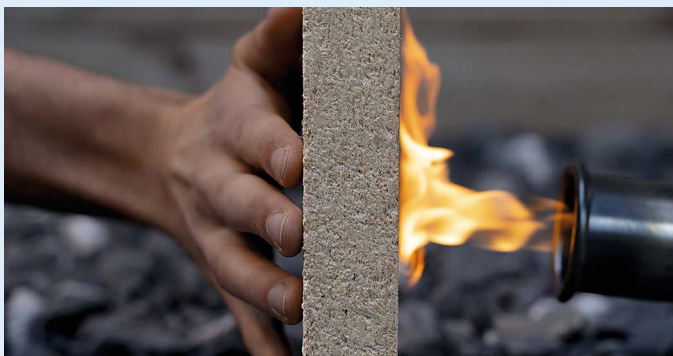


NATURVIDENSKAB OG TEKNOLOGI
DIREKTE FRA FORSKNINGSVERDENEN

AKTUEL
natur VIDENSKAB

**FORSKERE JAGTER
FORKLARING PÅ
GÅDEFULDT PROTEIN
I ZEBRAFISK**

AI og droner til overvågning af nattens rovdyr
Røntgenlaser filmer atomernes bevægelse
Kilogrammet har været svært at få styr på



Brandhæmmende savsmuld

Forskere fra ETH Zürich i Østrig og Empa i Schweiz har udviklet en metode til at omdanne savsmuld – som normalt brændes og dermed frigiver CO₂ – til et genanvendeligt og miljøvenligt kompositmateriale, der ovenikøbet er brandhæmmende. Ved hjælp af mineralet struvit – et krystallinsk, farveløst ammonium-magnesium-fosfat – samt et enzym udvundet fra vandmelonfrø kan forskerne styre krystalliseringen, så store krystaller binder savsmuldet fast sammen. Resultatet er et stabilt materiale, der kan tørres ved stuetemperatur, og som efter brug nemt kan nedbrydes til sine bestanddele og genanvendes.

Kilde: Chem Circularity, 2026, 100004.

Ny mekanisme til metanproduktion

I et nyt studium publiceret i Nature Communications beskriver forskere fra Syddansk Universitet og Aarhus Universitet, hvordan mikroorganismer i kystområder bruger ledende partikler som bittesmå naturlige ledninger til at udveksle elektroner – som et mikrobielt “elnet” i havbunden. Det gør mikroorganismene i stand til at omdanne organisk carbon til metan på en måde, der ikke tidligere er dokumenteret. Opdagelsen kan dermed få betydning for vores forståelse af den naturlige udledning af drivhusgasser.

Kilde: SDU/ Nat. Comm. Vol. 17, Article number: 2708

Fra ammunition til solceller

Et hold tyske forskere har i et nyt studium brugt ammunition i form af blykugler fra det 16. og 17. århundrede til et langt mere fredeligt formål. Nemlig at demonstrere en ny og mere miljøvenlig teknik til at anvende blyaffald til fremstilling af ren bly-iodid. Bly-iodid bruges til at danne krystaller af såkaldt perovskit, der har den nyttige egenskab, at de effektivt kan omdanne sollys til elektricitet. Derfor bruges de i fremstillingen af solceller. Forskerne byggede solceller ud fra deres fremstillede bly-iodid og viste, at disse var lige så effektive som perovskit-solceller, der brugte kommercielt bly-iodid.



Kilder: Nature og Cell Rep. Phys. Sci.

Foto: Efter-Syrmak, M. et al (2026)

Quizzen

Hvad hedder det protein, som forskere forsøger at afsløre funktionen af, ved hjælp af et “løbebånd” til zebrafisk?

1. Myoglobin
2. Hæmoglobin
3. Globulin

Find svaret i artiklen side 8.

Ubudne gæster i reaktionen

En nylig artikel i tidsskriftet *Chemistry World* sætter fokus på et problem, der angiveligt i stigende grad hjemsøger kemiske laboratorier både på universiteter og i industrien: nemlig at materialer, der længe har været anset for inerte (altså ikke reagerer med andre stoffer) under de rette omstændigheder kan påvirke kemiske reaktioner – nogle gange markant. Inerte materialer bruges til for eksempel glasbeholdere eller som stænger til at røre i blandinger med. Og så er det selvfølgelig et problem, hvis disse materialer indgår i reaktionerne som en slags skyggekomponent. Et helt nyt eksempel er, at japanske forskere har opdaget, at partikler afgivet fra rustfrie stålkugler brugt til at knuse materiale med viste sig at aktivere nikkel-salte, som katalyserede bestemte reaktioner i forsøgene.

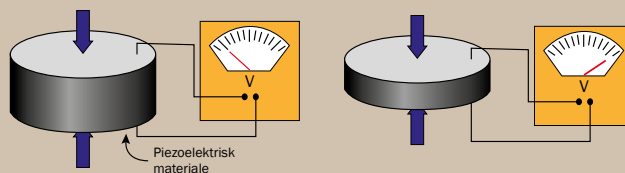
Kilde: Chemistry World 7. april 2026



Foto: Colourbox

Energihøster – nu uden bly

Piezoelektriske materialer bruges til mange formål – eksempelvis i hovedtelefoner, mikrofoner og højttalere. Sådanne materialer deformeres nemlig, når de udsættes for et elektrisk felt – og omvendt kan de generere strøm, når de udsættes for en mekanisk påvirkning. Men de mest effektive piezoelektriske materialer i dag indeholder miljøskadeligt bly.



Nu har forskere fra Osaka Metropolitan University udviklet ultra-tynne, blyfri piezoelektriske film, der kan fremstilles direkte på de tynde siliciumskiver (siliciumwafer), man bruger som basis for fremstilling af mikrochips. Holdet testede deres materiale i vibrationsenergi-høstere, dvs. enheder der omdanner mekaniske vibrationer til elektrisk energi. Her viste enhederne en femdobling af energieffektiviteten sammenlignet med tidligere versioner, og de fungerede effektivt under realistiske forhold med både kontinuerlige og pludselige vibrationer.

Kilde: Microsyst Nanoeng 12, 90 (2026)

indhold



Forskere jagter forklaring på gådefuldt protein i zebrafisk

Proteinet myoglobin findes hos fisk, fugle og pattedyr. Det er i vores muskler og i vores hjerte, men forskerne aner ikke, hvilken rolle det spiller.

8



AI og droner: En ny æra for overvågning af nattens rovdyr

Hvordan får vi viden om ræves og grævlingers natlige adfærd uden at forstyrre dem? Svaret er droner med termiske kameraer samt kunstig intelligens.

16



Golfstrømmen og Europas fremtidige klima

Hvis strømmen stopper, vil temperaturerne i Nordvesteuropa falde op til 10 °C. Visse oceanografiske modeller foreslår, at dette kan ske indenfor ganske få år. Men er det sandsynligt?

20



Vand, platin og naturkonstanter: Kilogrammet har været svært at få styr på

I 2018 lykkedes det endelig at frigøre kilogrammet fra afhængigheden af en metalklump i Paris.

30

FORSKNING OG NYHEDER

- 4 KORT NYT
- 6 Forstå fedtemøget
- 8 Forskere jagter forklaring på gådefuldt protein i zebrafisk
- 13 Bøger
- 14 Vandmænd jager børsteorm
- 16 AI og droner: En ny æra for overvågning af nattens rovdyr
- 20 Golfstrømmen og Europas fremtidige klima
- 26 Verdens sidste ammonitter – fundet ved Stevns Klint
- 30 Vand, platin og naturkonstanter: Kilogrammet har været svært at få styr på
- 36 Røntgenlaser filmer atomernes bevægelse
- 40 Bidt af fortiden
- 42 Kvæg presser Kenyas løver væk
- 44 BAGSIDEN: Når naturen kalder

OM AKTUEL NATURVIDENSKAB

Ansvarshavende

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

Redaktion

- Carsten Rabæk Kjaer, redaktør
- Jørgen Dahlgaard, redaktør
- Rasmus Kerrn-Jespersen, kommunikationschef
- Henriette Stevnhøj, journalist
- Jeppe Kyhne Knudsen, journalist

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

Abonnementsservice:

Tlf.: 3036 0662 eller abo@aktuelnaturvidenskab.dk

Udgiver

Aarhus Universitet, Faculty of Natural Sciences og
Faculty of Technical Sciences.

Kontakt:

Aktuel Naturvidenskab,
Ny Munkegade 120, Bygning 1520,
DK-8000 Aarhus C
Tlf.: 3036 0660 / 8715 2094
E-post: red@aktuelnaturvidenskab.dk

Layout:

Jørgen Dahlgaard

Tryk:

Jørn Thomsen Elbo

ISSN:

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

Oplag: 3.700

Forsidefoto:

Hans Malte og Ciska Bakkeren i laboratoriet med et specialbygget "vandløbeband" (et såkaldt svømmespirometer) til zebrafisk.

Foto: AU Foto / Andrea Lif Benediktsdóttir



SPONSOR-
ABONNENT

GRUNDFOS

Abonnementsservice

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

Kontakt os på telefon: 3036 0662
E-mail: abo@aktuelnaturvidenskab.dk

Abonnement kan også bestilles via hjemmesiden: aktuelnaturvidenskab.dk

Marsvin skruer selv ned for støjen

Marsvin er helt afhængige af deres hørelse for at overleve. De finder vej, jager og holder kontakt med andre marsvin ved at sende hurtige kliklyde ud i vandet og lytte til ekkoerne. Men i takt med, at havene bliver stadig mere støjfyldte, bliver det sværere for marsvin at "høre sig frem". Særligt støj fra skibe giver problemer. Selv om skibsmotorer primært udsender lavfrekvent støj, udsender de også højfrekvent lyd, som kan overdøve marsvins egne klik. Kliklydene er skarpe og korte og rækker kun over begrænsede afstande – derfor er de sårbare overfor støj fra kilder tæt på dem.

Et nyt studie fra Institut for Biologi ved Aarhus Universitet, offentliggjort i *The Journal of the Acoustical Society of America* giver nu ny indsigt i, hvordan marsvins høresystem reagerer, når deres lydverden forstyrres. Til forskernes overraskelse viser studiet, at mar-



Marsvinet Freja er trænet til at stå stille i vandet, mens hun får testet sin hørelse. Foto: Kristian Beedholm

svin faktisk ikke er helt forsvarsløse over for de høje lyde.

»Et marsvin kan tilsyneladende "skrue ned" for deres høresensitivitet, når de forventer støj. Det fungerer som en form for naturlig høreværnsmekanisme og kunne være en vigtig beskyttelse i en verden, der bliver stadig mere støjende for marsvin,« siger Kristian Beedholm. Han er biolog og ansat som forskningsprogrammør på Institut for Biologi på

Aarhus Universitet og førsteforfatter på den videnskabelige publikation.

Studiet er udført på marsvinet Freja, som svømmer frit i et indhegnet havneområde i forskningscenter Fjord & Bælt i Kerteminde. Ved hjælp af to elektroder monteret på ryggen af Freja, kunne forskerne måle forskellene i hendes hjernes reaktion, før, under og efter, at hun blev udsat for 20 sekunders mere eller mindre kraftig støj.

Selvom marsvinene tilsyneladende har en evne til at beskytte deres hørelse en smule, overdøver skibsstøj stadig deres vigtigste sans, hvilket kan være direkte livstruende. »Vores kriterier for, hvad der er acceptable støjniveauer, er sandsynligvis for høje. Derfor håber jeg, at studiet kan bidrage til et mere lydvenligt havmiljø for marsvin,« siger Kristian Beedholm.

Henriette Stevnhøj, Aarhus Universitet. Kilde: *J. Acoust. Soc. Am.* 158, 4212–4220 (2025)

Ildsprudende formidling

Iweekenden 20.-22. marts mødtes formidlingsglade studerende fra hele landet på Institut for Kemi på Aarhus Universitet for at konkurrere om titlen som årets danske mester i Science Show. Science Shows har en stolt tradition i Danmark, hvor det første af sin art – Kemi-show fra Aarhus Universitet – efterhånden har 28 år på bagen. Og tradition fornægter sig tilsyneladende ikke, idet

det netop var Kemi-show på Aarhus Universitet, der løb med 1. pladsen i årets konkurrence. Andenpladsen blev delt mellem Fysikshow på AU og DTU ScienceShow. Udover de nævnte shows deltog også kemi-shows fra Aalborg Universitet og Københavns Universitet samt ScienceShow fra Syddansk Universitet.

ScienceShows på universiteterne har til formål at formidle naturvidenskab på en



Alfred Overgaard og Magnus Juhl fra Kemi-show AU i færd med deres vinderoptræden. Karen Laurberg var også en del af holdet. Foto: Erik Overgaard.

levende og engagerende måde. Gennem eksperimenter, demonstrationer og humor gør de kemi og andre naturvidenskabelige fag mere tilgængelige, og de inspirerer især børn og unge til interesse for naturvidenskab. DM i ScienceShow afholdes hvert år, og de deltagende universiteter er på skift vært for arrangementet.

Udover selve konkurrencen – der blev be-

dømt af et panel af 6 eksterne dommere – var der også en workshopkonkurrence, hvor publikum stemte. Her løb DTU ScienceShow med prisen.

Kemi-shows vinderoptræden indeholdt blandt andet et forsøg, hvor publikum skulle hjælpe med at finde en flaske med en opløsning af almindeligt bordsalt ud fra den orange flammefarve

på natrium, og et forsøg, hvor kaffeflødepulver blev spredt og antændt i en flot, kontrolleret eksplosion. I det hele taget var det kendetegnende for de fleste shows, at de endte med et festligt brag – selvfølgelig under samvittighedsfuld hensyntagen til sikkerheden for både optrædende og publikum.

CRK, Kilde: Kemi AU

Liv på rumfart?

Forskere har længe spekuleret over den mulighed, at liv kan transporteres fra en planet til en anden, og at Jorden i tidernes morgen på den måde kunne være blevet "befrugtet" med liv fra rummet (for eksempel fra Mars). En mekanisme, der i teorien skulle kunne sende liv på rumfart, er en kollision med en asteroide. Herved kan der nemlig blive frigjort energi nok til, at fragmenter af planeten – med sit indhold af mikroskopisk liv – kan blive slynget ud i rummet. Men er der nogen chance for, at liv kan overleve den behandling? Det har forskere fra John Hopkins University i USA nu prøvet at undersøge. Til formålet har de designet et forsøg, der simulerer det enorme tryk, som en sådan "materialeudslyngende" asteroidekollision på Mars ville udmønte sig i. Som biologisk forsøgskanin brugte forskerne bakterien *Deinococcus radiodurans*, som er kendt for at være meget hårdfør. Bakterierne blev klemt inde mellem to metalplader, hvorefter forskerne affyrede projektiler fra en gaspistol mod pladerne. Det udsatte bakterierne for et tryk på mellem 1 og 3 gigapascal. Nye simuleringer har vist, at trykket i materiale,

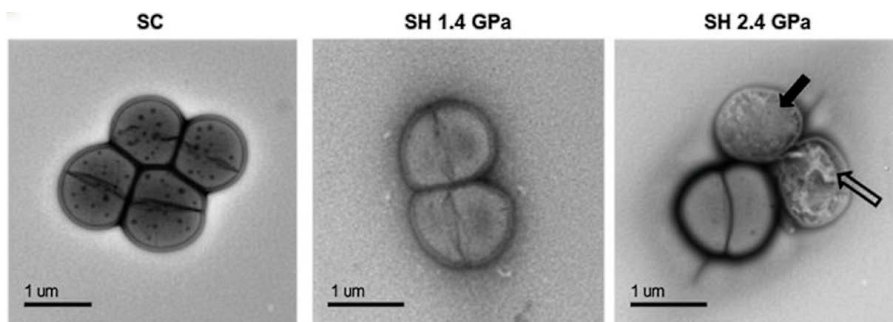


Illustration: Efter Zhao, L. et al, PNAS Nexus (2026).

der når undvigelseshastigheden for Mars' tyngdekraft er under 5 gigapascal.

Resultaterne af forsøgene – som for nylig er publiceret i tidsskriftet *PNAS Nexus* – viste, at næsten alle bakterierne overlevede tests op til et tryk svarende til 1,4 gigapascal, mens 60 % overlevede, når trykket blev øget til 2,4 gigapascal. Bakteriecellerne viste ingen tegn på skader ved forsøgene ved 1,4 gigapascal, mens nogle bakterier havde skader på membraner eller i deres indre ved de højeste tryk.

Tidligere forskning har vist, at *Deinococcus radiodurans* kan overleve både den stråling,

kulde og udtørring, som de vil blive udsat for på en færd gennem rummet. De nye resultater føjer derfor et vægtigt argument til den formodning, at liv godt kan overføres mellem planeter i rummet. Men om det også er sådan, livet i sin tid er kommet til Jorden, er en anden sag.

På billederne ses bakterier udsat for forskellige tryk (bakterierne til venstre er en uforstyrret kontrolgruppe). Pilene peger på henholdsvis indre skader (åben pil) og skader på cellemembranen (sort pil).

CRK, Kilde: *PNAS Nexus*, Vol 5, Iss. 3, pgag018.

Forskere fanger CO₂ i ikke-porøst materiale

En gruppe forskere ved Københavns Universitet tilknyttet CO₂-forskningscenteret CORC har udviklet en ny metode til CO₂-fangst, der kan bane vejen for et paradigmeskifte mod mere bæredygtige og omkostningseffektive løsninger. Det er Aleksa Petrovic og Rodrigo Jose da Silva Lima, der begge er postdocs i professor Jiwoong Lees gruppe på Københavns Universitet, der sammen med kolleger har udviklet hydrofobe, organiske krystaller, som på trods af, at de ikke er porøse af natur, effektivt kan indfange og let frigive CO₂. Forskernes krystaller er baseret på monoethanolamin (MEA), som allerede er et velkendt stof indenfor CO₂-fangst. Ved at bruge en variant af stoffet kaldet C10-MEA har de fremstillet en krystal, som omorganiserer sig via en hurtig faseovergang, når det udsættes for CO₂. Ved denne faseovergang ændrer krystallen sin interne struktur, men forbliver fast.



Forskernes krystaller før de udsættes for CO₂ og derved svulmer op. Foto: Mads Sejer Nielsen.

Denne omstrukturering gør det muligt for CO₂ at trænge ind i materialet og reagere med alle amingrupper i strukturen, hvilket maksimerer optaget. Når betingelserne ændres – for eksempel temperaturen – vender processen, og CO₂ frigives let. Krystallen genvinder herefter sin oprindelige form, og kan genbruges uden at nedbrydes. Den nye proces kræver mindre energi både ved fangst og frigivelse af CO₂ end traditionelle metoder og er samtidig enkel at opsætte,

hvilket er afgørende for at gøre CO₂-fangst mulig i praksis. I modsætning til porøse materialer, der kræver høje temperaturer langt over 100 °C, kan CO₂ frigives fra forskernes krystaller allerede ved 65 °C og ved hjælp af CO₂-gas til stripping (det vil sige til at frigive den indfangede CO₂ fra materialet). Det giver en ren, uforurenet CO₂-strøm som produkt.

Næste skridt er at skalere teknologien og i samarbejde med ingeniører undersøge design og anvendelser i forskellige sammenhænge. Ifølge forskerne rækker deres resultater ud over blot at forbedre CO₂-fangst. For de viser, at CO₂ aktivt kan udløse ændringer i et materiales krystalstruktur, og det er en egenskab, forskerne nu kan bruge som et designværktøj i mange forskellige sammenhænge og med en bred vifte af organiske materialer.

Kilder: CORC og *Nat Commun.* 17, 2293 (2026)



FORSTÅ FEDTEMØGET

Hvorfor er der kommet så meget fedtemøg ved de danske kyster de senere år?
Og hvorfor startede fedtemøgssæsonen tilsyneladende meget tidligt i år?
Det giver forsker Stig Markager her en forklaring på.

Humøret steg betragteligt hos forårshungrende danskere, da vinteren endelig slap sit kolde favntag om landet i starten af marts måned. Men forårets komme indvarslede også en ny sæson for det slimede stads, vi kalder fedtemøg, ved de danske kyster. Faktisk startede fedtemøgssæsonen ifølge øjenvidneberetninger usædvanligt tidligt i år: Aldrig så snart forårssolen tittede frem, kunne lystfiskere og andre naturelskere således melde om opblomstring af fedtemøg flere steder i landet. Og de observationer kan der være en god forklaring på, som hænger sammen med den kolde vinter i år. Den forklaring – samt de generelle årsager til fedtemøgets fremmarch ved de danske kyster de senere år – er nyttig at kende, så du kan skelne mellem skidt og kanel i debatten om det danske havmiljø. Så her kommer en kvikguide til at forstå fedtemøget.

Hvad er fedtemøg?

Fedtemøg er i en betegnelse for to arter af alger (tang), som på dansk hedder *dunalge* og *almindelig vatalge*. De består af brunlige, meget fine tråde, hvor cellerne sidder i en lang række. Og de kan vokse meget hurtigt under optimale forhold. Navnet fedtemøg skyldes, at trådene udskiller slim, som gør klumpen af tang slimet at røre ved. En fedtemøgssalge starter sit liv klistret fast på en sten, musling eller et ålegræs-blad tæt på fjordbunden. Men når den har vokset sig stor og dannet en busket klump, opstår der iltmangel nederst i klumpen, og så slipper den sit greb og begynder at flyde rundt. Derfor samler fedtemøg sig ofte i store mængder i beskyttede bugter, og når de dør, opstår der massivt iltsvind i bunden.

Is på fjorden kan give mere fedtemøg

Alle alger skal bruge fosfor og kvælstof (nitrogen) for at vokse. I fjordbunden findes der masser af begge dele, men især meget fosfor, som nemt frigives til vandet når iltindholdet falder. Idet fedtemøgssalgerne starter med at vokse ved

bunden, står de "først i køen", når næringsstoffer frigives fra bunden. Encellede planktonalger, som lever oppe i vandet, må leve af de næringsstoffer, der bliver tilført via vandløb, og det som er tilbage fra fjordbunden, når fedtemøget har taget sin del. Det faktum er vigtigt i forhold til at forstå den tidligere opblomstring af fedtemøg i år. For første gang i mange år har der nemlig denne vinter været is på fjordene. En isdækket fjord kan have to effekter, der er vigtige i denne sammenhæng. Den ene er, at isen kan forhindre luftens ilt i at komme ned i vandet, både direkte på grund af isen og indirekte, når vinden ikke kan skabe bølger. Så kan der opstå iltsvind i vandet, som forplanter sig ned i fjordbunden. I fjordbunden betyder iltsvind, at fosfor frigives fra det jern, det ellers var bundet til. Og så strømmer fosfor ud i sedimentet og op i vandet.

