

NATURVIDENSKAB OG TEKNOLOGI
DIREKTE FRA FORSKNINGSVERDENEN

AKTUEL
natur VIDENSKAB

**HVAD KAN EN
KVANTECOMPUTER
I DAG?**

Fremtidens biodiversitet
Klimatilpasning – fra tanke til handling
Våde lavbundslande rummer masser af muligheder

NR.2 - 2020 MAJ: 50 KR.



Foto: Colourbox

Hvad panda-bæerne gemte

Ved at kigge en masse panda-bæ igennem har forskere fra Aarhus Universitet fundet mikroorganismer, der er særdeles gode til at nedbryde såkaldt lignocellulose og omdanne det til blandt andet bioethanol. Et nyt projekt skal nu på den baggrund udvikle bæredygtige biobrændsler.

Kilde: *ingenioer.au.dk*

Quiz

Hvilken relation har forskerne fundet mellem forekomsten af sjældne plantearter i et område og klima?

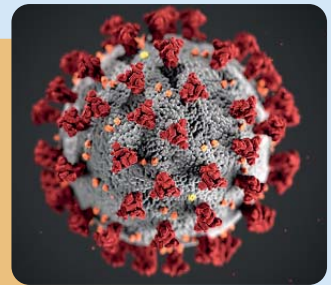
- Jo koldere, der er, jo flere sjældne arter finder man
- Jo mindre regn, der falder på årsbasis, jo flere sjældne arter finder man.
- Sjældne arter findes især i områder, hvor det fortidige klima har været relativt stabilt.

Find svaret i artiklen *Fremtidens biodiversitet* i dette nummer. Se hele quizen på: www.aktuelviden.dk/fremtidens-biodiversitet

Corona i kloakken

Prøver af spildevand fra kloakker kan testes for coronasmitte, har forskere fra DTU og Aalborg Universitet fundet ud af. Forskerne undersøger nu, om dette kan bruges til på en enkel og prisbillig måde at give en ide om antallet af smittede i et område og til at give tidlige forvarsler om en eventuel anden bølge af smitte.

Kilde: *Ingeniøren*



Grafik: Alissa Eckert, MS; Dan Higgins, MAM

Kunstig intelligens ind i klimakampen

Med satellitdata fra de seneste 40 år, kunstig intelligens og knap 15 millioner fra Villum Fonden vil professor Christian Igel fra datalogi og professor Rasmus Fensholt fra Geovidenskab, begge ved Københavns Universitet, sammen udvikle nye teknologier, som skal give et bedre overblik over klimaforandringerne betydning for klodens økosystemer.

Podcast: Tankelyn

Hvordan opstod universet og hvordan opstod vi? Hvad sker der, når vores krop går i stykker? Og hvordan bygger man et nedbrudt samfund op igen? I 12 afsnit fortæller forskere fra Københavns Universitet, hvordan små og store verdener bliver skabt, går under og opstår på ny.

<https://nyheder.ku.dk/podcasts/tankelyn>



Abelprisen 2020

Abelprisen – matematikkens pendant til Nobelprisen – deles i år mellem de to matematikere Hillel Furstenberg og Gregory Margulis (th). De to får prisen for deres banebrydende anvendelser af sandsynlighedsteori og dynamik på gruppeteori, talteori og kombinatorik.

Abelprize.no

Vidste du?

At over 5 % af det menneskelige genom formentlig oprindeligt stammer fra virus? Såkaldte retrovirus (som HIV) er kendetegnet ved evnen til at oversætte deres RNA-baserede arvemateriale til DNA og dernæst indsætte denne DNA-kopi i et kromosom i den inficerede celle. På den måde kan der over tid ophobes virus-DNA i den menneskelige arvemasse.

Læs mere om dette i artiklen *Din indre virus* fra *Aktuel Naturvidenskab* 6/2004.

Hvem skal have Nordisk Råds miljøpris?

Temaet for Nordisk Råds miljøpris i 2020 er biologisk mangfoldighed, og prisen skal gå til et nordisk initiativ, som sikrer en mere righoldig natur for vores fælles fremtid. Vinderen får 350.000 danske kroner, og alle kan foreslå kandidater på Nordisk Råds hjemmeside. Sidste frist for indsendelse af forslag er 13. maj.

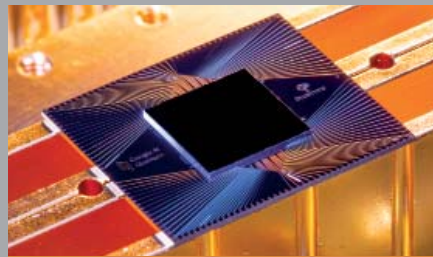
www.norden.org/da

indhold



Verdens biologiske mangfoldighed er truet af menneskets behov for plads og ressourcer samt af klimaforandringer. Vi har talt med forsker i biodiversitet Jens-Christian Svenning om, hvad vi kan forvente i fremtiden, og hvordan såkaldt rewilding kan være et værktøj til at genoprette velfungerende økosystemer.

12



Kvantecomputere eksisterer nu i adskillige laboratorier verden over, men de er stadig langt fra de supercomputere, som teknologien potentielt kan udvikle sig til. Meget tyder på, at de første praktiske anvendelser af kvantecomputere bliver indenfor kemien.

18



Når nøden er størst, er forskningen nærmest. Sådan synes Mads Albertsen fra Aalborg Universitet, at det bør være. Derfor har han og hans forskningsgruppe sat deres bakterieforskning på standby for i stedet at bruge al deres tid på at sekventere arvmasse fra coronavirus.

8



Hvordan sikrer man en generel bæredygtig udvikling til gavn for alle verdens borgere, mens klodens befolkningstal vokser med over 200.000 mennesker om dagen? En personlig beretning om motivation og handling ud fra pejlemærkerne bæredygtig udvikling, klimatilpasning og grøn infrastruktur.

26

FORSKNING OG NYHEDER

- 2 Noter
- 4 Kort nyt
- 8 Corona-Forskning på speed
- 12 Fremtidens biodiversitet
- 18 Hvad kan vi regne på en kvantecomputer i dag?
- 23 Våde lavbundsjordene rummer masser af muligheder
- 26 Klimatilpasning – fra tanke til handling
- 31 Ræve og mårhunde kan regulere antallet af hvalpe
- 36 Det er tid til at vågne op!

PERSPEKTIV

- 42 BØGER & SERVICE
- 44 BAGSIDEN: Virtuelle pandemier

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

Søren Rud Keiding, direktør for AIAS (Aarhus Institute of Advanced Studies), Aarhus Universitet.

Redaktion

Redaktører Carsten Rabæk Kjaer og Jørgen Dahlgaard
Tlf.: 87 15 20 94

E-post: red@aktuelnaturvidenskab.dk

Hjemmeside: aktuelnaturvidenskab.dk



AALBORG UNIVERSITET



AARHUS UNIVERSITET



KØBENHAVNS UNIVERSITET
DET NATUR- OG BIOVIDENSKABELIGE FAKULTET



DET NATURVIDENSKABELIGE FAKULTET



DET TEKNISKE FAKULTET



Roskilde Universitet

SPONSOR-
ABONNENTER



Ny metode til at rense vand for olie

Vi har alle i TV-Avisen set hjerteskrærende billeder i forbindelse med store olieudslip, når tankskibe forliser eller olieboringer kommer ud af kontrol, hvor fugle og havskildpadder er smurt ind i olie. Konsekvenserne er enorme. Fiske- og muslingebanker går til grunde, badestrande bliver ubrugelige. Dyrelivet bliver forgiftet.

I dag kan man inddæmme olie med flydespæringer og suge den op i containere. I nødstilfælde spreder man kemikalier, der splitter olien i dråber, som kan nedbrydes, men kemikalierne kan desværre være mere giftige for dyrelivet end selve olien.

Begrænsningerne ved de eksisterende metoder fik professor mso Yogendra Mishra fra SDU NanoSyd til at søge efter en bedre og mere effektiv løsning.

»Problemet med de eksisterende metoder er, at de ikke er kompatible med de biologiske processer, men det er vores metode med det

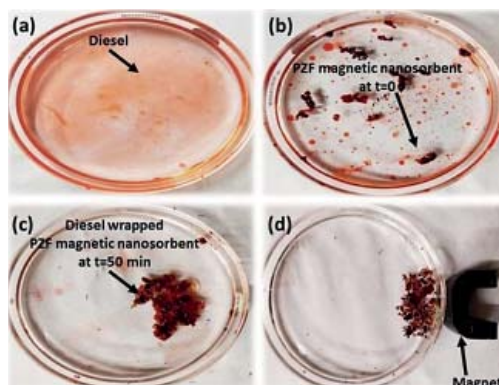


Foto: Yogendra Mishra

nanomateriale, vi har udviklet, som endda kan genbruges mange gange,« siger Yogendra Mishra.

Og det er faktisk ganske enkelt at fremstille materialet, som har en ekstraordinær evne til at absorbere kemikalier i olie fra vand.

»Vi fremstiller først et materiale, der hedder zinkoxid tetrapod. Materialet danner et slags netværk, som du måske kender det fra din

opvaskesvamp. Det har et enormt stort, indre overfladeareal til at fange og absorbere olien,« fortæller Yogendra Mishra.

Herefter tilføjes magnetiske og olieabsorberende egenskaber ved hjælp af nanowirer af jernoxid, inden materialet til sidst modificeres med polydimethylsiloxan-polymer, hvilket skaber et ekstremt olietiltrækkende og ekstremt vandafvisende slutprodukt.

»Nanomaterialet "suger" kort fortalt al olien og skadelige stoffer ud ad vandet, hvorefter det kan indfanges ved hjælp af magnetisme. Nanomaterialet kan så renses ved hjælp af ethanol og herefter genbruges.«

Det oprindelige proof-of-concept-forsøg har været i lille målestok i petriskåle, men teamet bag metoden planlægger nu at skalere op til pilotkala-forsøg med 1000 liter forurenede vand.

»Jeg er meget, meget optimistisk,« slutter Yogendra Mishra.

Sune Holst, SDU

Forskere vil bygge kunstig hjerne

Forskere fra Aarhus Universitet har for nylig sammen med en række internationale kolleger modtaget 40 millioner kr. fra EU-rammeprogrammet *Future and Emerging Technologies* til et projekt, der vil gøre fuldstændigt op med den normale måde at bygge computere på. I stedet for at bruge integrerede kredsløb som i normale computere vil forskerne anlægge en ny hardware-strategi, der udelukkende fokuserer på hjernens opbygning med neuroner, synapser og neurale netværk. Det internationale projekt, der går under navnet SpinAge, koordineres af lektor Farshad Moradi fra Institut for Ingeniørvidenskab, Aarhus Universitet.

Ideen om hjerneagtige computersystemer er ikke ny, og der er også allerede udviklet forskellige former for hjerne-inspirerede processorer, eksempelvis IBM's TrueNorth og Intels Loihi. Men Aarhus-forskerne og deres kolleger sigter på mere end bare processorerne. De vil bygge en helt ny samlet platform, der ligesom hjernen kan udføre ekstremt komplicerede

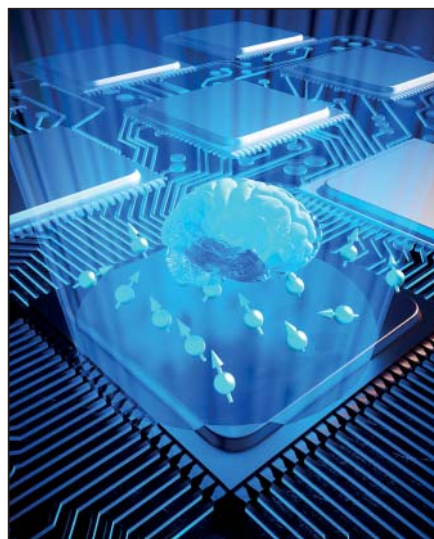


Illustration: Farshad Moradi.

de funktioner meget hurtigt og med meget lille energiforbrug. Forskerne vil i projektet udnytte en række nylige videnskabelige gennembrud indenfor såkaldt spintronik, som adskiller sig fra traditionel elektronik,

ved at man her udnytter en egenskab ved elektronerne kaldet spin i stedet for eller i tillæg til deres ladning. Visionen er at udvikle et neuromorfisk computersystem ved hjælp af synaptiske neuroner implementeret i spintromik på en måde, der aldrig før er blevet gjort. Der er således tale om en helt ny teknologi, der radikalt kan ændre den måde, computere fungerer på og som har potentiale til at forbedre ydelsen af selv topmoderne computersystemer med op til 100.000 gange.

Særligt energiforbruget er af stor interesse, for det anses som den væsentligste barriere for fremtidens kunstige intelligens. Og det er netop grunden til, at man vil kopiere opbygningen af den menneskelige hjerne, da den besidder enorm regnekraft, men forbruger ganske lidt energi. Målet med projektet er at mindske energiforbruget i moderne computersystemer med mindst en faktor 100.

CRK, Kilde: Aarhus Universitet, Technical Sciences

Skarver hører bedst under vand

Mange akvatiske dyr som frøer og skildpadder tilbringer en stor del af livet under vand og har tilpasset sig på forskellige måder, for eksempel ved at have en fremragende hørelse. Nu viser et nyt studie, at det samme gælder den dykkende fugl, skarven. Det er overraskende, fordi skarven tilbringer det meste af tiden oven vande.

» Det er første gang, vi ser så omfattende tilpasninger af høresansen hos et dyr, der ikke tilbringer det meste af tiden under vand«, siger biolog Jakob Christensen-Dalsgaard, Syddansk Universitet.

I undersøgelsen dokumenterer forskerne, at skarvens øre er specialiseret til undervandshørelse. De har blandt andet studeret, hvordan skarvers sansesystem reagerer på luft- og vandbåren lyd; om lydene for eksempel aktiverede neurologiske reaktioner. Tærsklen for hørelse i vand og luft viste sig at være ens og havde næsten samme følsomhed over for lydtryk i de to medier, vand og luft.

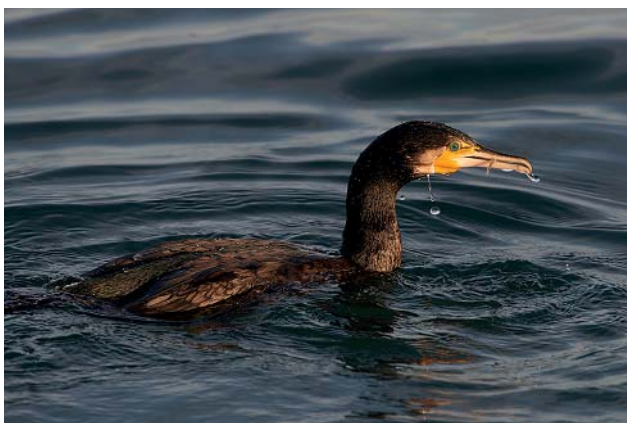


Foto: Colourbox

Det er overraskende, fordi identiske lydtryk i vand og luft betyder, at tærsklens lydintensitet (den energi, der udsendes af lydbølgen) er meget lavere i vand. Øret er altså mere følsomt for vandbåren end for luftbåren lyd.

»Vi fandt anatomiske ændringer i ørestrukturen, der er anderledes end i landlevende fugle. De er formentlig årsagen til den gode lydfølsomhed under vand. Tilpasningerne kan også give bedre beskyttelse af tromme-

hinderne mod vandtrykket,« siger Jakob Christensen-Dalsgaard.

Men der er – som altid i naturen – en pris for disse fordele: Skarvens hørelse i luften er ikke så følsom som mange andre fugles. Deres trommehinder er stivere og tungere. Trommehinden reagerer med store vibrationer, når den udsættes for lyd under vand, så følsomheden er sandsynligvis formidlet af trommehinden og mellemøret.

Disse vibrationer og skarv-ørets øvrige anatomiske træk minder om de træk, der findes hos skildpadder og frøer, der har specialiseret deres hørelse under vandet. Det antyder, at disse tre fjernt beslægtede arter hver især har udviklet modifikationer af øret, som minder om hinanden. Lignende modifikationer kan måske findes i andre dykkende fugle, mener forskerne.

Birgitte Svennevig, SDU. Artikel: Journal of Experimental Biology, doi: 10.1242/jeb.217265

Parasitter bruger CRISPR som våben

De seneste år har opfindelsen af CRISPR-metoden og navnlig gensekvensen gået sin sejrsgang i verden. Men ny forskning fra Københavns Universitet viser, at vi slet ikke var de første, der formåede at anvende CRISPR-teknik til egne formål. Primitive bakterielle parasitter har gjort det i millioner af år.

Forskerne har undersøgt det mest ubeskrevne og gådefulde af de seks CRISPR-Cas-systemer, der findes i naturen, nemlig CRISPR-Cas type IV. Her har de fundet nogle helt anderledes egenskaber end i de øvrige systemer.

»Man har hidtil troet, at CRISPR-Cas per definition er forsvarssystemer, som bakterier bruger til at beskytte sig mod invaderende parasitter såsom virusser – meget lig vores eget immunforsvar. Men det viser sig nu, at CRISPR faktisk er værktøjer, som kan bruges til forskellige formål af forskellige biologiske enheder,« siger Ph.d. fra Biologisk Institut på



Mikrobiologen Rafael Pinilla-Redondo. Foto: Selvportræt.

KU, Rafael Pinilla-Redondo, som har ledet forskningen.

En af de biologiske enheder er plasmider – små DNA-molekyler, der ofte opfører sig som parasitter og ligesom virusser har brug for en værtsbakterie for at overleve.

»Vi har her påvist, at dette CRISPR-Cas-system bruges af plasmider til at føre krig mod andre plasmider, der konkurrerer om det samme hjem. Og det er et bemærkelsesvæ-

digt, fordi plasmiderne altså har formået at vende systemet rundt, så det i stedet for at beskytte bakterier mod netop parasitter, bliver udnyttet af parasitter til at udføre en anden opgave,« siger Rafael Pinilla-Redondo.

Forskerne vurderer, at den nye opdagelse er oplagt at bruge til at bekæmpe multiresistente bakterier. Bakterier bliver for det meste antibiotika-resistente ved at plasmider transporterer resistensgener fra bakterie til bakterie.

»I og med dette system tilsyneladende har udviklet sig til specifikt at angribe plasmider, kan vi formentlig bruge denne metode fra naturen til at skille os af med plasmider, som bærer på resistensgener. For vi kan rent faktisk programmere dem til at angribe, hvad vi ønsker,« siger Rafael Pinilla-Redondo.

Maria Hornbek, KU. Kilde: Nucleic Acids Research, Volume 48, Issue 4, 28 February 2020, Pages 2000–2012

Til kamp mod multiresistent tuberkulose

Midt i corona-pandemien er det let at overse, at tuberkulose fortsat er verdens mest dræbende smitsomme infektionssygdom. Hvert år bliver cirka 10 millioner mennesker verden over diagnosticeret med tuberkulose, og ifølge WHO's seneste tal kostede sygdommen 1,5 millioner mennesker livet alene i 2018.

Tuberkulose udgør en stadig større sundhedsrisiko i takt med, at bakterien *Mycobacterium tuberculosis*, der forårsager sygdommen, har udviklet resistens over for de medicinpræparater baseret på antibiotika, som hidtil er brugt til behandling. Problemet er stigende, og globalt set blev cirka 500.000 patienter i 2018 diagnosticeret med multiresistent tuberkulose.

En international gruppe af forskere fra Roskilde Universitet, National University of Singapore og Imperial College London har nu publiceret forskningsresultater, der viser, at en ny type kemisk fremstillede antimikrobi-



Biljana Mojsoska i laboratoriet på RUC.
Foto: Kasper Hornbæk

elle stoffer er virksomme mod multiresistent tuberkulose. Med resultaterne er forskerne dermed kommet et vigtigt skridt videre i kampen for at finde en ny, effektiv behandling af multiresistent tuberkulose.

De nye forskningsresultater tager udgangspunkt i test af en række forskellige antimikrobielle peptoider udviklet på Roskilde Universitet af kemiker Biljana Mojsoska og

molekylærbiolog Håvard Jenssen. Peptoider er syntetisk fremstillede strukturer designet til at efterligne peptider, dvs. små proteinlignende molekyler. Forskerne har testet peptoider, der kan være aktive over for netop de bakterier, som er resistente over for antibiotika, inklusive multiresistente bakterier.

Særligt ét af disse peptoider (kaldet BM 2) udviser en potent virkning mod bakterier. Effekten gør sig gældende over for både lægemiddelfølsomme og decideret multiresistente

bakterier. Samtidig kunne dette peptoid klart skelne mellem bakterien *Mycobacterium tuberculosis* og humane cellemembraner. Forsøg i mus viste desuden, at peptoidet er i stand til effektivt at dræbe tuberkulosebakterien både før og efter, at bakterien har invaderet og skjult sig i immunsystemet hos musene.

Torben Jarl Jørgensen, Institut for Naturvidenskab og Miljø, Roskilde Universitet.
Front. Microbiol., 17 March 2020

Forskere opdager kæmpe-supernova

Når en stjerne dør, sker der en massiv energiudladning og eksplosion, som kaldes en supernova.

Og nu har forskere fra blandt andet Københavns Universitet fundet en supernova, der lyser dobbelt så kraftigt som alle andre, man hidtil har observeret.

»Vi har aldrig oplevet en supernova, der lyser så kraftigt. Derudover lyste den hele 600 dage, hvor en "normal" supernova lyser mellem 10 og 100 dage, før den brænder helt ud,« siger Alejandro Vigna-Goméz, der er Postdoc på Dark Cosmology Center på Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet.

Han har sammen med forskere fra blandt andre Harvard Universitet netop udgivet et studie om de overraskende resultater i tidskriftet *Nature Astronomy*.



Illustration: Getty Images.

Ud over at supernovaen med navnet SN2016aps lyser dobbelt så kraftigt som normale supernovaer, har den en eksplosionskraft, der er fem gange så voldsom som en almindelig stjernedød. En så lysende og kraftigt eksploderende stjerne har rumforskere aldrig oplevet før, og det store

spørgsmål er selvfølgelig, hvordan det kan lade sig gøre. Flere års studier af stjerners død via computersimulationer har ledt Alejandro Vigna-Goméz til følgende teori:

»Vi tror, at der er tale om to stjerner, der er smeltet sammen til én kæmpe stjerne. Det tror vi, fordi niveauet af hydrogen (gas) var så utroligt højt i så lang tid efter, at den begyndte at eksplodere. Det tyder på, at der var to stjerner med højt indhold af gas, der var blevet til én,« forklarer han og tilføjer:

»Det er en meget interessant opdagelse, vi har gjort, for hidtil har supernovaers opståen været en gåde for os. Men nu kan vi rent faktisk begynde at teste sammenhængen mellem vores teori og de virkelige observationer, vi har lavet via teleskoper i rummet.«

Ida Eriksen, KU

TAK H.C. Ørsted!

