Nat Food* 3, 29–37 (2022).

Ejrnæs et al. 2021. Danmarks biodiversitet 2020. DCE, Aarhus Universitet. dce2.au.dk/pub/SR465.pdf

Den danske rødliste 2019 ecos.au.dk/forskning/raadgivning/temasider/redlistframe/



[sdu.dk/ing](https://www.sdu.dk/ing) #sduing

SKAL DINE ELEVER PRØVE AT VÆRE INGENIØRSTUDERENDE FOR EN DAG?

Din elev følger en af vores ingeniørstuderende gennem en hel dag, deltager i undervisningen og i projektarbejdet. Eleven får en rundvisning på Det Tekniske Fakultet, ser laboratorier og vores andre spændende, innovative faciliteter. Dagen giver et indblik i at studere på ingeniøruddannelserne, og eleven får mulighed for at spørge vores studerende om alt fra det faglige til det sociale.

Målet er at give dine elever forudsætningerne for at tage et kvalificeret studievalg. Vores studievejleder står ligeledes til rådighed på dagen.

Eleven laver selv besøgsaftalen. Studerende for en dag afholdes i februar-maj og september-december.

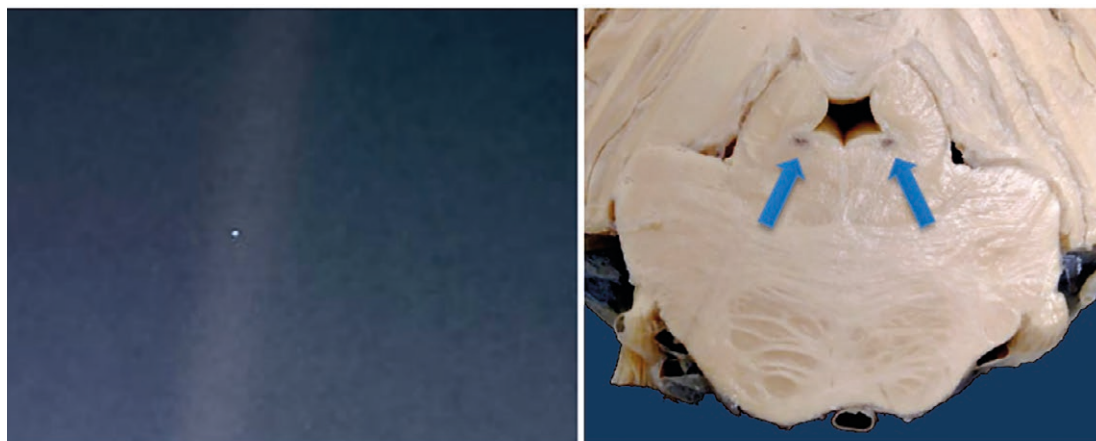
Mere information og tilmelding:
www.sdu.dk/tek/studerendeforendag

Find vores forskellige ingeniøruddannelser på:
www.sdu.dk/ing

Kontakt:
Tlf. **6550 7444** eller brobygning@tek.sdu.dk

Til venstre ses fotografiet *Pale Blue Dot* taget af Voyager 1 i 1990, som viser Jorden som en blålig prik. Foto: NASA

Højre: Snit af hjerne-stamme fra menneske. På vævssnit fremstår Locus Coeruleus svagt blålig på det blege hjernevævs baggrund. Foto: brain.oit.duke.edu



HJERNENS BLÅ PRIK

- centrum for hjernens sundhed?

Et lille område af hjernen bestående af nogle få tusinde neuroner kaldet Locus Coeruleus har formentlig stor betydning for hjernens funktion og sundhed.

Derfor er forskerne meget interesserede i at undersøge funktionen af dette område nærmere, hvilket dog er en udfordring.

Forfatterne



Nanna Bertin Markusen er medicinstuderende og forskningsårsstuderende. bertin@cifn.au.dk



Rasmus West Knopper er ph.d.-studerende. west@cfin.au.dk



Brian Hansen er lektor brian@cfin.au.dk

Alle ved Center for Funktionelt Integrativ Neurovidenskab (CFIN), Aarhus Universitet

Et berømt billede fra rumsonden Voyager 1 viser jorden som en lille, blålig prik i universets store øde. Det er svimlende at tænke på: Fra en afstand af seks milliarder kilometer er rammen for hele den menneskelige historie et isoleret, blåligt fnug. Kigger vi indad gentager dette svimlende sig: dybt i hjernen findes en lille blålig kerne bestående af blot få tusinde neuroner (nerveceller), og denne samling neuroner menes i dag at have central funktion for hele hjernens virkning og sundhed.