Den anden effekt af isen er, at ferskvand fra vandløbene, lægger sig som et tyndt lag i fjorden lige under isen, fordi det er lettere end saltvand. Åens vand indeholder en betydeligt højere koncentration af næringsstoffer end fjordens vand, især kvælstof fra landbruget. På lavt vand rammer dette næringsrige vand bunden, hvor fedtemøgssalgerne sidder. Når forårsolen slår igennem, som det skete i starten af marts, sidder fedtemøget på lavt vand med masser af frigivet fosfor fra bunden og masser af kvælstof fra åvandet. Og så eksploderer væksten. Algerne vokser nemlig fint i koldt vand.

Den tidlige opblomstring af fedtemøg i år skyldes altså sandsynligvis en kombination af is, iltsvind og fosfor i fjordbunden samt kvælstof og fosfor tilført via vandløb.

Kvælstof er den primære årsag til iltsvind under isen

Hvor kommer næringsstofferne så fra? Landbrugets dyrkning af markene og nedgravning af vandløb bidrager med cirka 60 procent af de menneskeskabte fosforudledninger, mens cirka 40 procent stammer fra spildevand. For kvælstof kommer

90 procent af de menneskeskabte udledninger fra landbruget, og sådan har det været siden 2001. Med "menneskeskabte" menes, at de næringsstoffer, der kommer naturligt fra landskabet, hvis der ikke boede mennesker og deres husdyr, er trukket fra.

Udledningen af kvælstof er den primære årsag til, at der opstår iltsvind under isen om vinteren. Iltsvindet opstår, fordi fjordbunden indeholder en masse dødt organisk stof, som ligger og rådner. Det kommer fra sidste års algevækst af både fedtemøg og encellede alger i vandsøjlen. Da de encellede alger kun er begrænset af tilgængeligheden af fosfor i nogle få uger om året, er det tilførslen af kvælstof, som styrer algevæksten gennem sommeren. Så iltsvindet under isen skyldes sidste års algevækst og dermed sidste års udledning af kvælstof.

Vi skal reducere udledningen af næringsstoffer!

At fedtemøget har bredt sig så meget de seneste 15 år skyldes paradoksalt nok, at vi har reduceret udledningen af fosfor via spildevand så voldsomt. Det betyder nemlig, at de encellede alger i fjordens frie vandmasser nu mangler fosfor i en periode om foråret. Så vokser de langsommere – og det er godt – men det betyder også, at de ikke optager så meget kvælstof fra vandet. Det efterlader mere kvælstof i vandet til fedtemøget – der i forvejen sidder oven på fjordbundens store fosforpulje – og fedtemøgssalgerne kan derfor vokse endnu hurtigere. Derfor stortrives fedtemøget. Mekanismen forstærkes af, at temperaturen i fjordens overfladevand er steget næsten 3 grader de seneste 30 år. Højere temperatur betyder mere iltsvind i fjordbunden, for bakterier vækst styres af temperaturen.

Løsningen på de voksende problemer med fedtemøg er enkel: Vi skal blive ved med at reducere udledningen af både kvælstof og fosfor til vandmiljøet, men fokus bør især være på at reducere kvælstof fra landbruget. ■

Om forfatteren



Stig Markager er professor ved Institut for Ecoscience, Aarhus Universitet. Han forsker i algers vækst og fotosyntese og havmiljøets respons på næringsstoffer. ssm@ecos.au.dk

Videre læsning

Du kan læse mere om sammenhængen mellem udledning af næringsstoffer og havmiljøets tilstand i *Aktuel Naturvidenskab*:

Gødning fra landbrug gør særlig ondt på dansk havmiljø. *Aktuel Naturvidenskab* nr. 4/2025

Naturen sætter en grænse – status for diskussionen om landbrug, kvælstof og havmiljø. *Aktuel Naturvidenskab* nr. 6/2015.

Varmere klima giver mere iltsvind. *Aktuel Naturvidenskab* nr. 2/2007

Angela Fago (i midten) i laboratoriet sammen med postdoc Ciska Bakkeren samt lektor emeritus Hans Malte. Sidstnævnte har spillet en stor rolle i udviklingen af "fiskeløbebåndet".

Foto: Andrea Lif Benediksdóttir, AU Foto.



FORSKERE JAGTER FORKLARING PÅ GÅDEFULDT PROTEIN I ZEBRAFISK

Proteinet myoglobin findes hos fisk, fugle og pattedyr. Det er i vores muskler og i vores hjerte, men forskerne aner ikke, hvilken rolle det spiller. Nu har professor Angela Fago med sin gruppe måske endelig fundet en god forklaring.

Forfatteren
Jeppe Kyhne Knudsen er journalist ved Aarhus Universitet. jkk@au.dk

Om forskerne
Angela Fago er professor i zoofysiologi angela.fago@bio.au.dk

Ciska Bakkeren er ph.d.-studerende. ciska.bakkeren@bio.au.dk

Hans Malte er lektor emeritus hans.malte@bio.au.dk

Alle tre er ved Institut for Biologi, Aarhus Universitet.

Efterårsolen står ind ad vinduerne i det hvide laboratorium. Støvparkler svæver lydløst i det skarpe lys, mens rummet afgiver en svag duft af rengøringsmiddel og sprit.

Sammen med sin ph.d.-studerende Ciska Bakkeren er professor i biologi ved Aarhus Universitet, Angela Fago, ved at samle et specialbygget "løbebånd" til en zebrafisk. En lille lukket vandbane i klar plastik, som ligner et stykke legetøj til en varm sommerdag i haven.

Lige nu har de ingen zebrafisk, men snart får de et nyt kuld leveret, som de skal lave flere forsøg med.

En lille propel er monteret i den ene ende af vandbanen. Den skaber en strøm i vandet, så fisken er nødsaget til at svømme for ikke at blive tvunget tilbage mod et gitter. En lille oxygensensor i vandet måler, hvor meget oxygen fisken optager fra vandet, mens et kamera filmer fisken, så dens hjerteslag kan ses gennem de gennemsigtige skæl.

»Vi bruger "løbebåndet" til at undersøge, hvordan zebrafisks iltforbrug og aktivitet bliver påvirket af, at vi slår et bestemt gen ud hos dem. Et gen, der indeholder opskriften på proteinet myoglobin. Tidligere var der enighed om, at myoglobin, som der er masser af, er afgørende i de fleste dyr for at levere oxygen nok til hjerte og muskler, men vores forsøg tyder på, at det er forkert,« siger Angela Fago.

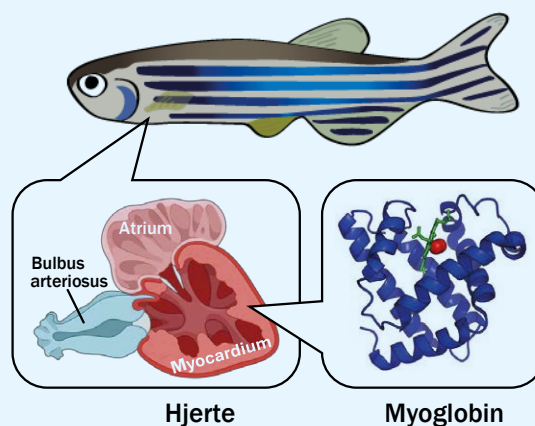
»Spørgsmålet er, hvilken rolle myoglobin så spiller. Vi ved det ikke med sikkerhed, men vi har en hypotese. Gennem vores forsøg håber vi, at vi kan opklare helt præcist, hvad proteinet laver i muskler og hjerte.«

Mod koldere himmelstrøg

Udenfor laboratoriets store vinduer river et vindstød i universitetsparkens gamle egetræer. Bladene er begyndt at gulne, forberede sig på vinterens komme. Enkelte hvirvler mod jorden.

Vintermånederne i Danmark kan sommetider føles ekstra lange for Angela Fago. Hun er født i det sydlige Italien, i byen Taranto som ligger lige hvor støvlelandets hæl stikker ud fra skoene. Her bliver det sjældent rigtig koldt, fortæller hun.

»Jeg savner indimellem det varme klima. Sommernætterne hvor man aldrig behøver at tage en jakke på – og maden naturligvis.«



Figuren lavet via Biorender. Myoglobin 3D-struktur er fra crystallography365.wordpress.com/2014/03/24/

Figuren viser proteinet myoglobin (med 3D-strukturen vist i blå), som udtrykkes i store mængder i zebrafiskens hjertemuskulatur, hvor det menes at fungere som et internt oxygenlager i hjertemusklen (myokardium). Oxygenmolekylet (vist i rødt) bindes til en jernholdig hæmgruppe (vist i grønt). Hos fisk er hjertet opdelt i tre kamre: bulbus arteriosus, atrium og ventrikel, som er omgivet af et tykt myokardium.

Det første protein, der blev kortlagt

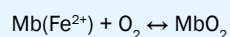
Myoglobin var det første protein, der blev kortlagt. Det skete i 1957, hvor det lykkedes John C. Kendrew at fastslå den tredimensionelle struktur af myoglobin ved hjælp af røntgenkrystallografi. Noget han sammen med Max Perutz fik nobelprisen for i 1962.

Myoglobin er i familie med det mere kendte protein hæmoglobin, som bærer oxygen i vores røde blodceller. Myoglobin blev kortlagt først, fordi det er markant mindre end hæmoglobin og derfor er enklere at kortlægge.

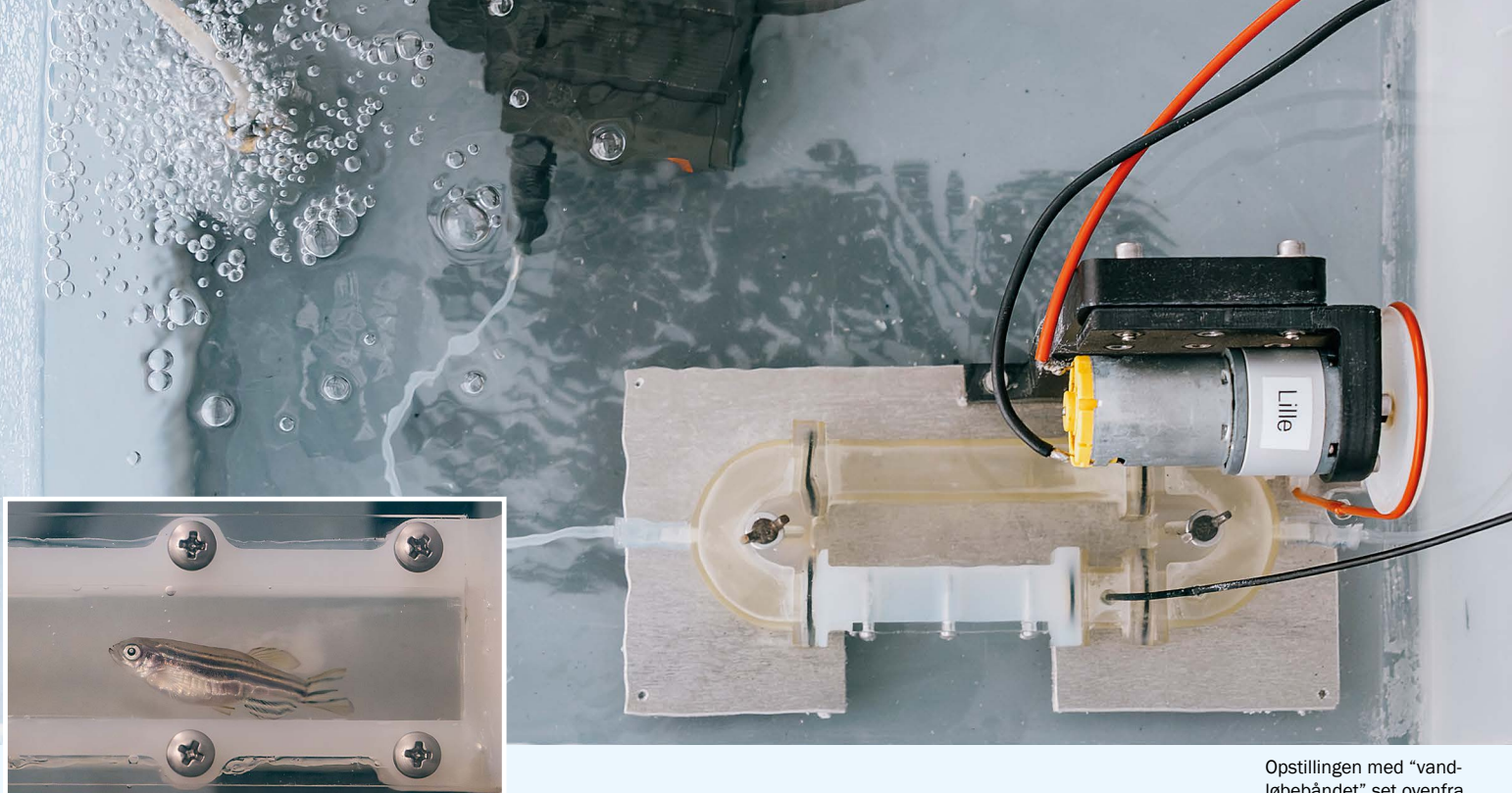
Begge proteiner udmærker sig ved at indeholde jernatomer i reduceret tilstand (Fe^{2+}), som binder oxygen til sig. Proteinerne kan holde på oxygenmolekylerne, og hæmoglobin bærer oxygen via blodet ud til cellerne i hele kroppen.

Fe^{2+} mangler to elektroner og søger derfor hele tiden efter molekyler med frie elektroner at binde sig til – og her er oxygen en af mulighederne. Dog ikke den eneste. Det er eksempelvis farligt at indånde for meget udstødning fra gamle biler, fordi den er fyldt med carbonmonoxid (CO), som binder sig til hæmoglobin og myoglobin i stedet for oxygen og dermed blokerer for oxygenoptagelsen.

Sådan ser reaktionen mellem jern og oxygen ud i myoglobin:

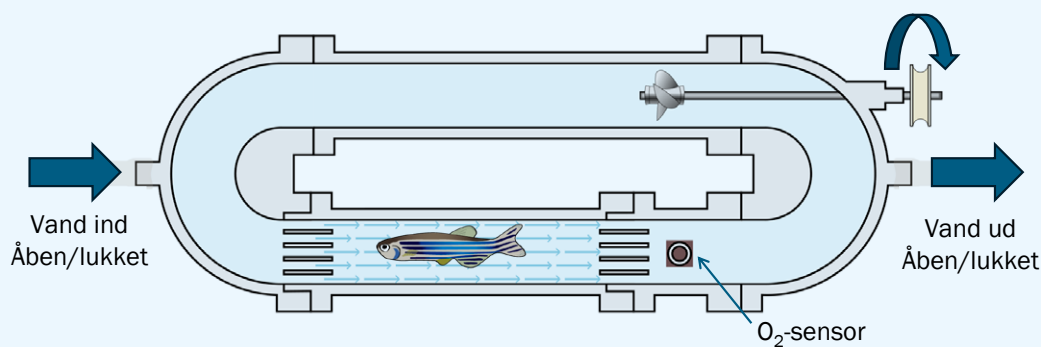


hvor $\text{Mb}(\text{Fe}^{2+})$ er deoxymyoglobin, O_2 er oxygen og MbO_2 er oxymyoglobin, hvor oxygenmolekylet har bundet sig til jernatomet.

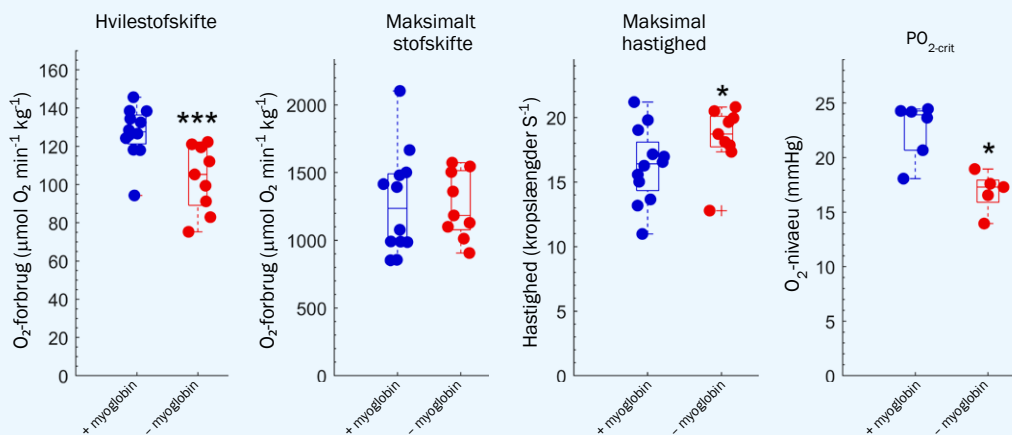


Opstillingen med "vandløbebåndet" set ovenfra. Lille foto: Et kig ind til fisken fra siden af båndet.
Fotos: Andrea Lif Benediksdóttir, AU Foto

Bestemmelse af stofskifte



Figuren viser princippet i forskernes specialbyggede "vandløbebånd" – på fagsproget kaldet et svømmespirometer. Det måler en zebrafisks optag af oxygen ved hjælp af en lille sensor placeret i vandet, mens vandstrømmen kan bestemmes af en propel koblet til en motor. Fiskene tvinges til at svømme ved meget lav hastighed for at måle fiskens optag af oxygen under hvile (hvilestofskiftet) eller ved maksimal hastighed (målt i kropslængder per sekund) for at måle det maksimale stofskifte.



Figurer efter Hejlesen et al., 2024; Hejlesen et al., 2026.

Graferne viser, at zebrafisk uden myoglobin-genet (data vist med rød) har et lavere oxygenforbrug under hvile, svømmer hurtigere, har samme maksimale oxygenforbrug (maksimalt stofskifte) ved maksimal hastighed og tåler oxygenmangel bedre (lavere PO_{2-crit}) sammenlignet med ikke-genmodificerede zebrafisk (blå). PO_{2-crit} angiver det oxygeniveau i vandet, hvor fisken ikke længere kan opretholde sit hvilestofskifte og derfor overgår til anaerobt energistofskifte, hvor energi produceres uden oxygen. Stjerneerne over datapunkterne angiver i hvilken grad, der er signifikant forskel på de to grupper.



Foto: Andrea Lij Benediktsdóttir, AU Foto

Hans Malte står her med det specialbyggede vandløbeband – kaldet et svømmespirometer.

At hun skulle ende i Danmark, er ikke helt så tilfældigt, som det lyder. Hendes mor er nemlig dansk, mødte hendes far i Italien og flyttede siden til Syditalien, hvor de stadig bor.

»Da jeg blev færdig på universitetet i Parma, blev jeg ansat i Napoli, hvor jeg blandt andet undersøgte, hvordan antarktiske fisk kan klare sig i et miljø med en konstant temperatur under frysepunktet. Det var her, jeg blev interesseret i sammenhængen mellem oxygen og væv,« siger hun.

I 1993 rejste hun til Danmark, hvor hun fik en midlertidig forskerstilling på Aarhus Universitet. Det stod dog hurtigt klart for hende, at hun ikke ville rejse tilbage til Italien.

»Jeg elskede det her. I Danmark var det muligt at søge fondsmidler, selv om man er en ung forsker. Forsknin-

gen i zoofysiologi i Aarhus, som mine interesser hørte under, var desuden i verdensklasse. Så jeg blev, fik senere min egen forskningsgruppe og blev professor i 2015.«

En overraskende opdagelse

Overfor laboratoriet, på den anden side af en gang, som er fyldt med gamle arkivskabe og udstoppede dyr, ligger Angela Fagos kontor. På døren hænger forsider fra nogle af de videnskabelige publikationer, hendes forskning har været publiceret i. På reolen bag skrivebordet står ringbind og bøger i en sirlig orden.

Hun fortæller, at hun for alvor fik øjnene op for myoglobin, da flere forskningsgrupper rundt omkring i verden i slutningen af 1990'erne publicerede overraskende resultater. Ny genteknologi havde gjort det nemmere og billigere at deaktivere det gen, der

bærer på opskriften på myoglobin i mus. Nu kunne man endelig med sikkerhed slå fast, hvilken rolle myoglobin spiller. Troede man.

Forskningsgrupperne regnede med, at de genredigerede mus ville blive små, svagelige og måske ikke nå voksenalderen, inden de døde. Men de tog fejl, forklarer Angela Fago.

»Nogle af musene døde, men langt de fleste overlevede. Det viste sig, at musene kunne klare sig med oxygen udelukkende fra blodomløbet. Nogle havde lidt større hjerter, men ellers var der ingen forskel fra de normale mus,« siger hun.

»Pludselig anede vi ikke, hvilken rolle proteinet spiller. Det var enormt spændende, og siden da har jeg været optaget af at løse mysteriet om, hvad myoglobin egentlig gør i dyr.«

Videre læsning:

Hejlesen, R., Scheffler, F.B., Byrge, C.G., Kjær-Sørensen, K., Oxvig, C., Fago, A., Malte, H. (2024): Assessing metabolic rates in zebrafish using a 3D-printed intermittent-flow respirometer and swim tunnel system. *Biol Open* (2024) 13 (6): bio060375. doi.org/10.1242/bio.060375

Hejlesen, R., Bakkeren, C., Damsgaard, C., Laurson, L.S., Kjær-Sørensen, K., Corti, P., Malte, H., Oxvig, C., Fago, A. (2026) Myoglobin Affects Tissue-Specific Transcriptome, Heart Regeneration and Whole Animal Metabolic Rates. *FASEB journal: official publication of the Federation of American Societies for Experimental Biology*. 40:e71424e71424.

Projektet er støttet af Danmarks Frie Forskningsråd I Natur og Univers.

Foto: Andrea LIF Benediktsdóttir, AU Foto



Sammen med forskere fra Institut for Molekylærbiologi og Genetik på Aarhus Universitet og to ph.d.-studerende, Rasmus Hejlesen og Ciska Bakkeren, designede hun en række forsøg med zebrafisk, hvor myoglobin-genet var sat ud af spil. Hun håbede, at fiskene kunne give nogle klare svar.