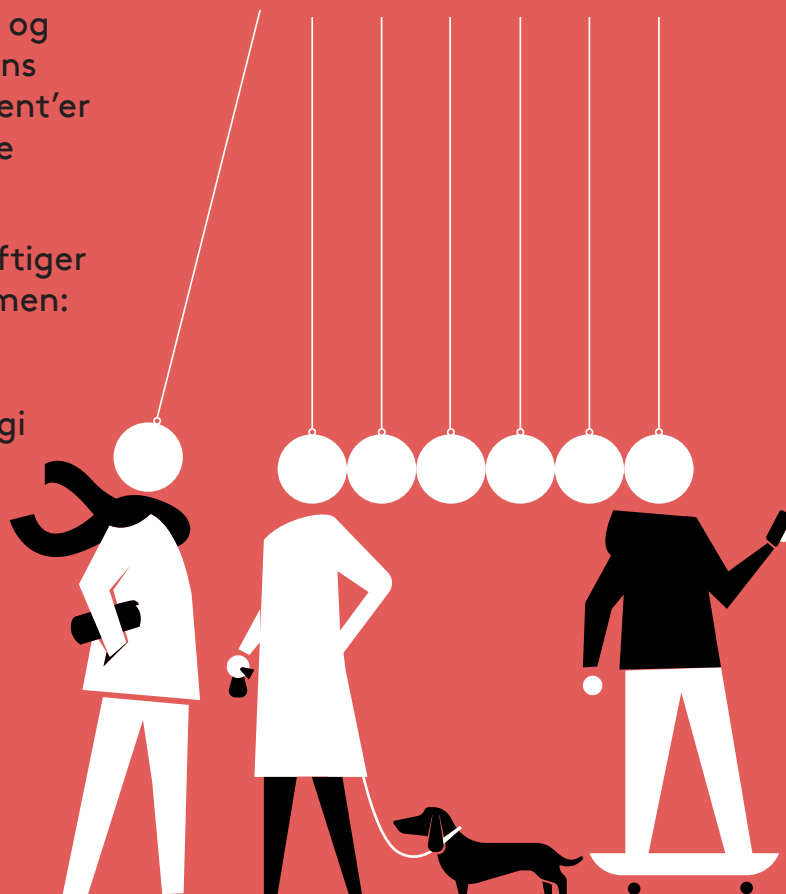
sdu.dk/uddannelse

Du satte en magnetnål i bevægelse
og ændrede videnskaben og verden for altid

På Syddansk Universitet i Odense og Sønderborg uddanner vi fremtidens nysgerrige ingeniører og cand.scient'er til at bevæge verden og skabe nye bæredygtige løsninger.

Seks af vores uddannelser beskæftiger sig særligt med elektromagnetismen:

- Cand. Scient i Fysik
- Civilingeniør i Fysik og Teknologi
- Civilingeniør i Electronics
- Diplomingeniør i Electronics
- Diplomingeniør i Elektronik
- Diplomingeniør i Elektrisk Energiteknologi



#sdudk

SDU fejrer H.C. Ørsted

Vandreudstilling oktober – december 2020

Oplev H.C. Ørsteds personlige samling af bl.a. fysikinstrumenter og brevveksling med H.C. Andersen. Det er i Bibliotekets Atriumgård på SDU i Odense. Alle er velkomne.

Skole- og gymnasieklasser kan booke ekstra aktiviteter relateret til emnet.

Sdu.dk/uddannelse og sdu.dk/mødsdu

På billedet ses Emil Aare Sørensen (tv) og Simon Knuttson i færd med at sætte de første rigtige prøver på sekventeringsmaskinen (det lille aflange apparat på bordet). De seneste uger har de på det nærmeste arbejdet i døgndrift i laboratoriet. Fotoet er taget af Søren M. Karst, der leder lab-teamet.



CORONA-FORSKNING PÅ SPEED

Når nøden er størst, er forskningen nærmest. Sådan synes Mads Albertsen fra Aalborg Universitet, at det bør være. Derfor har han og hans forskningsgruppe sat deres bakterieforskning på standby for i stedet at bruge al deres tid på at sekventere arvemasse fra coronavirus.



Mads Albertsen leder slagets gang fra sit interimistiske hjemmekontor i forældrenes stue.
Foto: Hanne Albertsen.

Af Carsten R. Kjaer,
Aktuel Naturvidenskab, crk@aktuel-naturvidenskab.dk

Corona-pandemien har sat en kæp i hjulet på utallige forskningsprojekter over hele verden, fordi forskerne er hjemsendt og forment adgang til deres laboratorier. Men samtidig gør den alvorlige situation det også bydende nødvendigt hurtigt at skaffe ny videnskabelig funderet viden om, hvordan vi bedst bekæmper denne trussel mod vores helbred og samfund. Derfor er der stadig hektisk aktivitet i nogle laboratorier, og mange gode kræfter er med kort varsel sat ind på at forske i forskellige aspekter af coronavirusens biologi og effekt på mennesker. Også forskere, som i udgangspunktet ikke har set sig selv som oplagte "virus-forskere", har kastet sig ind i kampen mod coronavirusen.

Blandt disse er en gruppe forskere på Aalborg Universitet ledet af professor MSO Mads Albertsen. Han og hans forskningsgruppe på 10 personer bruger netop nu al deres tid på at kortlægge coronavirusens arvemateriale i samarbejde med forskere fra Hvidovre Hospital, Statens Serum Institut og Aalborg Universitetshospital. Den information kan forskerne blandt andet bruge til at blive klogere på smittevejene.

Fra bakterier til virus

Normalt fokuserer Mads Albertsens forskningsgruppe ikke på virus, men på bakterier. Da corona-epidemien ramte verden var de i gang med et stort forskningsprojekt kaldet *Microflora Danica* støttet af Poul Due Jensen Fond, som går ud

på at identificere alle bakterier i Danmark. Baggrunden for at kunne gøre det er, at forskerne har opbygget et laboratorium i verdensklasse og ekspertviden om analyse og identifikation af bakterier.

»Metoderne til at identificere bakterier bygger på sekventering og analyse af deres arvemasse«, fortæller Mads Albertsen.

Sekventering betyder konkret, at man kortlægger rækkefølgen af de byggeklodser (nukleotider), som arvemassen består af. Mads Albertsen fortæller, at der principielt ikke er forskel på metoderne til at sekventere arvemateriale fra bakterier og virus. Bakteriers arvemasse er i form af DNA, som består af to strenge

Om coronavirus

Coronavirus har været kendt siden 1930'erne, og der kendes flere end 30 forskellige stammer af coronavirus. Kun 7 af disse er kendt for at kunne fremkalde sygdom hos mennesker. Men coronavirus kan mutere og på den måde pludselig få evnen til at inficere mennesker, selv om den før kun har cirkuleret i dyr. Det er således dette, der menes at være sket med den aktuelle coronavirus – med det borgerlige navn SARS-CoV-2, der forårsager sygdommen Covid-19.

SARS-CoV-2 er en stor virus, og dens arvemasse (genomet) består af RNA opbygget af knap 30.000 nukleotider. Forskere har fundet, at denne arvemasse indeholder instruktioner til op mod 29 forskellige proteiner, der sørger for alt fra at lave kopier af coronavirusen til at undertrykke værtens immunsystem.

Den genetiske kode ændrer sig dog ret hurtigt i coronavirus på grund af en forholdsvis høj mutationsrate. Faktisk viser en analyse af virus fra 600 danske patienter, som virusforsker Anders Fomsgaard fra Statens Serum Institut har lavet sammen med Mads Albertsen, at den genetiske kode hos virusen hele tiden ændrer sig en lille smule, således at virus hos den enkelte patient har en unik genetisk profil.

Langt de fleste mutationer hos virus har ingen betydning for hverken virusen selv eller de mennesker, den inficerer. Potentielt kan en mutation dog gøre virusen mere dødbringende, men det kan selvfølgelig også gå den anden vej – og det sidste er nok det mest sandsynlige.

Det er således vigtigt at følge med i, hvilke nye mutationer, der dukker op, da de kan have betydning for sygdomsudviklingen. Specielt er det interessant at studere mutationer, som er fælles og begynder at dominere i viruspopulationen, da det vil tyde på, at netop disse mutationer har givet virus en evolutionær fordel.

Sammenligninger af virusgenomer kan også hjælpe med at afsløre smittevejene. Når virus introduceres i et samfund opstår der lokale "smitteklynger", hvor virusen breder sig hurtigt i en lokal gruppe af mennesker fra en enkelt inficeret patient. Virus fra patienter i en smitteklynge vil have en tendens til at dele de samme mutationer, da de alle er nært beslægtede med virusen fra den første patient i smitteklyngen. Det giver mulighed for at se, hvorfra virus er kommet og at kortlægge smitteklyngernes spredning i verden på baggrund af en sammenligning af, hvilke mutationer virus fra forskellige patienter har tilfælles.

snoet om hinanden, mens coronavirus' arvemasse er i form af RNA, som kun består af en enkelt streng.

»I praksis betyder det blot, at vi skal tilføje et enkelt ekstra trin i proceduren, hvor vi laver virus-RNA'et om til DNA ved at tilsætte nogle specifikke reagenser og varme det hele op. Derudover foregår alt præcis på samme måde. Det har betydet, at vi har kunnet stille hele vores pipeline til rådighed for sekventering af arvemateriale fra coronavirus på meget kort tid,« fortæller Mads Albertsen.

Hjælp til et presset sundhedssystem

Moderne apparater til sekventering, som dem Mads Albertsen og kolleger bruger i deres laboratorium, fylder ikke mere end man kan have det i lommen, og sekventering af virus-DNA er også noget, der allerede rutinemæssigt foretages lokalt på hospitalerne. Når Mads Albertsen og hans forskningskolleger stiller sig til rådighed i kampen mod coronavirus handler det derfor først og fremmest om at løse et akut kapacitetsproblem.

»Lokalt kan en enkelt person med et sekventeringsapparat måske kortlægge 25 virusgenomer om dagen, hvis vedkommende bruger al sin tid på det. Vi har til sammenligning i vores laboratorium kapacitet til at generere flere hundrede virusgenomer om dagen, så da det blev klart for os, at der var et akut behov for at sekventere virus-DNA, var vi ikke et øjeblik i tvivl om, at det eneste rigtige var at byde os til. Sundhedspersonalet har jo så rigeligt at lave for tiden, så hvis vi kan være med til at tage noget af presset, gør vi det med glæde,« siger Mads Albertsen.

Genomer i hobetal

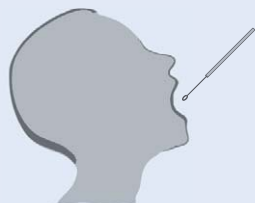
I løbet af kun et par uger lykkedes det Mads Albertsen at få alt på plads sammen med sine samarbejdspartnere, og de første 600 virusgenomer er i skrivende stund på vej ud af pipelinen. Analyse af de mange genomer kan nu være med til at afklare, hvordan smitten har spredt sig i Danmark. Når det er relevant at kigge på virusgenomer i den sammenhæng er det fordi,

virus' arvematerialer ændrer sig meget hurtigt på grund af mutationer. Derfor kan man ved hjælp af analyser af variationer i coronaviruss arvemasse opstille en slags stamtræ for virusen, der kan bruges til at kortlægge smittevejene.

I flere andre lande er der blevet etableret lignende forskningskonsortier, som genererer virusgenomer i stort antal. De danske genomer kommer derfor til at indgå i de verdensomspændende databaser, så forskere over hele verden kan samarbejde om at forstå og bekæmpe den globale coronavirus-pandemi.

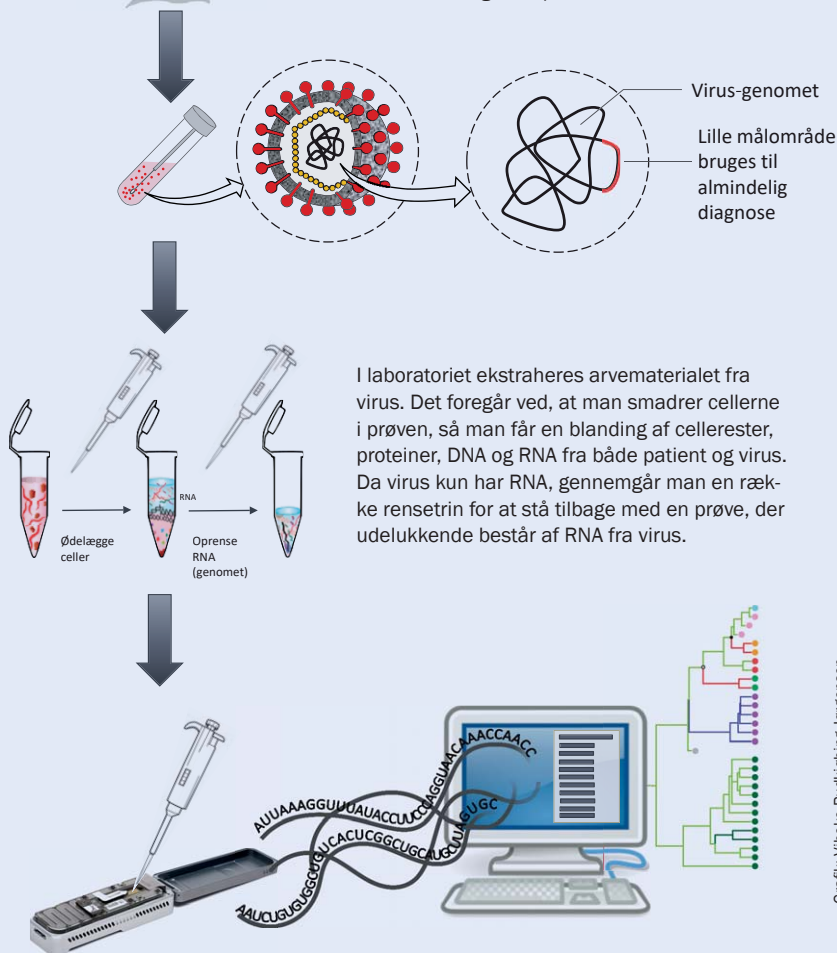
»Faktisk er det ikke det rent tekniske i omstillingen til at sekventere virus-arvemasse, der er udfordringen i et sådant projekt,« fortæller Mads Albertsen. »Det tekniske kan i princippet klares på en eftermiddag – det er alt det "udenom", der kræver en særlig indsats.«

Den største flaskehals i sekventeringsarbejdet er computerkraft, idet det kræver masser af beregnings-



Sekventering

Når man skal sekventere arvemateriale fra coronavirus er udgangsmaterialet typisk en prøve taget i svælget på patienten, der overføres til en beholder og transporteres til laboratoriet.



I laboratoriet ekstraheres arvematerialet fra virus. Det foregår ved, at man smadrer cellerne i prøven, så man får en blanding af cellerester, proteiner, DNA og RNA fra både patient og virus. Da virus kun har RNA, gennemgår man en række renses trin for at stå tilbage med en prøve, der udelukkende består af RNA fra virus.

Gratifik: Vibeke Ruckkjøbing Jørgensen

Efterfølgende sekventerer man virus-RNA'et i prøven (dvs. bestemmer rækkefølgen af nukleotider). Det foregår ved hjælp af en lille, kompakt sekventeringsmaskine (en såkaldt nanopore). Med en del computerarbejde kan man derefter sammenstykke aflæsningerne af de mange stykker RNA til et komplet genom for virussen. Ved den normale diagnose analyseres der kun for en lille del af genomet, og resultatet afslører ikke sekvensen, men måles ved hjælp af farveintensitet, da dette sparer tid og penge i forhold til genom-sekventering.

Når man har tilpas mange genomer er det muligt at lave såkaldte (fylogenetiske) stamtræer, hvor man grupperer genomerne efter, hvor meget de ligner hinanden (ud fra mutationerne). Det har vist sig at kunne bruges til at se, hvor virus i de forskellige danske patienter er kommet fra. På figuren kunne de grønne grene på træet eksempelvis være blevet smittet i Østrig og de lilla i Italien. I takt med, at virus muterer og smitte foregår indenfor Danmark, vil vi efterhånden begynde at se nogle nye grupperinger af grene, hvor genomet er forskellig fra dem, der ses hos danskere, der blev smittet i udlandet og også forskellig fra dem, der findes i andre lande. Hvis man kobler disse oplysninger med patientinformation, vil man kunne opspore potentielle hotspots for smitte.

kraft at processere de data, der kommer ud af sekventeringsmaskinerne. Her var forskerne afhængige af, at et team af universitetets IT-folk kunne smide, hvad de ellers havde i hænderne for at bygge en server dedikeret til projektet. Derudover var der også en juridisk hurdle i at

skulle omstille sig til at arbejde med prøver fra patienter i stedet for prøver af for eksempel spildevand med bakterier. Men også alle spørgsmålene om, hvordan de personfølsomme data skulle håndteres blev afklaret i rekordfart med assistance fra universitetets jurister.

Når systemet virkelig rykker

»Jeg har i det hele taget haft en oplevelse af, at hver gang jeg havde et problem, så stod der et helt team af specialister klar til at hjælpe mig med at få det løst,« fortæller Mads Albertsen. På den måde har hans engagement i corona-forskningen først og fremmest givet ham den positive erfaring, at når det virkelig gælder, kan det danske forskningssystem rykke helt utroligt hurtigt. Med til historien hører således også, at forudsætningen for, at Mads Albertsen og kolleger kunne gå i gang med at sekventere virus-arvemasse var, at Poul Due Jensen Fonden med dags varsel gav tilladelse til, at hele teamet af forskere i Microflora Danica-projektet, kunne bruge al deres tid på coronavirus i stedet.

Rent fagligt forventer Mads Albertsen til gengæld ikke, at han vil lære en masse han kan bruge i sit fremadrettede arbejde.

»Vi har jo egentlig bare gjort det, vi allerede gjorde i forvejen,« siger han. »Vi er glade for at kunne hjælpe, men jeg regner ikke med, at vi fremover kommer til at beskæftige os noget videre med virus. Lige den del, der handler om at håndtere personfølsomme oplysninger, kan jeg dog godt forestille mig, at vi kan få glæde af på længere sigt, « siger han.

På det personlige plan er der måske også et efterslæb på hjemmefronten, han skal have rettet op på, når situationen igen er normaliseret. Arbejdet med corona-projektet fra morgen til aften foregår fra et interimistisk hjemmekontor i forældrenes stue, da Mads Albertsen faktisk ikke selv er i laboratoriet. Og således er al husarbejdet og pasningen af tre børn derhjemme i alderen 0 til 6 for tiden overladt til kæresten.

»Heldigvis er hun også glad for, at jeg kan bidrage, men jeg kommer nok til at støvsuge og skifte ble de næste par år...» slutter Mads Albertsen. ■



KØBENHAVNS
UNIVERSITET



DET RIGTIGE STUDIEVALG TAGER TID

Brug tiden på at tage et **Uddannelsestjek** på KU's naturvidenskabelige bacheloruddannelser. Så er du bedre rustet til dit studievalg inden ansøgningsfristen 5. juli.

Klik dig ind på den uddannelse, du er interesseret i på science.ku.dk/ba – du finder **Uddannelsestjekket** på studiets hjemmeside.

science.ku.dk/ba

FREMTIDENS BIODIVERSITET

Verdens biologiske mangfoldighed er truet af menneskets behov for plads og ressourcer samt af klimaforandringer. Vi har talt med forsker i biodiversitet Jens-Christian Svenning om, hvad vi kan forvente i fremtiden, og hvordan såkaldt rewilding kan være et værktøj til at genoprette velfungerende økosystemer.

Af Carsten R. Kjaer,
Aktuel Naturvidenskab

Om forskeren



Jens-Christian Svenning er professor ved Institut for Biologi ved Aarhus Universitet. Her leder han Center for Biodiversitetsdynamik i en Verden under Forandring (BIOCHANGE). Han forsker i grundvidenskabelige spørgsmål vedrørende Jordens biologiske mangfoldighed og spillet mellem mennesker og natur. svenning@bios.au.dk

Menneskeskabte klimaændringer har i høj grad erobret dagsordenen som et problem, vi skal have gjort noget ved. Et andet problem, som mange mennesker formentlig også vil sætte højt på listen over dem, vi skal have gjort noget ved, er *biodiversitetskrisen*. Altså det faktum, at verdens mangfoldighed af levende organismer trues af menneskets gøren og laden her på jorden. Hidtil især fordi vi lægger beslag på en stor del af verdens arealer med landbrug og byer – men fremover også fordi vores udledning af drivhusgasser bidrager til klimaforandringer, som udsætter

verdens mangfoldighed for stigende pres. Et stykke ad vejen hænger biodiversitetskrisen derfor sammen med klimaforandringer.

»Hvis vi vil stoppe tilbagegangen i biodiversitet – og helst vende udviklingen – er det vigtigt, at vi bedst muligt forstår de årsagssammenhænge, der ligger bag tilbagegangen i biodiversitet,« siger Jens-Christian Svenning, der er professor og centerleder ved Aarhus Universitet og forsker i biodiversitet. »For ellers risikerer vi, at de ting, vi gør for at bevare eller fremme biodiversitet ikke er effektive eller modvirkes af andre faktorer – for eksempel,

tiltag for at imødegå klimakrisen,« siger han.