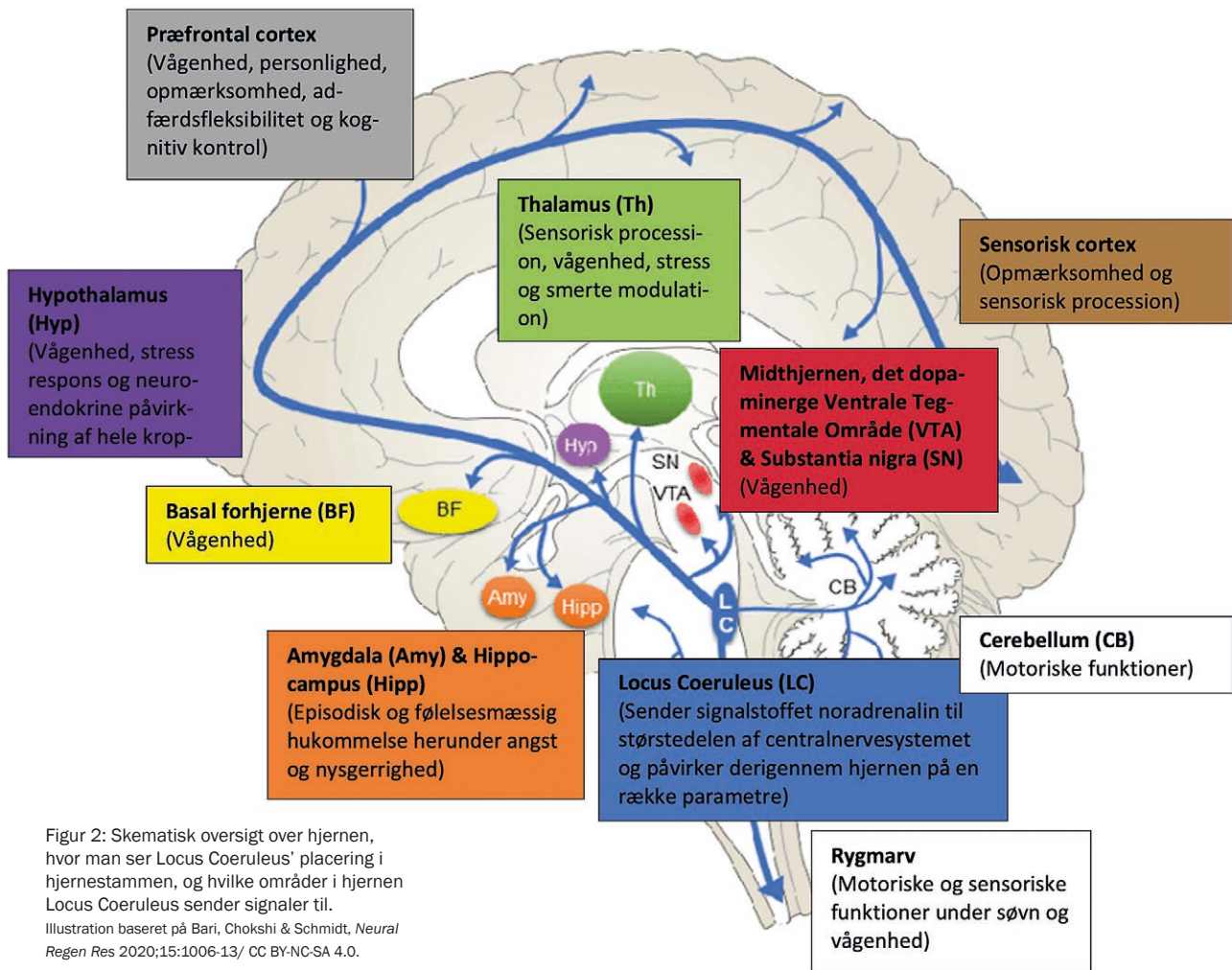
Kernen hedder Locus Coeruleus (egentligt fra det latinske Locus Caeruleus [udtales *lokus særuleus*], som betyder det mørkeblå sted, herfra blot LC) og er det primære sted for produktion af signalstoffet noradrenalin i centralnervesystemet. Via dette signalstof øver denne lille klynge af neuroner stor

indflydelse på hjernens milliarder af andre neuroner. LC er at finde på begge sider af hjernestammen, som blandt andet også indeholder vejtrækningscenteret. I et evolutionært perspektiv er hjernestammen en af de ældste dele af hjernen og danner rammen for fundamentale, livsnødvendige funktioner. Det forhold, at LC evolutionært set er gammel, medfører, at hjernens nyere strukturer alle er udviklet under indflydelse fra LC. Set i dette perspektiv er den tilsyneladende ubalance mellem LC's størrelse og dens indflydelse ikke så underlig. I den nutidige hjerne kommunikerer LC ved hjælp af noradrenalin til størstedelen af hjernen og påvirker derfor for eksempel vores søvnmønster, vores frygt og kæmp-eller-flygt-respons (via amygdala) og hukommelsen (via hippocampus). På basalt fysiologisk niveau menes LC at påvirke de små blodkar i størstedelen af hjernen. Disse kar er

centrale for forsyning af næring til hjernevævet, og taber de funktion, tager vævet skade. Derfor mener man i dag, at beskadigelse af LC på langt sigt bidrager til udviklingen af neurodegenerative sygdomme som Alzheimers og Parkinsons sygdom.

Det er også interessant, at forskning tyder på, at søvn er hjernens rengøringstid, hvor affaldsstoffer udvaskes via det såkaldte glymfatiske system. Hvis det er korrekt, kan beskadigelse af LC føre til dårligere søvn og dermed dårligere rengøring af hjernen med ophobning af skadelige affaldsstoffer til følge. Dette sker i så fald sideløbende med tabt funktion af små blodkar i hjernen, hvorved vævet altså både kommer til at mangle næring og rengøring.