»Vi valgte zebrafisk af flere grunde. De er billigere at have, de formerer sig i en fart og vokser lynhurtigt op. På den måde kan man komme gennem flere generationer og undersøge en række forskellige ting på nogle måneder.«

Troede at fiskene ville synke udmattede til bunds

En anden fordel ved zebrafiskene er, at man nemt kan tvinge dem til at svømme. En mus er derimod svær at tvinge op i hamsterhjulet, hvis den ikke vil.

»Vi designede vores fiskeløbebånd sådan, at fiskene er nødt til at svømme mod vandstrømmen. Hvis ikke, bliver de presset tilbage mod et plastikgitter,« siger Angela Fago.

Svømmespirometret gav professoren og hendes to ph.d.-studerende mulighed for at undersøge, hvad der sker med en zebrafisk uden myoglobin, når den bliver presset til det yderste. Noget, som ikke havde været muligt med musene.

»Vi troede, at fiskene hurtigt ville

blive udmattede, når de manglede myoglobin. Men i kampen mod den stærke strøm, klarede de sig mindst lige så godt som de normale fisk. De sank ikke udmattede til bunds, men svømmede blot videre, og kunne endda svømme hurtigere. Det var ret vildt at se – og ganske overraskende. Nu ved vi med sikkerhed, at myoglobin ikke spiller en rolle i forhold til at sørge for ekstra oxygen til hjertet. I hvert fald ikke i zebrafisk, siger Angela Fago.

Sensoren i vandstrømmen kunne desuden måle, hvor meget oxygen fisken optog fra vandet, når den svømmede – og de genmodificerede fisk trak heller ikke mere oxygen ind i gællerne.

»Det blev vi meget overraskede over at se. Det betyder, at fiskene ikke engang behøver at kompensere ved at trække mere oxygen ind i blodet,« siger hun.

Spiller måske vigtig rolle i fosterstadiet

Hvis myoglobin ikke fungerer som en slags reservetank med ekstra oxygen, hvilken rolle har den så? Det er det helt store spørgsmål, som Angela Fago og hendes ph.d.-studerende Ciska Bakkeren nu prøver at besvare. Og de har en teori.

»Vi tror, at myoglobin spiller en vigtig rolle i den embryonale udvikling hos dyr og mennesker. Proteinets får muligvis de forskellige celler i hjerte- og muskeltvæv til mere effektivt at

differentiere sig til de celletyper, der er brug for, mens væv og organer bliver bygget,« siger ph.d.-studerende Ciska Bakkeren.

Det er svært at undersøge, hvad der præcist sker inde i embryonet. Heldigvis har voksne zebrafisk også evnen til at regenerere dele af dets hjerte. For at gøre det, er fisken dog nødt til at spole cellerne tilbage til et tidligere stadie, hvor de endnu ikke er specialiserede – ligesom de er i embryonet. Og det giver de to forskere en mulighed for at undersøge, om deres teori holder.

»Det er faktisk muligt at klippe en smule af zebrafiskens hjerte, sy fisken sammen igen og observere, hvad der sker,« forklarer Angela Fago og fortsætter:

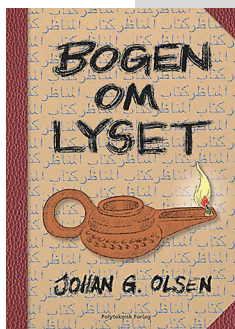
»Vores tidligere ph.d.-studerende Rasmus Hejlesen – der nu er postdoc i Edinburgh – har under et forskerophold i USA fundet ud af, at de normale zebrafisk skruer ned for deres myoglobinproduktion, når de skal regenerere hjertevæv. Det tyder på, at cellerne dermed får mulighed for at spole tilbage. Når de begynder at specialisere sig igen, bliver der dog skruet op for myoglobinnet.«

Når vi mennesker ikke kan regenerere dele af vores hjerte, skyldes det måske, at vi ikke kan skrue ned for myoglobinproduktionen på samme måde som zebrafisken.

»Noget tyder på, at myoglobin kommer med en pris. Det sørger for et velfungerende hjerte, der kan generere en masse energi, men du mister evnen til at regenerere det. Måske kan vi udnytte de her mekanismer i zebrafisk til nye former for hjertebehandlinger af mennesker engang ude i fremtiden,« siger Angela Fago og slutter:

»Hvem ved. Måske kan vi omprogrammere vores celler til at regenerere hjertevæv, når vi bedre forstår, hvordan myoglobin virker.« ■

FAKTA



Johan G. Olsen:
Bogen om lyset.
Polyteknisk Forlag 2026.
232 sider,
399,- kr.

Bogen om lyset

Hvordan sanser vi verden med synet - og hvad udgør den substans som vi sanser? Det simple spørgsmål "Hvad er lys?" og de mange forsøg på at besvare det, har ført til nogle af de mest vidtrækkende erkendelser af verden vi har opnået. I Bogen om lyset fører forsker og radiovært Johan G. Olsen os gennem lysets idéhistorie gennem 2.500 år, og fortæller os om nogle af de personer, der har beskæftiget sig med emnet. Det er en rejse til de yderste afkroge af vores arts forestillingsevne.

FAKTA

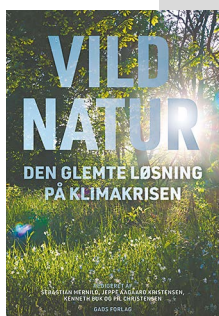


Fatima AlZahra'a Alatrakchi:
Besat af bakterier.
Politikens forlag 2026. 280 sider,
300,- kr.

Besat af bakterier

Bakterier har et socialt liv, de taler sammen, de samarbejder, og de bekæmper hinanden. På mange måder minder deres liv om menneskers. Få kender den verden bedre end den internationalt anerkendte danske forsker Fatima AlZahra'a Alatrakchi. Hun kan ikke slippe den vilde tanke, at bakterierne delvis styrer os mennesker. Med et personlige afsæt skildrer hun de dramatiske slag, bakterier og menneskekroppen udkæmper, og undervejs finder hun bakteriernes svar på nogle af de store spørgsmål: Kan det betale sig at snyde? Hvad sker der med samfund, hvor alle er passive? Og ultimativt: Hvad er meningen med livet?

FAKTA



Sebastian Mernild, Jeppe Aagaard Kristensen, Kenneth Buk og Pil Christensen (red.): Vild Natur – den glemte løsning på klimakrisen. Gads Forlag 2026. 240 sider, 299,95 kr.

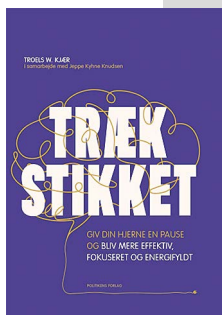
Vild natur – den glemte løsning på klimakrisen

Danmark er det land i Europa med mindst beskyttet natur som andel af arealet. Det har skabt en biodiversitetskrise uden fortilfælde. Men vi står midt i et historisk mulighedsvindue – for beslutningerne om fremtidens arealanvendelse bliver truffet nu. Denne bog viser, hvordan biodiversitetskrisen er tæt forbundet med klimakrisen – og formidler den nyeste viden om, hvordan mere vild natur kan være med til at løse begge kriser.

Jeg ser på fugle

I samarbejde med Rikke Hyldgaard er biolog og naturformidler Morten D. D. Hansen tilbage med en manual til det optimale fugleår i Danmark, hvor han sammen med læseren drager ud på 22 fugleture for at opleve 176 arter og den natur, de lever i. Alle kan finde fugle i nærheden af: ådale, urørt skov og vadehav, men også i parker, villakvarterer, mortorveje og storbyen. På terrassen eller ved søen.

FAKTA



Troels W. Kjær & Jeppe Kyhne Knudsen:
Træk stikket. Politikens forlag 2026. 216 sider,
280,- kr.

Træk stikket

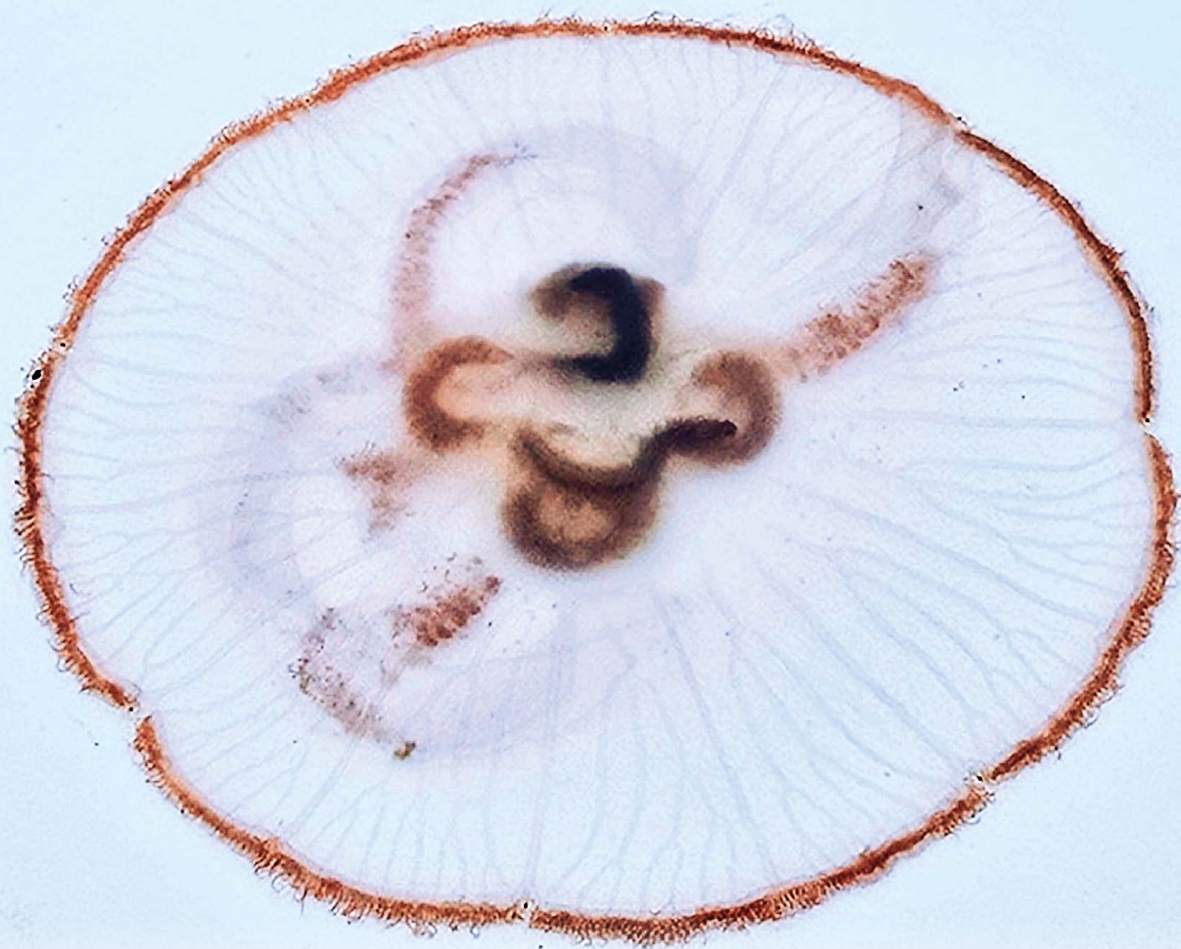
Gennem den nyeste hjerneforskning fortæller hjerneforsker Troels W. Kjær sammen med videnskabsjournalist Jeppe Kyhne Knudsen i denne bog, hvorfor det så vigtigt en gang imellem at trække stikket og give hjernen en pause. For når vi ikke holder pause – både de korte i løbet af dagen og søvnen om natten – bliver vi dårligere til at lære nyt, får sværere ved at håndtere udfordringer og bliver mindre opmærksomme på andre.

FAKTA



Morten D.D. Hansen, Rikke Hyldgaard:
Jeg ser på fugle.
Forlaget Alpha 2026. 448 sider,
299,95 kr.

Forskerne fandt i alt 48 vandmænd med børsteorm – og der var en eller to orm i de enkelte vandmænd, som det ses her. Foto: Hannah Yeo/SD



VANDMÆND JAGER BØRSTEORM

På varme sommernætter, når fuldmånen lyser, stiger børsteorm op fra havbunden for at gyde. Færden kan være farefuld, for i vandet venter sultne fisk. Men også sultne vandmænd har biologer nu påvist for første gang.



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

De fleste arter af børsteorm tilbringer deres liv i gange under havbunden. Men to arter – med de latinske navne *Alitta succinea* og *Platynereis dumerilii* – opfører sig anderledes: Når sommernætterne bliver varme, og månen bliver fuld, forlader de voksne individer deres gange og stiger op gennem vandet for at gyde. Når det står på, kan man se dem i tusindvis svømme rundt blandt hinanden.

Formålet med disse sværme er altså at sprede æg og sæd, og for

at komme af med deres værdifulde last, sprækker ormene simpelthen, hvorefter de dør. Ormene er en lækkerbissen for mange rovdyr i nærheden og bliver hapsed af ørreder og andre rovfisk. Nu viser ny forskning af biologer fra Syddansk Universitet og Københavns Universitet, at visse vandmænd også fanger og æder de sværmende orm.

»Vi vidste godt, at vandmænd æder nærmest alt, hvad de finder på deres vej, men det er første gang, at denne adfærd bliver dokumenteret,« siger en af forskerne bag

opdagelsen, biolog og postdoc Hannah Yeo fra SDUs Marinbiologiske Forskningscenter i Kerteminde.

Fordøjet på et par timer

I løbet af et år har forskerholdet registreret 56 tilfælde, hvor en vandmand har haft mindst en børsteorm i sig. Fundene er gjort i vandmænd fra to arter: den almindelige vandmand *Aurelia aurita* og den invasive ribbegople, også kaldet dræbergoppe, *Mnemiopsis leidyi*.

Alle fund er gjort i Kerteminde Fjord og det nærliggende Kertinge Nor.

Ormene blev fundet i 45 af de 166 indsamlede eksemplarer af den almindelige vandmand og i tre af 71 eksemplarer af dræbergopler. Tallet kunne godt have været højere, mener forskerne.

» Det tager ikke mere end et par timer for vandmændene at fordøje de her orm, så der har sandsynligvis været flere tilfælde end dem, vi har set,« siger medforfatter til studiet, professor Erik Kristensen fra Biologisk Institut på SDU.

At de orm, som blev fundet i vandmændene, rent faktisk fungerede som næring og ikke bare blev indtaget ved et uheld, påviste forskerne ved hjælp af isotopanalyser af vandmændenes væv. Disse analyser viste, at næring fra ormene bliver optaget af vandmændene, og at ormene ikke blot passerer igennem.

Jager om natten

Børsteorm er i det store billede næppe en stor næringskilde for vandmændene, men de udgør et koncentreret boom af næring i en kort periode om sommeren, som bidrager til, at vandmændene kan klare sig godt.

For den invasive dræbergoples vedkommende kan det dog godt være bekymrende, mener forskerne – netop fordi dens invasive natur gør enhver nyopdaget fødesøgningsadfærd til en potentiel økologisk bekymring.

»Vi mistænker, at de fangede og fortærede flere orm end dem, vi fandt. De jager nemlig også om natten, som jo er det tidspunkt, hvor ormene sværmer. Når vi så kom med vores net i dagtimerne, var de børsteorm så for længst fordøjet og dermed ikke nogen, vi kunne se,« siger medforfatter Jamileh Javidpour, der er lektor på Biologisk Institut.

»Dræbergopler er invasive og uønskede i den danske natur, fordi de kan fortrænge hjemmehørende arter. De er opportunistiske, og her har vi endnu en fødekilde, som de er i stand til at udnytte,« siger hun.



At vandmænd æder børsteorm viser, at vandmænd kan udnytte en energikilde fra havbunden, som hidtil har været overset, viser forskningen. Foto: Hannah Yeo/SD



Børsteormen *Alitta succinea* er en af de to arter fundet i vandmænd. Foto: Hans Hillewaert/ via Wikimedia Commons/CC BY-SA 4.0

Hidtil overset udveksling af energi

Forskernes opdagelse kaster ikke kun lys over vandmændenes jagtevnener, men afdækker også en hidtil overset udveksling af energi mellem havbund og vandsøjle. Normalt betragter man udvekslingen som primært envejs; at der falder organisk materiale ned til bunddyrene – for eksempel i form af døde børsteorm efter gydning.

»Men her ser vi energi bevæge sig opad; bunddyr, der selv bevæger sig op og bliver jagtet i vandsøjlen. Der

er flere slags rovdyr, der udnytter børsteormenes sværmen, men vi har ikke set vandmænd eller dræbergopler gøre det før. Det betyder, at vandmænd og gopler kan udnytte en energikilde fra havbunden, som stort set har været overset,« siger Jamileh Javidpour og konkluderer:

»Det skal vi tage højde for, når vi skal lave modeller for de kystnære økosystemers modstandsdygtighed. Selv om det kun forekommer sporadisk, har det betydning for, hvordan både hjemmehørende og invasive vandmænd og gopler klarer sig.« ■

Videre læsning: Resultaterne er publiceret i tidsskriftet *Hydrobiologia*. doi.org/10.1007/s10750-026-06174-3

Foto af AAU's drone:
Katrine Møller-
Lassenen

Forfatterne:



Katrine Møller-Lassenen er videnskabelig assistent på Institut for Kemi og Biovidenskab, Aalborg Universitet. Dronepilot og specialist i monitorering af pattedyr med drone og i AI-modellering. kamola@bio.aau.dk



Silje Marquardsen Lund er studerende på Aalborg Universitet, arbejder med AI-modeller på arter i Aalborg Zoo for at forbedre velfærd. sml21@student.aau.dk



Cino Pertoldi er professor ved Institut for Kemi og Biovidenskab. cp@bio.aau.dk



Lasse Lange Jensen er ph.d.-studerende ved Institut for Kemi og Biovidenskab, Aalborg Universitet.



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



AI OG DRONER: En ny æra for overvågning af nattens rovdyr

**Hvordan kan vi opnå viden om
ræves og grævlingers natlige adfærd uden at forstyrre dem?
Svaret er droner med termiske kameraer samt kunstig intelligens,
der omsætter optagelserne til kvantitative data om dyrenes adfærd.**

Siden 2022 har vi på Aalborg Universitet (AAU) arbejdet med termiske droner til overvågning af pattedyr som kronstyr, dådyr, hare og rovpattedyr som ræv, grævling og odder. Vi flyver i 70–100 meters højde med dronen, og det betyder, at vi kan observere dyrene uden at forstyrre dem. Kameraerne registrerer deres varmesignaturer, og med zoomfunktionen får vi detaljerede optagelser af pattedyrenes adfærd. Det er som at være en "flue på væggen" – bare fra luften.

Studerende på AAU har også eksperimenteret med kunstig intelligens (AI, Artificial Intelligence) til at overvåge adfærd hos

arter i Aalborg Zoo, for eksempel elefanter, dværgflodheste, tapirer, lemurer og edderkopaber. Målet er at udvikle metoder, der gør pasning og overvågningen af dyrene mindre arbejdskrævende. Når modellerne er færdigudviklet, kan kunstig intelligens advare dyrepasserne, hvis et individ ændrer adfærd og måske har brug for hjælp. Det giver mulighed for at højne dyrenes velfærd i anlæggene.

I 2024 gennemførte vi et spændende projekt med ræv og grævling i naturen, hvor vi kombinerede droneoptagelser af de to arter, med GPS-lokationer. Ved at koble lokation (dvs. habitat) og adfærd var det muligt at lave tidsbudgetter for,

hvordan rovdyrene bruger landskabet. Det viste os, at grævlingen fortrinsvist søger føde i lysåben skov og på enge, mens ræven søger føde mange forskellige steder og især på åbne marker med kort vegetation. På den måde fik vi helt nye indsigter i de to rovdyrs bevægelsesmønstre og deres indbyrdes interaktioner.

AI kan spare forskerne for arbejdstid

Men selvom droner har gjort det muligt at indsamle data på helt nye måder og endda følge dyrene om natten, er det stadig en stor udfordring at få data omdannet til tal. Det tager enormt lang tid at gennemgå videoerne bagefter for at finde ud af, hvad dyrene foretog

sig på et givent tidspunkt på en bestemt lokalitet. En video på 20 minutter tager mindst 40 minutter at gennemgå for at notere dyrenes adfærd sekund for sekund.

For at løse det problem har vi trænet kunstig intelligens til at genkende adfærd hos dyr som ræv og grævling i videoklip optaget med termiske droner. Det er ikke helt nemt, for dronen bevæger sig hele tiden og filmer fra forskellige vinkler og med forskellig zoom i modsætning til et fast kamera i en zoologisk have. Men når AI-modellen først er trænet, kan den selv finde dyrenes adfærd i lange videoklip og lægge resultaterne ind i et regneark, klar til analyse. Det sparer forskerne for mange timers arbejde og gør analysen mere ensartet, fordi mennesker ofte tolker adfærd lidt forskelligt.

På jagt efter velegnet AI-software

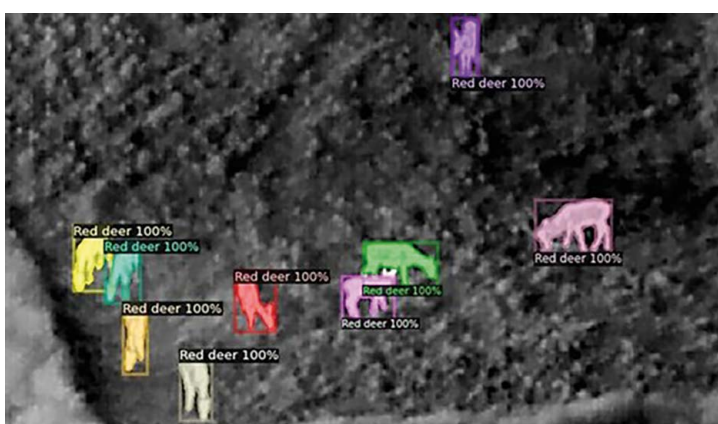
De seneste år er der sket en kæmpe udvikling i udbuddet af software på nettet, som gør det muligt at bruge kunstig intelligens til forskellige formål. For at finde det bedste program til at overvåge adfærd hos ræv og grævling fra termiske videoer afprøvede vi flere gratis (open-source) AI-programmer.

Et af de første programmer, vi prøvede, hedder YOLO, som står for You Only Look Once. YOLO er kendt for at være hurtigt til billedgenkendelse. Det fungerer ved at sætte firkantede bokse rundt om det, som programmet tror er et dyr. Metoden er god til at finde ud af, hvilken art dyret tilhører, men YOLO er endnu ikke lige så god som andre programmer til at analysere detaljeret adfærd, hvis der er mange dyr tæt på hinanden i samme videoklip.