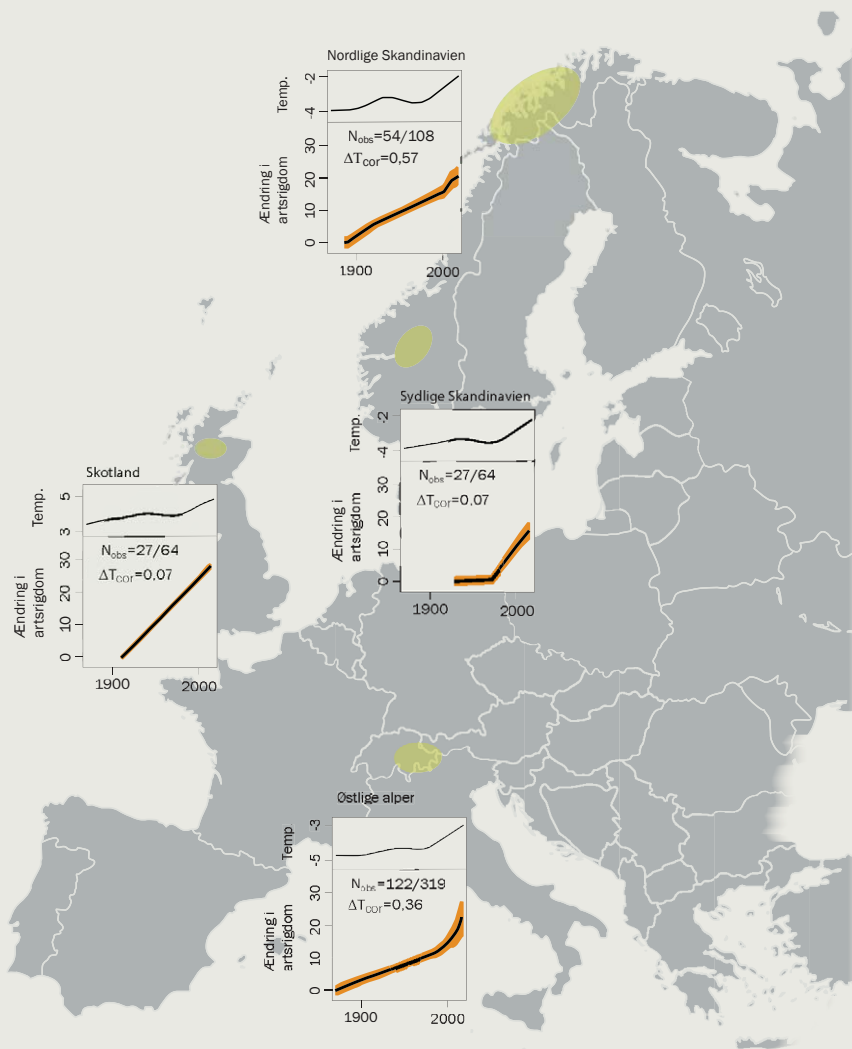
Et spørgsmål om sjældenhed

Jens-Christian Svenning står sammen med kolleger fra ind- og udland bag mange afhandling, der på forskellig måde viser, hvordan det ser ud med biodiversiteten i verden i dag, og hvilke udfordringer vi står overfor.

Når man snakker om en biodiversitetskriser mener man i særdeleshed, at det går tilbage med antallet af arter i verden, fordi unaturligt mange arter uddør på grund af mennesket. De arter, som umiddel-

← En sjælden plante: Zhejiang-Humlebøg (*Ostrya rehderiana*), som er et træ fra det østlige Kina. Man kender kun fem individer i naturen – på billedet ses tre af dem, og de to andre står lige i nærheden.

Foto: Jens-Christian Svenning.



De indsatte grafer på kortet viser ændringerne i plante-artsrigdom samt temperatur i fire udvalgte regioner ud af de 9 regioner, hvorfra forskerne i alt har data. N_{obs} angiver antallet af bjergtinder/optællinger i det bjergområde, som dataene i panelet kommer fra. ΔT_{cor} angiver korrelationen mellem vækstraten i artsrigdommen og ændringsraten i temperaturen. Grafik baseret på Steinbauer et al 2018.

bart er i størst fare for at uddø, er i sagens natur dem, der er sjældne. Men når en art er sjælden, er det ikke nødvendigvis menneskets skyld. Faktisk har naturforskere siden Darwin undret sig over, at det i naturen er meget almindeligt for en art at være sjælden og omvendt sjældent at være almindelig.

»Vi ved overraskende lidt om årsagerne til sjældenhed, og hvordan der opretholdes så mange sjældne arter på global skala«, siger Jens-Christian Svenning. »At forstå sjældenhed som fænomen er derfor vigtigt for biologer, der arbejder med naturbevaring.«

At kortlægge arters sjældenhed på global skala er dog ingen nem opgave. Den måde, man traditionelt har kvantificeret arters antal på, er ved at opgøre mængden af en given art i lokale miljøer, fordi det har været svært at skaffe data om arternes hyppighed på global skala.

Et problem med denne tilgang er blandt andet, at de fleste arter har en tendens til at være almindelige i få områder ud af deres samlede udbredelse og sjældne alle andre steder, hvilket giver en del støj i forhold til vurderinger af lokal hyppighed og et dårligt mål for global hyppighed.

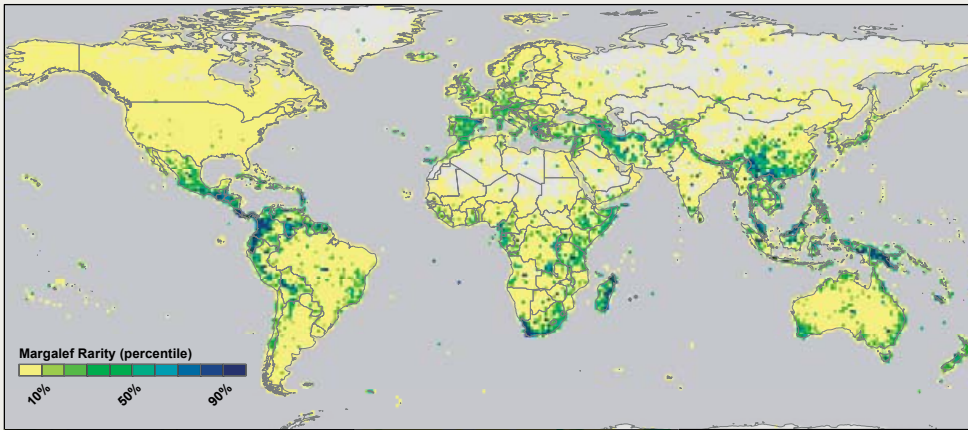
Hvor findes de sjældne planter?

Det seneste årtier har udviklingen af store globale databaser over biodiversitet givet forskerne meget bedre muligheder for at analysere mønstre i biodiversiteten på global skala og teste konkurrerende modeller for, hvordan disse mønstre opstår og opretholdes.

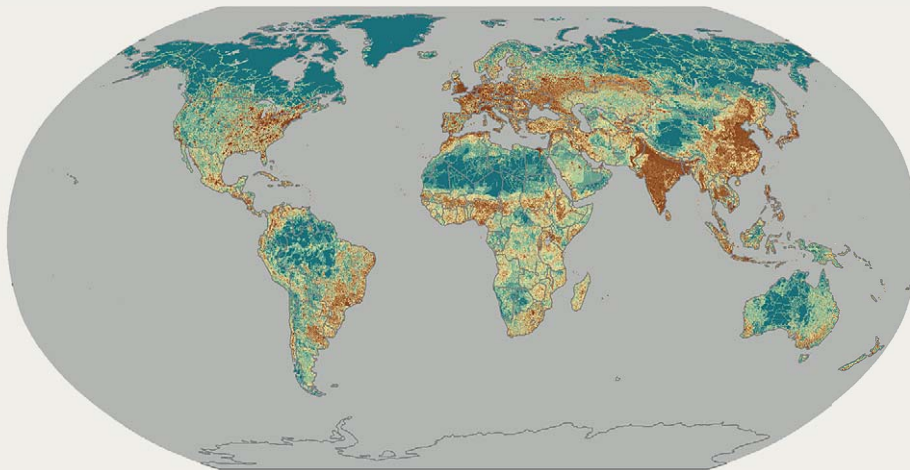
»Vi har opbygget en sådan global botanisk database til at undersøge mønstre i udbredelsen af flere end 430.000 landplanter i verden baseret på næsten 35 millioner observationer af disse planter,« fortæller Jens-Christian Svenning. Analysen har bekræftet, at mange

planter er sjældne – ja, faktisk kan mange siges at være supersjældne, idet cirka 1/3 af arterne kun har fem eller færre observationer. Samtidig viser analysen, at fordelingen af sjældne arter på ingen måde er jævnt fordelt ud over kloden. De klumper sig tvært imod sammen i mindre geografiske områder, der således udgør biologiske hotspots for en høj mangfoldighed af planter. Det gælder for eksempel bjergrige områder i Syd- og Nordamerika, Afrika, Europa, Asien og relativt små klimatiske regioner, der er stærkt forskellige fra deres omgivelser (for eksempel den atlantiske regnskov i Brasilien, Caribien). Udover koblingen til bjerge er der en vigtig sammenhæng til klima, idet sjældne arter især findes, hvor det fortidige klima har været relativt stabilt.

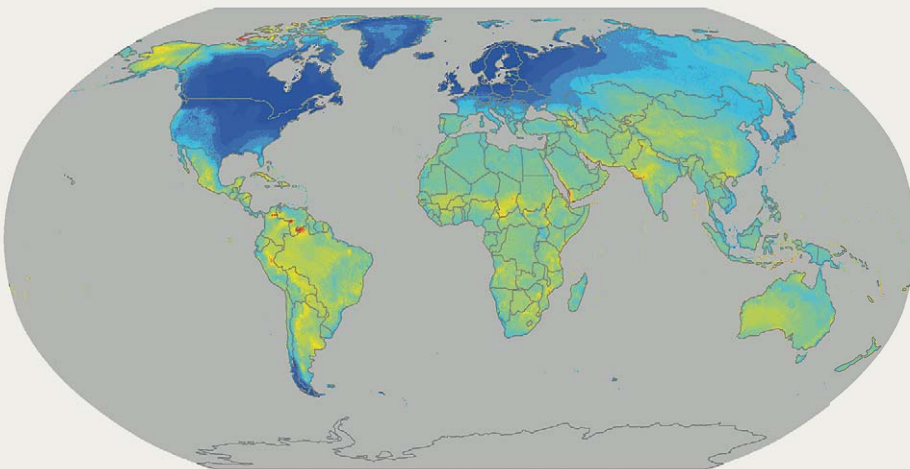
Udviklingen i den globale plantebiodiversitet vil derfor afhænge meget af, hvad der sker i de geografiske områder, der huser mange sjældne



Fordelingen af sjældne plantearter i verden (arter hvor der i databasen er tre observationer eller færre). Områder med et forholdsvis stort antal sjældne arter er vist med blålige farver, mens områder med relativt få sjældne arter er grønne. Gule farver er områder, hvorfra man har observationer, men ingen sjældne arter. Fra de grå områder har man ingen observationer.



Kort over variationen i det såkaldt "humane fodaftryk", der er et mål for menneskets påvirkning af dets omgivelser. Brune farver angiver kraftig menneskelig påvirkning, mens grønne angiver lav.



Kort over forholdet mellem hastigheden af fremtidige klimaændringer og historiske rater af klimaændringer. Temperaturerne vil generelt stige i fremtiden verden over, men set i forhold til, hvordan temperaturerne historisk har udviklet sig, vil nogle områder opleve relativt hurtigere ændringer (rater større end 1 = grønne til røde farver), mens andre vil opleve langsommere ændringer (værdier mindre end 1 = blå til grønne farver).

planter. Og her er der grund til bekymring. »Det viser sig nemlig, at de områder, der i dag huser mange sjældne planter, samtidig er områder, der er under stærk påvirkning af menneskelige aktiviteter (ikke mindst omdannelse af naturlige habitater til landbrug), og som samtidig er områder, hvor klimaforandringer forventes at slå særlig stærkt igennem i fremtiden. Mange sjældne planter vil altså i fremtiden komme under dobbelt pres fra men-

nesker og klimaændringer, hvilket vil kunne skubbe en del af dem ud over kanten,« siger Jens-Christian Svenning.

Op ad bakke for planterne

At der allerede er sket en kontant udvikling i plantesamfund drevet af klimaændringer, har Jens-Christian Svenning tidligere været med til at påvise. I 2018 publicerede han sammen med internationale kolleger og kolleger fra Aarhus

Universitet en artikel i tidsskriftet *Nature* om udviklingen i diversiteten af planter på 320 europæiske bjergtoppe. Det særlige ved bjergtoppe er, at de udgør meget veldefinerede geografiske lokaliteter, som er lette at genfinde, når man skal sammenligne med tidligere undersøgelser. Fra nogle af disse bjergtoppe har man observationer af planter helt tilbage fra 1870, og det udgør derfor meget værdifulde tidsserier i forhold til at undersøge,



Landskab i Tatrabjergene, en bjergkæde, der adskiller det sydlige Polen fra det nordlige Slovakiet.



hvordan plantesamfundene har udviklet sig i takt med den opvarmning, der påviseligt har fundet sted i perioden.

»Vi fandt, at der i dag findes mange flere plantearter på bjergtoppene end før i tiden. Og denne udvikling har ikke været jævn. For 50 år siden kom der i gennemsnit 1,1 ny art til på bjergtoppene pr. årti, mens dette tal var øget til 5,4 nye arter i det seneste tiår i den undersøgte periode (2007-2016). Vi ser altså en accelererende udvikling i antallet af arter på bjergtoppene«, fortæller Jens-Christian Svenning.

Udviklingen skyldes altovervejende øgede temperaturer, idet udviklingen har været konsistent over alle de ni geografiske regioner, forskerne har kigget på i deres studium. Der er også andre faktorer, der regionalt kan have betydning for udviklingen – som øget tilførsel af

kvælstof eller ændringer i nedbørsmønstre – men effekten af disse faktorer varierer betydeligt mellem de forskellige regioner.

»Der er ikke noget underligt i, at planter "kravler op ad bakke", når temperaturerne stiger,« siger Jens-Christian Svenning. »Også i lavlandsområder observerer man

jo en klar sammenhæng mellem temperatur og artsantal sådan, at artsantallet falder, jo koldere det bliver. Men her fordeler temperaturgradienten sig over et langt større geografisk område, mens den i bjergområder findes inden for korte afstande, da det er højden, der afgør temperaturen. Det betyder, at planterne i bjergområder hurtigere

Stigende temperaturer medfører, at der kommer flere og flere plantearter til på bjergtoppe. Her ses *Campanula alpina*, en art klokkeblomst der er knyttet til højtliggende bjergområder i Centraleuropa og Østeuropa. Fotos: Jens-Christian Svenning.

Tiår med fokus på økosystem-genoprettelse

FN har erklæret tiåret fra 2021-2030 for *tiåret for økosystem-genoprettelse* (UN Decade on Ecosystem Restoration). Det er i en erkendelse af, at genoprettelse af økosystemer verden over er en af forudsætningerne for at kunne indfri ambitionerne i FN's verdensmål. Genopretning af økosystemer er således et middel til at bekæmpe klimaforandringer, idet sunde økosystemer kan binde op til en tredjedel af vores CO₂-udledning. Derudover er det et middel til at forbedre fødevarerforsynings-sikkerheden, vandforsyningen og biodiversiteten.

Blandt de konkrete målsætninger er, at 350 millioner hektar forarmet landskab skal være genoprettet inden 2030.

Kilde: www.decadeonrestoration.org

Vildtlevende heste er et af de store dyr, der er relevant at bruge i såkaldte rewilding-projekter – her på Mols i Jylland. Foto: Jens-Christian Svenning



kan brede sig til områder, der tidligere har været for kolde til dem, når temperaturen stiger.«

Man kan selvfølgelig se det som en positiv ting, at biodiversiteten øges på bjergtoppe. Men for de sjældne arter, der har fundet refugier her, er udviklingen knap så godt nyt.

»Vi må forvente, at nogle arter vil blive presset på længere sigt af, at der bliver mere konkurrence på bjergtoppene,« siger Jens-Christian Svenning. »Det vigtigste er dog, at undersøgelsen viser, at klimaændringerne i accelererende grad ændrer de naturlige økosystemer«

Rewilding som en del af løsningen

Selv på bjergtoppe, der repræsenterer nogle af de mest afsides og utilgængelige naturområder, sker der altså en accelererende ændring i biodiversiteten på grund af klimaforandringer. Og det viser, at vi kan forvente mange forandringer rundt om i verden i fremtiden under de sandsynlige scenarier for klimaudviklingen. Det kan have vidtrækkende konsekvenser – ikke bare for biodiversiteten, men også for den måde økosystemerne fungerer på. Dette sammenholdt med, at de biologiske hotspots for sjældne arter generelt findes i områder, der er særligt truede af både menne-

skelige aktiviteter og fremtidige klimaændringer gør, at der er grund til at tænke grundigt over, hvad vi kan gøre for at vende den negative udvikling.

»Overordnet må målet være, at de ting, vi gør, understøtter økosystemer i at kunne vedligeholde sig selv, så vi mennesker ikke skal fungere som en slags kroniske "naturplejere",« siger Jens-Christian Svenning. »Selv i Danmark er midlerne til naturpleje meget begrænsede, og ude i verden og på den skala, der skal til for imødegå biodiversitetskrisen, er pleje helt urealistisk.«

Et af de virkemidler, der har været diskuteret meget i fagkredse, er såkaldt rewilding, som er en tilgang til naturgenopretning, der prøver at etablere selvopretholdende økosystemer via genetablering af naturlige processer. Et vigtigt perspektiv i rewilding er, at naturlige, velfungerende økosystemer også omfatter store planteædere og rovdyr (megafauna), som via kaskadeeffekter har en stor og vigtig rolle i økosystemerne. I mange regioner – for eksempel her i Danmark – er mange af de naturligt hjemmehørende store dyr fortrængt eller udryddet af mennesket. Mange steder har man arbejdet på at genindføre nogle af dem – det gælder for eksempel bæveren her i Danmark.

Hvis man vil bruge dette værktøj på en intelligent måde skal man selvfølgelig sikre sig, at man ikke genindfører arter i geografiske områder, hvor den forventede klimaudvikling vil gøre miljøet uegnet til den pågældende art. Netop den problemstilling har Jens-Christian Svenning undersøgt sammen med postdoc Scott Jarvie ved at kigge på 17 forskellige arter, der anses for oplagte kandidater til rewilding-formål i forskellige typer af økosystemer (for eksempel kronhjort, hest, elefant, muskusokse, dromedar, tiger).

»Her finder vi heldigvis, at der ikke vil være generelle klimabetingede barrierer mod at anvende disse dyr i fremtiden under de sandsynlige scenarier for klimaudviklingen,« siger Jens-Christian Svenning. »Klimatisk vil der også i fremtiden være rige muligheder for genetablere store planteædere og rovdyr i økosystemer verden. Det afspejler at lige netop store dyr oftest ikke har særligt specifikke klimakrav, modsat mange andre organismer«. Resultaterne understøtter, at rewilding har praktisk anvendelighed i en fremtid med stigende klimaændringer. Rewildings fokus på at genoprette de processer, der igennem millioner af år har opretholdt biodiversiteten, mere end på at fastholde en bestemt naturtilstand på et bestemt sted, passer også generelt godt til en foranderlig fremtid. ■

Undervisningsmateriale
På Aktuel Naturvidenskabs hjemmeside kan du finde et forløb om biodiversitet og biodiversitetskrisen beregnet på gymnasieundervisningen i biologi B/A.

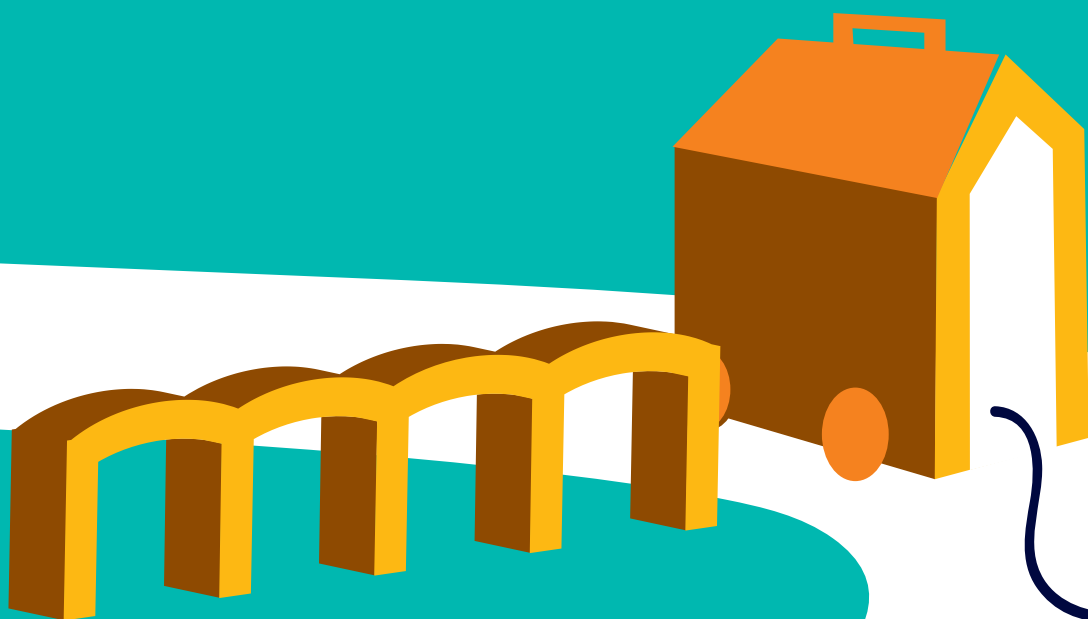
Videre læsning
Enquist, B.J. et al (2019): The commonness of rarity: Global and future distribution of rarity across land plants. *Sci. Adv.* 5, eaaz0414

Jarvie, S & Svenning, J-S (2018): Using species distribution modelling to determine opportunities for trophic rewilding under future scenarios of climate change. *Phil. Trans. R. Soc. B* 373: 20170446

Steinbauer, M.J et al (2018): Accelerated increase in plant species richness on mountain summits is linked to warming. *Nature* vol 556. Pp 231-234

DET RULLENDE UNIVERSITET

FÅ EN LÆRERIG UNDERVISNINGSDAG PÅ JERES EGET
GYMNASIUM MED STUDERENDE FRA **AARHUS UNIVERSITET**



Med Det rullende Universitet kan jeres elever

- ✓ få et realistisk indblik i livet som universitetsstuderende
- ✓ blive undervist af studerende i spændende og relevante emner af høj faglig kvalitet
- ✓ høre om forskellige uddannelser på Aarhus Universitet
- ✓ få større viden om overgangen fra gymnasium til universitet

Vi ruller også gerne ud til jeres gymnasium!

Besøg DRU.AU.DK
eller skriv til os på DETRULLENDEUNIVERSITET@AU.DK



Foto: Stig E. Rasmussen

HVAD KAN VI REGNE PÅ EN KVANTECOMPUTER I DAG?

Kvantecomputere eksisterer nu i adskillige laboratorier verden over, men de er stadig langt fra de supercomputere, som teknologien potentielt kan udvikle sig til. Meget tyder på, at de første praktiske anvendelser af kvantecomputere bliver indenfor kemien.