Det er stadig uvist, præcist hvilke mekanismer der fører til udviklingen af neurodegenerative sygdomme. Interessant er det dog,



Figur 2: Schematisk oversigt over hjernen, hvor man ser Locus Coeruleus' placering i hjernestammen, og hvilke områder i hjernen Locus Coeruleus sender signaler til. Illustration baseret på Bari, Chokshi & Schmidt, *Neural Regen Res* 2020;15:1006-13/ CC BY-NC-SA 4.0.

at patienter med demens ofte har udviklet søvnforstyrrelser 10-15 år tidligere end demensdiagnosen stilles, og at LC ofte er den første hjernestruktur, der ses beskadiget.

Dette passer godt med de ovenfor beskrevne mekanismer. Forskningen søger i dag at identificere centrale mekanismer, som effektivt kan rammes med tidlig, forebyggende behandling. I håb om at bidrage hertil har vi i vores projekter fokus på at forstå LC's rolle for hjernens funktion og sundhed.

Studier af hjernefunktioner

Historisk har man opnået indsigt i hjerneområdernes funktion ved at studere patienter med hjerneskader. Et berømt eksempel er jernbanearbejderen Phineas Gage, der overlevede at få en jernstang gennem den forreste del af hjernen, men hans personlighed var for altid forandret. Et andet eksempel er epileptikeren

Henry Molaison, som fik fjernet hippocampus i et forsøg på at helbrede hans epilepsi og derved mistede evnen til at danne nye minder.

Ved observation af disse tilfælde sluttede man sig til de første indsigter om funktionen af frontallapperne (personlighed og social adfærd) og hippocampus (hukommelse). Samme strategi kunne i princippet anvendes på forsøgsdyr som mus, men i praksis er det umuligt at begrænse et kirurgisk indgreb til kun at beskadige et så lille og specifikt hjerneområde som LC, der både er diffus og placeret dybt i hjernen, uden at ødelægge andet hjernevæv. Derved ville en eventuel observeret effekt ikke isoleret kunne tilskrives LC. Som løsning har man derfor udviklet mere raffinerede metoder til at påvirke og undersøge funktionen af hjerneområder i mus. Vi vil her beskrive to metoder, som vi benytter i vores forsøg til at undersøge LC's funktion i mus.

Ødelæggelse af LC

Det er muligt at ødelægge LC alene (en såkaldt ablation) ved at indsprøjte en nervegift (et neurotoxin), som kun rammer LC's neuroner. I vore studier bruger vi neurotoxinet DSP-4, som indsprøjtes i musens bug, hvorfra stoffet optages i blodbanen, krydser blod-hjerne-barrieren og optages og ophobes i LC's neuroner, som derved ødelægges. I vore studier er vi interesseret i at studere, hvad der sker i musehjernen, når LC er ude af funktion over lang tid. For at kunne studere dette med MR-skanning og optisk mikroskopi skal vi først finde den optimale dosis nervegift. Det gør vi ved at indgive grupper af mus forskellige doser af giftstoffet og derpå undersøge størrelsen af LC samt antallet af neuroner. For at gøre dette aflives musen, og hjernen udtages og skæres derefter i tynde skiver. Dernæst farves hjerneskiverne med det formål at få LC til at skille sig ud fra resten af hjernevævet.

Mus og hjerneforskning

Når man skal studere en hjernestruktur som Locus Coeruleus (LC), er det helt afgørende at kunne udføre forsøg, hvor LC kan manipuleres alene og kontrolleret. Sådanne studier kan kun udføres i forsøgsdyr som mus, da man her kan påvirke LC i en intakt, levende organisme og undersøge effekten på en række parametre for adfærd og fysiologi. Ulempen ved at bruge forsøgsdyr er, at man ikke kan være sikker på, at resultaterne direkte kan overføres på mennesker. Men der er også mange fordele. Et menneskes udvikling bestemmes af både arv og miljø, som man i undersøgelser hverken kan ændre eller kontrollere. Derimod er forsøgsmus' genetiske baggrund kendt i stor detalje, og det er muligt at kontrollere det miljø, de lever i meget detaljeret – hvad de får at spise og drikke, hvad de har til rådighed, og hvordan deres døgnrytme er. At både arv og miljø er ens for alle dyrene, giver et optimalt grundlag for at sammenligne grupper af dyr, som påvirkes på forskellige måder i forsøget. Dertil



Foto: Colourbox

kommer, at mus er pattedyr ligesom mennesket, og så har de en kort livscyklus, der gør det muligt at observere ændringer over en kort periode, der i mennesket først vil finde sted over flere årtier. Dette er specielt vigtigt, når man undersøger neurodegenerative sygdomme, der i mennesket oftest udvikles gradvist over mange år.



Snit af en musehjerne, der viser hjernevæv indeholdende Locus Coeruleus (LC), der ses farvet blå som en diffus klynge på hver side af det hvide område i midten. I mus er LC ikke blå som i mennesker, så derfor farves den, så cellerne kan tælles. Det indsatte billede nederst til venstre viser en forstørrelse af LC i snittets venstre side. I begge tilfælde svarer den sorte bjælke til 300 µm.

I vores tilfælde opnår vi en selektiv farvning af LC ved at binde antistoffer til enzymet tyrosin hydroxylase, der er en vigtig del af dannelsen af det noradrenalin, som specielt er at finde i LC. Når hjernevævet er farvet, kan vi tælle antallet af celler og måle volumen af LC, der begge forventes at være formindsket. Graden af formindskelse giver et direkte udtryk for, hvor effektivt giften ødelægger LC ved den givne dosis. Herved kan vi finde den optimale dosis nervegift til vores fremtidige studier.