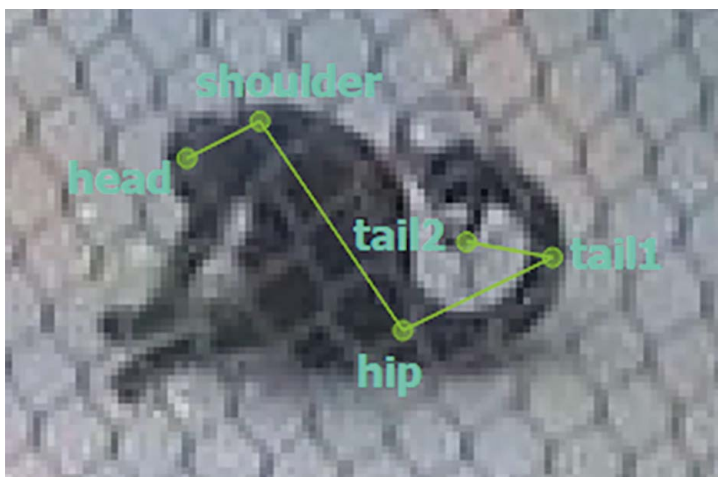
Vi har brugt YOLO til at genkende kronstyr og dådyr på termiske dronevideoer optaget i Lyngby Hede og Nationalpark Thy. Det viser, at teknologien kan bruges til monitoring af store pattedyr, men YOLO er udfordret, når man vil gå fra simpel artsgenkendelse til mere avanceret adfærdsanalyse.



1. På billedet ses en ræv filmet med termisk kamera på en drone. De små prikker indenfor de røde cirkler er mus. Billede fra video af Esther Ellersgaard Enevoldsen.



2. AI-programmet YOLO identificerer kronstyr med stor præcision, men er mindre anvendelig når programmet skal genkende forskellige adfærdstyper. Foto: Lasse Lange Jensen.



3. Her er programmet SLEAP brugt til at lave markeringer på en edderkopabe filmet i Aalborg Zoo (Lund et al. 2025)

Dernæst prøvede vi et program, der hedder SLEAP (Social LEAP Estimates Animal Poses). Det fungerer lidt som at lave et digitalt skelet af dyret: Vi markerer nøglepunkter som hoved, ben og hale og forbinde dem med streger. Når vi har skelettet, kan vi se, hvordan dyret

bevæger sig, og ud fra afstanden mellem punkterne kan man regne ud, hvilken type adfærd dyret har.

Men der er en udfordring: Når kameraet sidder på en drone, bevæger det sig hele tiden og filmer fra forskellige vinkler. Det gør

Find videoer og ekstra materiale på:
aktuelnaturvidenskab.dk/
2-2026/ekstra





Præcisionen af AI-modeller

Når man skal vurdere, hvor præcis en AI-model er til at finde og genkende objekter korrekt (i vores tilfælde dyr), bruger man en enhed kaldet mean Average Precision – altså modellens gennemsnitlige præcision for alle de kategorier af objekter, modellen skal kunne genkende. Dette bygger på fire grundlæggende målinger:

Sand positiv: Modellen genkender korrekt, at der er et dyr.

Sand negativ: Modellen genkender korrekt, at der *ikke* er et dyr.

Falsk positiv: Modellen tror, der er et dyr, men det er måske en sten.

Falsk negativ: Modellen overser et dyr, selvom det er der.

På Aktuel Naturvidenskabs hjemmeside kan du finde en udvidet version af denne boks, der udfolder matematikken i, hvordan man ud fra disse grundlæggende målinger, kommer frem til modellens mean Average Precision. Se aktuelnaturvidenskab.dk/2-2026/ekstra



beregningerne mellem skelettets nøglepunkter meget mere komplicerede og tidskrævende, fordi man i beregningen af dyrets bevægelse ud fra afstanden mellem lemmerne skal tage højde for både den vinkel og afstand, dyret er filmet fra.

også eksportere alle data, så de nemt kan åbnes i et regneark. På den måde kan vi lave analyser og grafer uden en masse ekstra arbejde med at kigge videomateriale igennem.

Sådan bygges AI-modellen

Vi valgte til sidst at bruge programmet LabGym. Det er et program, der egentlig er udviklet til at analysere adfærd hos laboratoriedyr, men vi opdagede, at det også fungerer rigtig godt til droneoptagelser. Programmet kan registrere dyrets omrids, og når det er trænet, kan det også genkende, hvad dyret laver. Det sker ved hjælp af billedgenkendelse og segmentering, som betyder, at LabGym kan "se" og kategorisere adfærden via dyrets omrids.

For at træne AI-modellerne brugte vi videoptagelser af ræv og grævling fra flere droneflyvninger på forskellige steder, hvor vi vidste, at dyrene var til stede. Optagelserne blev filmet med AAU's største drone, som er forsynet med et termisk kamera. Når vi filmer dyr, flyver vi som regel i en højde på mellem 70 og 120 meter, og vi følger dyrene rundt i landskabet.

Det smarte ved LabGym er, at det er brugervenligt. Man behøver ikke kunne kode for at bruge det, og det kan automatisk notere adfærden på optagelserne. Programmet kan

Når optagelserne er i hus, bliver videoklippene omdannet til still-billeder – for eksempel ét billede per sekund gennem hele videoen – gennem et hjælpeprogram kaldet Roboflow. I dette program tegner vi markeringer (såkaldte segmenteringsmaps) omkring dyrene

Prøv selv at bruge AI-modellerne

Via QR-koden kan du finde links til Aalborg Universitets modeller til at genkende ræv og grævling og deres adfærd fra droneoptagelser. Vi har desuden lavet en model, som kan kende forskel på hund og kat. Den kan du bruge til at eksperimentere med LabGym og videoklip af dine egne – eller naboens – hunde og katte.

Du kan også finde videoer med eksempler samt videoer, hvor Katrine Møller-Lassesen viser, hvordan du opsætter LabGym, og hvordan du indsætter koderne til AAU's modeller i din egen LabGym.



på billederne. Herefter får hver markering en "label", som angiver om det er "ræv" eller "grævling".

De mange billeder med labels bruges nu til at træne modellen i LabGym. I første omgang træner vi programmet til at kunne skelne mellem en ræv og en grævling ved hjælp af en funktion kaldet Detector. Når det er trænet, udarbejder vi et såkaldt "etogram" – dvs. en liste over de adfærdstyper, vi er interesserede i at genkende – for eksempel: sidde, stå, være opmærksom, løbe og søge føde.

For at træne LabGym til at genkende disse adfærdstyper deler vi videoer op i små bidder på ét sekund og sorterede dem i mapper efter adfærd. Mapperne bliver derefter brugt til at træne LabGym med en anden funktion (kaldet Categorizer), som lærer programmet at identificere forskellige adfærdstyper. På den måde kan vi opbygge en model, der automatisk kan analysere dyrenes adfærd.

Når modellerne er færdigtrænede med begge funktioner, kan de bruges til at analysere nye videoklip og helt automatisk læse videoens indhold. Det betyder, at programmet selv finder ud af, hvilken art der er på optagelsen, og hvilken adfærd dyret har.

Når analysen er færdig, har vi to ting:

- Et regneark med alle observationerne – altså en oversigt over, hvilke adfærdstyper der er registreret og hvornår.
- En video, hvor man kan se markeringer (annoteringer) af både art og adfærd direkte på optagelsen.

Modellens robusthed og præcision

Alle modeller er ikke lige gode, og når en AI-model er trænet, tester vi, om modellen er til at stole på. Først giver vi modellen en video, den aldrig har set før. Hvis den kan genkende dyrene og deres adfærd her, er det et godt tegn. For at måle, hvor præcis modellen er, kigger vi på, hvor mange korrekt bestemte

Ordforklaring til AI-værktøjer som LabGym

Annotering betyder i AI-sammenhæng, at man tilføjer information til data, så en maskinlæringsmodel kan lære af dem.

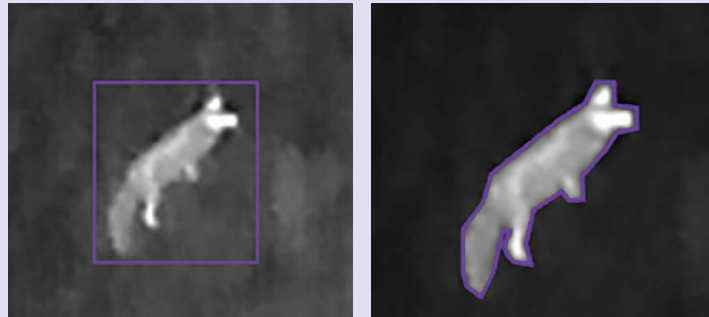
Roboflow er en platform designet til at gøre det nemt for udviklere og virksomheder at bygge, træne og implementere computer vision-modeller. I AI-sammenhæng bruges Roboflow til objektgenkendelse, billedklassificering og segmentering. Desuden opdeler Roboflow videoklip i stillbilleder, så de er klar til annotering.

Detector er den model, der kan genkende arten på dyret på et billede.

Categorizer er den model i LabGym, der kan genkende adfærden i en video.

Augmentering i billedgenkendelsesmodeller er når der ændres på billederne i en sådan grad, at modellen kan bruge billedet som et nyt træningseksempel. Dette kan være ved at ændre på kontrasten, flippe og rotere billedet eller tilføje støj til billedet.

Open-source betyder, at softwaren er gratis og kan tilpasses og deles frit – en stor fordel for forskningsprojekter.



Eksempler på annotering af billeder. Til venstre tegnes et rektangel (en Bounding Box) rundt om et objekt (en ræv) for at vise, hvor objektet befinder sig i billedet. Det er hurtigt og effektivt, men giver kun en grov placering. Til højre er objektet markeret pixel for pixel med en såkaldt Segmentation Map, så man får en præcis form og afgrænsning af dyret. Det giver en mere detaljeret information, men kræver også mere datakraft og træning.



Billede fra en annoteringsvideo med detektion af art og adfærd med programmet LabGym. Sandsynligheden for rævens aktuelle adfærd ses nederst til højre. Link til video: <https://youtu.be/uniwWy6Cpfo>

arter og adfærd, modellen fandt, sammenholdt med, hvor mange den overså. Ud fra dette kan vi beregne modellens sikkerhed (kaldet

mean Average Precision). Som tommelfingerregel skal dette tal ligge på 80 % eller mere, før vi kan bruge modellen til forskning. ■

Se ekstrapaterialet på: aktuelnaturvidenskab.dk/2-2026/ekstra med flere videoer

Videre læsning:
Christensen POF, Clausen MH, Faddersbøll TL, Gammelgård F, Lund SM, Nielsen APM, Nielsen J, Olsen NH, Olsen TK, Pagh S, Pertoldi C. 2026 Assessing Welfare in Ex Situ Lowland Tapirs Through Activity Patterns and Machine Learning: Journal of Zoological and Botanical Gardens. 7, 1, 15 s., 11.

Gammelgård F, Nielsen J, Nielsen EJ, Hansen MG, Alstrup AKO, Perea-García JO, Jensen, TH, Pertoldi C 2024. Application of Machine Learning for Automating Behavioral Tracking of Captive Bornean Orangutans (*Pongo Pygmaeus*). *Animals* 14, 1729.

Jensen, L. L., Pertoldi, C., & Pagh, S. 2025. The Use of Open Vegetation by Red Deer (*Cervus elaphus*) and Fallow Deer (*Dama dama*) Determined by Object Detection Models. *Drones*, 9(4).

Lund S M, Nielsen J, Gammelgård F, Nielsen MG, Jensen TH, Pertoldi C 2024. Behavioral Coding of Captive African Elephants (*Loxodonta africana*): Utilizing DeepLabCut and Create ML for Nocturnal Activity Tracking. *Animals*, 14(19), Article 2820.

Møller-Lassesens K, Enevoldsen EME, Pertoldi C, Pagh S Assessing UAVs Equipped with Thermal Camera as a Novel Tool for Studying Habitat Related Behaviour of Mesopredators. *Preprints* 2025, 2025020121.

Pertoldi C, Olsen AAK, Andersen SV, Fabricius IKB, Ludvigsen MI, Overgaard C, Thaarup SR, Jensen TH, Jensen TH. 2024. The Impact of Zoo Visitors on the Behaviour of Black Lemurs (*Eulemur macaco*) and Ring-Tailed Lemurs (*Lemur catta*) Assessed With Artificial Intelligence. *Genetics and Biodiversity Journal* 8 (2): 11–22.

Forskningen beskrevet i artiklen er støttet af Aage V. Jensen Fond.

GOLFSTRØMMEN og Europas fremtidige klima



Hvis Golfstrømmen stopper, vil temperaturerne i Nordvesteuropa falde 6-10 °C. Visse oceanografiske modeller foreslår, at dette vil kunne ske indenfor ganske få år. I denne artikel argumenterer vi for, at en sådan udvikling er højst usandsynlig.

Om forfatterne



Tine Rasmussen er professor ved Norges Arktiske Universitet, Tromsø, Norge



Erik Thomsen er lektor emeritus, Institut for Geoscience, Aarhus Universitet. erik.thomsen@geo.au.dk

Golfstrømmen er en del af et større system af havstrømme, der kaldes AMOC – *Atlantic Meridional Overturning Circulation*. Det er dette system, der bringer varmt vand fra subtropene op til Europas kyster og holder klimaet i for eksempel Danmark mildt og relativt varmt. Uden Golfstrømmen ville vintertemperaturerne i Vesteuropa falde 6–10 °C. Golfstrømmen er altså afgørende for det klima, vi kender i dag.

AMOC fungerer som et kredsløb i havet:

- Varmt vand strømmer fra tropene mod nord i overfladen.
- I de nordligste dele af Nordatlanten afkøles det varme vand om vinteren og bliver koldere og tungere.
- Det tunge vand synker mod havbunden og strømmer tilbage mod syd som en kold bundstrøm.
- Dette driver hele strømcyklussen frem, idet det udstømmende bundvand giver plads til, at varmt overfladevand fortsat kan strømme mod nord.

- AMOC hjælpes dog også på vej af coriolis-kraften fra jordens rotation og af de vedholdende sydvestlige vinde, der dominerer Nordatlanten.

Nedsynkning af koldt vand foregår især i de nordiske have (Grønlandshavet, Islandshavet og sporadisk i Norskehavet) mellem Grønland og Norge. Her sker afkølingen, og nedsynkningen er meget stabil og foregår i stor skala. I mindre grad forekommer der også nedsynkning i Labradorhavet og Irmingerhavet men i disse områder er nedsynkningen forholdsvis ustabil, og den sker ikke hvert år og heller ikke samme sted eller i samme mængde.

Truer smeltevand Golfstrømmen?

I de senere år er der i flere forskerkredse opstået bekymring om, at AMOC i den nære fremtid kan blive svækket eller endda kollapse. Denne hypotese er blandt andet fremført af Stefan Rahmstorf fra Universität Potsdam og af en forskergruppe ved Universiteit Utrecht,

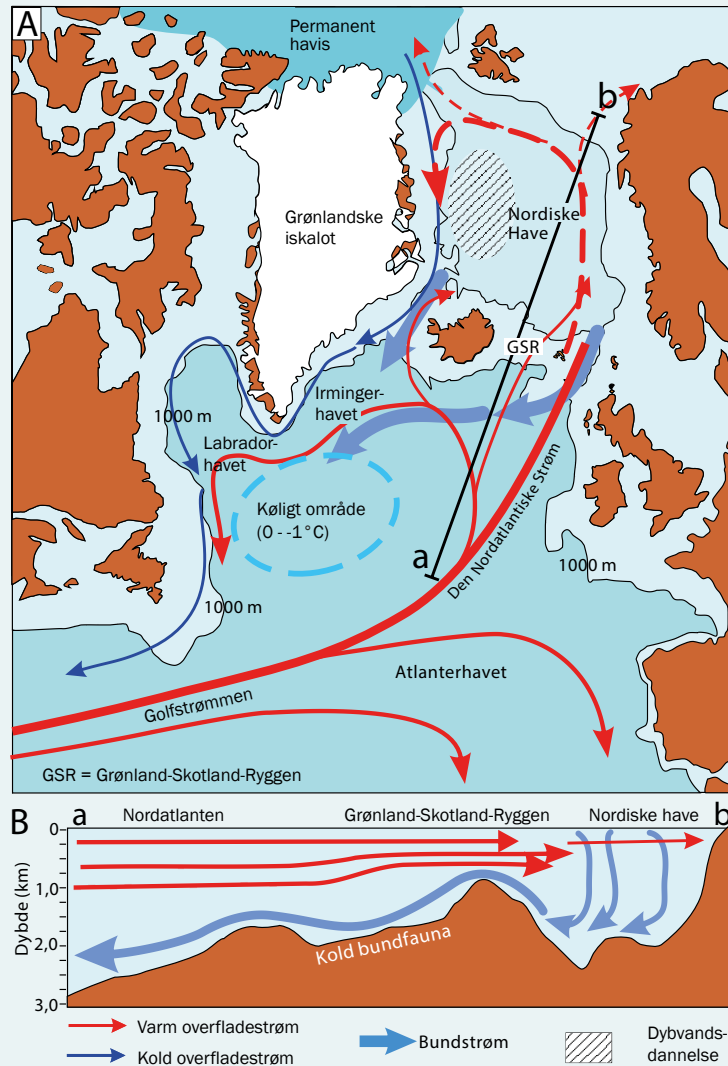
Holland, men danske forskere, blandt andet Peter Ditlevsen og Susanne Ditlevsen fra Københavns Universitet har også spillet en betragtelig rolle. Beregningerne, der bygger på moderne klimamodeller, advarer om, at der kan ske et kraftigt fald i AMOC's styrke indenfor få årtier – måske allerede indenfor 10 år. Klimamodellerne i dag er uhyre komplekse systemer, hvori man over tid kan ændre en lang række faktorer, der kan have betydning for forudsigelsen af klimaets udvikling i fremtiden. Modellerne kan også anvendes til vurdering af mulige ændringer i oceanerne og i deres strømsystemer. Det kan eksempelvis være ændringer i AMOC i en fremtid med stigende temperaturer.

Centralt for de beregninger, der blev omtalt i verdenspressen 2022–2025, er nedsynkningsområderne i Labradorhavet og Irmingerhavet uden at inddrage hovedområdet lokaliseret i de nordiske have. Udgangspunktet for undersøgelserne er, at temperaturerne i overfladevandet i et område sydøst for Grøn-

Det nordlige Atlanterhav i nutiden

A. Det nordlige Atlanterhav med generaliseret oversigt over de vigtigste strømsystemer i nutiden (mellemistid). Strømmene udgør den nordlige del af det strømsystem, vi kalder AMOC. Varmt subtropisk vand (Golfstrømmen og Den Nordatlantiske Strøm) strømmer nordpå ind i de nordiske have (røde pile), hvor det afkøles om vinteren og synker til bunds og flyder tilbage langs havbunden (lyseblå pile). Linjen a-b viser placeringen af nord-syd-profilet i figur B.

B. Varmt overfladevand strømmer over Grønland-Skotland-Ryggen (GSR) og afkøles i de nordiske have, og synker mod havbunden. Det kolde dybvand strømmer tilbage til Nordatlanten og giver plads til, at nyt varmt overfladevand kan strømme ind i de nordiske have. Afkølingen og nedsynkningen af varmt atlantisk vand i de nordiske have er den vigtigste pumpe i AMOC-systemet. Tilpasset efter Rasmussen og Thomsen (2004).



land indenfor de senere år er faldet med 0,5-1 °C sammenlignet med de omgivende havområder. Faldet kunne være forårsaget af en øget mængde smeltevand fra Grønlands indlandsis som følge af den menneskeskabte globale opvarmning. Det ferske smeltevand skulle gøre overfladevandet i Labrador- og Irminger-havene lettere, og dermed forhindre nedsynkning. Hvis tilførslen af ferskvand fortsætter med at stige, kan det medføre en alvorlig svækkelse eller stop af AMOC.

Mange forskere, heriblandt Steffen M. Olsen fra DMI, er dog skeptiske for disse teoretiske beregninger. De peger blandt andet på, at nedsynkningen i de berørte områder altid har været ustabil, og at den er sekundær i forhold til de vigtige

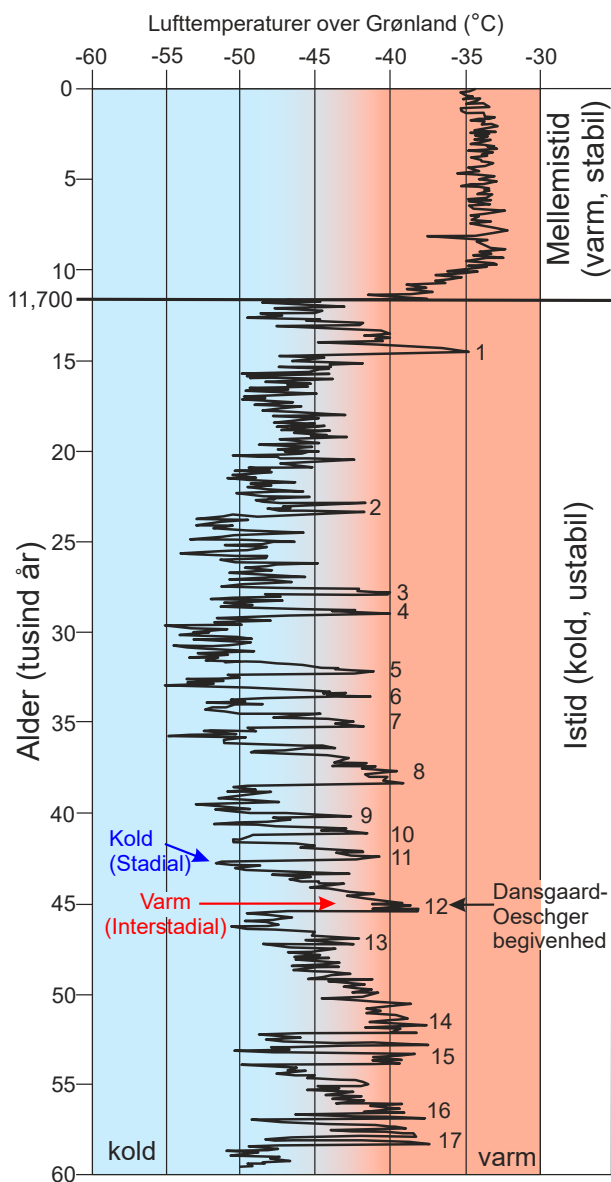
nedsynkningsområder i de nordiske have. Bogi Hanssen fra Faroe Marine Research Institute og mange andre forskere fremhæver desuden, at man indtil videre ikke har set tegn på en svækkelse af ind- og udstrømning af vandmasser fra de nordiske Have, lige som der ikke er stærke indikationer på en svækkelse af Golfstrømmen, hvor denne forlader den Mexicanske Golf. De nyeste målinger antyder faktisk, at strømningerne i begge områder er øget. Det må betyde, at nedsynkningen i Nordatlanten og i de nordiske have ikke er svækket.