I oktober måned 2019 annoncerede en forskningsgruppe fra Google, at de havde nået en milepæl indenfor kvanteteknologi: De havde fået en kvante-computer til at slå alle almindelige computere. Det har længe været kendt, at kvantecomputere i teorien kan løse visse opgaver langt mere effektivt end almindelige "klassiske" computere, men at bygge en velfungerende kvante-computer

er en svær opgave. Informationen i en kvante-computer er lagret som en kvantemekanisk tilstand, og de er notorisk skrøbelige overfor påvirkninger fra omgivelserne. Over tid vil selv de mindste påvirkninger give anledning til tilfældige fejl på resultatet af beregningen.

Forskerne hos Google havde desværre ikke fundet en måde at slippe af med støjen på, men den

var tilpas behersket til, at de kunne detektere et statistisk signifikant signal, som de tolkede som et svar fra kvante-computeren. Beregningen blev udført på en kvante-computer bestående af 53 kvantemekaniske bits (kvantebits), og forskerne estimerede, at det vil tage de bedste klassiske computere 10.000 år at eftergøre beregningen. Konkurrenten IBM kunne dog siden påvise, at deres klassiske supercomputere

Forfatterne

Niels Jakob Søren Loft (i midten) er postdoc
nsl@phys.au.dk

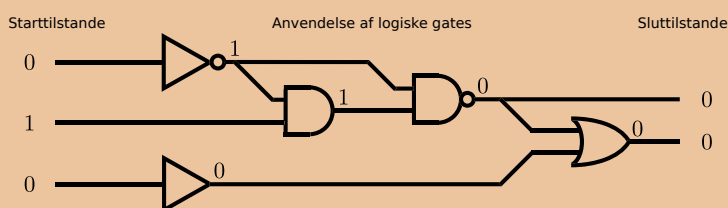
Emil Bahnsen (th)
er specialestuderende
201505515@post.au.dk

Nikolaj T. Zinner (tv) er
vicedirektør for Aarhus
Institute of Advanced
Studies og lektor i
teoretisk fysik
zinner@aias.au.dk

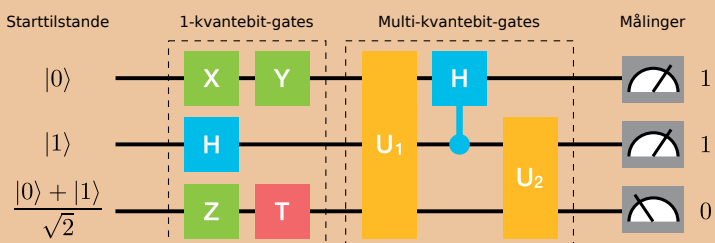
Alle ved Institut for
Fysik og Astronomi,
Aarhus Universitet

Kvante- og klassiske beregninger

En klassisk (almindelig) computer regner ved at udføre logiske gates på bits, der enten har værdien 0 eller 1. På figuren kan du følge de enkelte bits fra venstre mod højre og se, hvordan de forskellige gates ændrer bit-værdierne på baggrund af de givne input-værdier. Til slut aflæses resultatet af beregningen: to bits med værdien 0.



En kvanteberegning foregår efter samme princip, men i stedet for blot værdien 0 og 1 kan kvantebits antage såkaldte superpositionstilstande, der er blandinger af 0 og 1. På figuren starter de to øverste kvantebits i de tilstande (skrevet med en lodret og knækket streg), der svarer til de klassiske 0 og 1, mens den nederste starter i en superpositionstilstand. På figuren udføres først en række gates, der manipulerer enkelte kvantebits.



Eksempelvis er H den såkaldte Hadamard-gate, der ændrer 1 til en superposition af 0 og 1. Dernæst udføres multi-kvantebit-gates, der kan sammenfiltre (entangle) kvantebits, hvilket er et rent kvantemekanisk fænomen. Til sidst måler

man værdien af de enkelte kvantebits, hvilket giver enten 0 eller 1 med en vis sandsynlighed. Styrken i en kvantecomputer ligger i evnen til at manipulere superpositions- og sammenfildrede tilstande, der ikke findes i en klassisk computer.

kunne udføre opgaven på to og en halv dag. Til trods for det vinder kvantecomputeren dog stadig klart med sine kun 200 sekunders beregningstid.

Selve opgaven, som Googles kvantecomputer har løst, har ingen praktisk anvendelse. Den er designet til at være svær at løse for en klassisk computer, men let for en kvantecomputer, og det er netop den forskel, der er pointen med eksperimentet.

Fordelen ved en kvantecomputer

Når kvantecomputere nævnes i medierne, bliver den tit omtalt som fremtidens vidundermaskine, der kan regne alt på ingen tid og få nutidens supercomputere til at ligne kuglerammer. Det er en sandhed med modifikation. Det er korrekt, at man har algoritmer til en kvantecomputer, der kan udføre den samme opgave hurtigere end de tilsvarende klassiske algoritmer. Med dette forstår man, at tiden (eller rettere antallet af individuelle beregninger), det tager at udføre

kvantealgoritmen, vokser mere favorabelt med opgavens omfang end den bedste klassiske algoritme.

Et ofte fremhævet eksempel er Shors kvantemekaniske algoritme, der kan faktorisere et givet tal i sine primtalsfaktorer. Ethvert naturligt tal kan skrives som et produkt af primtal, eksempelvis $15 = 3 \cdot 5$, men at finde primtalsfaktorerne, dvs. at 3 og 5 givet tallet 15, er generelt en hård beregningsopgave. For store tal med hundredevis af cifre er det så svært at finde primtalsfaktorerne, at det udgør låsen i moderne kryptering, der eksempelvis sikrer kommunikationen mellem dig og din netbank.

For sådanne store tal er Shors algoritme langt hurtigere end de bedste kendte klassiske algoritmer for primtalsfaktorisering, og derfor er kvantecomputere blevet set som en trussel mod it-sikkerheden. Dog er truslen mere teoretisk end reel. For at faktorisere et tal, N , skal det først indlæses på kvantecomputeren, hvilket kræver lige så mange kvantebits, som der er bits

i den binære repræsentation af N . For eksempel er tallet 15 i bits givet som 1111, hvilket kræver fire (kvante)bits. Kryptografisk relevante tal behøver flere tusinde kvantebits. Til sammenligning har Googles største kvantecomputer 72 kvantebits.

Signal bliver hurtigt til støj

Kan man lave 72 kvantebits, kan man vel også lave tusind? Ja, det er faktisk ingen bedrift at producere en chip med tusinder af superledende kvantebits, der er en af de førende platforme for kvantecomputere, som blandt andet Google og IBM satser på. Udfordringen er at beherske dem. Hver enkelt kvantebit skal manipuleres og kontrolleres gennem ledninger, der transmitterer mikrobølger til og fra kvantebitten, og det kræver godt gammeldags elektronisk udstyr. Elektronikken til at styre bare en håndfuld kvantebits fylder et mindre lokale. Man kan reducere mængden af udstyr ved at opkoble færre kvantebits, men det sker på bekostning af kontrollen over de enkelte kvantebits.

Superledende kvantebits

Billede af en superledende chip med fem kvantebits fra MIT. Hver kvantebit (krydserne i midten) er forbundet med mikrobølgeledere, som anvendes til at udføre gates, justere kvantebittens energi og læse tilstanden, hvilket giver enten 0 eller 1 med en vis sandsynlighed. Undervejs i udførslen af en kvantealgoritme kan det være nødvendigt at justere energien af hver kvantebit for at styre hvilke kvantebits, der udveksler information med hinanden.

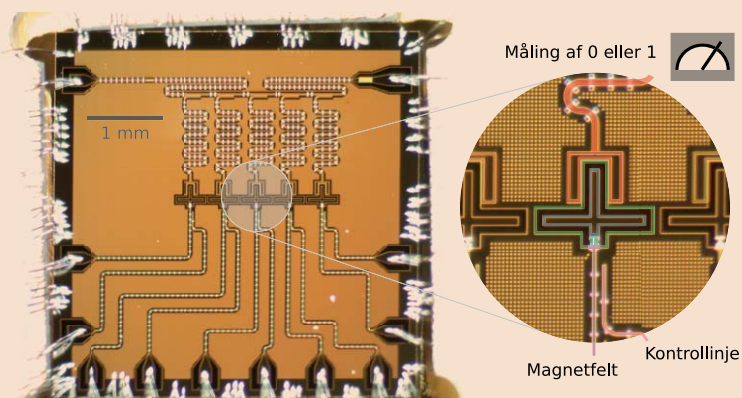
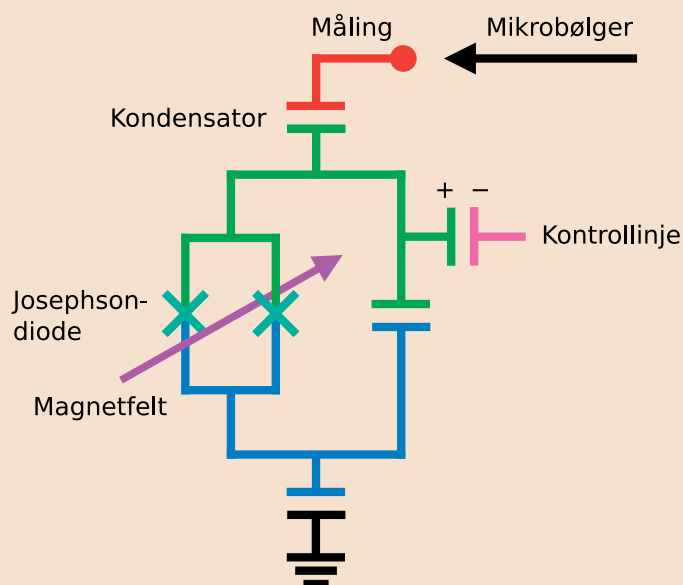


Foto: Roni Winik, postdoc ved William D. Oliver og Simon Gustavssons gruppe på MIT.

Diagrammet viser en af de superledende kvantebits, som kan modelleres som et elektrisk kredsløb bestående af simple komponenter. Komponenterne er farvekodede i forhold til det forstørrede billede fra chippen ovenfor.

Kondensatoren fungerer ligesom en almindelige pladekondensator og skabes ved at placere to stykker metal parallelt med hinanden på chippen. Josephson-dioderne giver en kvantemekanisk komponent og er grunden til, at chippen skal nedkøles til en temperatur under 1 Kelvin, hvor chippen bliver superledende. Disse styrer nemlig den kvantemekaniske tunnelling af superledende elektroner over på det blå stykke metal, hvis antal kan relateres til kvantebittens tilstand



eller værdi. Kvantebittens energi kan styres via et eksternt magnetisk felt som angivet. Gennem kontrollin-

jen kan man ændre kvantebittens tilstand, eksempelvis ændre den fra 0 til 1, eller noget derimellem.

Dernæst er der kvaliteten af de enkelte kvantebits. Sætter man en kvantebit i en bestemt tilstand, for eksempel 0, vil den over tid vekselvirke svagt med sine omgivelser, hvilket efterhånden vil give mere og mere støj på kvantebittens tilstand. Venter man længe nok, er kvantebittens værdi ikke længere 0, men en tilfældig tilstand – altså ren støj. Med andre ord har kvantebits en endelig levetid, før al den information, man har lagret i dem, er gået tabt. Dette sætter en naturlig øvre grænse for beregningstiden, før resultatet går til i støj. Levetiden af

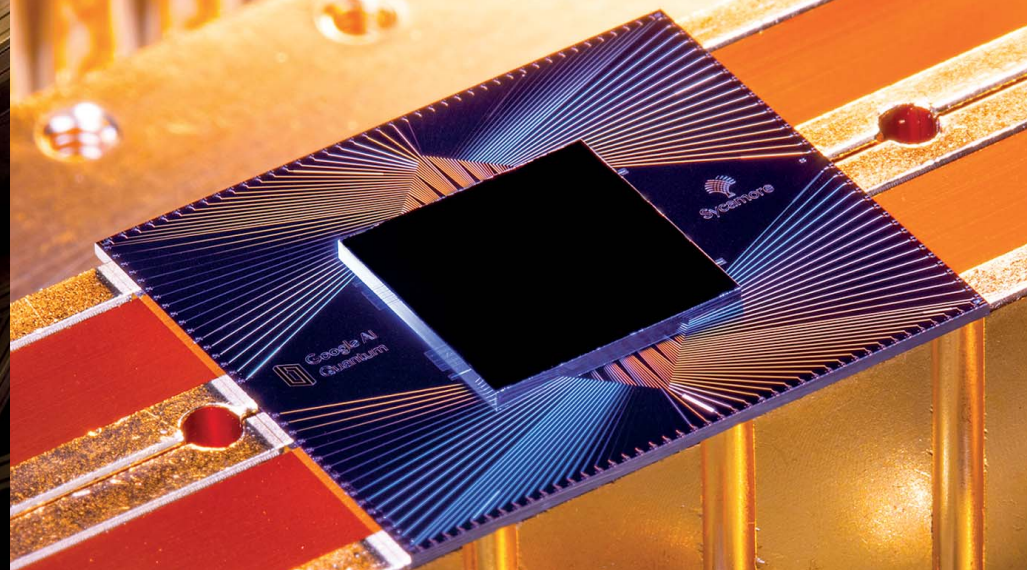
superledende kvantebits er typisk 10-100 μ s.

Der findes teoretiske metoder til at rette de fejl, der typisk opstår på ens kvantebits, men de bygger typisk på at koble flere kvantebits sammen, hvor nogle af dem bruges til at tjekke og rette fejl. Dermed kommer én kvantebit i computeren til at bestå af adskillige fysiske kvantebits på computerchippen. Det komplicerer måden, hvorpå man laver beregninger, og derfor ligger kvanteberegninger med fejl-rettede kvantebits noget ude i fremtiden.

Langt fra brugbare resultater

Når man konkret laver en beregning, dvs. kører en algoritme, udfører man den som en række simple manipulationer af én eller få kvantebits ad gangen. Hver manipulation svarer til en bestemt type operation (kaldet *gates*), som eksempelvis kan være at ændre 0 til 1 og 1 til 0. I praksis foregår dette på superledende kvantebits ved, at man sender bestemte mikrobølger til sine kvantebits, der påvirker dem til at ændre tilstand.

Kvantemekaniske gates er altså byggeklodserne i alle algoritmer på



Googles state-of-the-art kvanteprocessor, kaldet Sycamore, indeholder 53 kvantebits. I drift befinder chippen sig i en såkaldt cryostat (billedet til tv), der holder chippen nedkølet. Fotos: Erik Lucero/Google.

en kvantecomputer. Det er derfor afgørende, at man kan udføre gates med stor nøjagtighed, især hvis man vil udføre komplicerede beregninger som Shors algoritme, der består af mange gates. På superledende kvantebits kan man i dag lave gates med en nøjagtighed på 99 % eller mere. Det vil med andre ord sige, at gaten forøger støjen på kvantebittene med op til 1 %. Det lyder måske ikke af meget, men fejlene hober sig op: Efter ti gates vil støjen stige til 10 %, og efter 100 gates er næsten 2/3 af informationen tabt.

Denne begrænsning har betydet, at det største tal, man har primtalsfaktoreriseret med Shors algoritme på en kvantecomputer er 21 (10101 som binær). Det skete i 2012, da en gruppe brugte fotoner (lyspartikler) som kvantebits. Kvantecomputeren kunne oplyse, at $21 = 3 \cdot 7$. Med superledende kvantebits er rekorden 15, som kvantecomputeren faktoreriserede i 3 og 5. Det var i øvrigt kun i knap halvdelen af tilfældene, at kvantecomputeren regnede rigtigt.

Kemi på en kvantecomputer

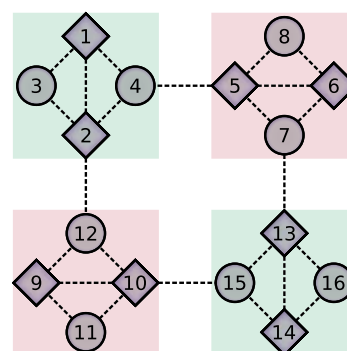
Det ultimative mål er en kvantecomputer med masser af kvantebits, der retter sine egne fejl, og hvor vilkårlige gates kan udføres med tilpas lille fejl på alle kvantebits. En sådan maskine kan blandt andet implementere Shors algoritme og bryde nogle typer kryptering: En vidunder- eller mareridtsmaskine, afhængig af øjnene, der ser. Det bliver ikke lige nu, og heller ikke om lidt.

Det interessante spørgsmål er derfor, hvad vi kan gøre med teknologien i dag og indenfor en overskuelig fremtid. Hvad bliver kvantecomputerens første rigtige anvendelse? For at besvare det spørgsmål skal vi finde et anvendelsesområde, hvor det er en naturlig fordel, at computeren følger kvantemekanikkens spilleregler. Det oplagte svar er at lade kvantecomputeren regne på kvantefysik! Det er ekstremt krævende for klassiske computere at simulere kvantemekaniske systemer, men for en kvantecomputer, der i sig selv er et kvantemekanisk system, er opgaven lige for. Netop denne fordel ved en kvantemekanisk regnemaskine motiverede forskere som den sovjetiske matematiker Yuri Manin og de amerikanske fysikere Paul Benioff og Richard Feynman til at foreslå idéen om kvantecomputere i starten af 1980'erne.

Specifikt vil man gerne beregne energien af store molekyler, der kan være relevante for medicinalindustrien. Håbet er, at en kvantecomputer indenfor en overskuelig tid kan regne på meget større og komplekse molekyler, end man kan i dag, hvilket kan bane vejen for ny medicin. Energien af et molekyle skyldes et kompliceret kvantemekanisk samspil mellem elektronerne, der arrangerer sig således, at molekylets samlede energi minimeres.

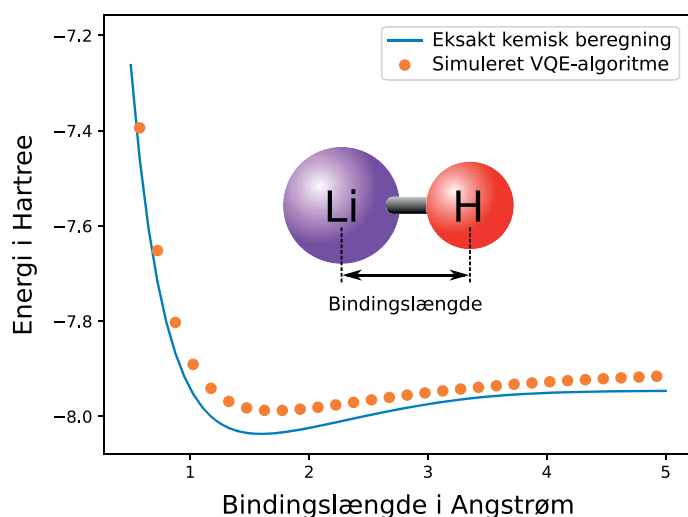
Man kan regne et molekyles energi ud ved hjælp af den såkaldte VQE-algoritme (der står for *variatio-*

16-kvantebit-computer



Skematisk forslag til en 16-kvantebit-computer konstrueret ved at koble fire kopier af vores fire-kvantebit-computere (de farvede firkanter). De grå firkanter og cirkler er kvantebits (med forskellige funktioner), og de stiplede linjer er koblinger mellem dem, der giver kvantebittene mulighed for at udveksle kvanteinformation med hinanden.

nal quantum eigensolver), og denne algoritme giver det faktisk mening at køre på nutidens kvantecomputere – alle deres begrænsninger til trods. Kort fortalt er idéen i VQE følgende: I stedet for at køre en række helt specifikke gates på sine kvantebits, vælger man dem delvist tilfældigt. Det er altså ikke afgørende præcis hvilke gates, man udfører på sine kvantebits – i modsætning til for eksempel Shors algoritme, der består af nogle nøje udvalgte gates, der skal udføres med stor nøjagtighed. Tilfældigheden i VQE-algoritmen gør den fleksibel og modstandsdygtig overfor systematisk støj. Man lader hver kvantebit



Beregninger af energien af LiH-molekylet (1 Hartree = $4,36 \cdot 10^{-18}$ J) som funktion af bindingslængden (1 Angstrøm = 10^{-10} m). Den blå kurve er resultatet af en kostbar eksakt kemisk beregning, mens de orange punkter er det forventede resultat af en kvanteberegning med VQE-algoritmen på vores fire-kvantebit-computer. Bemærk, hvor tæt VQE-beregningen med blot fire kvantebits kommer på det eksakte resultat.

repræsentere en elektronorbital, og når alle gates er udført, er resultatet en kompliceret kvantebit-tilstand, der svarer til en elektronkonfiguration. Ud fra sluttillstanden kan man regne molekylenergien for den givne konfiguration. Dernæst ændrer ("varierer") man lidt på valget af gates, hvilket resulterer i en ny sluttillstand med en ny energi. Processen fortsætter, indtil man ikke længere kan sænke energien. På den måde afsøger man forskellige elektronkonfigurationer og finder den, der giver den lavest mulige energi – dette er således elektronerne vil arrangere sig i et virkeligt molekyle.

VQE-algoritmen er allerede blevet brugt til at udregne energien af adskillige molekyler på en rigtig kvantecomputer. Eksempelvis har forskere fra IBM regnet på H_2 med to kvantebits, på LiH med fire kvantebits og på BeH_2 med seks kvantebits. Det er dog meget simple molekyler, men eksperimenterne viser, at metoden virker.

Nyt design kan spare gates

Præmissen i VQE-algoritmen er, at kvantecomputeren kan producere den kvantebit-tilstand, der svarer til den rigtige elektronkonfiguration. Det afhænger helt af, hvilke gates

vi kan udføre. I sidste ende er det betinget af vores hardware og designet af kvantecomputer-chippen.

I vores forskningsgruppe på Aarhus Universitet har vi i samarbejde med internationale kolleger fra blandt andet MIT foreslået et design til en ny gate. Den består af fire superledende kvantebits sammensat i et firkantet diamantmønster, hvorfor vi kalder den "diamantgaten". Indtil nu har alle gates, der er blevet implementeret på superledende kvantebits, manipuleret enten én eller to kvantebits ad gangen. Til sammenligning manipulerer vores gate alle fire kvantebits på én gang. Det lyder måske ikke af det helt store fremskridt, men det kan faktisk betyde en enorm reduktion i antallet af gates, som man behøver at køre i alt på sin kvantecomputer.