Studier af adfærd og fysiologi

Når den optimale dosis til at ødelægge LC er bestemt, indgives den-

ne dosis i nye grupper af dyr, som derefter studeres indgående. I vores studier laver vi ikke-invasive søvn- og adfærdsstudier, MR-skanning og slutteligt optisk mikroskopi for at undersøge hjernens blodforsyning. Et vigtigt aspekt af vores studier er, at forsøgsdyrenes adfærd følges gennem forsøget, og at disse data indsamles på de samme dyr, som vi senere laver avancerede fysiologiske målinger på. Herved indsamles et datasæt, som giver et meget komplet indblik i effekten af manglende LC-funktion. På grund af LC's indflydelse på stort set hele hjernen forventer vi at se ændret adfærd i de mus, der har fået beskadiget LC.

For eksempel ved vi, at LC sender signaler til hippocampus, så ved skade på LC forventer vi at se nedsat indlæring og hukommelse (som hos Henry Molaison nævnt ovenfor), hvilket kan undersøges ved brug af adfærdstests (se faktaboks). Derudover aktiverer LC hjernestrukturen amygdala, som har stor indflydelse på frygt og angst, hvilket også kan undersøges med adfærdstests. Ved skade på LC forventer vi derfor at se et nedsat angstniveau og en øget nysgerrighed.

Vores igangværende studier viser da også en tendens til, at kontrolgruppen med intakt LC har et højere

Adfærdstest af mus

Når man vil teste læring og hukommelse hos mus, kan man benytte adfærdstesten Barnes maze. Til undersøgelse af angst samt nysgerrighed kan adfærdstesten light-dark box benyttes. Begge adfærdstests bygger på, at musen søger at undgå store, lyse og åbne områder og foretrækker små, lukkede og mørke områder. Barnes maze består af en længerevarende træning, hvor musene oplæres i brugen af visuelle ledetråde til at finde det rigtige hul ud af tyve, hvor der er en lukket, mørk boks under. Hvor længe musen skal bruge på at lære, samt hvor god musen er til at huske, hvor boksen er, giver et indblik i musens indlæringssevner samt dens kort- og langtidshukommelse.

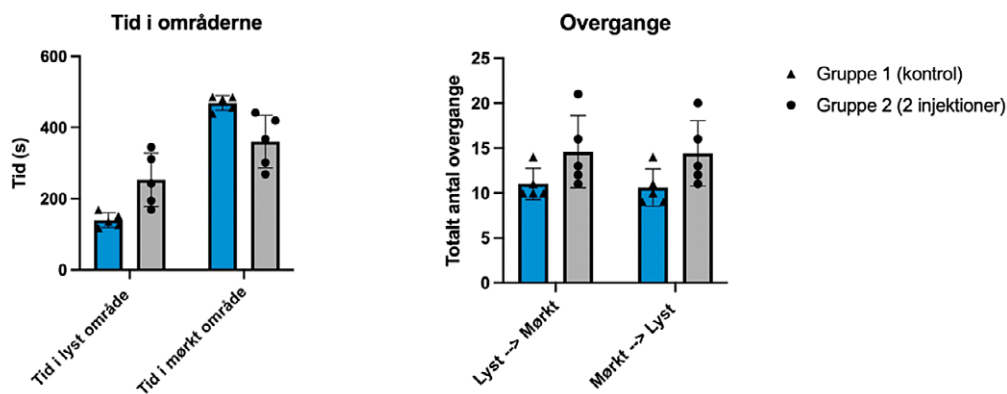


Barnes Maze. Foto: Nanna Bertin

Adfærdstesten light-dark box adskiller sig ved, at den kun udføres én gang og ikke indebærer træning. Testen består af en rektangulær kasse med to områder – et mørkt og et lyst, der er forbundet med en lille dør. Musen placeres i det lyse og åbne område, hvorefter den får ti minutter til at udforske de to områder. Musens adfærd kan da vurderes ud fra en række parametre: Hvor den tilbringer mest tid, hvor hurtigt og langt den bevæger sig, og hvor mange gange den går fra det ene område til det andet. Disse parametre giver et udtryk for musens niveau af angst og nysgerrighed.



Øverst ses den fysiske kasse, man benytter i en light-dark box-test. Kassens lukkede rum er gennemsigtigt for et infrarødt kamera. Nederst ses screenshot fra infrarøde optagelser af en mus under en test.



De to grafer viser resultater fra adfærdstesten light-dark box (se også faktaboks om adfærdstest). Her ses henholdsvis mængden af tid, musene bruger i hvert område (venstre) samt antal overgange fra det ene område til det andet (højre). I hver graf vises resultater fra to grupper mus: gruppe 1, kontrolgruppen, har ikke fået injektioner med neurotoxin, der ødelægger Locus Coeruleus, mens gruppe 2 har fået to injektioner. Der ses en tendens til, at gruppe 1 har tilbragt mest tid i det mørke område sammenlignet med gruppe 2. Det tyder på, at gruppe 2 har

nedsat aktivering af amygdala. Årsagen til dette kan være manglende aktivering af amygdala fra Locus Coeruleus. Musene i gruppe 2 udviser dermed ikke samme angstniveau, der normalt medfører en adfærd, hvor musen helst vil opholde sig i det mørke område. Samtidig ses der en øget nysgerrighed, da gruppe 2 har flere overgange fra det ene område til det andet. I hver gruppe er der fem mus, og stregerne over søjlerne viser standardafvigelse. I vores studie har vi flere grupper end de to viste for også at kortlægge effekten af dosisstørrelse.