AMOC under istiden

De moderne matematiske klimamodeler er udviklet til at estimere fremtidens udvikling indenfor en lang række områder. Det vil øge tro-

værdigheden af modellernes forudsigelser om mulige ændringer i en ukendt fremtid, hvis man kan vise, at modellerne korrekt kan beskrive kendte ændringer i fortiden. Eksempelvis vil det styrke modellernes forudsigelse om en fremtidig nedlukning af AMOC, hvis man kan påvise, at AMOC tidligere har været lukket ned under omstændigheder, der kan sammenlignes med nutidens. Her henviser flere af disse forskere til forholdene under sidste istid, da AMOC lukkede ned eller svækkedes kraftigt mindst 25 gange.

Det nuværende strømsystem i Atlanterhavet har været stabilt siden slutningen af seneste istid for cirka 11.700 år siden. Disse stabile klimatiske forhold står i modsætning til forholdene under istiden, der var



Modificeret efter McNeall et al. (2011), Climate Change 2, 663-686

Temperaturudviklingen over Grønland gennem de seneste 60.000 år baseret på forholdet mellem oxygenisotoperne ^{18}O og ^{16}O målt i de grønlandske iskerner. Bemærk de store forskelle mellem de varme stabile forhold gennem de seneste cirka 11.700 år og ustabiliteten under den forudgående istid, hvor kulden utallige gange blev brudt af kortvarige opvarmninger kaldet Dansgaard-Oeschger-begivenheder.

stærkt ustabile. Resultater fra de grønlandske iskerner viser, at i perioden fra cirka 115.000 år til cirka 15.000 år siden kunne temperaturerne over Grønland stige og falde med op til 10-16 °C på få årtier. Iskernerne dokumenterer, at dette skete mindst 25 gange siden sidste stabile varmeperiode Eem, der varede i cirka 10.000 år. Udsvingene kaldes Dansgaard-Oeschger-begivenheder, og de skyldes givetvis ændringer i luftmasserne omkring Grønland. Den egentlige årsag til fluktuationerne er sandsynligvis ændringer i AMOC, og de forskere, som mener at AMOC i dag pludselig

kan standse, henviser da til istidens temperaturspring som eksempler på, at sådanne nedlukninger faktisk er sket i fortiden. Men som vi vil påvise i det følgende, er årsagen til istidens fluktuationer usammenlignelige med de ændringer, de matematiske modeller siger, kan ske i fremtiden.

AMOC i dag sammenlignet med istiden

Som følge af svingninger i jordaksens hældning og i jordens bane omkring solen svinger jordens klima mellem relativt varme perioder, der varer i cirka 10.000-15.000 år,

og kolde perioder, der varer i cirka 100.000 år. De varme perioder kaldes mellemstider; de kolde perioder kaldes istider. De seneste cirka 11.700 år har forholdene været varme. Før den tid var forholdene koldere og mellem 80.000 og cirka 15.000 år siden var klimaet så koldt, at Skandinavien, inklusive Danmark, i lange perioder var dækket af en mere end 2 km tyk iskalot. Gennemsnitstemperaturen på den nordlige halvkugle var cirka 7-10 °C lavere end i dag.

Det nordlige Atlanterhav blev dækket af havis som det Arktiske Ocean i dag. Isen nåede ned til en linje ud for Portugal. På samme måde som i det Arktiske Ocean var saliniteten i overfladevandet under isen reduceret. Isdækket og den nedsatte salinitet umuliggjorde nedsynkning, og AMOC var stærkt reduceret. Disse forhold burde have været permanente og ubrydelige gennem hele den kolde del af istiden. Når dette ikke var tilfældet, således som Dansgaard-Oeschger-begivenhederne og de pludselige opvarmninger viser, skyldes det en række specielle forhold knyttet til den Nordatlantiske geografi. Området udgør således ikke et sammenhængende bassin, men er delt i to af en højderyg fra Grønland til Skotland, Grønland-Skotland-Ryggen. Over denne er vanddybden bare 500-800 meter sammenlignet med 2 til mere end 3,5 kilometer i de nordiske have nord for ryggen og 4-5 kilometer i det centrale Atlanterhav syd for ryggen.

De specielle forhold betød for det første, at AMOC ikke var helt slukket, idet coriolis-kraften og nordøstenvinden fortsat pressede på; dog skete indstrømningen af atlantisk vand til de nordiske have meget langsommere end i nutiden. For det andet skete indstrømningen i dybet under det lette overfladevand. I de nordiske have blev det dybere hav gradvist opvarmet. Opvarmningen kan ses i bunddyrsfaunaen, der afspejler de stadig højere temperaturer, og ved hjælp af geokemiske målinger, der viser 3-6 grader højere temperaturer

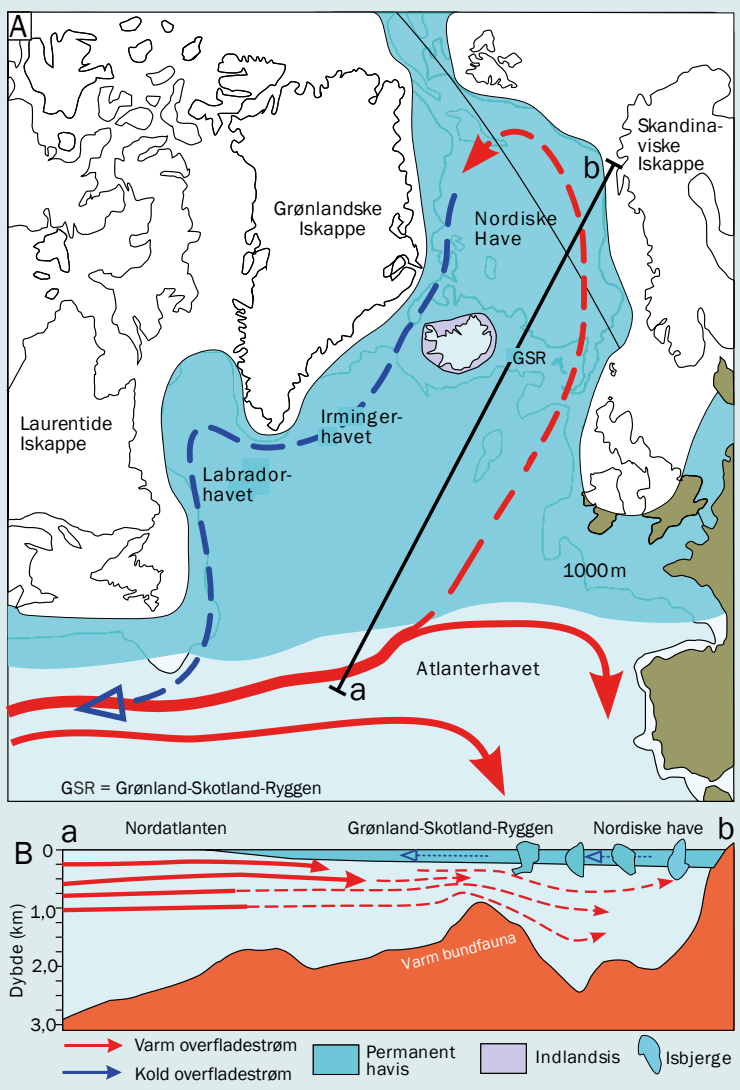


Hvis Den Nordatlantiske Strøm standser, vil der ske et temperaturfald på 6 °C og 10 °C. Ved et årsgennemsnit på 3,3 °C (som Harstad i Norge ved foden af Lofoten) vil skoven være åben og hovedsagelig bestå af birk, pil og nåletræer. Den naturlige pattedyrsfauna består af rensdyr, elg, ulv, polarræv, los, jærv og bjørn. Landbrug med kornavl er ikke mulig. Foto: Colourbox.

Det nordlige Atlanterhav under istiden

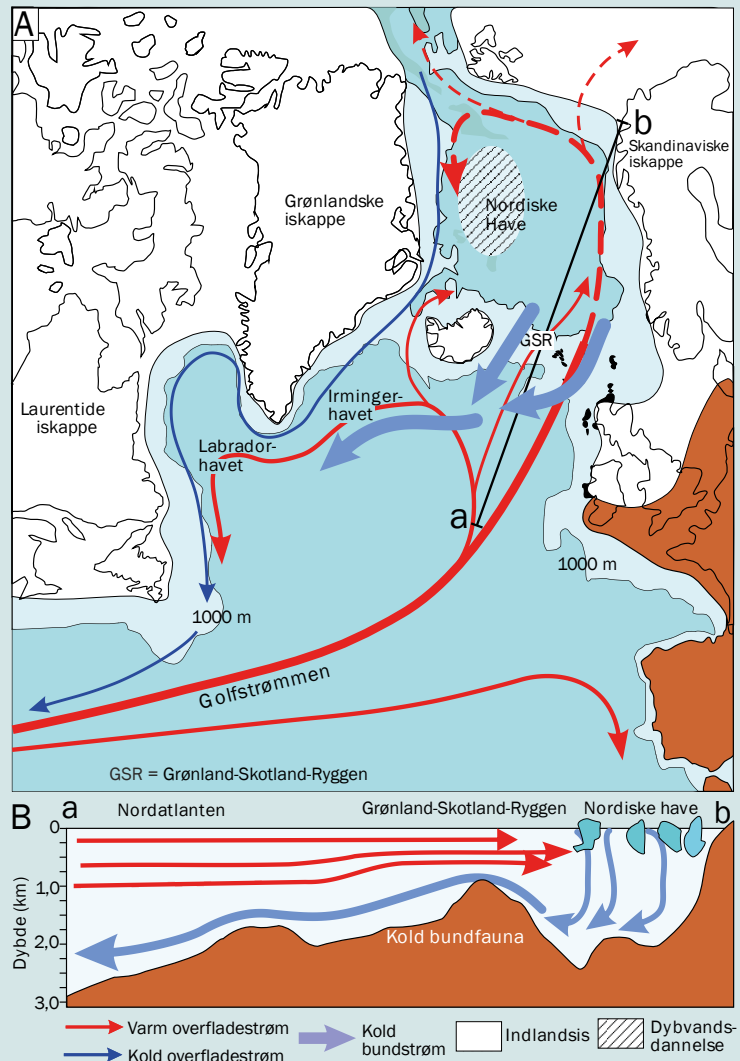
A. Udbredelsen af indlandsis og havis i det Nordatlantiske område under de koldeste perioder af sidste istid. Nordatlanten var i lange perioder under sidste istid omgivet af kæmpemæssige iskapper (markeret med hvidt på figuren). De vigtigste var den skandinaviske iskappe, de islandske og grønlandske iskapper samt den nordamerikanske Laurentide-iskappe. I de koldeste faser af Dansgaard-Oeschger-begivenhederne nåede havisen ned til den iberiske halvø.

B. Golfstrømmen og den Nordatlantiske Strøm var stærkt svækkede, og løb ikke længere i overfladen, men under havisen. I de nordiske have varmedes de dybere vandmasser langsomt op (baseret på Rasmussen og Thomsen, 2004).



Det nordlige Atlanterhav under istiden – varm fase / interstadial

Udbredelsen af indlandsis efter, at de opvarmede dybe vandmasser har brudt igennem havisen i de nordiske have. AMOC genetableres, og temperaturerne i det nordatlantiske område stiger. Vi er i Dansgaard-Oeschger-begivenhedernes varmeste fase (se figuren med temperaturudviklingen over Grønland). Dog kun for en kort stund, for de højere temperaturer udløser en øget tilførsel af smeltvand fra de omgivende iskalotter. Smeltvandet sænker overfladevandets temperatur og massefylde, og nedsynkningen går langsomt i stå. Iskalotterne vokser igen og sender flere og flere isbjerge ud, og til sidst kolliderer AMOC. Vi er på vej ind i Dansgaard-Oeschger-begivenhedernes kolde fase. Tilpasset efter Rasmussen og Thomsen (2004)



end i dag. Det vil sige, at fra cirka 300 meters og ned til næsten 2 kilometers dybde kunne temperaturerne stige med op til 6 °C. For det tredje dannede Grønland-Skotland-Ryggen en dyb spærre mellem de nordiske have og det nordlige Atlanterhav. Det varme vand ophobede sig nord for ryggen, hvor vandet blev varmere og varmere. Til sidst blev opvarmningen så stor, at det varme (og salte) bundvand blev lettere end det kolde isede overfladevand. Det trængte igennem til havoverfladen og kunne nu afgive sin varme til atmosfæren. Den opbrudte havis i de nordiske have og det nordlige Atlanterhav forsvandt, nedsynkningen gik i gang på ny, og AMOC blev genoprettet. Over det nærliggende Grønland steg temperaturerne med op til 16 °C. Opvarmningen var uhyre brat og tog

måske mindre end 10-20 år. Fasen med maksimum-temperaturer var dog kortvarig, for med varmen steg tilførslen af smeltvand fra de omgivende iskalotter, og gradvist blev overfladevandet igen lettere end det dybe vand, havisen bredte sig, og gradvist gik AMOC i stå igen. Næste nedfrysning kunne begynde.

Betydningen af ferskvandstilførsel

Klimaspringene, der udgør Dansgaard-Oeschger-svingningerne, består altså af to dele: en brat opvarmning efterfulgt af en langsom nedkøling. Opvarmningen skyldes opstigende varmt vand fra neden. Tilsvarende processer kendes kun i beskedent omfang fra det marine miljø i nutiden. Årsagen til den følgende nedkøling er udledning af

let smeltvand, der lægger sig som et koldt låg ovenpå det varmere bundvand. Denne del af Dansgaard-Oeschger ligner de processer, som de fleste modelforskere arbejder med, når de beregner, om tilførsel af ferskvand kan standse AMOC i nutiden.

Det betyder dog ikke, at nutidens og istidens nedkølingsfaser kan sammenlignes. De geografiske forhold var nemlig voldsomt forskellige. I dag dækker indlandsis på den nordlige halvkugle cirka 1,8 millioner kvadratkilometer, hvoraf den grønlandske indlandsis udgør mere end 95%. Under istidens koldeste fase for 30.000-22.000 år siden, hvor Dansgaard-Oeschger-begivenhederne var hyppige, dækkede de nordlige iskalotter mindst 30 mil-

lioni kvadratkilometer eller cirka 15 gange mere end i dag (se figur). Til sammenligning dækker isen på Antarktis 14,2 millioner kvadratkilometer med kun små forskelle mellem istid og nutid. Det er også vigtigt at notere sig, at under istiden stod isranden omkring det nordlige Atlanterhav langs kontinentalranden og var i direkte kontakt med oceanerne. I nutiden har isranden de fleste steder på den nordlige halvkugle trukket sig tilbage fra kysten og for det meste langt ind i fjordene.

Hver gang temperaturerne steg i forbindelse med Dansgaard-Oeschger-begivenhederne må enorme mængder af ferskvand have strømmet ud i det nordatlantiske område. De sparsomme data tillader dog ikke en direkte kvantitativ sammenligning mellem tilførslen i nutid og tilførslen under Dansgaard-Oeschger-begivenhederne.

8200-års begivenheden

Den Grønlandske Indlandsis er i dag næsten den eneste kilde til smeltevand og isbjerger til Atlanterhavet. Siden slutningen af istiden for cirka 12.000-10.000 år siden har AMOC været relativt stabil. Der indtraf dog for cirka 8200 år siden et temperaturfald, som yderligere kan belyse ferskvands betydning for temperaturerne på den nordlige halvkugle. Faldet varede cirka 150 år. I de grønlandske iskerner har man registreret et temperaturfald på cirka 2 °C. Årsagen til denne begivenhed var et kollaps af den sidste rest af Laurentide-iskappen på det nordamerikanske kontinent, samt en tømning af de søer, som isen havde holdt opdæmmet. Ifølge de nyeste estimater strømmede der på få år cirka 500 billioner tons is og koldt ferskvand ud i det nordvestlige Atlanterhav. Det skal sammenlignes med, at den samlede mængde smeltevand fra den grønlandske indlandsis gennem de seneste 20 år er estimeret til cirka 5 billioner tons eller 100 gange mindre end udledningen under 8200-års begivenheden. Alligevel medførte denne episode kun et

forholdsvist beskedent temperaturfald i Europa på 1-1,5 °C. Det er her vigtigt at påpege, at på trods af de enorme mængder af koldt ferskvand, der blev udløst for 8200 år siden, så kollapsede AMOC ikke, selv ikke på kort sigt.

Nye perspektiver

En af de faktorer, der påvirkes af den globale temperaturstigning, og som har stor betydning for stabiliteten af AMOC, er massefylden af overfladevandet i Nordatlanten. Når massefylden falder, vil nedsynkningen blive vanskeligere. Da nedsynkningen er den største pumpe for AMOC, vil denne blive langsommere og måske helt kollapse.

Indenfor det seneste år er der sket et betydeligt skifte i en hollandsk forskergruppes vurdering af årsagerne til mulige ændringer i massefylden i disse nordlige farvande. I en artikel fra 2025 af Sybren Drijfhout og kolleger fra Universiteit Utrecht bliver smeltevand fra Grønland tillagt langt mindre betydning end hidtil.

Disse forskeres udgangspunkt er, at saliniteten og massefylden i Nordatlanten og i de nordiske have i dag er forholdsvis høj. Det skyldes, at Golfstrømmen og den nordatlantiske strøm tilfører højsalinitet overfladevand fra det varmere subtropiske og tropiske Atlanterhav. Ved en svækkelse af AMOC vil denne transport af saltrigt vand formindskes med det resultat, at massefylden i Nordatlanten og i de nordiske have falder. Det betyder, at AMOC svækkes yderligere. Der er således opstået et selvforstærkende feed-back system mellem det nordlige og sydlige Atlanterhav, hvorved saliniteten og massefylden i nord bliver stadig lavere. På basis af deres modeleksperimenter mener disse forskere, at det afgørende skæringspunkt, hvorefter et kollaps er uundgåeligt, sandsynligvis vil passeres indenfor de næste 10-20 år. Men det egentlige sammenbrud af AMOC vil dog først indtræffe 50-100 år senere, altså en meget langsommere proces end den, som

de mest alarmistiske forskere fremfører. Hvad der til en begyndelse sætter feed-back-processen i gang er uklart. En mulig forklaring kunne være den globale opvarmning.

Som det fremgår af denne artikel, er modelforskerne for tiden langt fra enige om betydningen af helt centrale punkter i deres modeller som effekten af Grønlands smeltevand. Ifølge nogle modeller har den en afgørende betydning; ifølge andre er den uden betydning. Mange modelforskere synes at mangle overvejelser om, hvorvidt de opstillede scenarier overhovedet er realistiske. Der er dog undtagelser. Således påpeger Sybren Drijfhout og kolleger i deres artikel fra 2025, at et abrupt kollaps (det vil sige på mindre end 30 år) af AMOC vil kræve massive, ikke-realistiske tilførsler af ferskvand til Nordatlanten.

Alt i alt må vi konstatere, at hypoteserne om et snarligt kollaps af AMOC er kontroversielle, og at datagrundlaget for modellerne er tyndt. Der mangler tydeligvis brugbare data, ikke mindst om oceanernes udvikling i de seneste cirka 100 år.

Afslutningsvis, vil vi påpege, at flere forskere (for eksempel omtalte Drijfhout og kolleger) giver udtryk for, at de katastrofale temperaturfald, der teoretisk set vil ramme Nordvesteuropa, hvis AMOC kollapse, måske slet ikke vil indtræffe, men blive kompenseret for af den generelle globale opvarmning, der følger af udledningen af drivhusgasser. Det betyder ikke, at nedsynkningen i de nordlige farvande nødvendigvis vil være uden betydning. Måske flytter den bare nordpå ind i det Arktiske Ocean.

Selvom vi anser en katastrofal kollaps af AMOC som følge af menneskeskabt opvarmning for usandsynlig, er andre konsekvenser af den fortsatte udledning af drivhusgasser dog uundgåelige og potentielt lige så alvorlige som et stop af Golfstrømmen. Det kan for eksempel være stigninger i havniveauet og forskydninger i klimabælterne. ■

Videre læsning

Ditlevsen, P., Ditlevsen, S. (2023). Warning of a forthcoming collapse of the Atlantic meridional overturning circulation. *Nature Communications* 14:4254.

Drijfhout, S., et al (2025). Shutdown of northern Atlantic overturning after 2100 following deep mixing collapse in CMIP6 projections. *Environmental Research Letters* 20, 094062.

Hansen, B., Larsen, K. M. H., Hátún, H., Olsen, S. M., Gierisch, A. M. U., Østerhus, S., Ólafsdóttir, S. R. (2023). The Iceland-Faroe warm-water flow towards the arctic estimated from satellite altimetry and in situ observations. *Ocean Science* 2023, 1-42.

Rahmstorf, S. (2024). Is the Atlantic overturning approaching a tipping point? *Oceanography*.

Rasmussen, T. L., Thomsen, E., (2004). The role of the North Atlantic Drift in the millennial timescale glacial climate fluctuations. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 210, 101-116.

Stevns Klint. Her ses tydeligt lagene af kridt fra Kridttiden nederst og den hårde mosdyrkalk (bryozokalk) fra Palæogentiden øverst.
Foto Rudy Hemmingsen

VERDENS SIDSTE AMMONITTER

– fundet ved Stevns Klint

Ammonitterne er en forhistorisk gruppe af blæksprutter, der ifølge alle lærebøger uddøde i slutningen af Kridttiden for 66 millioner år siden ved den store masseuddøen, der også udryddede dinosaurerne. Men nye fund fra Stevns Klint viser, at nogle få arter overlevede i mindst 60.000 år efter katastrofen.