Selvom vores superledende chip endnu ikke er blevet bygget, kan vi godt eksperimentere med diamantgaten. Så længe kvantecomputeren ikke er for stor, kan man godt regne ud på en klassisk computer, hvad den vil gøre i virkeligheden. Vi kan derfor prøve at bruge diamantgaten i en VQE-algoritme og regne ud, hvilket svar en kvantecomputer vil give os tilbage. På den måde har vi set,

at én enkelt diamantgate kan regne energien for LiH lige så præcist som IBM kan med tre af deres gates. Det ser altså ud til, at vores gate har nogle nyttige egenskaber og kan bruges til kemiske beregninger med VQE-algoritmen.

Jo større molekylet er, jo flere måder kan elektronerne besætte elektronskallerne på, hvilket kræver flere kvantebits. Vores næste skridt er altså at skalere systemet op, så vi får en kvantecomputer med flere kvantebits. Eksempelvis kan man kopiere diamantgate-konfigurationen fire gange og koble kvantebittene sammen, hvilket giver en 16-kvantebit-computer. Det gør os i stand til at køre diamantgaten på hver af de fire kopier samt at sende information rundt kopierne imellem på en kontrolleret måde. Selvom forøgelsen fra fire til 16 kvantebits ikke lyder voldsom, så eksploderer antallet af forskellige kvantebit-tilstande fra $2^4 = 16$ til $2^{16} = 65.536$. I modsætning til en klassisk computer, som kun manipulerer én tilstand ad gangen, kan kvantecomputeren manipulere alle 65.536 tilstande på én gang. Det gør det meget krævende at simulere 16-kvantebit-computeren på vores almindelige computer på skolebureauet.

Næste stop er en nyttig beregning

Google har vist, at kvantecomputere i praksis kan slå klassiske computere, men har stadig ikke regnet noget interessant ud. Samtidig har VQE-algoritmen vist, at kvantecomputere kan regne molekylenergier ud, men er indtil videre kun demonstreret for små molekyler, hvor vi kender svaret i forvejen. Det næste store mål bliver at kombinere de to ting: At lave et nyttigt udregning på en kvantecomputer, som ikke kan udføres på en klassisk computer. Først når dette er sket, har kvantecomputeren for alvor vist sit værd. Det bliver et hårdt kapløb, for det handler ikke kun om prestige, men også om de mange penge, maskinens resultater vil være værd. Løbet er skudt i gang. ■

VÅDE LAVBUNDSJORDE

rummer masser af muligheder

Ved at opgive at dyrke de våde lavbundslande kan vi med et slag reducere frigivelsen af drivhusgasser, øge biodiversiteten, reducere kvælstoftransporten til havet og nedbringe risikoen for oversvømmelser. Men vi har brug for at sammentænke alle disse aspekter i stedet for at fokusere på det mest dagsaktuelle.

Lavbundslande bliver vådere overalt i landet. Det er uundgåeligt, da mere nedbør, stigende grundvandsstand og øget havniveau vil gøre det stadig mere vanskeligt at bortlede vandet i fremtiden. Oveni synker de drænedes jorde, fordi det organiske materiale nedbrydes af mikroorganismer, når der kommer ilt ned i jorden.

Denne udvikling forløber under højtrøstede debatter og forslag fra vandlidende bønder om at udgrave åerne. En sådan regulering kræver omfattende vurderinger og at indgrebene ikke strider mod bestemmelser i vandløbsloven, paragraf 3 beskyttelse mv. Men presset har tidligere medført flere udsigtsløse indsatser for at undgå det endegyldige: At man må opgive at dyrke korn på betydelige lavbundsarealer, som man drænedes og tog under plov for mange år siden, men som nu har sat sig så meget, at vandet ikke kan ledes bort, når grundvandet og åvandet står højere end jorden. Flere kommuner praktiserer i dag mange årlige grødeskæringer

for at holde vandstanden nede i sætningsramte jorde uden, at det har løst dyrkningsproblemerne, mens vandløbenes natur og kommunekasserne har måttet lide.

Arealet af dyrkningsusikre lavbundslande er stort. Der ligger omkring 170 tusinde hektar lavbundslande langs danske vandløb, søer og kyster, hvilket svarer til 4% af Danmarks samlede areal og 7% af landbrugsarealet. Dem vil landbruget gerne sælge eller veksle til dyrkningssikre højbundslande. Det åbner positive muligheder for natur og miljø. For lavbundslandene har potentiale til på en og samme tid at give os mere natur, binde CO₂, tilbageholde kvælstof og afhjælpe problemerne med oversvømmelser.

Ved vedtagelse af Landbrugspakken i foråret 2016 var mediernes og politikernes fokus på havets kvælstofforurening. Ved Folketingsvalget i juni 2019 var fokus skiftet til klima og CO₂. Og nu i februar i 2020 er blikket stift rettet mod den højeste nedbør i de seneste 150 år på tre gange over normalen og de

store oversvømmelser, som den har udløst især i Jylland. Ind imellem alt dette popper det op, at biodiversiteten står i sin hidtil største krise nogensinde både nationalt og globalt. Mere end nogensinde viser det os, at landet er af lave, og vi bør tænke i alle disse aspekter samtidigt og søge integrerede løsninger, i stedet for at stirre os blinde på eksempelvis klimaaspektet eller oversvømmelserne, som der desværre ofte er en tendens til.

Mere vand i landskabet

Et blik fra oven i februar 2020 viser vand overalt i det danske landskab. Månedens nedbør er tre gange større end langtidnormalen, og der strømmer tilsvarende mere vand gennem vandløbene. Langs Gudenå er der oversvømmelser i Silkeborg, Storå oversvømmer dele af Holstebro, og Ribe Å har oversvømmet dele af Ribe. På de fleste tidspunkter er det attråværdigt at have sit hus beliggende tæt på åer og søer, men lige i februar 2020 ønsker man, måske, at man ikke havde bygget så tæt på det våde element. Lavbundslandene langs

Filsø ved Varde. 160 år efter den første og 60 år efter den tredje afvanding af Filsø i 1951 var de dyrkede lavbundslande blevet så fugtige, at man valgte at sælge arealerne til Aage V. Jensen Naturfond, som i 2012-2013 genoprettede den nye Filsø. På fotoet er vandet på vej ind over kornstubbene og genskaber hurtigt en rig natur.

Foto: Theis Kragh

Forfatteren



Kaj Sand-Jensen er professor ved Ferskvandsbiologisk Sektion, Biologisk Institut, Københavns Universitet ksandjensen@bio.ku.dk

vandløbene i landbrugslandet står mange steder under vand, og selv på højjordene ser man blankt vand som tegn på, at nedbøren falder hurtigere end jorden kan opsuge den. For at mindske risikoen for oversvømmelser foreslår ferskvandsbiologen Bent Lauge Madsen at give åen mulighed for igen frit at slynge sig i ådalen og oversvømme den i våde vintre. Lauge Madsen peger på at øge magasinkapaciteten for vandet i moser og vådområder i åens opland samt forlænge vandets opholdstid i landskabet, så risikoen for oversvømmelser på marker og i byer mindskes længere nede ad vandløbet. Især oversvømmelse i byer koster meget store tab. Det er derfor nødvendigt at vurdere hydrologien i hele åens opland og længde, så man ikke lokalt træffer beslutninger, som øger risikoen for oversvømmelser andre steder. Kommunerne må arbejde sammen og finde reelle løsninger fremfor at lytte til de selvbestaltede eksperter, som angriber kommunale forvaltninger og beklikker faglige eksperter fra velrenommerede konsulentfirmaer for i stedet på et tyndt

fagligt grundlag at foreslå at grave åerne op og slå mere grøde. Hvis åer og vådområder får mulighed for at overtage de nære omgivelser, indebærer det samtidigt gevinster for tilbageholdelse af kvælstof, for mindre CO₂-frigivelse og højere biodiversitet i vand og på land. Man kan således tilstræbe en planlægning og optimering af de fire formål, som både tager hensyn til indbyrdes synergier og modsætninger.

Natur og biodiversitet

De 170 tusinde hektar lavbundsjord svarer i størrelse til cirka 50 % af det nuværende, danske naturareal. Ved etablering af blandet lysåben og skovdækket fugtig eller våd natur ved søer og vandløb vil der kunne ske en meget stor og reel forøgelse af landets naturareal og biodiversitet. Af hensyn til maksimal CO₂-reduktion kan sumpskov med el, ask og eg være at foretrække, eller galleriskov langs vandløbene. Vi har meget lidt natur af denne type, som er rig på insekter, svampe og visse fugle. Sumpskov er genoprettet i naturreservater langs Elben ovenfor Hamborg af hensyn

til biodiversitet og rekreative formål og, helt afgørende, for at reducere risikoen for oversvømmelse af millionbyen. Man fjernede digerne langs Elben, som tidligere stuede vandet op til mere end 7 meter over normalt niveau og udløste voldsomme oversvømmelser i Prag og Hamborg under store afstrømninger. Uden digerne vil Elben kunne oversvømme sumpskov og, efter aftale med og kompensation til landbruget, de permanente græsarealer.

Sumpskov kommer af sig selv langs danske vandløb, hvis arealerne passer sig selv. Men de fleste vil sikkert foretrække både skov og lysåbne områder. Da lavbundsjordene gennemgående er næringsrige vil de halvfugtige arealer hurtigt gro til med høje urter, buske og træer, hvis de får lov til at passe sig selv. Vedvarende græsning med store vilde dyr, husdyr eller maskinel slåning er derfor nødvendig, hvis der også skal være udsyn over en lav lysåben engvegetation med de mange planter, sommerfugle og engfugle, som følger med. For at spare penge kan man fristes til at



Skals Å i Himmerland i sensommeren 2018. Kraftig nedbør har oversvømmet lavbundsjord langs åen. På fotoet strømmer vandet tilbage til åen. Foto Jens Chr. Schou.



parkere overskydende vand i områder, hvor der allerede eksisterer eller er fremtidige muligheder for artsrig, lysåben natur. Men denne høje artsrigdom kan ikke opnås, hvis næringsrigt åvand tilføres. Til gengæld fører øget vandstand i sumpskog eller oversvømmelse af arealer med vedvarende græs ikke til tilsvarende tab af kvalitet eller udbytte. Derfor er det vigtigt at tage hensyn til modstridende interesser.

Stort potentiale for CO₂-reduktion

Vedrørende klimaet kan udtagning af dyrkningsusikre jorde, der forvandles til halvfugtige og vanddækkede vådområder, nedsætte udledning af drivhusgasser og tilbageholdelse af organisk kulstof svarende til et estimat på netto 2-5 millioner CO₂-ækvivalenter per år. Til sammenligning er den ønskede reduktion for landet i 2030 på 28 millioner CO₂-ækvivalenter. Potentialet for CO₂-reduktion ved skiftet fra drænedede marker til våd og halv-våd natur er altså meget betydeligt. Men vi mangler præcise tal for, under hvilke forhold kulstoftilbageholdelsen i jorden og reduktionen af CO₂-frigivelsen til luften bliver

optimal samtidig med, at man tilgodeser højere biodiversitet, større kvælstoftilbageholdelse og reduceret risiko for oversvømmelser.

Tilbageholdelse af næringsstoffer

I februar 2016 vedtog de borgerlige partier Landbrugspakken, som stoppede 30 års indsats for at reducere næringstilførslen til jord, ferskvand og havet. Med pakken ophørte kravet om dyrkningsfrie bræmmer langs vandløbene, der kunne tilbageholde næringsstoffer og pesticider og sikre en smule natur i agerlandet. Nu er det fordelagtigt for landbruget at søge andre økonomiske løsninger ved at give afkald på dyrkningsusikre lavbundsjord, som så i et ukendt omfang kan erstatte den næringsreduktion, som forsvandt ved opløjning af de udyrkede bræmmer. Når gødsningen af lavbundsjordene ophører, vil de, i hvert fald efter nogle år, skifte fra at frigive næringsstoffer til i stedet at optage dem og dermed mindske næringstilførslen til havet. Effekten må være meget betydelig.

Diskussionen om lavbundsjordernes fremtid efterlader mange

spørgsmål om forskning og planlægning. Tvunget af oversvømmelser langs Gudenå er de syv kommuner langs åen i februar 2020 blevet enige om at arbejde for en fælles løsning, som de håber Miljøministeren vil støtte. Beslutningstagere har tendens til at lægge sig mest op ad det emne, som lige nu har størst mediebevågenhed, og hvor borgerne råber højest. Det er istedet vigtigt at følge sagkundskaben og samtænke effekter på klima, biodiversitet, næringsstoffer og oversvømmelser, når eller hvis lavbundsjordene efter mange års tjeneste i landbruget, leveres tilbage til naturen. Men selv om beslutningstagerne skal indrage forskere og faglig rådgivere, så ved de ikke alt. Der mangler således egentlige målinger af CO₂-udskillelse og biodiversitet i fremtidige vådområder samt samlede vurderinger af kapaciteten for tilbageholdelse af vand og næringsstoffer. Derfor bør fremtidige forskningsprogrammer, udover fokus på feltstudier af CO₂ og biodiversitet, også lægge op til integrerede analyser og de praktiske muligheder, som ophør af dyrkningen på lavbundsjordene kan tilbyde ■

Den fugtig ellesump er ret lysåben med grønne urter i bunden. En af sjældenhederne er tørveviol. Foto Jens Chr. Schou.



Naturbaseret spildevandsrensning på øen Phi Phi Island i Thailand, 2006. Spildevandet fra hoteller og restauranter på øen renses i fire typer af serielt forbundne anlæg: et grusfilter med vertikal strømning, et grusfilter med horisontal strømning, et konstrueret vådområde med åbent vandspejl og et opholdsbassin. Det rensede spildevand genanvendes til vanding af hotellernes haveanlæg. Kilde: Brix et al. Ecol Eng 37 (5). Gengivet med tilladelse fra Elsevier.

KLIMATILPASNING

– fra tanke til handling

Om forfatteren



Ole Fryd er lektor i landskabsarkitektur, planlægning og klimatilpasning, Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet (KU). Han er uddannet Civilingeniør i Arkitektur & Design fra Aalborg Universitet og har en ph.d. i byplanlægning og landskabsarkitektur fra KU. Ole underviser og forsker i klimatilpasning og især, hvordan man kan arbejde med beplantning og naturlige processer som en klimatilpasningsstrategi. Til daglig er Ole tilknyttet landskabsarkitektuddannelsen og Have- og Parkingeniøruddannelsen, den internationale Master i Klimatilpasning og Parkdiplomuddannelsen på KU. of@ign.ku.dk

Hvordan sikrer man en generel bæredygtig udvikling til gavn for alle verdens borgere, mens klodens befolkningstal vokser med over 200.000 mennesker om dagen?

Her følger en personlig beretning om forfatterens egen motivation og handling ud fra pejlemærkerne bæredygtig udvikling, klimatilpasning og grøn infrastruktur.

I julen 2004 udløste et jordskælv en kraftig tsunami i Det Indiske Ocean med store ødelæggelser til følge i blandt andet Thailand. Under den efterfølgende genopbygning blev jeg som ung, nyuddannet ingeniør ansat på et udviklingsprojekt under Danida, hvor min opgave var at bidrage til at sikre hensigtsmæssige sanitære forhold i tre byer langs kysten i det sydvestlige Thailand.

Det, der motiverede mig ved jobbet – og som har været den gennemgående drivkraft i mit arbejdsliv lige siden – var muligheden for at udvikle bæredygtige løsninger, der forsøger at tackle tekniske sam-

fundsudfordringer ved at arbejde *med* naturen frem for *mod* naturen. Denne tilgang kan samtidig danne grobund for helhedsorienterede løsninger, der er skræddersyet til det enkelte sted, og som kan skabe nogle fantastiske synergieffekter.

Det mest spændende projekt i Thailand var på turistøen Phi Phi Island. Tanken var at slå flere fluer med et smæk og designe et spildevandsrensning, der samtidig fungerede som en offentligt tilgængelig grøn park med bænke og fodboldbaner, hvor restproduktet fra spildevandsrensningen var store smukke blomster, der kunne bruges som en del af dekorationen på øens

hoteller – og hvor det rensede spildevand kunne bruges til vanding af træer og blomster og dermed sikre, at øen kunne fortsætte med at fremstå som et frodigt tropisk paradis. Det var, hvad vi gjorde. På øens eneste offentlige grund blev der lavet et anlæg, der ikke kun rensede øens spildevand og sikrede rent vand langs bountystrandene, men også fungerede som en offentlig tilgængelig bypark. Det bekræftede mig i troen på, at “grøn infrastruktur” – i forståelsen som en teknisk infrastruktur, der er baseret på naturlige processer med sollys, planter og vand – kan noget særligt i forhold til at imødekomme verdens miljø- og klimaudfordringer.

Kig ud over den omlagte Skt. Kjelds Plads, der indgår som en del af klimatilpasningsprojektet langs vejen Bryggervangen på Østerbro. De mange træer og de mange forskellige arter og størrelser er en del af de nye tiltag i Københavns såkaldte Klimakvarter.
Foto: Mikkel Eye.



Intelligent afledning af regnvand

Et par år senere fik jeg mulighed for at skrive en ph.d. om samspillet mellem klimatilpasning og udviklingen af bæredygtige grønne byer. Specifikt var fokus på udviklingen af såkaldte LAR-løsninger som en klimatilpasningsstrategi, der skal mindske presset på byens kloaksystem, når nedbøren som forventet bliver kraftigere og kraftigere.

LAR er en forkortelse for Lokal Afledning af Regnvand og handler grundlæggende om at tilbageholde, nedsive, fordampe eller anvende regnvandet tæt på, hvor regnen falder, frem for som i traditionelle kloakløsninger at forsøge at komme af med vandet så hurtigt som muligt ved brug af underjordiske rørsystemer. Samtidig handler det om at udnytte jordens evne til at fungere som et filter, der renses vandet, jordens evne til at fungere som en svamp, der opsuger og gemmer vandet, og planter evne til at optage og fordampe vandet. Derudover handler det om at kombinere håndteringen af vandmængderne og risikoen for forurening med muligheden for at skabe lokal merværdi. Eksempler på dette ses i Brygger-

vangen og Folehaven, der begge ligger i Københavns Kommune.

Bryggervangen på Østerbro kan betragtes som Danmarks største LAR-anlæg indplaceret i den eksisterende by. Vej- og fortovsarealet langs Bryggervangen er reduceret med omkring 30 % og erstattet af grønne områder med en variation af planter, buske og træer. Omlægningen fra asfalt og betonfliser til vegetationsdækkede overflader betyder, at regnvandet kan opfanges af trækrone og sive ned i jorden frem for blot at strømme af på overfladen, hvilket samtidig aflaster

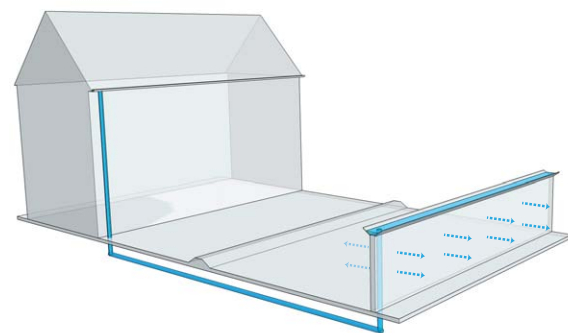
kloakken, så den ikke skal transportere så meget vand. Når det regner, ledes vandet fra fortove og hustage til plantebedene, hvorfra en del af vandet siver ned i jorden, optages af planternes rødder og fordampes. På denne måde håndterer plantebedene regnvandet uden at belaste det eksisterende kloaksystem. Samtidig har boligområdet fået et kvalitetsløft gennem de varierede beplantninger og de unikke og oplevelsesrige byrum, der er skabt.

Et andet eksempel er Folehaven i Valby, hvor man har udviklet en kombineret støjskærm og regn-

Jordens økologiske bæreevne

The Limits to Growth hedder en bog fra 1972. Den problematiserer sammenhængen mellem industriel økonomisk vækst, global befolkningstilvækst og det deraf følgende pres på naturens ressourcer, herunder fødevarerproduktion, CO₂-udledning og anden forurening. En del-problemstilling er Jordens økologiske bæreevne, der fungerer som en grænse for vækst.

Planetary Boundaries introduceres i 2009 som en metode til at kortlægge og vurdere Jordens grænser for menneskelig påvirkning. Af de i alt ni grænser har biodiversitetskrisen og den globale kvælstof- og fosforkrise allerede skubbet kloden "ud over kanten". Derudover er især klimakrisen og forvaltningen af planetens skov- og naturarealer i en særlig kritisk fase, mens vi stadig ved for lidt om, hvordan forskellige typer af forurening påvirker kloden som helhed.



Princip for LAR-anlæg i Folehaven, hvor vandets potentielle energi fra taget bruges til at løfte vandet op i fordelerrenden i toppen af den grønne klimaskærm (ovenfor). På fotoet ses klimaskærmen i forbindelse med indvielsen i efteråret 2019. Kilde: Marina Bergen Jensen, Københavns Universitet.

vandsløsning, nemlig en såkaldt grøn klimaskærm. Regnafstrømningen fra tage ledes via en underjordisk ledning til klimaskærmens top. Hertil udnyttes regnvandets potentielle energi. Fra toppen af klimaskærmen fordeles vandet over en fritstående skærm indeholdende mineraluld, som opsuger vandet og derefter tillader vandet at fordampe ud ad siderne under påvirkning af vind, sol og temperaturforhold. Den grønne klimaskærm kan ses som et eksempel på LAR generation 2.0, hvor man i højere grad udnytter de marginale arealer i byen, for eksempel smalle arealer langs skel, og samtidig udnytter vandets potentielle energi frem for at "tabe" muligheden for gravitationsbaserede løsninger, når først vandet er landet i terrænet. Samtidig er klimaskærmen kombineret med plantebede, så klatreplanter kan skabe en grøn væg, mens der også er mulighed for at tage ophold og sidde langs skærmen.

Naturbaseret byudvikling i Afrika

Over en periode på cirka 10 år har jeg været involveret i forskningsprojekter, der fokuserer på mulighederne for naturbaserede løsninger i afrikanske storbyer, specifikt i byerne Addis Ababa i Etiopien, Dar es Salaam i Tanzania og Lilongwe i Malawi. Med naturbaserede løsninger menes en vifte af tilgange, der udnytter det

eksisterende terræn, jordbundsforholdene, klimaet, den lokale vegetation og de lokale vandressourcer som udgangspunkt for byudviklingen. En by som Dar es Salaam vokser med omkring 1000 mennesker om dagen. I dag bor der cirka 6-7 millioner mennesker i byen. Om 10-15 år vil byen have dobbelt så mange indbyggere. De skal alle have et sted at bo, de skal have et job, mad at spise og de skal ikke blive syge af at bo i byen. Så hvordan bygges byen smart og bæredygtigt?