angst- og frygtniveau samt er mindre nysgerrige end de tre grupper, der har modtaget forskellige doser af nervegiften. Denne observerede tendens til ændret adfærd er interessant, fordi mennesker, der lider

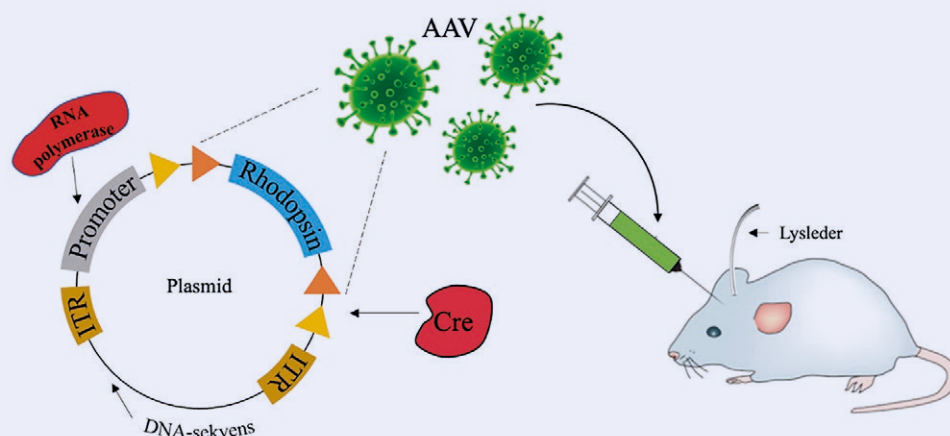
af neurodegenerative sygdomme, er kendetegnet ved at have ændret hukommelse, indlæring, angst, nysgerrighed og søvn. Dette tyder på, at vores dyremodel kan lære os nye ting om LC's rolle i disse sygdomme.

Billeder af hjernens aktivitetsmønster

Hvis LC spiller en vigtig rolle i udviklingen af neurodegenerative sygdomme, er det dog også vigtigt at tage hensyn til, at LC i disse pa-

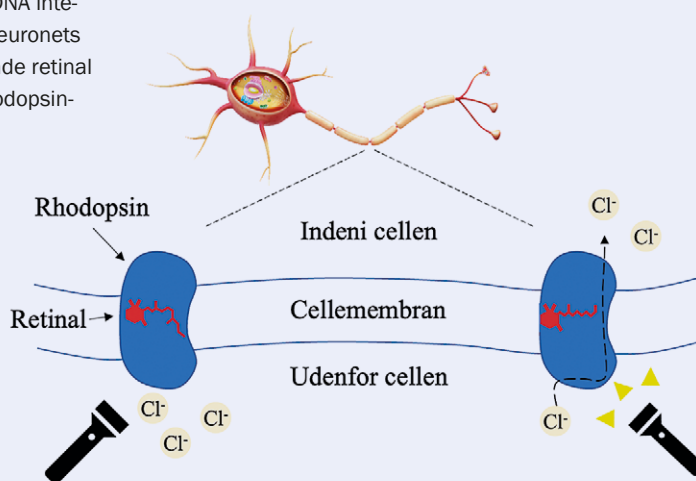
Sådan fungerer optogenetik

Optogenetik går grundlæggende ud på at indsætte lysfølsomme proteiner (såkaldte rhodopsiner) i cellevæggen af neuroner, som i dette tilfælde er neuroner i Locus Coeruleus. Rhodopsinerne belyses og aktiveres herefter med en indopereret lysleder. I praksis kan indsættelsen af de lysfølsomme proteiner foregå ved hjælp af virus. Virussens genetiske materiale er organiseret i en lille, cirkulær DNA-sekvens kaldet plasmid. Alle de nødvendige gener for leveringen af lysfølsomme proteiner til LC indsættes i virussens plasmid, hvorefter virus injiceres ind i området omkring LC. I neuroforskning bruger man ofte en såkaldt adenoassocieret virus (AAV), fordi disse har stærke præferencer for neuroner, og fordi denne type virus ikke integrerer deres genetiske materiale i modtagercellens arve-materiale, hvilket ellers kan påvirke aflæsningen af cellens DNA.



Udover selve genet for rhodopsin indsætter man også et promoter-gen i plasmidet. Promoteren sikrer, at kun neuroner med visse karaktertræk kan aflæse genet for rhodopsin. Dette sker ved, at enzymet RNA-polymerase binder sig til promoteren og aflæser det efterfølgende DNA-stykke.