Forfatterne



Jesper Milån er palæontolog og Museumsinspektør på museet KALK, der er en del af Østsjællands Museer. Han forsker især i fossilerne fra kridtet og kalken i Danmark og dyrelivets udvikling omkring Kridt-Palæogen-grænsen.
jesperm@oesm.dk



Marcin Machalski er Professor ved Institute of Paleobiology of Polish Academy of Sciences i Warszawa, Polen. Han forsker især i ammonitter fra kridttiden og Kridt-Palæogen-grænsens påvirkning på datidens økosystemer.
mach@twarda.pan.pl

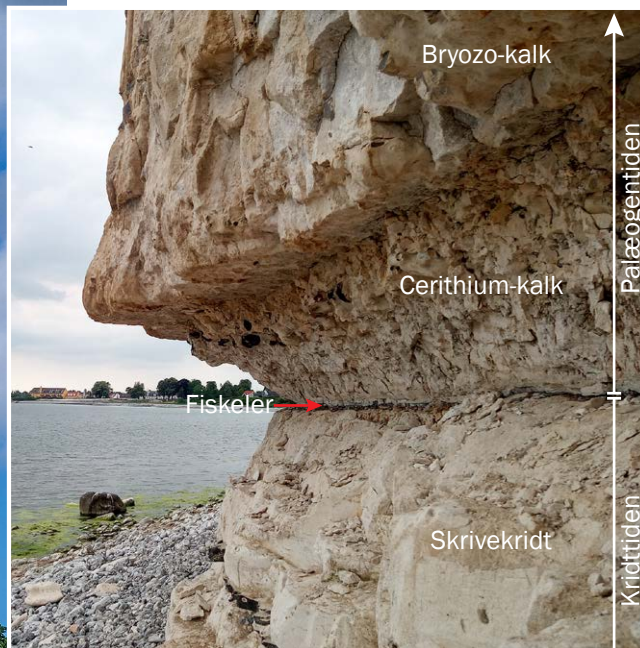
Stevns Klint er med sine fantastiske klinger af kridt og kalk en verdensberømt geologisk lokalitet. Det skyldes, at klinten, viser grænsen mellem de to geologiske tidsperioder Kridt og Palæogen for 66 millioner år siden, som markerer en af de største katastrofer i livets historie. Dengang blev Jorden formentlig ramt af en asteroide på omkring 10 kilometer i diameter, der udløste så enorme ødelæggende kræfter, at op mod 75 procent af alle arter – fra mikroskopiske alger i havet til de kæmpestore dinosaurer på land – uddøde. Blandt de organismer, der tilsyneladende uddøde, var ammonitterne – en stor gruppe af blæksprutter kendt for deres smukke oprullede skaller, og som er blandt de mest kendte og ikoniske fossiler i verden.

Selve den katastrofale begivenhed er i Stevns Klint repræsenteret ved et tyndt lerlag, der kaldes Fiskeleret. Lige over Fiskeleret findes et lag af hærdet kalk kaldet Cerithiumkalken, og det repræsenterer de første cirka 200.000 år af palæogen-tiden, der begyndte efter den store masseuddøen. I dette kalklag har vi nu fundet beviser for, at en bestand af ammonitter faktisk overlevede katastrofen på Kridt-Palæogen-grænsen – måske helt op til 200.000 år efter, at man har regnet dem for uddøde på verdensplan.

Succesfulde blæksprutter

Ammonitterne var en ekstrem succesfuld gruppe af blæksprutter, der opstod helt tilbage i den geologiske tidsperiode kaldet Devon-

tiden for omkring 400 millioner år siden. De udviklede sig hurtigt og spredte sig ud over hele verdens oceaner. De fandtes i størrelser fra få centimeter helt op til over to meter i diameter. Langt de fleste ammonitter havde skaller, der var oprullet i en flad spiral, der nogle gange havde indviklede mønstre af riller og små horn voksende ud af skallen. Men nogle af dem udviklede mere løst oprullede skaller, og andre udviklede lange, lige, kræmmerhusformede skaller. Andre igen startede som oprullede, men "rettede" sig efterhånden ud, når de havde nået en vis størrelse. Andre igen havde skaller, der nærmest havde form som en papirklips eller en sammenrullet kugle. Der er beskrevet over 10.000 arter af fossile ammonitter fra hele verden,



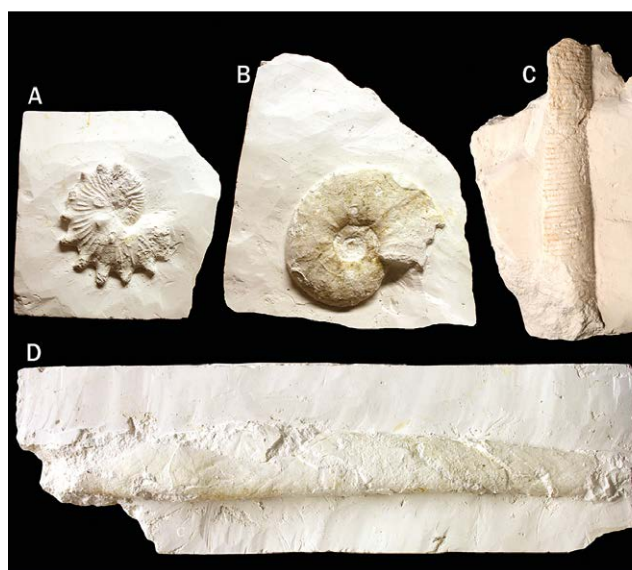
Nærbillede af grænselaget i Stevns Klint, taget lige nord for Rødvig. Nederst ses skrivekridt fra Kridttiden. Det tynde lag af Fiskeler repræsenterer den geologiske grænse mellem Kridt- og Palæogen-tiden, hvor der skete en masseuddøen af arter. Over Fiskeleret findes et lag af Cerithiumkalk, der blev dannet i de første cirka 200.000 år af Palæogen-tiden. Øverst ses bryzokalk. Foto: Jesper Milån.



Nautiler og ammonitter kan kendes fra hinanden på formen på suturlinjerne mellem kamrene i skallen. Til venstre ses en typisk nautil af slægten *Eutrephoceras* fundet i Faxe Kalkbrud. Her er suturlinjen en simpel, svagt buet linje. Til højre ses et fragment af en ammonit af slægten *Baculites* fra Stevns Klint. Her danner suturlinjerne komplekse, bølgede former. Fotos: Jesper Milån & Sten Lennart Jakobsen.

og fordi de er så talrige som fossiler, og desuden var en dyregruppe, der hurtigt udviklede forskellige nye arter, bruges ammonitter ofte til at aldersbestemme geologiske lag med.

Ammoniternes skaller er opbygget på samme måde som hos deres nulevende slægtninge nautilerne. Selve dyret sidder i et beboelseskammer, den kan trække sig ind i. I takt med, at blæksprutten vokser, udvider den beboelseskammeret med en lidt større diameteråbning, og den smalle bagerste del af kammeret snøres af med en skillevæg. Ser man et tværsnit gennem skallen hos en ammonit, ser man derfor forrest et stort beboelseskammer, og så bagved en række gradvist mindre kamre adskilt med



- A. *Hoploscaphites*. Oprullet ammonit med tynde ribber og pigge på skallen.
- B. *Pachydiscus*. Ammonit med brede, bølgede ribber i skallen.
- C. *Diplomoceras*. Ammonit med lige skal med små bølger.
- D. *Baculites*. Ammonit med lang, glat og lige skal.

Foto: Jesper Milån

Typiske ammonitter fra Kridttiden fundet ved Stevns Klint. De nævnte navne er slægtsnavne – en slægt rummer typisk flere forskellige arter. Vi ved nu, at slægterne *Hoploscaphites* og *Baculites* samt *Fresvilia* (vist på næste figur) faktisk overlevede katastrofen på grænsen mellem kridttiden og palæogentiden.

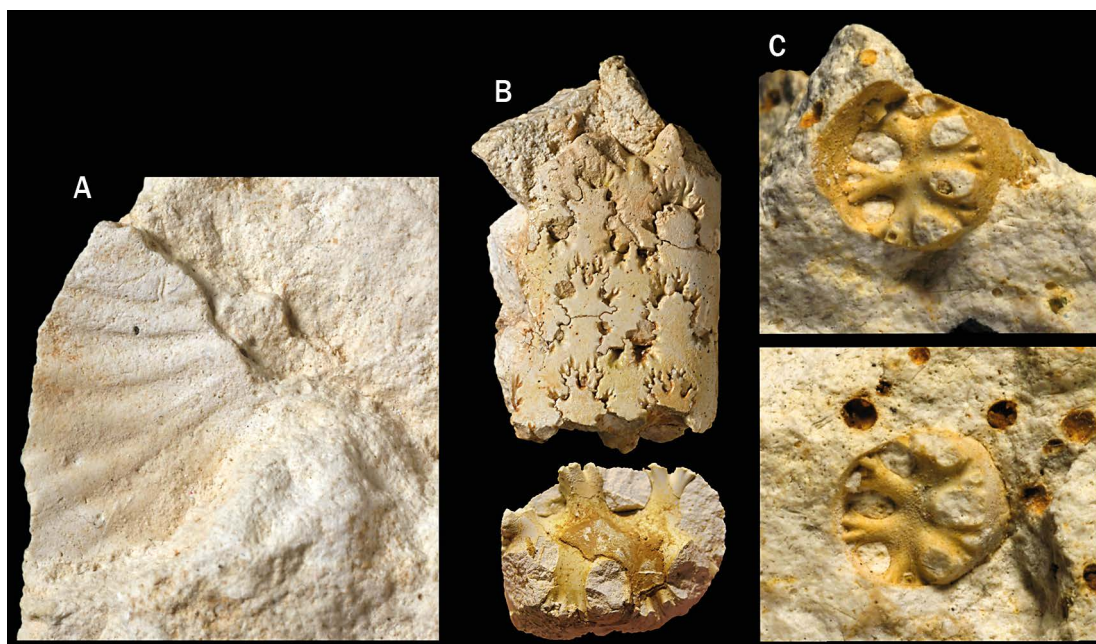


Foto: Marcin Machalski

Eksempler på ammonitter fundet i Cerithiumkalken ved Stevns Klint. A. Den oprullede ammonit *Hoploscaphites*, B. *Baculites*, en ammonit med lang, lige skal og ovalt tværsnit. C. *Fresvilia*, en ammonit med lang, lige skal med cirkulært tværsnit.



Foto: Shutterstock

Tværsnit af en ammonitskal, hvor man tydeligt kan se de mange gamle beboelseskamre, der er snørret af med en skillevæg i takt med, at ammonitten er vokset. Skallen kommer ikke fra Danmark.

buede skillevægge. Alle de gamle afsnørede kamre er forbundet med et tyndt rør (kaldet en siphon), som blæksprutten kan bruge til at pumpe enten gas eller vand ud i gamle kamre med, så den kan justere sin position i vandet. Hos de moderne nautiler er væggene mellem kamrene bare en simpel bue, men hos ammonitterne danner kanten af kammervæggene komplekse, sindrigt bølgende former, der varierer fra art til art, og derfor kan bruges til at skelne arter fra hinanden.

En lille gruppe overlever

Som nævnt har den gængse opfattelse været, at ammonitterne uddøde i slutningen af Kridttiden for 66 millioner år siden.

Men gennem de seneste årtier er der dukket fund op ved Stevns Klint, ved Maastricht i Holland og i New Jersey i USA, der tyder på, at nogle ammonitter overlevede i en periode efter den store masseuddøen. Disse fund var imidlertid få, og kunne ikke altid bekræftes fuldstændigt.

Nu har vi sammen med kolleger fra Polen, USA og Holland i et nyt grundigt studie baseret på gamle og nye fund fra Stevns Klint imidlertid endegyldigt påvist, at nogle få arter af ammonitter har overlevet den store masseuddøen i en periode.

Ammonitterne er fundet i Cerithiumkalken, helt op til 38 centimeter over Fiskeleret, hvilket giver en omtrentlig alder på mindst 60.000 år efter den store masseuddøen. De arter af ammonitter, der indtil videre er fundet rester af i Cerithiumkalken, tilhører tre forskellige grupper (slægter). Den mest almindelige er den oprullede form *Hoploscaphites*, og derefter den lige ammonit *Baculites*. Derudover er der fundet et enkelt eksemplar af en anden lige ammonit af slægten *Fresvilia*. Den kan kendes fra *Baculites* ved, at skallen hos *Baculites* er oval i tværsnit, hvor den er cirkulær hos *Fresvilia*. Mærkeligt nok er *Fresvilia* ikke tidligere fundet i det Danske kridt, og kendes derfor hidtil kun fra kridtet i udlandet.

Datering af ammonitterne

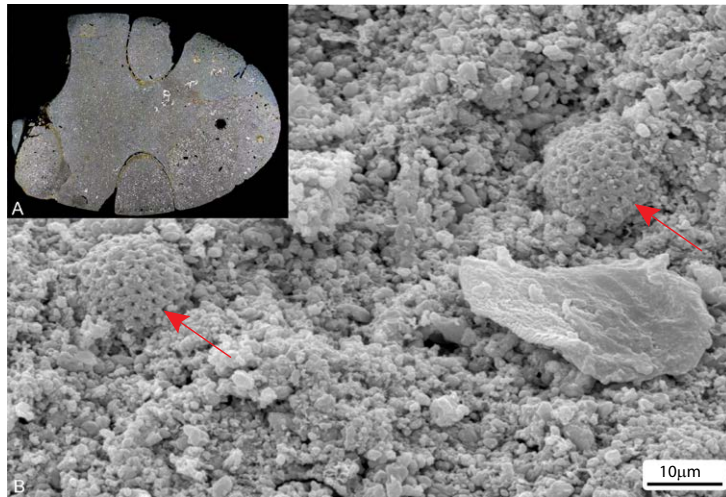
Det afgørende i dette studium har altså været at kunne vise, at de ammonitter, der er fundet over grænselaget (dvs. Fiskeleret), der

markerer slutningen af Kridttiden, virkelig var fra Palæogen-tiden. Når man finder et fossil i et bestemt lag, kan det nemlig godt "snyde med sin alder", hvis fossilet er blevet omlejret. Det betyder for lagene ved Stevns Klint, at fossiler på et tidspunkt i den geologiske historie kan være blevet eroderet fri af kridtet fra Kridttiden og siden begravet på ny i yngre lag. På den måde kan der opstå lag, hvor man finder fossiler af forskellige aldre sammen.

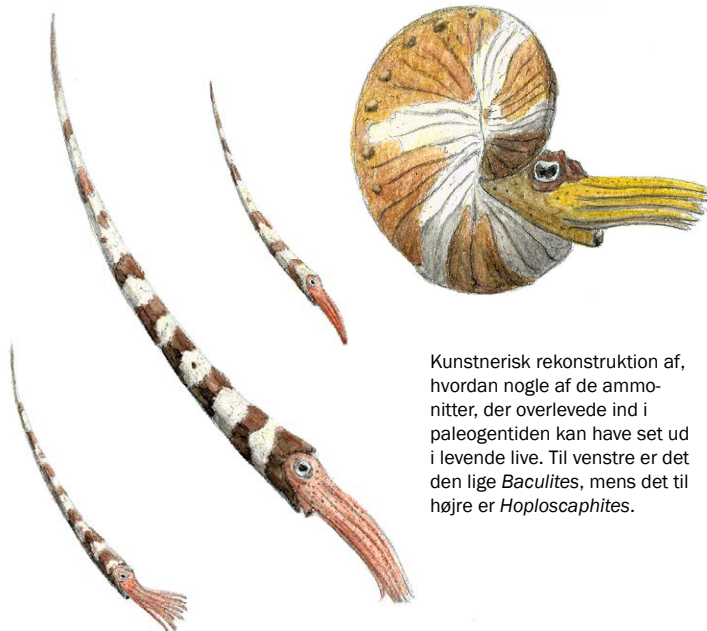
Når man hidtil har betvivlet, at ammonitter fundet i Cerithiumkalken var fra palæogen-tiden, har netop omlejring været hovedargumentet. Heldigvis er ammonitterne fra Stevns Klint bevaret i kridt og kalk, og det er sedimenter, der er ret nemme at fastslå den relative alder på. Det skyldes, at kalken og kridtet hovedsageligt består af mikroskopiske kalkskaller fra alger og andre mikroorganismer, der levede i havet på det tidspunkt. Disse mikroorganismer ændrede deres skaller gennem tiden, og især lige omkring grænsen mellem Kridt- og Palæogen-tiden er der stor forskel på dem, der levede før og efter katastrofen.

Når en ammonit i datidens hav døde, sank den ned på havbunden og dens tomme skal blev derefter fyldt ud med slam fra havbunden i takt med, at den blev begravet. Det sediment, man finder inde i skallen på et ammonit-fossil, vil derfor stamme fra det tidspunkt, hvor dyret blev begravet. Ved at undersøge de mikrofossiler, kalken eller kridtet inde i fossilet består af, og sammenligne med dem, man finder i sedimentet udenom fossilet, kan man derfor afgøre, om fossilet er omlejret. Hvis mikrofossilerne indeni skallen og i sedimentet udenom er af forskellig alder, er fossilet sandsynligvis omlejret.

Vi har i vores studium grundigt undersøgt alle ammonitter fundet i Cerithiumkalken ved at skære ammonitterne igennem og undersøge indmaden af dem med et scanning-elektronmikroskop. Og vi kunne konkludere, at mikrofossilerne



Billede taget med scanning-elektronmikroskop af kalken inde i skallen af et eksempel af ammonitten *Baculites* (øverst til venstre ses et poleret tværsnit af skallen). De røde pile peger på eksemplarer af dinoflagellaten *Cervisiella operculata*, som er et typisk mikrofossil i Cerithiumkalken, men ikke findes i lag fra kridttiden.



Kunstnerisk rekonstruktion af, hvordan nogle af de ammonitter, der overlevede ind i paleogentiden kan have set ud i levende live. Til venstre er det den lige *Baculites*, mens det til højre er *Hoploscaphites*.

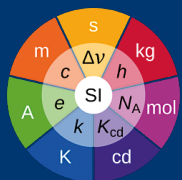
Illustration: El fossilmaniaco/via Wikimedia Commons/CC BY-SA 4.0

indeni ammonit-skallerne virkelig stammer fra Palæogen-tiden. Et eksempel på mikrofossiler, vi brugte, er såkaldte dinoflagellater. Det er en gruppe af encellede, havlevende organismer, der lever frit svævende i vandmasserne, og som danner mikroskopiske kalkskaller omkring sig. I ammonit-skallerne fandt vi blandt andet dinoflagellat-arten *Cervisiella operculata*, der ikke findes i Kridttiden, men som først opstår i starten af Palæogen-tiden. Det er et bevis på, at disse ammonitter også var fra Palæogentiden.

Som nævnt viser vores undersøgel-

se, at mindst tre forskellige slægter af ammonitter overlevede katastrofen ved slutningen af Kridttiden og mindst 60.000 år ind i den efterfølgende Palæogentid. To af disse slægter, *Hoploscaphites* og *Baculites*, er også fundet i Palæogene lag i Holland og New Jersey. Når de nye fund fra Stevns Klint nu bekræfter, at disse ammonitter stammer fra Palæogentiden, antyder det kraftigt, at også de hollandske og amerikanske fund har været "ægte overlevende". At ammonitterne overlevede katastrofen på Kridt-Palæogen-grænsen har dermed været et globalt fænomen. ■

Videnskabelig artikel:
Machalski, M., Olszewska-Nejbert, D., Landman, N.H., Jagt, J.W.M., Garb, M., Milàn, J. 2025. Ammonite survival across the Cretaceous–Palæogene boundary confirmed by new data from Denmark. *Scientific Reports* 15, 45802 (2025). doi.org/10.1038/s41598-025-34479-1



VAND, PLATIN OG NATURKONSTANTER:

Kilogrammet har været svært at få styr på

I handel og videnskab skal man ofte veje ting, og det kræver enighed om måleenheden. Til det har vi enheden kilogram, som dog har ændret definition gennem historien. I 2018 lykkedes det endelig at frigøre kilogrammet fra afhængigheden af en metalklump i Paris.

Om forfatteren
Henrik Bendix er
videnskabsjournalist.
bendix@vidmere.dk

Det var ikke nemt af være handelsrejsende i 1700-tallet, og da slet ikke, hvis man ville købe eller sælge efter vægt. De fleste steder i Europa havde hver købstad sin egen, lokale vægtenhed. Der kunne endda være forskellige vægtsystemer på samme markedsplads, alt efter varekategori og hvordan den skulle beskattes.

For eksempel var vægtenheden et pund, på fransk *livre*, ikke det samme i Paris og i Lyon. Det betød, at hvis en købmand tog fra Paris med 100 livres tekstiler, så var der kun 87 livres, når han kom frem til Lyon. Gik turen videre til Marseilles, vejede tekstilerne kun 81 livres her. Alene i Frankrig var der cirka 250.000 forskellige enheder for mål og vægt i brug. Det var noget rod.

For både købere og sælgere var det nemt at snyde og føle sig snydt, og både nationalt og internationalt bremsede det kaotiske virvar af lokale vægtenheder handlen. De mange forskellige måleenheder gjorde heller ikke noget godt for



Foto: Shutterstock

videnskaben, for det var svært at sammenligne og reproducere forsøgsresultater.

Fra lokale traditioner til universelt system

I slutningen af 1700-tallet var der en stærk idé blandt naturforskere om, at måleenheder burde være baseret på naturen. De skulle være reproducerbare overalt og uafhængige af autoriteter. Videnskabsmændene ønskede sig et rationelt og universelt system, der kunne afløse lokale traditioner.

I 1790 blev ideen om et universelt enhedssystem præsenteret for den

franske nationalforsamling, der midt under den franske revolution pålagde det franske videnskabsakademi at nedsætte en kommission for mål og vægt. Nogle af tidens mest fremtrædende videnskabsmænd, heriblandt Lagrange og Laplace, fik til opgave at udvikle det nye enhedssystem. De kom frem til, at det skulle være baseret på 10-talssystemet, så det er nemt at regne med.

De besluttede også, at den nye længdeenhed meteren skulle defineres som en timilliontedel af en fjerdedel af Jordens meridian, altså $1/10.000.000$ af afstanden fra ækvator til nordpolen langs meridianen gennem Paris. Rummål og vægt skulle baseres på denne længde.

Nationalforsamlingen var med på idéen, der blev til lov 7. april 1795. Her blev et gram (*gramme*) defineret som den absolutte vægt (masse) af et rumfang rent vand svarende til en kube med en sidelængde på en hundrededel af en meter, ved den temperatur, som is smelter ved. Et kilogram er så 1.000 gram.