I Dar es Salaam har vi samarbejdet med borgerne i bydelen Kibululu om udviklingen af en helhedsorienteret by- og landskabsstrategi for bæredygtig udvikling. I forhold til vandhåndtering er et af problemerne, at der ikke er noget formelt afvandingssystem i den hastigt voksende by, at der kommer flere og flere huse til – så der genereres mere regnafstrømning fra tage i områder, der tidligere var marker eller bananplantager – hvilket øger erosionen i åer og floder og øger risikoen for massive oversvømmelser længere nede i flodsystemet, hvilket kan have katastrofale og fatale konsekvenser. Derudover er der i troperne regntider, hvor det regner meget og kraftigt, og tørkeperioder, hvor det stort set ikke regner i flere måneder. Det betyder, at der er vandmangel i lange perioder mellem regntiderne.

Ved at opsamle regnvand fra tage til lokal brug øges vandforsyningsikkerheden. Ved at forsinke, nedside og fordampe vandet lokalt reduceres belastningen af åer og floder – med deraf følgende reduktion i erosions- og oversvømmelsesrisikoen nedstrøms i flodsystemerne. Endelig kan løsningen med lokal opsamling af regnvand kobles til lokal jobskabelse for de nye tilflyttere i form af landbrug og dambrug, der samtidig bidrager med produktion af lokale fødevarer – ikke mindst proteiner – der kan ernære den hastigt voksende befolkning.

Der er et stort internationalt potentiale i at tænke tingene sammen. Landskabsbaserede løsninger er multifunktionelle og kan skabe mere synergi end traditionelle mono-funktionelle teknologier.

På globalt plan forventes omkring 2,5 milliarder mennesker at flytte til byerne i de kommende 30 år. Det betyder, at det samlede bebyggede areal i verden vil fordobles – måske tredobles. Tendensen er nemlig, at vi bor i større huse, har dobbelt carport og kører bil, når vi skal ordne vores daglige gøremål, hvilket kræver meget mere plads end da vi byggede middelalderbyer i for eksempel Italien, Frankrig og Danmark. Næsten 90 % af denne globale byvækst forventes at finde sted i Asien og Afrika. Det positive er, at størstedelen af disse byområ-



Workshop med borgere i bydelen Kibululu i Dar es Salaam, Tanzania, om udviklingen af lokalt forankrede naturbaserede regnvandsløsninger, der giver mening for de involverede parter og adresserer mange forskellige problemstillinger på samme tid. Foto: Ole Fryd.

der endnu ikke er bygget – så vi har en unik mulighed for at gentænke byen og naturens rolle i byen, inden vi plastrer det hele til med asfalt og beton. Men det haster. Der flytter mere end 200.000 mennesker ind til byerne hver dag. Vi har en mulighed for at tænke helhedsorienteret fra starten og indtænke landskabets multifunktionelle rolle fra starten – frem for at det er noget, der som i eksemplet Bryggervangen i København bliver tilpasset 100 år efter, byen er bygget.

Havvand og grundvand er de næste klimaudfordringer

I de senere år har jeg udbygget erfaringerne fra arbejdet med klimaforandringer – med fokus på regnvandshåndtering i byerne – til også at dække klimatilpasningen af de danske kystområder i lyset af stigninger i det generelle havniveau såvel som øget risiko for stormflod. Her kan løsningerne deles op i tre overordnede tilgange: 1) *Beskyttelse* som diger, sluser og høfder; 2) *tilpasning*, hvor bebyggelsen og beboernes evne til at leve med vandet udvikles, og 3)

tilbagetrækning, som er en gradvis udfasning af bebyggelse i særligt udsatte, lavtliggende kystområder. En delstrategi under tilbagetrækning handler om at undgå problemer i fremtiden ved ikke at bygge i særligt udsatte områder som strandenge og ådale.

Tilbagetrækning er nok den mest kontroversielle tilgang på nuværende tidspunkt. Givetvis fordi det kan tolkes som en diametral modsætning til en mulig iboende menneskelig stræben efter at kontrollere naturen – det at lade ting stå til, at give land tilbage til naturen og ikke

Menneskelig handling og konsekvens

Resiliens kan ses som et samfunds og/eller et økologisk systems evne til at "springe tilbage" til en normalsituation efter en chokpåvirkning. Jo hurtigere, man er tilbage til normalsituationen, jo mere resiliens er systemet. En udspændt elastik springer tilbage til sin grundform på en brøkdel af et sekund. En by tager måske fem år at genopbygge efter et jordskælv eller en anden katastrofe – mens de mentale- og sundhedsmæssige eftervirkninger kan trække spor flere årtier efter hændelsen. Et globalt klimasystem kan måske stabilisere sig indenfor en tidshorizont på 5.000-10.000 år. Den sjette masseudryddelse, dvs. det aktuelle tab af dyre- og planterarter som følge af menneskelig aktivitet, vil kræve en restitueringsperiode på omkring 5 millioner år – måske endnu mere.

Så naturkatastrofer og menneskelige handlinger og valg har forskellige konsekvenser og forskellige tidsmæssige påvirkninger såvel lokalt som globalt. Når man presser en hånd ned i en skummadras vil det tage kortere eller længere tid for madrassen at finde tilbage til sin grundform og sit udgangspunkt. Det samme gælder menneskabte miljøpåvirkninger.

Vil du vide mere?

- Resiliens og havvand: Ole Fryd og Gertrud Jørgensen (red.): *Byerne og det stigende havvand – Statusrapport 2019*. IGN Rapport, Januar 2020.

- Lokal Afledning af Regnvand (LAR): www.laridanmark.dk

- Planetary boundaries: www.anthropocene.info

- Meadows, D. H., & Club of Rome. (1972). *The Limits to growth: A report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind*. New York: Universe Books.

- Brix et al (2011): The flower and the butterfly constructed wetland system at Koh Phi Phi - System design and lessons learned during implementation and operation. *Ecological Engineering* 37 (5), pp. 729-735

bare "bygge os ud af problemerne". Det kalder på en større ydmyghed blandt os mennesker – ja for hele menneskeheden – i forhold til naturen. Det kalder på en ændring af "mind set". Og det tager tid.

Heri ligger en mulig kobling til resiliensforståelsen, der ikke kun omhandler et systems evne til at "springe tilbage", men også et samfunds evne til at omorganisere sig og "springe fremad" i en løbende proces, hvor vi i højere grad tillader læring og en afvejning og tilpasning af teknologier og valg over tid, frem for (på reduktionistisk vis) at se klimatilpasning som en handling, en event, hvor borgmesteren klipper snoren over og påstår, at "nu er vi klimasikrede". Ud fra en evolutionær resiliensforståelse er klimatilpasning netop ikke en event, men en kontinuerlig proces med mange læringsloops. I den forbindelse er jeg overbevist om, at naturbaserede løsninger har et kæmpe potentiale som en del af løsningsrummet.

En af de andre store klimaudfordringer, vi er begyndt at arbejde med, er

det stigende grundvand. Danmark er grundlæggende et historisk moselandskab, som har været heftigt drænet i over 100 år. Med stigende årsnedbør og især stigende vinternedbør, hvor fordampningen samtidig er lav – og med ofte lerede jorder, der kun kan opbevare en relativt lille mængde vand – er der stigende risiko for, at jorden sumper til. Denne udfordring forværres i kystområder af en stigning af det generelle havniveau og yderligere af landsænkninger i den sydvestlige del af Danmark. I udviklingen af helhedsorienterede og langsigtede klimatilpasningsløsninger gælder det således om at sammentænke grundvandsstigninger, havvandsstigninger, vandforsyning (blandt andet i tørkeperioder) og afvanding ved hjælp af LAR.

Nogle af de spørgsmål, der rejser sig i forhold til naturbaseret dræning er blandt andet: Hvor effektive er forskellige træer til at suge vand op af jorden og fordampe det? Hvordan plantes og plejes disse særligt tørstige eller oversvømmelsestolerante træer, og hvordan får

de lov til at udvikle sig over tid? Er det f.eks. acceptabelt at træerne vokser sig meget store i vores byområder?

Fra tanke til handling

I mit arbejde som underviser på universitetet oplever jeg et enormt engagement blandt studerende, der ønsker at bidrage konstruktivt til udviklingen af en bedre verden – og som deler min fascination af naturen som kilde til inspiration og en gave, der kan være med til at løse de mangesidede udfordringer. Vi mangler stadig at forløse potentialet fuldt ud, og det sker gennem nysgerrighed, analyser og handling én-til-én. Såvel helt lokalt på en gade i Danmark som globalt i de hastigt voksende byer i Asien og Afrika.

Hvad gør man, hvis man har et brændende engagement og en lyst til at bidrage til udviklingen af en bedre verden? Man handler! Det har jeg i hvert tilfælde valgt at gøre, og jeg håber at denne lille fortælling kan være med til at tænde en tilsvarende gnist hos dig. ■

Indavl hos danske pindsvin

I 2016 bad pindsvineforsker Sophie Lund Rasmussen fra Biologisk Institut Syddansk Universitet danskerne om hjælp til at indsamle døde pindsvin over hele landet, som hun og hendes kolleger på Syddansk Universitet og Aalborg Universitet skulle bruges til at undersøge, hvordan bestanden af pindsvin har det i den danske natur. Og budskabet blev opfanget. I alt 697 døde pindsvin blev indsamlet af danske borgere over hele landet og sendt til forskerne. Efter at have gransket de indsamlede pindsvin blev 178 udvalgt til at blive nærmere undersøgt af genforskere fra Institut for Kemi og Biovidenskab på AAU.

De genetiske undersøgelser viser, at den danske pindsvinebestand kan inddeles i tre overordnede geografiske grupper: Jylland,



Sophie Lund Rasmussen med pindsvineunge.
Foto: Pia Burmøller Hansen

Bornholm og en gruppe bestående af Fyn, Sjælland, Lolland og Falster. Disse grupper kunne yderligere inddeles i seks genetisk forskellige bestande på Fyn, Sjælland, Lolland og Falster, Bornholm, Jylland nord for Limfjorden og Jylland syd for Limfjorden. Det skyldes formodentlig, at Danmark består

af en masse øer, som er isoleret fra hinanden via hav. Selvom pindsvinene er gode svømmere, har undersøgelsen bekræftet, at de ikke frit kan bevæge sig fra den ene ø til den anden. Resultaterne peger derfor også på, at den danske pindsvinebestand er temmelig indavlet sammenlignet med undersøgelser fra andre europæiske lande.

Forskerne kan endnu ikke sige, hvad det eventuelt kan betyde for dyrenes overlevelse. Det fortsatte arbejde med Det danske Pindsvineprojekt vil på sigt måske kunne give svar på det spørgsmål ved blandt at kombinere den nye viden med andre helbredsrelaterede undersøgelser, som bliver udført på de 697 døde pindsvin.

CRK, Kilde: AAU, PLOS One <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227205>

RÆVE OG MÅRHUNDE KAN REGULERE ANTALLET AF HVALPE

Undersøgelser af ræve og mårhunde i Danmark tyder på, at de får flere hvalpe, når bestanden er lille og færre, når den er stor. Det kan blandt andet have betydning for vores muligheder for at reducere bestanden af mårhunden, der regnes for invasiv i Danmark.

Når man snakker om forvaltning af især ræve har det længe været diskuteret, om ræve regulerer deres reproduktion efter, hvor hårdt jagttrykket er. Dvs., hvis man jager ræve hårdt i et område for at reducere antallet, "skruer" rævene så bare op for antallet af hvalpe, så reguleringen er nytteløs eller i værste fald øger antallet af ræve i området? Undersøgelser af ræv og mårhund udført af forskere fra Aalborg Universitet, Institut for Kemi og Biovidenskab og DTU Center for Diagnostik tyder på, at dette faktisk er tilfældet.

Mårhundens indtog i Danmark

Mårhunden er, til forskel fra ræven, indført af mennesker. Den stammer fra Østasien og har i øjeblikket status som invasiv art i Europa. Den 1. januar 2015 trådte en ny EU-forordning om invasive arter i kraft, som betyder, at medlemslandene er forpligtiget til at træffe særlige foranstaltninger i forhold til mårhund. Dette har været en stor forvaltningsmæssig udfordring, fordi mårhunde formerer sig hurtigt. Mårhunden blev første gang set i naturen i Danmark i 1980 ved Vejle. I perioden fra 1995 til 2003 blev 25 mårhunde registreret i forbindelse med projekt Dansk Pattedyr Atlas, og i jagtsæsonen 2018/2019 blev der nedlagt mere end 3000



Danske mårhunde får i gennemsnit knap 11 hvalpe og op til 16 hvalpe pr kuld.
Foto: Shutterstock.

mårhunde i Jylland. Der er således ingen tvivl om, at mårhundebestanden, som i skrivende stund kun findes i Jylland, er i kraftig stigning.

Mårhunden er mere en opportunist end en jæger. Den lever af en lang række fødeemner som mus, fugle, padder og krybdyr, hvirvelløse dyr,

Forfatterne



Sussie Pagh er seniorforsker ved Institut for Kemi og Biovidenskab, Aalborg Universitet
sup@bio.aau.dk



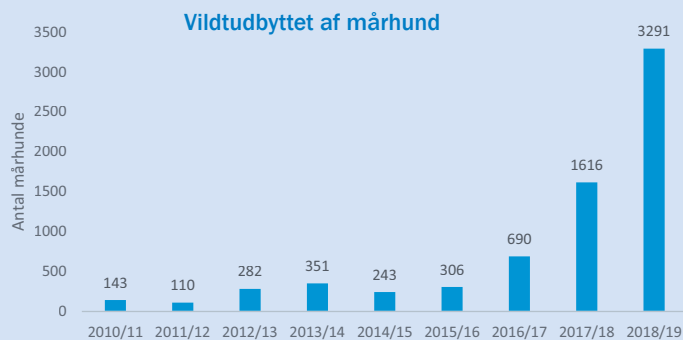
Cino Pertoldi er professor ved Institut for Kemi og Biovidenskab, Aalborg Universitet og ved Aalborg Zoo.



Mariann Chriél er chefkonsulent ved Center for Diagnostik, Danmarks Tekniske Universitet



Mette Sif Hansen er lektor ved Institut for Veterinær- og Husdyrvidenskab, Københavns Universitet



Figuren viser vildtudbyttet af mårhund ifølge DCE, Bioscience, Aarhus Universitet. Vildtudbyttet er det samlede tal for antallet af nedlagte individer af en art pr år. Vildtudbyttet baseres på indrapporteringer fra jægere i jagtsæsonen. Over en kortere periode betragter man vildtudbyttet som et relativt mål for bestanden. Man ved ikke, hvor stor en andel af bestanden af ræv eller mårhund, som skydes eller aflives, men hvis den andel af bestanden, som nedlægges, er konstant, så kan op- og nedgange i vildtudbyttet bruges som et udtryk (eller mål) for op- og nedgange i selve bestanden.

En dansk undersøgelse i 1970'erne viste, at man skød eller aflivede cirka 50% af den danske rævebestand. Vildtudbyttet var på det tidspunkt ca. 50.000 ræve, og man kunne på daværende tidspunkt derfor regne ud, at rævebestanden var på cirka 100.000 ræve.



Uterus fra mårhund med 15 ar (mørke aftegninger), som viser, at mårhunden har haft 15 fostre. Foto: Center for Diagnostik, DTU.



Uterus fra ræv med seks mørke ar, som viser at ræven har haft 6 fostre. Foto: Center for Diagnostik, DTU.

plantemateriale som majs og frugt, og en stor del af dens kost består af ådsler. Ud fra studier i vores nabolande ser mårhunden ikke ud til at give nævneværdige problemer for bestandene af hjemmehørende rovdyr som ræv, grævling og skovmår. En mindre bestandsnedgang hos andre rovdyr kan dog ikke udelukkes, hvis mårhundebestanden fortsætter med at stige, og den danske natur skal rumme mårhunden, som er endnu et generalistrovdyr.

Et gennemsnit på knap 11 hvalpe

Når man undersøger et rovdyrs reproduktionspotentiale, kigger man ofte på placental ar, dvs. ar i uterus (det organ som hos mennesker kaldes livmoderen) efter tilhæftning af moderkagen, da disse viser, hvor der har siddet et foster (se fotos). Alternativ kan man opsøge rovdyr på ynglepladsen og tælle unger, men det er svært at få et tilstrækkeligt datamateriale ad den vej. Hos arter som ræv og mårhund, der må jages, er det nemmere at tælle placental ar. Arrene kan ses mange måneder efter hvalpene er født, så selvom hunræven eller hunmårhunden først er skudt om vinteren, kan arrene stadig tælles. Omkring næste ynglesæson bliver arrene mindre tydelige, og nye ar kommer til. Arrene er sammen med fostre det mest nøjagtige estimat af kuld størrelsen. Dog kan man ikke vide, om hvalpen er levendefødt, dødfødt eller aborteret sent i drægtigheden. Mange hvalpe dør desuden indenfor de første uger og måneder – alt efter forældrenes evne til at skaffe tiltrækkelig føde til hvalpene. Placentale ar egner sig godt til sammenligning af kuld størrelser mellem lande og mellem ynglesæsoner.

I 2017 undersøgte vi placental ar fra 89 voksne mårhundehunner, der enten var blevet skudt eller dræbt i trafikken. Antallet af ar varierede mellem 1 og 16 med et gennemsnit svarende til en kuld størrelse på knap 11 hvalpe.

Antallet af hunner som reproducerede sig blev anslået til at være mere



end 78%. Det er den største gennemsnitlige kuld størrelse og den største hvalpeproduktion, der hidtil er dokumenteret hos mårhunde i Europa. Til sammenligning blev der ved større undersøgelser af mårhunde i Finland og Polen fundet en gennemsnitlig kuld størrelse på mellem 8 og 9 hvalpe. I Finland anses mårhunden i mange områder for det mest almindelige rovdyr. Formentlig hænger den høje reproduktion hos mårhunde i Danmark sammen med, at mårhundene er ved at etablere sig, hvorfor bestandstætheden er lav. Da mårhundene tilsyneladende ikke konkurrerer væsentligt med vores hjemmehørende mellemstore rovdyr er der tilstrækkelig føde til, at de kan producere store kuld. Sandsynligvis vil kuld størrelsen falde efterhånden som mårhundebestanden i Danmark bliver tættere.

Den høje reproduktion hos danske mårhunde betyder, at en stor del af bestanden kan dø, før bestanden falder. Hvis meget få mårhunde dør af naturlige årsager som sult og sygdomme, og det tyder alt på, skal man aflive 8 ud af 10 mårhunde, før bestanden holder op med at vokse –

Fakta om ræv og mårhund

Ræv (*Vulpes vulpes*)

Social struktur: Ræve har en fleksibel social struktur – fra små familiegupper, som ofte ses hos byræve, til monogame par og polygam socialstruktur (oftest hanner med flere hunner). Det er primært hunnen, som er hos hvalpene. Både hun- og hanræven henter føde, når hvalpene er store nok til, at hunræven kan forlade graven. Hannen henter føde til hunræven, indtil hvalpene er store nok til, at hunræven kan forlade hvalpene.

Yngletid: I Danmark starter parringstiden for ræve sidst i december, og de fleste rævehvalpe fødes mellem 15. marts og den første uge i april efter en drægtighedsperiode på 52-53 dage.

Kuld størrelse: I Europa ligger gennemsnittet på mellem 3,3 og 6,9 hvalpe.

Kønsdimorfi: Hanner er generelt større end hunner.

Status: Ræve er hjemmehørende i Danmark, formentlig indvandret for 11.000 år siden. Ræve må jages i perioden 01.09 - 31.01, men der findes en lang række undtagelser, hvor man uden forudgående tilladelse kan regulere ræve uden for jagttiden, blandt andet må hvalpe mange steder reguleres udenfor graven i perioden 01.07 - 31.08 (se yderligere www.retsinformation.dk - søg under vildtskader).

Mårhund (*Nyctereutes procyonoides*)

Social struktur: Mårhunde lever i monogame par, og han og hun opfoster hvalpene i fællesskab. Det er primært hannen, som er hos hvalpene ved graven eller lige i nærheden, mens hunnen søger føde længere væk for at skaffe energi til diegvingen.

Yngletid: I Danmark fødes mårhundehvalpene i perioden fra sidst i april til starten af maj, dvs. ca. en måned senere end ræve får deres unger. Hunnen er drægtig i 62-64 dage.

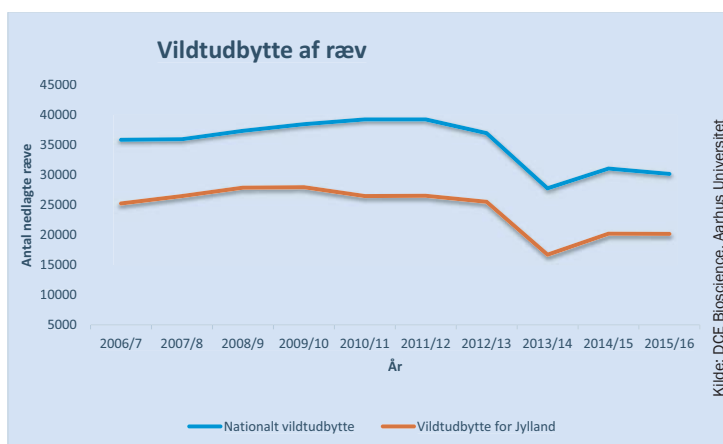
Kuld størrelse: Den gennemsnitlige kuld størrelse i Europa er fra 8 til 11 hvalpe.

Kønsdimorfi: Hanner og hunner er lige store.

Status: Mårhunden regnes som invasiv i Danmark og må derfor jages hele året rundt.

Danske ræve får i gennemsnit 4 hvalpe pr kuld, når bestanden er tæt og i perioder, hvor der er en lav bestandstæthed er kuld størrelsen 8 hvalpe i gennemsnit. Foto: Morten Hilmer.

Mette Sif Hansen i laboratoriet på DTU-Veterinærinstituttet med bøtter fyldt med uterus/livmødre af mårhund. Foto: Center for diagnostik.



Vildtudbyttestatistik af ræv på landsplan og i Jylland, dvs. det antal nedlagte ræve som indrapporteres af jægere efter jagtsæsonen hvert år. Det ses på kurven, hvordan vildtudbyttet falder i forbindelse med udbrud af hvalpesyge.