Efter succesfuld aflæsning af virussens DNA integreres det funktionelle protein (opsin) i neuronets membran. Herefter bindes lysabsorberende retinal til opsinet og danner det lysfølsomme rhodopsin-molekyle. I hvile er miljøet indeni cellen mere negativt ladet end udenfor cellen. Når neuronet aktiveres, bliver miljøet indeni cellen mere positivt ladet end udenfor cellen. Rhodopsiner kan modvirke denne celleaktivering, da de transporterer negativt ladede ioner som klorid (Cl^-) ind i cellen eller positivt ladede ioner ud af cellen. Med optogenetik kan vi derfor undertrykke aktiveringen af LC og undersøge, hvilken effekt det har på hjernens blodkar.



tienter først sent og gradvist taber funktion. Den kemiske ødelæg-gelse af LC beskrevet ovenfor er derfor ikke altid den bedst egnede undersøgelsesmetode. De akutte effekter af en beskadiget LC kan undersøges via såkaldt optogenetik (se faktaboks) uden permanent at ødelægge hjernestrukturen. Denne metode bruger genetisk manipu-lation til at indsætte lysfølsomme

proteiner på overfladen af udvalgte neuroner for eksempel i LC. Ved at lyse på proteinerne med en optisk fiber kan proteinerne åbnes, hvorved neuronet enten aktiveres eller undertrykkes afhængigt af protei-nets egenskaber. Derved kan man tænde eller slukke et hjerneområde som ved brug af en lyskontakt.

Neuronerne i LC indeholder som

nævnt enzymet tyrosin hydroxylase, og vi kan bruge dette karaktertræk til at rette de lysfølsomme protei-ners egenskaber kun mod netop disse neuroner. På den måde vil kun celler med tyrosin hydroxylase i LC blive aktiveret af lyset.

Et tidligere studie har benyttet opto-genetik til at undertrykke specifikke nervebaner mellem LC og hippo-

campus, hvilket resulterede i forringet indlæring. Studiet kombinerede optogenetik med mikroskopi og kunne vise, at LC reaktiverer specifikke hukommelsesceller i hippocampus. Hvis ikke det sker, reduceres indlæringsevnen. Derfor forventer vi også, at mus med ødelagt LC i vores nye forsøg vil klare sig dårligere i adfærdstests, der tester hukommelse og indlæring. Optogenetikkenes evne til at tænde og slukke veldefinerede hjerneområder gør os således i stand til at se effekten af LC på andre hjerneområder, for eksempel hukommelsescellerne i hippocampus. Med sådanne teknikker øges vores evne til at afsøge funktionen af hjernens kredsløb, lidt ligesom man gør med et elektronisk kredsløb, man ønsker at forstå eller reparere.

I et af vores nye studier vil vi skanne mus med magnetisk resonans (MR), mens vi tænder og slukker LC ved hjælp af optogenetik. Baggrunden for dette forsøg er, at kognitiv svækkelse ofte er en forudgående diagnose til Alzheimers sygdom hos mennesker. MR-skanninger har vist, at disse patienter er karakteriseret ved at have et ændret aktiveringsmønster i hjer-

nen, når patienten ikke fokuserer på noget specifikt (dette kaldes grundtilstandsnetværket). Hjernens grundtilstandsnetværk kan visualiseres ved hjælp af en MR-skanner, hvor man måler blodtilførsel og iltningegrad i forskellige områder af hjernen, mens hjernen er i hvile. Vi vil undersøge, om en optogenetisk slukket LC fører til en ændring i musens grundtilstandsnetværk, som ligner det, man ser i mennesker med mild kognitiv svækkelse. Det smarte er, at vi på skift kan danne billeder af musens grundtilstandsnetværk med tændt/slukket LC i samme mus og under samme skanningssession.

Kombinationen af optogenetik og billeddannelse med MR-skanner kan således give os en idé om, hvorfor grundtilstandsnetværket er forstyrret hos mennesker med tidlig Parkinsons sygdom og samtidig belyse, hvorvidt en dysfunktionel LC kan være relateret til Alzheimers sygdom.

Håb om tidligere diagnose

I Danmark lider cirka 80.000 mennesker af neurodegenerative sygdomme. Alzheimers sygdom ale-

ne indtager femtepladsen på listen over de hyppigste dødsårsager i den vestlige verden. Aktuelt findes kun symptombehandlerende medicin. Da sygdommenes udløsende faktorer er mange og opstår i et komplekst samspil over årtier, er det en stor udfordring at udvikle forebyggende behandlinger. Vi håber, at vores studier af LC i mus vil give indsigt, der kan bidrage med vigtig viden om sygdomsmekanismer og -udvikling og derved føre til udviklingen af tidligere og mere præcis diagnostik af patienter, så behandling kan startes tidligere og sikre patienten flere gode leveår.

Forhåbentligt kan denne type forskning også på sigt hjælpe til at identificere personer med risiko for udvikling af neurodegenerative sygdomme. Et af de spændende aspekter af vores forskning er, hvorvidt søvnbetragtning og hjerneskaninger kan bruges til at forudsige eller diagnosticere neurodegenerative sygdomme, inden de klassiske symptomer opstår. Hvis dette er tilfældet, giver det også mulighed for at begynde behandling tidligere. ■

Mere information
Tidsskriftet *Nature* har på deres Youtube-kanal en god introduktion til optogenetik:
Method of the Year 2010: Optogenetics - by Nature Video
www.youtube.com/watch?v=I64X7vHSHOE

Videnskabelig artikel vedrørende optogenetisk manipulation af LC i forbindelse med indlæring: Akiko Wagatsuma et al: Locus coeruleus input to hippocampal CA3 drives single-trial learning of a novel context. *PNAS* January 9, 2018 115 (2) E310-E316

Længe leve boblen

Som bekendt holder en sæbeboble sjældent mere end ganske få minutter, før den springer. Det skyldes, at væsken, der udgør boblens skal, relativt hurtigt drænes væk på grund af fordampning og tyngdekraftens påvirkning. Forskere har tidligere fremstillet bobler, der havde en levetid meget længere end almindelige sæbebobler, men det har krævet en meget nøjagtig kontrol af deres ydre miljø for at opretholde dem over tid, og samtidig er de mindsket i størrelse med tiden.