Vand var besværligt

De nye enheder kom ikke ud af det blå. Tankerne bag dem havde floreret blandt europæiske videnskabsmænd i mere end hundrede år. Tilbage i 1668 argumenterede engelske John Wilkins for eksempel for et enhedssystem, hvor den fundamentale masseenhed skulle baseres på et bestemt rummål af regnvand.

Vand blev valgt som basis for masseenheden, fordi det er let tilgængeligt for alle, og vands smeltepunkt er nemt at finde. Man blander bare is med flydende vand og lader blandingen stå et øjeblik, mens man venter på ligevægt, så har man den rette temperatur. Det er ikke nødvendigt med et præcist termometer.

Men rent praktisk var vand svært at have med at gøre. Alene det at fremstille en beholder med det perfekte rumfang til vandet var en stor udfordring, og små luftbobler og opløste salte og gasser kunne ændre vandets massefylde, der også afhænger stærkt af temperaturen. Ganske små temperaturafvigelser kunne ødelægge målingerne.

Derfor blev det i 1799 besluttet at fremstille en mere håndgribelig og stabil reference i form af en lille cylinder af platin. Dette prototypekilogram fik samme masse som en kubikdecimeter rent vand ved den temperatur, hvor det har størst densitet (cirka 4 °C).

Sammen med en platinstang med en længde, som meteren nu blev defineret ud fra, blev normalkilogrammet placeret i det franske rigsarkiv i Paris. Dette "Kilogramme des Archives" kunne nu bruges som udgangspunkt for officielle kopier (og mindre værdifulde kopier af kopierne, for eksempel lodder af messing), som blev fragtet rundt i Frankrig og brugt til at fremstille lokale kopier og kalibrere vægte. Senere blev kopier også sendt til andre europæiske lande, der så småt begyndte at bruge meter og kilogram.



Den internationale prototype fra 1879 af kilogrammet, forkortet IPK og ind imellem kaldt Le Grand K. Det er en cylinder på ca. 39 mm i højde og diameter, som er lavet af en legering af 90 % platin og 10 % iridium (densitet ca. 21.500 kg/m³). Hele tre glasklokker beskytter Le Grand K.

Foto: BIPM/CC BY-SA 3.0 IGO

Kilogram kommer fra græsk

Ordet gram kommer oprindeligt fra det oldgræske *grámma* (γράμμα), der betyder noget skrevet. Vi kender ordet fra grammatik, men på latin kom ordet til at betyde en lille vægt eller et lille lod, og det er derfra, det franske gramme og det danske gram kommer. Kilo kommer fra det oldgræske khilioi (χίλιοι), der betyder tusind.

Meterkonventionen

I praksis tog det en del år at gå fra de lokale enheder, som folk var vant til, til de nye enheder for længde og masse. Folk foretrak de måleenheder, de kendte, og

i Danmark havde vi allerede et fornuftigt system for mål og vægt takket være astronomen Ole Rømers store indsats i slutningen af 1600-tallet. Her var et pund defineret som vægtigheden (dvs.

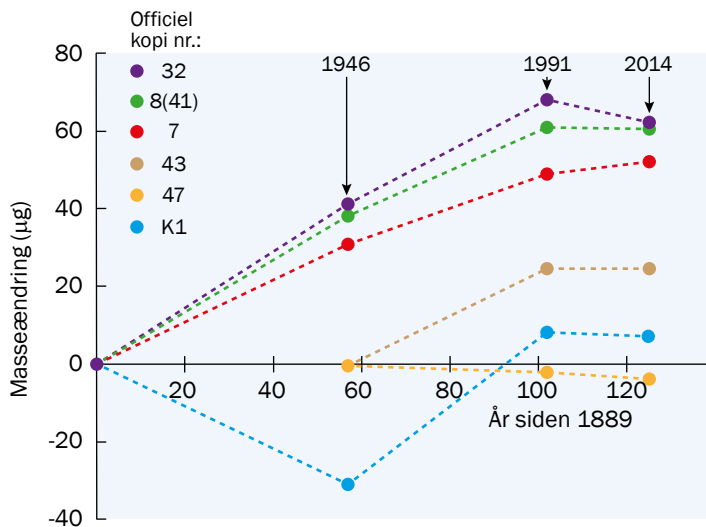
I et projekt kaldet *The International Avogadro Project* forsøgte en gruppe forskere at finde Avogadros konstant ved at tælle atomer i verdens mest perfekte og rundeste siliciumkugle. Her ses kuglen af silicium-28 i krystalform. Foto: NIST



Nyt kilolod blev standarden

Med traktaten blev der stiftet et internationalt bureau for mål og vægt, *Bureau international des Poids et Mesures*, forkortet BIPM, med hovedsæde i Paris. Det blev også besluttet, at der skulle fremstilles nye, internationale prototyper af meteren og kilogrammet.

Det nye kilogram blev støbt af en legering af 90 procent platin og 10 procent iridium. Legeringen gjorde cylinderen mekanisk hårdere og mere slidstærk end forgængeren af ren platin. Med en diameter og højde på cirka 39 millimeter er den omtrent på størrelse med en golfbold, og den dag i dag kan man stadig finde den placeret sikkert under tre glasklokker i en boks i kælderen hos BIPM.



Udviklingen af massen af de forskellige kopier af det officielle kilogram (IPK) siden den første kalibrering i 1889 (kopierne nr. 43 og 47 blev først kalibreret i 1946). Massen vises som afvigelsen i forhold til IPK. Efter Stock, M. et al, *Metrologia* 52 (2015) 310.

Den internationale prototype af kilogrammet, forkortet IPK og ind imellem kaldt Le Grand K, blev støbt af firmaet Johnson Matthey i London i 1879 og tilpasset og pudset i Paris i 1880. Faktisk blev der i første omgang fremstillet tre eksemplarer, hvoraf det ene blev valgt som international prototype. Der blev der også støbt 40 kopier (og senere flere) til brug i de lande, der tilsluttede sig metersystemet.

Den øverste myndighed for BIPM er generalkonferencen for mål og vægt, og den første af slagsen blev afholdt i september 1889. De delegerede hjembragte nationale kopier af meteren og kilogrammet, og Danmark fik kilogramprototype nr. 27, der blev anbragt i Nationalbankens kælder.

vægten) af 1/62 kubikfod vand, og der var fremstillet et mønsterpund som reference.

Et egentligt international enheds-system lod vente på sig. På internationale videnskabskonferencer blev behovet for sådan et system fremhævet igen og igen op igennem 1800-tallet. I 1869 blev der nedsat en international meterkommission

med deltagelse af den danske fysikprofessor Carl Holten. Kommissionens arbejde førte til en traktat kendt som meterkonventionen.

Den 20. maj 1875 blev konventionen skrevet under af 17 nationer, herunder Danmark (og i øvrigt også USA, hvilket måske er mere overraskende – her går det lidt trægt med at få indført metersystemet).

På den tredje generalkonference i 1901 blev det gjort helt klart, at kilogram er en enhed for masse, der ikke må forveksles med vægt. I fysikken er vægt en kraft, og vægten af et objekt er lig med massen af objektet gange tyngdeaccelerationen.

Kunne ikke holde vægten

Stadig flere nationer tilsluttede sig bestræbelserne på at indføre metersystemet, men politisk var

det lidt af en varm kartoffel. Derfor var det også først i 1907, at det nye enhedssystem blev indført ved lov i Danmark, og der var en lang overgangsperiode, så folk kunne vænne sig til de nye enheder.

I et kælderlokale på Polyteknisk Læreanstalt (i dag Danmarks Tekniske Universitet, DTU) blev der bygget et brand- og tyverisikret skab til opbevaring af Danmarks prototyper af meteren og kilogrammet. I 1940'erne fik Danmark en ny, officiel kopi af den internationale prototype af kilogrammet (nr. 48), som i dag kan findes i Hørsholm hos det nationale metrologiinstitut Dansk Fundamental Metrologi, der ejes af DTU.

I 130 år var et kilogram lig med massen af den internationale kilogramprototype. Kilogrammet er en af de fundamentale enheder, der indgår i det internationale enhedssystem, SI-systemet, der blev vedtaget på den 11. generalkonference i 1960. Her gik meterprototypen på pension og blev afløst af en ny meterdefinition, og kun kilogrammet blev bestemt af en fysisk genstand i en kælder i Paris.

Men det fysiske kilogram havde svært ved at holde vægten. Tre gange er IPK blevet rengjort, hvorved det er blevet lettere – første gang forsvandt over 50 mikrogram, senere noget mindre. Imellem rengøringsseancerne tager kilogrammet tilsyneladende en smule på. Og så blev spørgsmålet, om et kilogram per definition altid er lig med den øjeblikkelige masse af IPK, af massen af IPK i 1889 eller massen lige efter en rengøring?

Forvirringen blev ikke mindre af, at IPK ikke blev ved med at have samme masse som kopierne. Der var en klar tendens til, at kopierne stille og roligt blev tungere, eller også blev den internationale prototype lettere. Ved den seneste sammenligning (kalibrering) i 2014 blev der målt udsving på op til 60 mikrogram. Forskellene blev umulig at ignorere.

Kibble-vægten sammenligner kræfterne fra strøm og masse

Vejemetoden:
Den opadrettete kraft på spolen er produktet af strømmen (I), styrken af magnetfeltet (B) og længden af tråden i spolen (L). Kraften er i balance med vægten (mg) af testlodet (massen).
 $mg = IBL$

Bevægelsesmetoden:
Spændingen (V) som induceres i spolen mens den bevæger sig er lig hastigheden (v) gange BL

Kraften/vægten af testlodet er lig med massen (m) gange den lokale tyngdeacc. (g)

Vejemetoden:
 $mg = IBL$
dvs. $mg/I = BL$

Bevægelsesmetoden:
 $V = vBL$
dvs. $V/v = BL$

BL er ens i begge tilfælde og derfor er $IV = mgv$
watt elektrisk = watt mekanisk

Princippet i en Kibble-vægt. Kilde: USA's National Bureau of Standards (NIST).

Fokus på naturkonstanter

Fysikere begyndte at komme med forslag til en ny og mere præcis definition af kilogrammet. I et mangeårigt projekt kaldet *The International Avogadro Project* forsøgte en gruppe forskere at finde Avogadros konstant (måske bedre kendt som Avogadros tal) ved at tælle atomer i verdens mest perfekte, rundeste siliciumkugle.

Idéen var at fremstille en kugle af silicium-28 i krystalform og bestemme dens volumen med nanometerpræcision ved hjælp af en laser. Silicium-atomerne danner et krystalgitter med en fast afstand

mellem atomerne, og den afstand kunne måles ved hjælp af røntgen-diffraktion. Dermed kunne antallet af atomer i kuglen beregnes.

Avogadros konstant er det tal, der kobler atomar masse til makroskopisk masse. Ud fra massen af kuglen, antallet af atomer i den og molarmassen af det anvendte silicium kunne forskerne beregne Avogadros konstant med meget stor præcision. Men så kunne man vende den om og bruge Avogadros konstant til at definere kilogrammet. Med andre ord kunne man sige, at et kilogram per definition var et bestemt antal atomer af en bestemt slags isotop.

Videre læsning
BIPM.org

NIST.gov:
www.nist.gov/
si-redefinition/
kilogram-introduction

Terry Quinn: From artefacts to atoms. Oxford University Press, 2011.

Om den skiftende vægt af IPK:
Michael Stock et al 2015: Calibration campaign against the international prototype of the kilogram in anticipation of the redefinition of the kilogram part I. Metrologia 52 310 DOI: 10.1088/0026-1394/52/2/310

Om de danske forhold:
K. Prytz 1908: Metersystemet med en indledende Omtale af dansk Maal og Vægt. DOI: 10.48563/dtu-0000285

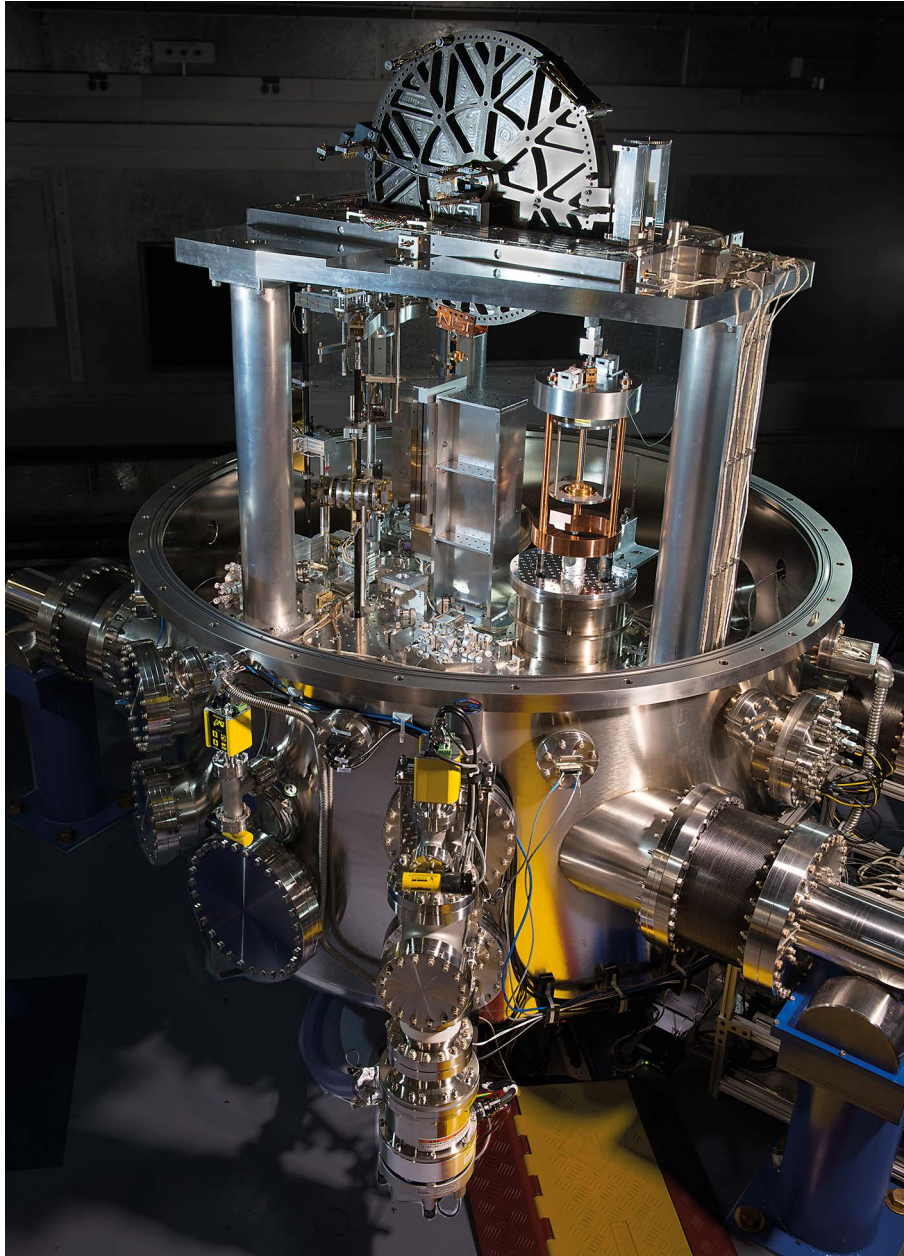


Foto: USA's National Bureau of Standards (NIST).

Kibble-vægten, som har målt Plancks konstant med en usikkerhed på mindre end 20 milliardtedele! Dvs. målingen var mere end præcis nok til at definere kilogrammet. Den nye definition trådte i kraft i 2019.

Kilogrammet knyttes til Plancks konstant

Men det endte i stedet med en ny definition af kilogrammet knyttet til Plancks konstant, der ellers bedst kendes fra kvantemekanikken. Plancks konstant måles i enheden joule gange sekund, der udtrykt i SI-enheder er kilogram gange kvadratmeter per sekund ($\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$). Størrelsen af meteren og sekundet kendes allerede, så hvis Plancks konstant kan måles med meget stor præcision, kan kilogrammet defineres ud fra denne størrelse.

Til det formål bruger man en Kibble-vægt (tidligere kaldt en watt-vægt),

der er et elektromekanisk måleinstrument, som måler vægten af et objekt ekstremt nøjagtigt ved at måle den strøm og spænding, der skal til for at producere en kompenserende kraft.

Det spændende ved Kibble-vægten er, at den er så præcis, at kvanteeffekter kommer i spil. Elektrisk spænding og modstand bliver koblet med Plancks konstant (og for den sags skyld også elektronens ladning), og derfor kan en Kibble-vægt bruges til at måle Plancks konstant uhyre præcist.

I 2011 blev det besluttet at basere

kilogrammet på Plancks konstant, hvis den kunne måles med en usikkerhed på mindre end 20 milliardtedele. Det lykkedes, og på den 26. generalkonference for mål og vægt i november 2018 blev det nye kilogram vedtaget.

Ud fra de præcise målinger blev Plancks konstant givet en fast værdi på $h = 6,62607015 \times 10^{-34}$ J-s, og kilogrammet er nu bundet op på denne værdi. Den nye definition trådte i kraft 20. maj 2019. På den måde fik vi et kilogram, der afhænger af fundamentale naturkonstanter i stedet for en metallklump i Paris. ■

SubUniversity

HAR DU ELEVER MED POTENTIALE – SOM MÅSKE IKKE SELV OVERVEJER UNIVERSITETET?

SubUniversity er et tilbud til gymnasieskoler, der giver fagligt motiverede elever med universitetspotentiale – særligt dem fra ikkeakademiske hjem – en unik mulighed for at opleve universitetet

95% af eleverne vil anbefale SubUniversity

88% føler sig mere afklaret i forhold til deres studievalg

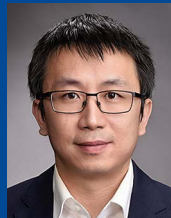
»Jeg har set, at universitet slet ikke er så skræmmende, som jeg troede.«

»Jeg ved, hvilken retning jeg vil gå i nu – og mine mentorer har været vildt gode til at vise, hvordan en hverdag som studerende ser ud.«

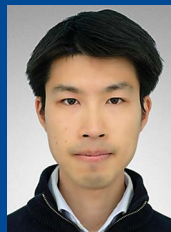


Dronefoto af Røntgenfri-
elektronlaser (XFEL)-
faciliteten LCLS i Califor-
nien. Foto: Olivier Bonin/
SLAC National Accelerator
Laboratory

Forfatterne

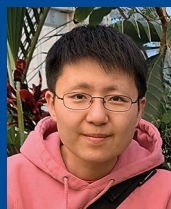


Shuai Wei er lektor
ved Institut for Kemi
på Aarhus Universi-
tet. Hans forskning
fokuserer på strukturen
og egenskaberne af
amorf materialer ved
hjælp af røntgen- og
neutronspreddning.
shuai.wei@chem.au.dk



Tomoki Fujita er
postdoc ved Institut
for Kemi på Aarhus
Universitet, hvor han
undersøger strukturen
og dynamikken i amorfe
materialer og krystal-
linske faste stoffer.
tofu@chem.au.dk

Shuai Wei og Tomoki
Fujita er begge tilknyttet
Aarhus Universitets
materialeklynge,
AU Materials.



Yanwen Sun er Staff
Scientist ved LCLS
på SLAC National
Accelerator Laboratory
i Californien, USA. Hen-
des forskning fokuserer
på at udvikle næste
generations ultrahurtige
røntgeninstrumentering
samt på struktur og
dynamik i uordnede
systemer.

RØNTGENLASER FILMER ATOMERNES BEVÆGELSE



**Med en gigantisk røntgenlasermaskine – en såkaldt XFEL
– kan forskere nu tage billeder så hurtigt efter hinanden og med så høj opløsning,
at man kan registrere atomernes bevægelse i uordnede materialer
som glas eller en strømmende væske.**

Det forrige århundrede var en triumf for reduktionismen – en videnskabelig og filosofisk tilgang, der forsøger at forklare komplekse fænomener ved at bryde dem ned i fundamentale bestanddele: fra makroskopiske objekter til molekyler, fra molekyler til atomer, dernæst protoner og neutroner, så elektroner, kvarker og måske endda vibrerende strenge. Samtidig blev naturens fundamentale kræfter udtrykt i elektromagnetismen, tyngdekraften samt den stærke og svage vekselvirkning. En stræben, der afspejlede et ønske om at afsløre en enkelt elegant lov – en universel regel, der kan forklare alt.

På den anden side viste der sig kompleksitet overalt. Så snart vi ser udover det enkelte atom, er virkelige materialer blevet stadig mere komplicerede i takt med, at vores viden er øget. Selv i “perfekte” krystaller, hvor atomer gentager sig som enheds-celler i et ordnet mønster, findes der altid defekter og uorden. I sit berømte essay i tidsskriftet *Science* “*More Is Different*” fra 1972 bemærkede den amerikanske fysiker Philip Anderson – ofte betragtet som den mest indflydelsesrige fysiker indenfor faststoffysikken i det 20. århundrede – at når mange partikler samles, opstår nye og uventede fysiske love. Disse såkaldt emergente love er i overensstemmelse med

den fundamentale fysik, men de kan ikke udledes direkte fra denne. Superledning er et slående eksempel: Den kollektive dans af elektroner skaber et fænomen, som ingen enkeltpartikel-lov kan forudsige. Anderson bemærkede, at “det dybeste problem i faststoffysikken i det 21. århundrede er problemet med uordnede og komplekse systemer.”