	1997-1999 Høj	2012-2013 Høj-faldende	2015-2016 Lav	Signifikans
Kuld størrelse hos alle hunner	5,6	5,7	8,2	Forskel mellem 1997-1999 og 2012-2013 sammenlignet med 2015-2016 (p<0,05)
Kuld størrelse hos unge hunner	0	3,6	7,6	Forskel mellem 2012-2013 sammenlignet med 2015-2016 (p<0,05)
Andelen af unge ynglende hunner i forhold til ældre	6%	53%	61%	Forskel mellem 1997-1999 sammenlignet med 2015-2016 (p<0,01)

Gennemsnitlig kuld størrelse hos ræve i perioder med relativt høj bestandstæthed (1997-1999 og 2012-2013) og i en periode med lav bestandstæthed efter hvalpesyge (2015-2016). Kuld størrelsen er baseret på mørke ar i rævenes uterus (placentale ar).

man siger, at bestanden har en omsætning ("turn over") på 80 %. Siden antallet af mårhunde, der skydes af jægere, stiger kraftigt fra år til år, tyder alt på, at bestanden er i stigning, og at et mål om at aflive 8 ud af 10 mårhunde vil være svært at nå.

Et naturligt eksperiment

Flere undersøgelser af reproduktion hos familien af hundedyr (for eksempel hos polarræv, rødrev, coyote, skabaraksjakal og etiopisk ulv også kaldet abessinsk ræv) tyder på, at der er en sammenhæng

mellem populationstæthed og reproduktion. Dvs., når populationstætheden er lav er reproduktionen høj (store hvalpekuld og stor andel reproducerende hunner), og omvendt, når populationstætheden er høj er reproduktionen lav (små kuld og mange ikke-reproducerende hunner).

I 2012 udbrød der hvalpesyge (hundesyge) i den jyske rævebestand, som medførte et stort fald i rævepopulationen. Denne begivenhed var en unik mulighed for at undersøge, om danske ræves reproduktion ville stige efter en bestandsnedgang. Ved at sammenligne ræves reproduktion fra en periode med relativt høj bestandstæthed (1997-1999 og 2012-2013) med rævenes reproduktion i perioden lige efter hvalpesyge-epidemien (2015-2016), kunne vi teste hypotesen om, at der er en sammenhæng mellem tæthed af ræve og reproduktion.

Flere rævehvalpe ved lav bestandstæthed

I undersøgelsen blev 280 hunnræve aldersbestemt og deres uterus undersøgt for ar. Det viste sig, at antallet af ar i uterus hos hunnrævene steg fra et gennemsnit på 5,6 og 5,7 i de to perioder med relativt høj bestandstæthed før hvalpesygen til 8,2 i perioden med hvalpesyge og lav bestandstæthed. Denne forskel i kuld størrelsen hos hunnrævene i perioder med høj og lav bestandstæthed er statistisk signifikant (se tabel).

Ser vi på andelen af unge hunner, som ynglede i deres første sæson, så var den i perioden 1997 til 1999 kun 6 %. I 2012-2013 var den steget til 53 % og i perioden 2015-16 var den oppe på 61 %. Hvalpesygen startede i 2012, hvilket har betydet flere ledige territorier til unge hunner. I perioder med høj bestandstæthed er det de ældre hunner, som reproducerer sig og får flest hvalpe, mens der ikke er så stor forskel på reproduktionen hos unge og gamle hunner, når bestandstætheden er lav, og

Tidsperiode	Kropsvægt (kg)	
	Han	Hun
1965-1977	7,7	6,0
2012-2014	6,8	6,1
Vinter 2015/16	7,5	6,2
Forskel mellem perioderne	Signifikant ($p < 0,01$)	Ikke signifikant ($p = 0,77$)

Gennemsnitlig kropsvægt (kg) hos voksne rævehanner og -hunner >1 år i to perioder med lav bestandstæthed 1965-1977 og vinteren 2015/16, og en periode med normal bestandstæthed fra 2012-2014.

der er ledige territorier med god adgang til føde. At det sandsynligvis er konkurrence om føden, som spiller ind, viste en analyse af sammenhængen mellem hunrævenes fedtprocent og deres reproduktion. Hunner med fostre havde højere fedtprocent end ikke drægtige hunner, og der blev fundet en svag sammenhæng mellem antallet af fostre og hunrævens fedtprocent.

Større hanræve ved lav bestandstæthed

I sammenligningen af ræve i perioden før og efter hvalpesyge fandt vi også til vores overraskelse, at voksne hanræve, men ikke

hunrævene, blev signifikant større efter hvalpesyge. Det førte til, at vi yderligere sammenlignede vægt og længde af i alt 552 danske ræve fra perioderne 1965-1977 (hvor der var et relativt højt jagttryk, blandt andet i forbindelse med rabiesbekæmpelsen i Sønderjylland), 2012-2014 samt ræve skudt i vinteren 2015/2016.

Det viste sig, at voksne hanræve i de to perioder med relativ lav bestandstæthed (1965-1977 og 2015/16) i gennemsnit vejede henholdsvis 7,7 kg og 7,5 kg, mens hunrævene i perioden 2012-2014, som var opvokset i en periode med høj bestandstæthed,

vejede 6,8 kg (se tabel). Hunrævenes vægt ændrede sig derimod ikke i forhold til bestandstætheden. Da hunrævenes vægt ikke ændrede sig betød det, at forskellen i størrelsen mellem hanner og hunner (kaldet kønsdimorfien) varierede. I perioder med store hanræve var der stor forskel mellem hanner og hunner og vice versa.

Et britisk studie af ræve viser, at der er sammenhæng mellem hanræves størrelse og deres territoriestørrelse, og at store hanræve parrer sig med flere hunner. Derimod blev der ikke fundet sammenhæng mellem hunræves kropsstørrelse, territoriestørrelse eller kuld størrelse. En øget størrelsesforskel mellem han- og hunræve kan derfor betyde, at rævenes socialstruktur ændrer sig afhængig af bestandstætheden. I perioder med en lav bestandstæthed er ræve således polygame, dvs. hanræve har flere hunræve, mens rævene formentlig lever i monogame forhold, når rævebestanden er relativ høj. ■

Her kan du læse mere
Baagøe H, Secher Jensen T (2007). Dansk Pattedyr Atlas. Gyldendal

Pagh S, Chriél M (2017). Mårhund - risikovurdering, biologi og erfaringsgrundlag for "best-pactice" i forhold til regulering.

Pagh S, Chriél M, Jensen B, Jensen B, Pertoldi C, Hansen MS (2018a). Development of body mass and sexual size dimorphism in Danish red foxes (*Vulpes vulpes*). Genetics and Biodiversity Journal 2:36-47.

Pagh S, Chriél M, Madsen AB, Jensen TW, Elmeros M, Asferg T, Hansen MS (2018b). Increased reproductive output of Danish red fox females following an outbreak of canine distemper. Canid Biology and Conservation 21:12-20.

Pagh S, Buxbom J, Chriél M, Pertoldi C, Pedersen JS, Hansen MS (2020). Modelled population growth based on reproduction differs from life tables based on age determination in Danish raccoon dogs (*Nyctereutes procyonoides*). Mammal Research.

Study Mathematical Bioscience

Roskilde University offers a unique integrated master's programme for students with a deep interest in mathematics and biology.

Specialize in mathematical modeling of health and disease developments, ecology, or mathematical methods.

→ **Mathematical Bioscience**

ruc.dk/en/master/programmes



RUC

DET ER TID TIL AT VÅGNE OP!

Moderne hjerneforskning bryder nu med en tradition for at bedøve forsøgsdyr, når man undersøger dem med eksempelvis MR-skannere. Bedøvelsen kan nemlig påvirke resultaterne, og når man studerer et fænomen som søvn, må man sammenligne med målinger på vågne, ustressede dyr.

Om forfatterne



Thomas Beck Lindhardt er ph.d.-studerende ved Center for Funktionelt Integrativt Neurovidenskab, Aarhus Universitet og forsker i søvn. tblindhardt@cfin.au.dk



Brian Hansen er lektor ved Center for Funktionelt Integrativt Neurovidenskab, Aarhus Universitet og forsker i udviklingen af MRI-teknikker til studier af hjernen og til diagnostik. brian@cfin.au.dk

Søvnprojektet omtalt i artiklen er finansieret af Sino-Danish Center og Aarhus Universitets Forskningsfond

Vi mennesker bruger en tredjedel af vores liv på at sove, men vi ved stadig ikke med sikkerhed hvorfor. Ny forskning tyder på, at søvn spiller en vigtig rolle i at holde hjernen rask. For eksempel diskuteres det i dag, om søvn mon hjælper til at rense hjernen for affaldsstoffer. At forstå den mekanisme kan vise sig afgørende i arbejdet med at forhindre udvikling af alvorlige hjernesygdomme som demens.

I studiet af søvnens fysiologi er det nødvendigt at studere både den sovende og den vågne tilstand – ofte i organismer, som kan manipuleres (for eksempel genetisk), så de udvikler sygdomme. Det kan man kun med forsøgsdyr. Traditionelle dyreforsøg udføres næsten altid i bedøvede dyr. Bedøvelse minder om søvn, men er alligevel ikke helt det samme. Studier i vågne dyr er en stor udfordring, men er nødvendige for at kunne forstå, hvordan den vågne hjerne er anderledes end hjernen under søvn eller bedøvelse. Skiftet til studier af vågne dyr er en stor ændring af etableret praksis for dyreforsøg. I denne artikel vil vi give et overblik over baggrund og formål med at lave skanningsforsøg i vågne dyr.

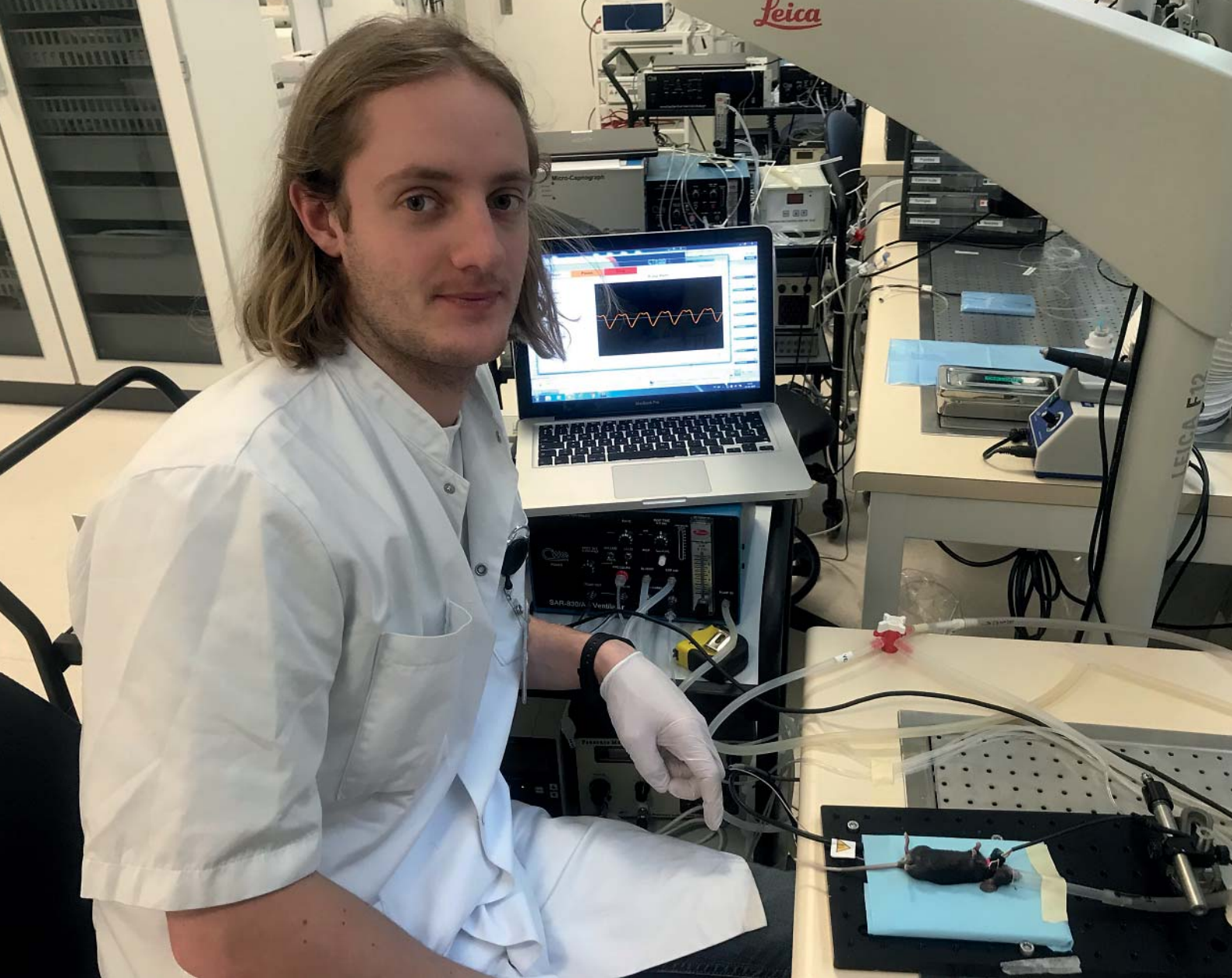
Århundredes forskning bygger på dyreforsøg

Stort set alle medicinske gennembrud gennem tiden har bygget på forsøg udført i dyr. Organtransplantationer, vacciner og antibiotika er blot få eksempler på metoder og medicin, som i dag redder millionvis af menneske- og dyreliv verden over, alt sammen takket være dyreforsøg. Desværre eksisterer der stadig en lang række alvorlige sygdomme, som vi ikke er i stand til at kurere – ikke mindst hjernesygdomme. Derfor anvendes forsøgsdyr i stor stil i hjerneforskning som et redskab til at forstå sygdomsophav og finde effektive behandlinger.

Til at udforske og studere hjernen benytter man alt fra snegle og orm til mennesker, men oftest rotter og mus. Disse forsøgsdyr bruges især, fordi de er pattedyr med en kort livscyklus, hvilket gør at deres fysiologi ikke er ulig menneskers, og at det samtidig er muligt at følge dem igennem hele deres liv samt gennem flere generationer. Dette er en fordel, fordi mange af de fysiologiske og strukturelle ændringer, der i mennesker udvikles over flere årtier som følge af sygdom eller dårlig livstil, i dyr kan studeres over blot få måneder.

Når mennesker udvikler sygdom, er der ofte tale om et samspil af mange risikofaktorer såsom genetik, livsstil og ydre risikofaktorer. Det vanskeliggør studiet af en isoleret sygdomsmekanisme. Fordelen ved at benytte forsøgsdyr er, at det her er lettere at sikre, at dyrene har været udsat for det samme. Det er altså muligt at opnå en mere ensartet forsøgsgruppe, og dermed kan man udelukke mange arvelige og miljømæssige faktorer. Derudover kan mus og rotters fysiologi og genetik også manipuleres. Det er en stor fordel i hjerneforskningen, hvor man ofte ønsker at studere, hvilke genetiske eller fysiologiske mekanismer der forårsager sygdomme i hjernen.

På verdensplan bruges årligt over 100 millioner forsøgsdyr. Det er mange, og der er derfor stort fokus på at nedbringe antallet af nødvendige forsøgsdyr. Forskere gør derfor også brug af metoder, hvor dyr ikke anvendes, for eksempel computersimuleringer og målinger i kunstige modelsystemer eller dyrkede cellekulturer. Der findes dog mange tilfælde, hvor disse metoder ikke er tilstrækkelige, og derfor forbliver dyreforsøg nødvendige. Især forskningsområder som demens og søvn involverer meget komplekse fysiologiske mekanismer, som berører



hele organismen. Derfor kan de kun studeres i det intakte, levende dyr.

Hjerneforskningens teknikker

I studiet af hjernen ønsker man typisk at kortlægge, hvor i hjernen der er sket en ændring af hjerneaktivitet, fysiologi eller struktur – for eksempel som følge af sygdom. En af de mest populære teknikker, som bruges til netop dette formål, er MR-skanning (det vil sige billeddannelse ved hjælp af magnetisk resonans). MR-skanning er en ufarlig teknik, der kan optage detaljerede billeder af hjernen ved hjælp af et stærkt, permanent magnetfelt, tidsvarierende magnetfelter og radiobølger. Afhængigt af, hvilken skanningsteknik der benyttes, kan MR-skanneren optage billeder, som kan bruges til enten at kortlægge hjerneaktivitet og fysiologiske

ændringer (funktionelle billeder), mikroskopiske vævforandringer (for eksempel med diffusions-MR), eller ændringer i hjernens større strukturer (strukturelle eller anatomiske billeder). I nogle sygdomme (eksempelvis i demens) ses forandringer i alle disse billedtyper på forskellige stadier af sygdommens udvikling. De første MR-skannere, man byggede, var ikke kraftige nok til at optage brugbare billeder i små hjerner som hos rotter og mus. Efterhånden som MR-teknologien er blevet mere avanceret, er det blevet muligt at optage meget detaljerede billeder af selv små dyrs hjerner (en musehjerne er cirka 10-15 mm lang).

Bedøvelse som fejlkilde

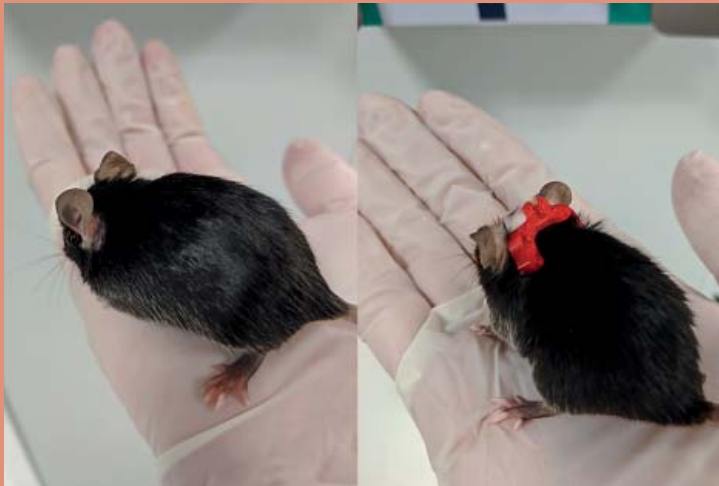
I dyreforsøg er det almindelig praksis at bedøve dyrene, så de ikke lider under eksperimenterne. Og

det har passeret godt til eksperimenter med MR-skannere, hvor det er vigtigt, at forsøgspersonen eller forsøgsdyret ligger stille inde i skanneren, da bevægelse under skanningen ødelægger billederne. I mange årtier er hjerneforskning med forsøgsdyr derfor foregået med bedøvede dyr. Det har genereret mange gode resultater, som har hjulpet os med at forstå mange grundlæggende aspekter af hjernen og dens komplicerede fysiologi, for eksempel hvordan hjernens blodforsyning reguleres.

Med tiden er vi dog nået til et teknologisk stadie, hvor de målemetoder, vi benytter (herunder MR-skanning), har opnået en så stor følsomhed i målingerne, at bedøvelsens effekt på dyrets fysiologi ikke længere kan ignoreres: Bedøvelsen forstyrrer

En af artiklens forfattere (Thomas) ved en typisk arbejdsstation, hvor han er i gang med at monitorere puls og vejrtrækning i en mus under bedøvelse.

Foto: Brian Hansen



Fotos: Thomas Beck Lindhardt

Brug af nakkekrave som hovedholder

For at kunne foretage MR-skanninger med forsøgsdyr i vågen tilstand er man nødt til at fastholde dem. Det kan enten gøres ved at bygge et leje, hvori musen fastspændes omkring krop og hoved. Den anden mulighed er at montere en nakkekrave eller hovedholder, som dyret går med permanent og derved vænner sig til. Denne hovedholder har en klampe-mekanisme, som gør det muligt at spænde dyret fast til et leje, som indsættes i MR-skanneren. Det er den metode, vi bruger ved CFIN.

På billedet til venstre ses en normal laboratoriemus, og på billedet til højre ses en laboratoriemus med en indopereret hovedholder. Under operationen er musene bedøvet, og efter opvågning får de både smertestillende medicin og antibiotika for at undgå smerte og udvikling af infektion. Hovedholderen forårsager ikke noget ubehag og er designet således, at musene stadig har fri mulighed for at spise og bevæge sig uden problemer. De indopererede hovedholdere er 3D-printede og er lavet af et ikke-magnetisk materiale, så de kan bruges i MR-skanneren.



Ved CFIN har vi etableret en metode, så dyrenes træningsmiljø næsten er identisk med det faktiske skannermiljø. Ved hjælp af en 3D-printer har vi skabt et dyreleje, som passer til mus. Lejet passer ind i en boks, hvor der på begge sider af musens hoved er højtalere, som kan afspille de samme lyde, som MR-skanneren udsender. Musene fastspændes til lejet ved hjælp af en indopereret hovedholder. Lejet kan følge med dyret ind i MR-skanneren, så forskellen fra træningsmiljøet til skannermiljøet er minimal.

de mekanismer, man ønsker at studere. Man ved nu, at bedøvelse påvirker både hjerneaktivitet og hjernefysiologi på måder, som er u hensigtsmæssige for eksperimenterne. Disse ændringer afhænger også af, hvilken type bedøvelsesmiddel der anvendes, og derfor skal man være forsigtig, når man fortolker og sammenligner måleresultater.

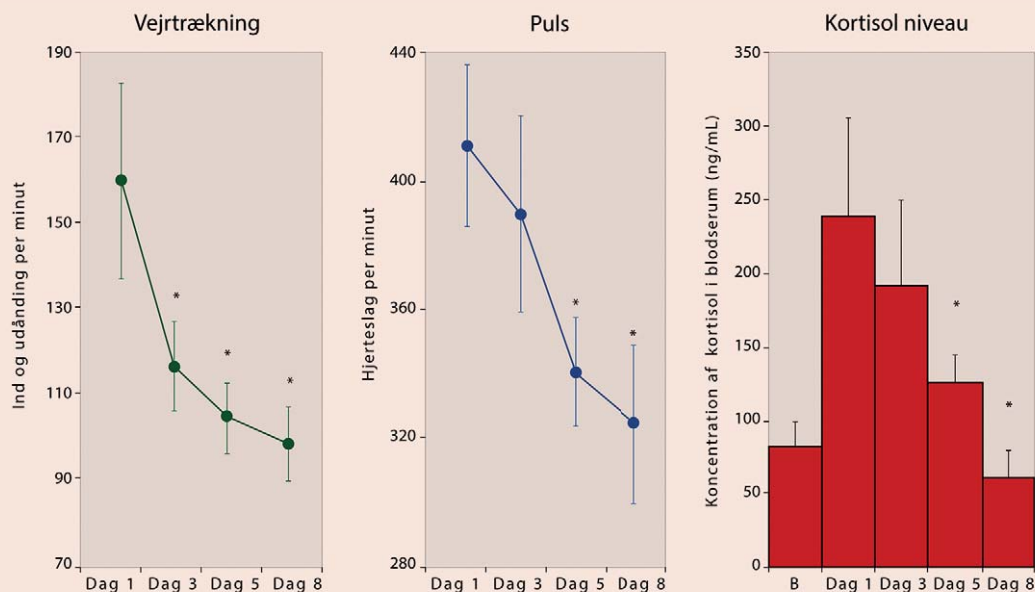
I arbejdet med at forbedre vores forståelse af hjernen og sikre, at de videnskabelige konklusioner fra forsøgsdyr kan overføres til mennesker, er vi derfor nødt til at kunne studere ubedøvede dyr for at undgå, at de biologiske systemer forstyrres af bedøvelsen. Mange forskningslaboratorier arbejder derfor nu hen imod at foretage eksempelvis MR-skanninger i vågne dyr.