Michael Baudoin og kolleger fra universitetet i Lille, Frankrig, har nu sat en ny og imponerende rekord: De har lavet sæbebobler, som holdt i 465 dage i en ganske almindelige atmosfære – mere end 200.000 gange længere tid end almindelige sæbebobler holder under tilsvarende forhold.



Foto: Colourbox

Boblerne lavede forskerne ud fra en blanding af vand, glycerol og mikroskopiske plastikpartikler, og de monitorerede derefter, hvordan boblernes masse og form ændrede sig med tiden. Det viste sig, at boblerne forblev praktisk taget uændrede i mere end et år. Som forklaring på boblernes ekstremt lange levetid forslår forskerne, at plastikpartiklerne forhindrer, at tyngdekraften dræner væske fra boblen, mens glycerol modvirker fordampning ved at absorbere vand fra den omgivende luft.

Forskerne håber, at de i fremtidige undersøgelser vil kunne afgøre, hvordan variationer i sæbeboblens sammensætning og det omgivende miljø påvirker stabiliteten af boblen.

CRK, Kilde: *Phys. Rev. Fluids* 7, L011601

STOL PÅ DINE SANSER

LÆS MERE PÅ
AABENTHUS.
AAU.DK

Du kan læse og google dig til meget her i livet.
Men når det handler om din fremtid, skal du også lytte til dine sanser ...

**KOM TIL ÅBENT HUS PÅ
AALBORG UNIVERSITET
FREDAG DEN 4. MARTS.**

Så kan du smage på mulighederne og dufte til fremtiden ...



**AALBORG
UNIVERSITET**





Undervisningsmaterialer

Find dem på AktuelNaturvidenskab.dk

Biodiversitet

Der er nye arbejdsark, der knytter an til artikler om biodiversitet, og som er beregnet på undervisningen i gymnasiet.

Der er et arbejdsark til artiklen *Rewilding – Lad os få bisonokser tilbage i den danske natur* i dette nummer samt til artiklerne *Fortidens klima præger fremtidens skove* fra Aktuel Naturvidenskab nr. 4/2016 og *Skovengen blomstrer* fra Aktuel Naturvidenskab nr. 2/2016.

I tilknytning til arbejdsarkene er der en øvelsesvejledning med tilhørende regneark til *gradientanalyse*, som går ud på at vurdere, hvordan plantediversiteten varierer i et transekt på 100 m. Dette vurderes ved hjælp af Raunkjær's metode og Hult-Sernanders dækningsgradskala.

Fremtidens landbrug

På hjemmesiden finder du også materiale, som er tænkt ind i et forløb om Dansk Landbrug på Naturgeografi C-niveau. Det inddrager blandt andet artiklen *Kød uden kød eller dyr – Hvordan det?* Bragt i Aktuel Naturvidenskab 2019 nr. 1.

Alle de nævnte materialer er udarbejdet som perspektiv på emnet for foredraget *Fremtidens natur* af Jens-Christian Svenning afholdt i serien Offentlige foredrag i Naturvidenskab den 8/2-2022 som del af projektet *Brobygning på første række* finansieret af Novo Nordisk Fonden.

Kommende foredrag i Offentlige foredrag i Naturvidenskab:

- 15/3: Ekstrem fordøjelse ved professor Tobias Wang
 - 29/3: Flagermus ved professor Peter Teglberg
 - 26/4: På rumsafari blandt Mælkevejens planeter prof. Hans Kjeldsen
- Se mere på ofn.au.dk

ABONNEMENTS-SERVICE

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

Kontakt os på telefon:

8715 2094 / 3036 0662

E-mail: abo@aktuelnaturvidenskab.dk

Abonnement kan også bestilles via hjemmesiden: aktuelnaturvidenskab.dk

Husk at melde flytning til ny adresse.

Vi modtager desværre ikke automatisk besked om din nye adresse.

Til nye abonnenter:

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

OM AKTUEL NATURVIDENSKAB

Styregruppe

- **Birgitte Lyhne Broksø**, kommunikationschef, Det Natur- og Biovidenskabelige Fakultet, Københavns Universitet
- **Jane Thoning Callesen**, communication manager, Det Tekniske Fakultet, Syddansk Universitet
- **Torben Jarl Jørgensen**, kommunikationskonsulent, Roskilde Universitet
- **Mikkel Linnemann Johansson**, teamleder, Det Naturvidenskabelige Fakultet, Syddansk Universitet
- **Sanne Holm Nielsen**, kommunikationsmedarbejder, Aalborg Universitet
- **David Lundbek Egholm**, prodekan ved Faculty of Natural Sciences, Aarhus Universitet

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

Layout: Jørgen Dahlgaard

Tryk: Jørn Thomsen Elbo A/S

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

Oplag: 5.500



Redaktionsgruppe

- **Sune Holst**, Det Tekniske Fakultet, Syddansk Universitet
- **Birgitte Svennevig**, Det Naturvidenskabelige Fakultet, Syddansk Universitet
- **Carsten Rabæk Kjaer**, Aktuel Naturvidenskab
- **Jørgen Dahlgaard**, Aktuel Naturvidenskab
- **Michael Skov Jensen**, Københavns Universitet
- **Sanne Holm Nielsen**, Aalborg Universitet
- **Signe Hansen**, Viborg Gymnasium og HF
- **Torben Jarl Jørgensen**, Roskilde Universitet

Redaktionen:

Telefon: 8715 2094 / 3036 0660 / 3036 0662

E-mail: red@aktuelnaturvidenskab.dk

Hjemmeside: aktuelnaturvidenskab.dk

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

Omlagsfoto:

En artsrig tangbevoksning.
Foto: Peter Bondo Christensen.