Vågn op!

Overgangen til at arbejde med vågne dyr har mange udfordringer. Alle, der arbejder med forsøgsdyr, tilstræber, at dyret ikke lider under forsøget, og man søger af denne grund også at undgå, at dyret stresses. Det bedøvede dyr bevæger sig ikke under skanning, men ved skanning af vågne dyr er man nødt til at fastgøre dyret. Når rotter og mus fastspændes, enten via en indopereret hovedholder eller ved at bruge et fastgørelsessæt, bliver de meget stressede, og de vil forsøge at kæmpe sig fri. Det skaber en u hensigtsmæssig situation, hvor dyret både oplever ubehag og stress, som påvirker hjerneaktivitet og fysiologi (tænk bare på din puls, når du selv er bange). Derfor kan de hjerneskaninger, der optages i stressede dyr også være forurennet af dyrets stress.

Heldigvis har forskere vist, at dette kan undgås ved gradvist at tilvænne og træne dyrene, så man starter med at fastspænde dyrene i kun 1-2 minutter og gradvist øger varigheden over de følgende dage. Dyrenes velbefindende følges både under træning (ved at måle dyrenes puls og vejrtrækning) og i burene efterfølgende.

Træning til ophold i en MR-skanner



Figur efter Ferris et al., 2011

Når man benytter vågne forsøgsdyr i forbindelse med MR-skanninger er det nødvendigt at træne dyrene til at være trygge ved at være fastspændt og ved de høje lyde, som MR-skanneren udsender. Dette er vigtigt for at minimere dyrenes stress og for at undgå de medfølgende fysiologiske ændringer, som stress forårsager i hjernen. En forskergruppe i Boston har testet, hvordan rotters vejtrækning og hjerterytme samt stressniveau ændrer sig, hvis man træner dem i et MR-miljø i otte dage.

På den første figur ses, hvordan rotternes gennemsnit-

lige vejtrækning sænkes markant efter bare få dages træning. På figuren i midten ses, hvordan rotternes gennemsnitlige puls også falder markant i takt med, at de trænes over flere dage. På den sidste figur (til højre) ses det, hvordan niveauet af stresshormonet kortisol også falder markant gennem de 8 dages træning. På denne måde opnår man, at dyrene er trygge under skanningen, og at målingerne ikke forstyrres af dyrets stress. Stjernerne indikerer, om der er statistisk signifikans (sammenlignet med Dag 1), og de lodrette streger udviser standardafvigelsen.

Efter flere dages træning, kan man se, at dyrene har normal puls og vejtrækningsrytme, når de er fastgjort. På den måde sikrer man, at dyrene vænner sig så meget til det simulerede skannermiljø, at deres stressniveau bliver lavt nok til, at dyrene er egnede til forsøg. Der findes adskillige teknikker, som kan hjælpe med at reducere dyrenes ubehag i forbindelse med at blive fastspændt. Det er for eksempel muligt at installere et løbebånd under dyret, således de har oplevelsen af stadig at kunne bevæge sig. Denne følelse af frihed sænker stress-niveauet hos dyret.

Efter endt optræning er dyrene trygge både under træning og skanning. Optræningen er mandsskabskrævende, fordi dyrets daglige træning foregår under observation.

Det er dog indsatsen værd, fordi skanning af vågne dyr giver MR-forskere en ny platform, hvorfra det er muligt at studere hjernen i dens naturlige tilstand, fri for bedøvelsens forstyrrende effekter. På sigt vil dette medføre, at vi får bedre videnskabelige resultater, som samtidig er lettere at overføre fra grundforskningen til klinisk forskning.

Vågne dyr hjælper søvnforskningen

Ved Aarhus Universitets hjerneforskningscenter CFIN er vi ved at starte et nyt projekt om søvn, hvor MR-skanning af vågne dyr er nødvendigt for at kunne sammenligne med den sovende hjerne. Vi bruger bedøvede mus i stedet for naturligt sovende, fordi studier har vist, at bedøvelse er tilstrækkeligt "søvn-lignende" til at kunne erstatte

ægte søvn i vores eksperimenter. Det er godt, for MR-skannere larmer så meget, at man næppe kan få dyr til at sove naturlig søvn under skanningen.

I projektet skal måledata optaget i bedøvede dyr sammenlignes med målinger fra vågne dyr. Derved kan vi afklare, hvordan hjernens fysiologi ændres under søvn-lignende tilstand. Det er vigtigt, for megen hjerneforskning, med både dyr og mennesker, har efterhånden bevist, at søvn er utrolig vigtig for kroppens og hjernens evne til at fungere optimalt samt modstå sygdomme. Søvnmangel og dårlig søvn ødelægger kroppens immunforsvar og øger risikoen for at udvikle kræft. Derudover øges risikoen for diabetes, hjertestop og udviklingen af demens. Særligt Alzheimer-demens

Videre læsning

Om MR-teknikken:
Brian Hansen: Mikroskopi med MR-skanneren, *Aktuel Naturvidenskab*, 4-2010

Om søvn:
Matthew Walker: Derfor sover vi. *Rosinante* 2019.

Om dyreforsøg:
"Forsøgsdyr - og alternativer", Miljø og fødevareministeriet & Danmarks 3R-Center <https://3rcenter.dk/forsoegsdyr/>

Avanceret læsning:
Hoyer, C. et al (2014). Advantages and challenges of small animal magnetic resonance imaging as a translational tool. *Neuropsychobiology*, 69, 187–201.

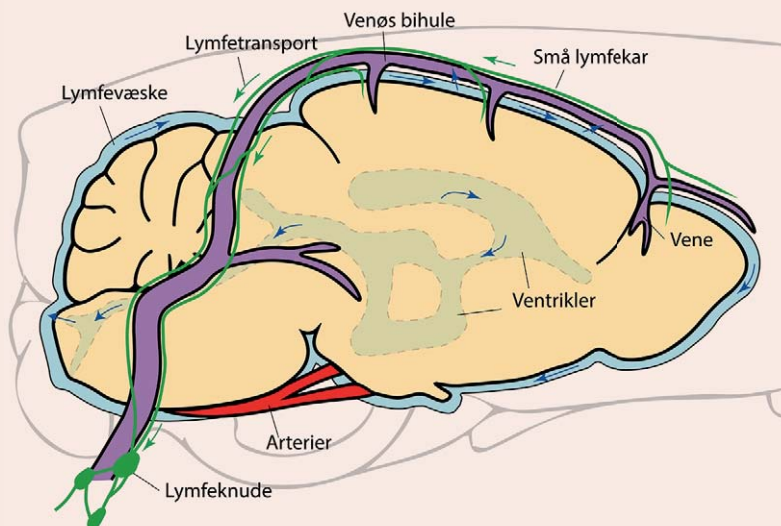
Desjardins, M. et al (2019). Archival Report Awake Mouse Imaging: From Two-Photon Microscopy to Blood Oxygen – Level Dependent Functional Magnetic Resonance Imaging. *Biological Psychiatry: CNNI*, (2), 1–10.

Ferris, C. F. et al (2011). Functional magnetic resonance imaging in awake animals. *Reviews in the Neurosciences*, 22(6), 665–674.

Fysiologisk ændringer i bedøvet tilstand

Under søvn eller bedøvelse sker der forskellige ændringer i både kroppen og hjernen. Når vi sover eller er bedøvet, mister vi bevidstheden, og samtidig bliver musklerne helt slappe. Derudover kan der observeres ændringer i fysiologi såsom hjerterytme, blodtryk og hjerneaktivitet. Der sker også ændringer i blodforsyningen til hjernen, graden af væksthormoner, der frigives, samt dynamikken af væsketransport i hjernen, men præcis hvordan, disse ændringer hænger sammen med søvn, er stadig uklart.

Mange af de generelle fysiologiske ændringer, der optræder i søvnstadiet, minder meget om de fysiologiske ændringer, der kan observeres i bedøvet tilstand. Af denne grund kan man derfor benytte bedøvelse som kunstig søvn i de forsknings-sammenhænge, hvor man ønsker at studere søvn, men hvor naturlig søvn ikke er muligt. Det er dog vigtigt at tage forbehold for både dosering og type af narkose, da disse har stor betydning for, hvordan fysiologien ændres. På figuren ses en grafisk afbildning af en musehjerne. Her ses det, hvordan



Sammenligning af hjernefysiologi i forskellige tilstande



hjernen er omkranset af lymfevæske. Lymfevæske produceres blandt andet i ventriklerne og kan derfra nå ud til forskellige dele af hjernen. Udenpå venerne løber små lymfekar, som sørger for at transportere cellerester, som lymfevæsken har opsamlet, ud af hjernen og ned til lymfeknuder udenfor kraniet.

Fysiologiske ændringer i sovende/bedøvet tilstand:

- Hjerterytme ↓
- Blodtryk ↓
- Hjerneaktivitet ↓
- Væsketransport i ↓↑ hjernen
- Væksthormoner ?
- Blodforsyning...

Grafik: Thomas Beck Lindhardt, inspireret af Louveau, A. et al (2016), *Neuron*, 91(5), 957–973.

ser ud til at være koblet til søvn, men hvordan sygdommen opstår, og hvilken præcis rolle søvn har for udviklingen heraf, hersker der stadig megen tvivl om.

Vi har sat os for at studere søvnens rolle for hjernens fysiologi med en række nye eksperimenter. Målet er at kortlægge søvnrelaterede fysiologiske mekanismer, som bidrager til at holde hjernens indre miljø sundt og raskt. Vi vil til det formål fokusere på væsketransport i hjernen, særligt cirkulation af lymfevæske i hjernen. Lymfevæske er en klar væske, som i kroppen transporteres rundt via lymfekar og som blandt andet har den funktion at rense væv og organer for affaldsstoffer.

Ny forskning tyder på, at søvn har indvirkning på lymfetransporten i hjernen og måske dermed på, hvor godt hjernen renses – eksempelvis for de skadelige proteiner, som menes at være årsagen til, at demens opstår. Resultater fra forskellige forskningsgrupper er dog uforenelige.

Nogle studier peger på, at søvn (og bedøvelse) øger effektiviteten af væsketransporten, mens andre studier tyder på, at søvn ikke har nogen betydning for væsketransporten. For at afgøre om søvn virkelig har indflydelse på væsketransport i hjernen, er det derfor nødvendigt med velplanlagte studier og meningsfulde metodevalg, som tager højde for de eksisterende problem-

stillinger i litteraturen.

I vores studie vil vi derfor sammenligne en række forskellige typer MR-skanninger i både vågne (ubedøvede) og bedøvede dyr. Hermed kan vi undersøge, om søvnliggende tilstande påvirker væsketransporten og effektiviteten af lymfesystemet i hjernen. Hvis det viser sig, at hjernens lymfesystem renses vævet for de farlige proteiner, og at dette sker bedst under søvn, vil man have opklaret en vigtig fysiologisk funktion af søvn. Samtidig åbner denne indsigt for nye strategier til at forebygge og behandle demenssygdomme. Disse eksperimenter kan kun laves med vågne forsøgsdyr. Så sagen er klar: søvn er vigtig, men det er tid at vågne op. ■



**I MORGEN BLIVER
DER STJÅLET 21
BILER I DANMARK.
VIL DU VIDE HVOR?**

LÆS DATAVIDENSKAB

Big data, kunstig intelligens, statistik, programmering,
dataanalyse og visualisering af data.

Med en uddannelse i Datavidenskab bliver du
ekspert i fremtidens vigtigste ressource.

datavidenskab.aau.dk



AALBORG UNIVERSITET

BØGER

FAKTA

Helge Kragh *Den sære historie om Venus' måne og andre naturvidenskabelige fortællinger. Lindhardt og Ringhof 2020. 344 sider, 299,95 kr.*



Den sære historie om Venus' måne

I denne bog fortæller videnskabshistoriker Helge Kragh om nogle af historiens vigtigste landvindinger inden for fysikken, kemien og astronomien: Opdagelsen af atomet, det krumme rum, jordens alder, det periodiske system og meget mere. Det er opdagelser, der har vendt op og ned på vores forestillinger om verden – uanset om disse teorier siden er blevet afvist eller står den dag i dag.

FAKTA

Sussie Pagh: *Nordens kloge kragefugle. Naturforlaget 2020. 236 sider, 299,95 kr.*



Nordens kloge kragefugle

Kragefuglene er fascinerende, fordi de er så tilpansningsdygtige, og fordi de seneste 20 års forskning har vist, at de mentalt hører til de mest intelligente væsner på jorden. Biologen Sussie Pagh fortæller i denne bog om de forskellige arters liv, udvikling, status og andet godt, krydret med alle de fabler og myter, der er knyttet til disse intelligente fugle. Fotos af naturfotografen Morten Hilmer og tegninger og malerier af Jens Gregersen.

FAKTA

Forskningens skønhed. Et festskrift til Hendes

Majestæt Dronning Margrethe II ved 80-års-fødselsdagen den 16. april 2020. Redigeret af Marita Akhøj Nielsen. Det Kongelige Danske Videnskabs-ernes Selskab, 2020. 200 sider. 400 kr.



Forskningens skønhed

I anledningen af Hendes Majestæt Dronning Margrethe II's 80-års-fødselsdag har Videnskabsernes Selskab udgivet en bog om skønheden i forskningen. I bogen fortæller 16 videnskabsfolk om deres forskning og den skønhed, de finder i deres videnskab. For mange af forskerne er det indlysende, at genstanden for deres granskning i sig selv er smuk – det være sig sorte huller eller græske skrifttegn. For andre ligger skønheden derimod ikke i objektet, men i selve udforskningen. I den møjsommelige vej frem mod forståelsen af fænomenerne, i det helt vidunderlige øjeblik, hvor en ny indsigt pludselig melder sig – og selvfølgelig i den betydning, opdagelsen kan få for andre.

FAKTA

Kristoffer Frøkjær:

Manden, der fik sin hjerne skåret i skiver og 49 andre vilde videnskabelige forsøg. Politikens forlag 2020. 144 sider, 200 kr.



Manden, der fik sin hjerne skåret i skiver

Manden, der fik sin hjerne skåret i skiver og 49 andre vilde videnskabelige forsøg er møntet på børn og andre nysgerrige, som kan glædes ved en god historie. Blandt historierne er, hvordan en russisk videnskabsmand syede et ekstra hoved på en hund og lægen, der spiste bræk fra dødssyge mennesker. Men der er også fortællinger om klassiske forsøg som Pavlovs forsøg med hunde og HC Ørsteds opdagelse af elektromagnetismen.



Nye undervisningsmaterialer

For dig, der underviser, er der inspiration at hente på hjemmesiden: aktuelnaturvidenskab.dk

Arbejdsark om nitrogen-kredsløbet og klimaforandringer

Arbejdsarket er knyttet til artiklen *Våde marker giver mere lattergas* fra Aktuel Naturvidenskab nr. 2/2019. Artiklen kan anvendes i forbindelse med et økologiforløb, hvor N-kredsløbet indgår. Artiklen kan også anvendes i et undervisningsforløb om klimaforandringer, hvor der med artiklen gives et eksempel på økologiske konsekvenser af klimaforandringer.

Fag: Bioteknologi A og biologi A.

Arbejdsarket er udarbejdet af Lone Als Egebo, Ege-bøger.

Quiz om biodiversitet

Prøv også quizen til artiklen *Fremtidens biodiversitet* i dette nummer og test, om du har forstået artiklens budskaber.

Fik du set forløbet om biodiversitet og biodiversitetskrise?

Dette forløb bygger på 7 artikler fra Aktuel Naturvidenskab. Der er forslag til en lektionsplan på 6 lektioner, der omfatter introduktion til biodiversitet og biodiversitetskrise, gruppearbejde med artikler og fremlæggelse med opponentgrupper samt øvelser i felten. Forudsætninger for forløbet er, at eleverne kender til økologiske grundbegreber.

I Biologi B/A kan forløbet bidrage til at dække følgende kernestof og supplerende stof: Økologi: samspil mellem arter og mellem arter og deres omgivende miljø, bæredygtighed og miljøbeskyttelse, biologi som videnskabsfag.

Forløbene er udarbejdet af Lone Als Egebo, Ege-bøger.

ABONNEMENTS-SERVICE

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

Kontakt os på telefon: 87 15 20 94
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 intropakke 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**, kommunikationschef, Det Natur- og Biovidenskabelige Fakultet, Københavns Universitet
- **Jens D. Holbech**, chefkonsulent, Science and Technology, Aarhus Universitet
- **Mette Christina Møller Andersen**, specialkonsulent, Det Tekniske Fakultet, Syddansk Universitet
- **Niels Kring**, chefkonsulent, Det Naturvidenskabelige Fakultet, Syddansk Universitet
- **Sanne Holm Nielsen**, kommunikationsmedarbejder, Aalborg Universitet
- **Søren Rud Keiding**, direktør for AIAS (Aarhus Institute of Advanced Studies), 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: 5.700

Redaktionsgruppe

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

Redaktionen:

Tlf.: 87 15 20 94

E-mail: red@aktuelnaturvidenskab.dk

Hjemmeside: aktuelnaturvidenskab.dk

Facebook.com/aktuelnaturvidenskab

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

Omslagsfoto:

Der er store forventninger til kvantecomputere. Her ses en kunstners indtryk. Illustration: Shutterstock.



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

Virtuelle pandemier

Af Carsten R. Kjaer, Aktuel Naturvidenskab

Den spanske syge i 1918 er vist den epidemi, der mest af alt fremhæves som en relevant pendant til den aktuelle coronapandemi. Det viser sig nu, at der også findes en virtuel pendant til corona-pandemien, som fandt sted i onlinespillet World of Warcraft tilbage i 2005. Som gammel World of Warcraft-spiller har det selvfølgelig pirret min nysgerrighed. Jeg var ikke selv begyndt at spille, dengang epidemien fandt sted, men heldigvis var der forskere blandt de spillere, der oplevede den. Blandt dem var epidemiologerne Eric T. Lofgren og Nina H. Fefferman, som indså, at den begivenhed, der udspillede sig for deres øjne, repræsenterede en yderst realistisk simulering af en virkelig epidemi og ikke mindst det sociale kaos, der følger med. De to forskere undersøgte derfor sagen



Hakkar the soulflyer – kilden til epidemien i Azeroth i 2005.
Illustration: Blizzard

nærmere og skrev en artikel i det lægevidenskabelige tidsskrift *The Lancet* i 2007. Episoden har nu fået ny aktualitet, hvor hele verden er optaget af, hvordan mennesker reagerer på corona.

Det korruperede blod

Baggrunden for epidemien i World of Warcraft var en udvidelse af spillet i september 2005, hvor en ny zone – kaldet Zul Gurub – blev tilgængelig i den store, virtuelle verden Azeroth, hvor spillet foregår. Zul Gurub var en lukket zone beregnet for grupper af spillere, som hver med deres virtuelle karakter, skulle nedkæmpe særligt stærke boss. Den sidste boss, Hakkar the Soulflyer, kastede blandt andet en magi på spillerne kaldet corrupted blood, som over nogle sekunder drænedes en mængde af spillerens liv. Derudover havde magien den egen-

skab, at den spredte sig til andre spillere, der opholdt sig inden for en vis afstand af den inficerede.

Det var ikke meningen, at corrupted blood skulle kunne brede sig ud over den lukkede zone. Men nogle uhensigtsmæssigheder i programmeringen – vi kan kalde dem mutationer – gjorde, at spillerne i visse situationer alligevel kunne bringe den virusagtige magi med sig ud fra Zul Gurub. Og så startede balladen. Corrupted blood spredte sig som en steppebrand fra de store, tætbefolkede byer i spillet til næsten

hele den virtuelle verden, og den slog svage spillere ihjel i hobetal (dvs. dem der ikke var i højeste level og havde godt udstyr). Kaos rådede, nogle spillere forsøgte at søge tilflugt i fjerne egne af verden, mens andre forsøgte at hjælpe ved at genoplive døde spillere, men kom ofte

i deres hjælpsomhed samtidig til at sprede smitten. Alle forsøg på at begrænse smitten mislykkedes, og situationen kom først under kontrol, da spilservere blev stillet tilbage til den tilstand, de havde før smitteudbruddet kombineret med velvalgte "hotfixes".

Noget at lære

Mange ligheder med den aktuelle coronavirus-pandemi er blevet fremhævet: Udbruddet havde sit udspring i en fjern region i verden, hvorefter den blev transporteret til andre regioner med rejsende. Både mennesker og dyr kunne bære smitten, og den blev spredt ved nær kontakt mellem figurerne. Det var de svage figurer i spillet, der døde af infektionen, mens de stærke ikke blev nævneværdigt påvirket. Nogle figurer (som ikke styres af spillere) fungerede endvidere som asymptotiske smittebærere.

Der var selvfølgelig også mange ting, der var urealistiske i forhold til en rigtig epidemi – blandt andet en ekstrem høj spredningsrate og ikke mindst, at man jo i et onlinespil kan genopstå og dø utallige gange. Men flere forskere har siden interesseret sig for de muligheder, der ligger i at bruge erfaringer fra epidemilignende situationer i onlinespil til at justere deres modeller. For eksempel kunne man drage den lære af corrupted-blood-epidemien, at nogle spillere i stedet for at flygte, strømmede til for at se, hvad der foregik og på den måde kom til at fungere som smittebærere. Den adfærd var ikke noget, man før tog højde for i modellerne, men som man har indset faktisk kan spille en rolle – for eksempel når journalister dækker en epidemi i et område og tager smitten med sig.