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

Unboxing i laboratoriet

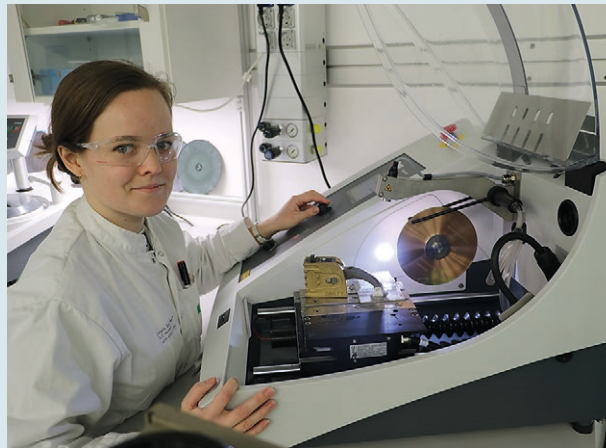
Af Carsten R. Kjaer, Aktuel Naturvidenskab

Hvis du jævnligt færdes på de sociale medier, er du uden tvivl på et tidspunkt faldet over en video med "unboxing". At der er et stort marked for videoer af folk, der pakker et eller andet nyindkøbt produkt ud – hvilket kan være alt fra et akvarelsæt til en kompostkværn – kan måske synes underligt. Men så alligevel ikke, når de fleste af os uden tvivl kan genkende glæden ved at få en ny gadget til hjemmet. Forleden læste jeg et opslag på det sociale medie LinkedIn, der ledte mine tanker hen på unboxing. Her fortalte professor i materialekemi ved Aalborg Universitet Morten Mattrup Smedskjær begejstret om en ny skæremaskine, han havde fået til sit laboratorium, og det gjorde mig nysgerrig på, hvorfor netop en skæremaskine kan skabe glæde i forskermiljøet.

En glasskærer

Morten Mattrup Smedskjær fortæller, at han skal bruge skæremaskinen i sin forskning i glasmaterialer. Han understreger, at vi her taler om glas, som vi normalt forstår det – altså glas, som vi bruger til for eksempel vinduer, mobilskærme og meget andet. I generel forstand betegner glas nemlig en uordnet tilstand, hvor molekylerne i et fast materiale sidder rumligt tilfældigt i modsætning til en krystallinsk tilstand, hvor molekylerne er arrangeret i en velordnet struktur. Derfor findes der mange forskellige glasmaterialer, der bruges til en lang række eksotiske formål. Det er Morten også interesseret i, men skæremaskinen skal han altså primært bruge til at skære i almindeligt glas.

»I vores forskning forsøger vi at forstå sammenhængen mellem den kemiske sammensætning af glasset, dets struktur og dets mekaniske egenskaber«, fortæller Morten. »Det er nemlig nødvendig, hvis vi målrettet vil udvikle nye og bedre typer af glas.«



Her ses ph.d.-studerende Elsebeth J. Pedersen med den nye skæremaskine.
 Foto: Camilla Kristensen, Kemi og Biovidenskab, AAU

Til det formål er der brug for præcise og reproducerbare målinger – og målingernes kvalitet afhænger i høj grad af, hvor ensartet prøvematerialet er.

»Det kræver for eksempel, at størrelsen på glasprøverne er ens med mikrometers nøjagtighed, at deres overflader er fuldstændig parallelle, og at de er poleret ens. Og det er slet ikke nemt«, siger Morten.

Uden teknologi – ingen fremskridt

Til at skære de mange glasprøver ud i præcist afmålte stykker på få kvadrantcentimeter, har Morten derfor brug for en maskine, der både er en arbejdshest og meget præcis.

»Der er sådan set ikke noget fancy ved vores nye skæremaskine – den benytter diamanthænder, som vi kender det fra hverdagsagtigt værktøj som en vinkelsliber. Vores maskine kan bare justeres meget mere præcist. Men vi behøver trods alt ikke

at kunne skære med nanometers præcision ved hjælp af for eksempel fokuserede ionstråler, som man godt kan få udstyr, der kan klare – dog til en noget anden pris!«, fortæller Morten.

Det er nu ikke fordi, at skæremaskinen ligefrem har været billig – cirka 200.000 kr. koster en sådan krabat. Halvdelen af pengene har forskerne fået fra Myhrwolds Fond, mens universitetet har lagt resten.

Denne lille historie illustrerer meget fint den pointe, at ny erkendelse og fremskridt indenfor forskningen hænger tæt sammen med, hvilket udstyr forskerne har adgang til. Det er nemt at forstå, at milliarddyre teleskoper – som for eksempel det nyligt opsendte James Webb rumteleskop – kan åbne op for helt nye opdagelser. Men også i den meget mindre skala kan fremskridt i forskningen afhænge af, om man har en ordentlig skæremaskine i sit laboratorium. Og det er derfor, at Morten er så begejstret. ■