Glas og væsker er komplekse systemer

Blandt de mange eksempler på komplekse stoffer skiller glas og væsker sig ud. Atomerne i glas og væsker er ikke ordnet som i krystaller, men viser i stedet uordnede mønstre. I videnskaben refererer

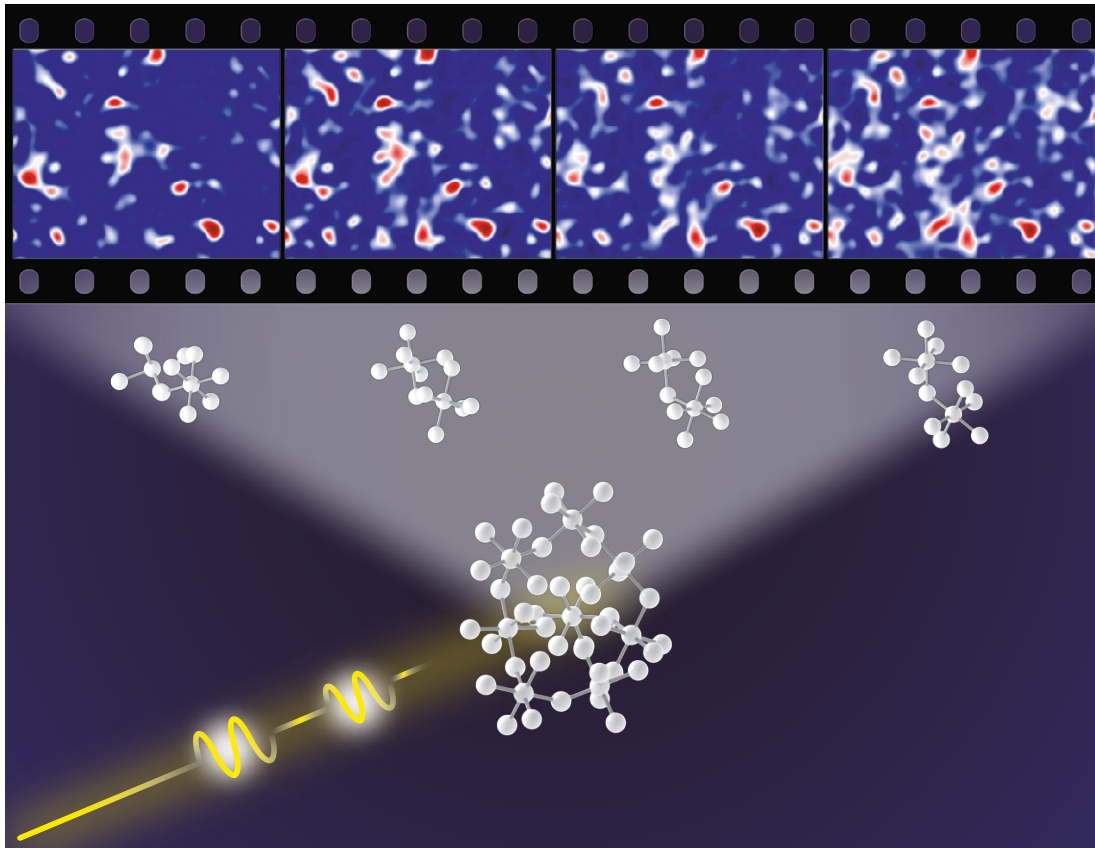


Illustration: forfatterne.
Reprinted with permission from *The Journal of Chemical Physics* 162, 194201 (2025).

Figuren illustrerer nederst, at tvillingepulser fra XFEL rammer en prøve af et glasmateriale og gør det muligt at optage en film af, hvordan materialet ændrer sig med atomar opløsning. Filmen består af changerende kornede prikker kaldet speckle-mønstre (øverst), som repræsenterer atomernes placering i materialet.

“glas” ikke kun til gennemsigtige vinduesglas eller smartphone-skærme, men også bredt til mange typer amorfe, faste stoffer som metalliske glas, polymerer, chalcogenidglas, organiske systemer og endda amorf is (som menes at være den mest almindelige form for vand i universet).

At beskrive disse uordnede systemer er en skræmmende opgave. I modsætning til i krystallinske materialer findes der ingen strukturel enhed, som atomer gentager, når de udfylder pladsen. På et område på størrelse med en æggeblomme findes der således cirka 10^{23} atomer, der tilsyneladende er tilfældigt arrangeret. For at gøre det endnu værre, bevæger disse atomer sig hele tiden. Afhængigt af temperaturen kan atomer bevæge sig så langsomt, at deres positioner næppe ændrer sig i millioner af år ved lave temperaturer; eller de kan bevæge sig næsten lige så hurtigt

som lydens hastighed (cirka 200 m/s) ved høje temperaturer nær smeltepunktet.

Hvis vi skal forstå sådanne systemer, må vi derfor som forskere kunne måle, hvordan atomerne er arrangeret i rum og tid på atomart niveau.

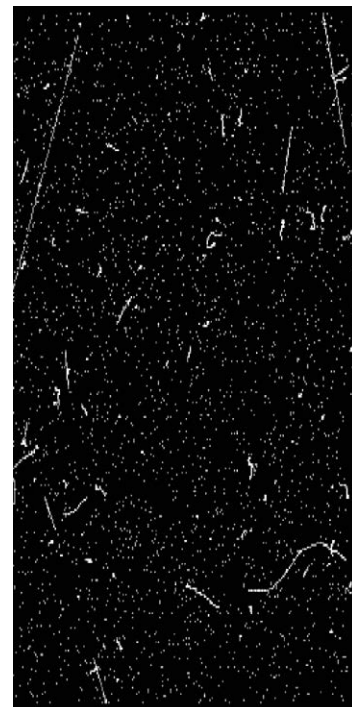
Krav til et “atomkamera”

For at optage en ægte atomfilm har vi brug for et særligt kamera med en usædvanlig hurtig “lukker”. To krav er afgørende:

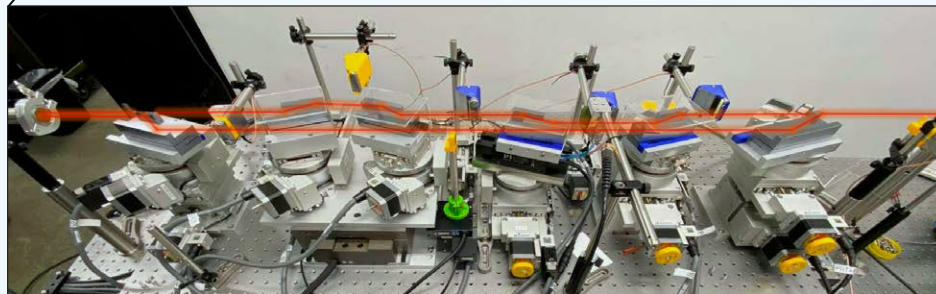
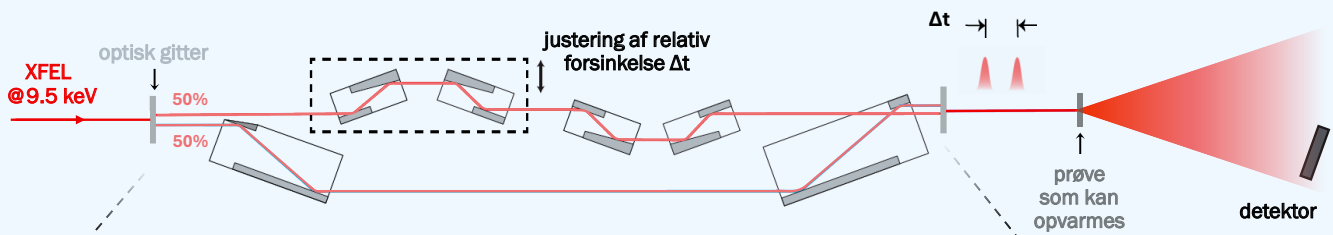
Rumlig opløsning fin nok til at se de enkelte atomer.

Eksposeringstider korte nok til at tage to på hinanden følgende billeder med mindre end 10^{-12} sekunders mellemrum, så atomernes bevægelse fanges i realtid.

Først skal kameraet kunne “se” atomerne – altså opnå en opløsning



Detektorerne er så følsomme, at de også opfangede tilfældige kosmiske stråler fra rummet under målingerne (de hvide streger). Illustration: forfatterne.



Illustrationen viser princippet i split-og-forsink-optikken. Optikken splitter en enkelt røntgenpuls i to pulser. Den ene rejser en længere vej end den anden. Når de kombineres igen, er en puls forsinket med nogle hundrede femtosekunder. Illustration: Yanwen Sun

fin nok til at skelne dem. Atomer er utroligt små, kun omkring 2 ångstrøm i diameter (1 ångstrøm = 10^{-10} meter), svarende til omtrent en halvtredstusindedel af tykkelsen af et menneskehår. Takket være opdagelsen af røntgenstråler, har vi et værktøj, der i princippet gør det muligt at se atomer.

Røntgenstråler er en særlig type lys, som har en bølgelængde på samme skala som atomer – dvs. som kan måles i ångstrøm. Det gør røntgenstråler ideelle til at afsløre atomstrukturer. Når røntgenstråler vekselvirker med stof, skaber de diffraktionsbilleder i det, fysikere kalder det reciprokke rum (som i en slags mærkeligt spejl). Fysikere som William Lawrence Bragg og Max von Laue udviklede geniale matematiske metoder til at oversætte disse diffraktionsbilleder tilbage til, hvordan atomerne er arrangeret i det virkelige rum. Denne tilgang har været spektakulært succesfuld for krystaller, herunder løsningen af DNA's helixstruktur.

For uordnede materialer er opgaven imidlertid langt mere kompliceret. Almindelig røntgendiffraktion mister faktisk noget information, fordi røntgenbølgerne ikke er helt i takt. I ordnede krystaller betyder dette ikke meget, men i uordnede

materialer som glas og væsker bliver det et grundlæggende problem. For at bevare informationen om den uordnede struktur har vi brug for perfekte røntgenbølger, der er helt i takt. Forskere kalder dette "kohærente røntgenstråler", hvor bølgerne er i fase med hinanden. Det betyder, at bølgetoppene og bølgedalene falder sammen i tid og rum, og at de svinger med samme frekvens og i samme retning. Med sådanne røntgenstråler kan man opnå billeder, der, selvom de ligner tilfældige kornede prikker (se figuren næste side), faktisk er fingeraftryk af atompositioner i det virkelige rum. Kort sagt er kohærente røntgenstråler den nøgleingrediens, der gør det muligt at bygge et kamera, der kan afsløre de skjulte atomarrangementer i uordnede materialer.

Kunsten at splitte en røntgenpuls

Den anden udfordrende opgave er at få røntgenstrålen til at tage billeder meget hurtigt. Atomer, der bevæger sig med lydens hastighed, lyder måske ikke særlig hurtigt. Men når de kun flytter sig en meget kort afstand – nogle få atomafstande – bliver det ekstremt svært at måle. Det betyder, at kameraets lukker som tidligere nævnt skal være så hurtigt som 10^{-12} sekund.

Hvis du er vant til at arbejde med et kamera, så ved du, at forudsætningen for, at man kan opnå et brugbart billede, er, at der kommer lys nok ind i kameraet. Med andre ord skal vi for at tage billeder af atomer have pakket tilstrækkeligt mange fotoner i en enkelt pakke – en "røntgen-puls" – og lade dem vekselvirke med materialet. Med en såkaldt XFEL (der står for *X-ray Free Electron Laser*) har en puls en varighed på 50×10^{-15} sekunder, eller 50 femtosekunder.

I princippet kan vi tage et billede indenfor denne korte tid. Men et enkelt billede er ikke nok, fordi vi ønsker at optage en film – altså så vi kan se, hvordan atomer bevæger sig fra tidspunkt 1 til tidspunkt 2. Forskellen mellem de to tidspunkter er mindre end 10^{-12} sekunder. Med andre ord skal vi producere to røntgenpulser, der følger efter hinanden med en tidsforsinkelse på 10^{-12} sekunder. Hvordan gør man det?

Forskere har brugt årtier på at udvikle optik til at opnå netop dette, hvilket absolut ikke er trivielt. Ideen er at bruge spejle til at splitte en røntgenpuls i to tvillingepulser og lade dem rejse ad to forskellige stier. Den ene rejser en lidt

længere vej end den anden, og det betyder, at denne puls bliver forsinket i forhold til den anden. Efter denne rejse bliver tvillingepulserne kombineret igen for at vekselvirke med materialet – den ene efter den anden med en lille tidsforsinkelse imellem. Denne geniale idé gør det muligt for forskere nøjagtigt at kontrollere tidsforskellen mellem ankomsten af pulserne ved præcist at justere de stier, de rejser.

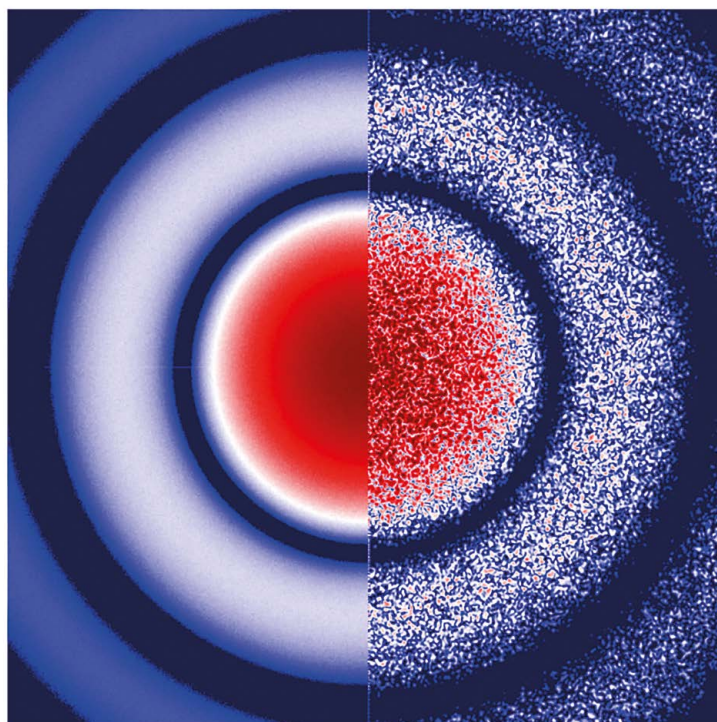
I praksis er det dog meget svært at opnå i laboratoriet. Eksperimenterne kræver nemlig, at tvillingepulserne efter opdeling og rekombination er nøjagtig ens og næsten perfekt i takt. Små forskelle kan føre til støj, der gør det umuligt at se meningsfulde signaler.

En ægte atomar film

For nylig har vi demonstreret, at de to kritiske krav til at optage en ægte atomar film nu kan opfyldes. Vores kamera brugte røntgenlyskilden ved XFEL-faciliteten LCLS, som ligger i Bay Area nær Stanford University – en gigantisk maskine med 100 meter lange tunneler til at accelerere elektroner til næsten lysets hastighed for at generere næsten perfekt kohærente tvillingepulser af røntgenstråler, pakket med et enormt antal fotoner. Vi har udviklet en metode til at overvåge præcisionen af tvillingepulserne samtidig med, at vi måler atompositioner i uordnede materialer.

På grund af de uordnede strukturer er signalerne fra atompositionerne svage. Af denne grund skal de detektorer, der opfanger signalerne, være meget følsomme. De detektorer, vi brugte, var så følsomme, at de også opfangede kosmiske stråler – energirige partikler fra rummet – mens vi målte materialets atompositioner. Selv med så svage signaler kunne vi ved hjælp af matematiske metoder udtrække atompositionerne i rum og tid.

Vores analyse af mere end en million billeder viser, at selv i uordnede



Sammenligning af røntgendiffraction fra almindelige røntgenstråler (venstre) og mere informativ detektion med kornede prikker fra kohærente røntgenstråler (højre). Illustration: Yanwen Sun.

strukturer korrelerer atomer stadig med hinanden lokalt over korte afstande (nogle få atomafstande). Disse lokale atomordener fluktuerer mellem høj og lav i et meget hurtigt tempo. Vi har således set, hvordan den lokale orden kunne forsvinde på mindre end 10^{-12} sekund.

Fremtiden er lys

De nuværende atom-film af uordnede strukturer er stadig begrænset til blot nogle få billeder. De er begrænset af, hvor mange pulsetvillinger de nuværende XFEL-kilder kan levere hvert sekund. Alligevel markerer denne præstation et gennembrud for eksperimentelle værktøjer, der beviser, hvordan vi kan bruge verdens mest kraftfulde røntgenlasere til at få et glimt af atomernes bevægelse.

I øjeblikket findes der ingen omfattende teori, der pålideligt kan beskrive eller forudsige, hvordan atomer udvikler sig i uordnede systemer. Det er blandt andet derfor, at næste generation af røntgenfaciliteter – såsom LCLS-II-HE i USA

og European XFEL – er så spændende. Disse maskiner vil levere langt flere røntgenpulser, hurtigere dataindsamling og endnu mere følsomme detektorer. Tilsammen vil de åbne op for det fulde potentiale af denne teknik og give forskere mulighed for at følge atomernes bevægelse i både tid og rum med hidtil uset detaljerigdom.

Når disse eksperimentelle datasæt bliver tilgængelige, vil vi kunne bruge kunstig intelligens til at opdage skjulte mønstre i de tilsyneladende kaotiske omarrangementer af atomer. Nye teoretiske rammer kan derefter opstå, ligesom Braggs' krystallografi revolutionerede vores forståelse af ordnede krystallinske materialer for mere end 120 år siden.

Sådanne fremskridt vil være afgørende for at opdage og designe de avancerede materialer, vi har brug for i det 21. århundrede – fra bæredygtig energilagring og effektiv computerhardware til nye lægemidler og genanvendelige plastmaterialer. ■

Videre læsning

T. Fujita, Y. Sun, H. Li, T. J. Albert, S. Song, T. Sato, J. Moesgaard, A. Cornet, P. Sun, Y. Chen, M. Mo, N. Amini, F. Yang, P. Lucas, V. Esposito, J. Vila-Comamala, N. Wang, T. Mamyrbayev, C. David, J. Hastings, B. Ruta, P. Fuoss, K. Sokolowski-Tinten, D. Zhu, S. Wei, Femtosecond x-ray photon correlation spectroscopy enables direct observations of atomic-scale relaxations of glass forming liquids. *The Journal of Chemical Physics* 162, 194201 (2025)

Y. Sun, M. Sutton, S. Wei, Analysis strategy for ultrafast X-ray photon correlation spectroscopy. *MRS Commun.*, doi:10.1557/s43579-025-00716-x (2025).

Rekonstruktion af et dinosaurkadaver med ådselædende artsfælle. Illustration superviseret af Yu Xin, designet af Shen Li, skulptureret af Liang Junwei.



BIDT AF FORTIDEN

Josephine Nielsen tog sin fascination af dinosaurer med i sit studie på universitetet. Nu har hun udgivet sit bachelorprojekt om et tyrannosaurbid i en artsfælles fod som videnskabelig artikel.

Forfatter
Henriette Stevnhøj
er journalist, Aarhus
Universitet

»**J**eg tror, at jeg var som de fleste børn. Jeg fandt sten, fossiler og var vild med dinosaurer. Jeg slugte bøgerne og samlede figurerne. Forskellen på mig og de andre er vel bare, at jeg aldrig helt har sluppet det,« fortæller Josephine Nielsen, 23 år, der i dag er kandidatstuderende på Institut for Geoscience ved Aarhus Universitet.

Mens de fleste jævnaldrende pakkede plastikfigurerne væk sammen med resten af barndommen, har Josephine Nielsen vekslet sin barnlige nysgerrighed til benhård videnskab. Sit bachelorprojekt om et tyrannosaurbid på en mellemfodsknogle har hun for nylig fået udgivet som en videnskabelig artikel. Det er en præstation, hendes vejleder, Christof Pearce, lektor ved Institut for Geoscience, kalder fremragende og et inspirerende eksempel på at forfølge en barndomsdrøm.

For Josephine Nielsen gælder det om at holde fast i passionen, også selv om hverdagens studier fylder skemaet.



Josephine Nielsen på feltarbejde i Montana, USA. Privatfoto.

»Derfor lavede jeg den aftale med mig selv, at jeg skulle udleve min dinosaurinteresse i sommerferierne,« fortæller hun.

Som Jurassic Park

Aftalen har ført hende vidt omkring – fra Portugal, hvor hun var frivillig i et fossillaboratorium, til USA. I

Josephines videnskabelige artikel:
Nielsen, J., Fowler, D., Wyenberg-Henzler, T. Jacobsen, A.R. & Pearce, C.: Investigating size-asymmetric feeding among tyrannosaurids using tooth marks on a metatarsal from the Judith River Formation, Montana, USA. *Evolving Earth*, Vol. 4, 2026, 100107.

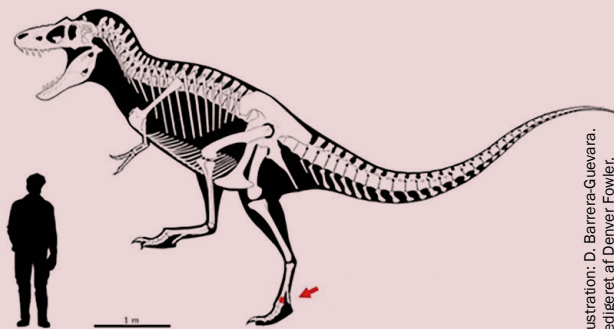
16 bid i en mellemfodsknogle

Med hjælp fra en avanceret 3D-overfladeskanning har Josephine Nielsen kortlagt 16 unikke bidmærker ved hjælp af det såkaldte CM-klassifikationssystem (CM står for Category Modifier). Det er et ret nyt hierarkisk system til at bestemme bidmærker, hvor man kategoriserer hvert enkelt mærke ud fra faste kriterier, så man kan skelne mellem alt fra strejfende tænder til dybe knuse-bid. Denne retsmedicinske tilgang har gjort det muligt at identificere "gerningsmanden" som en lille eller ung tyrannosaurus, der har gnavet i en artsfælle, som var betydeligt større end den selv.

Kernen i Josephine Niensens studier er en knogle fra en venstre mellemfod, der bærer tydelige spor efter et forhistorisk måltid. Mellemfodsknoglen er 11 centimeter lang og stammer fra en tyrannosaurus, der i levende live målte 10-12 meter og vejede flere tons. Knoglen er fundet i Judith River formationen i Montana, USA, som for cirka 75-80 millioner år siden var hjemsted for nogle af jordens største dinosaurer.

Studiet konkluderer, at dinosauren har bidt i en fodknogle uden meget kød, og da der ikke er tegn på heling, tyder alt på, at den lille tyrannosaurus har spist af et kadaver. Det er ifølge Josephine Nielsen ikke overraskende adfærd. Tyrannosaurerne spiste simpelthen det, de kom i nærheden af – også selv om det var artsfæller eller ligefrem en fætter.

Studiet bekræfter tidligere studier om, hvordan de store rovdyr i kridttiden interagerede og udnyttede den føde,



Tegning af et tyrannosaurus-skelet med placeringen af den 2. mellemfodsknogle, som Josephine Nielsen har undersøgt.

Illustration: D. Barrea-Guevara.
Redigeret af Denver Fowler.



Den delvise fodknogle. Den trekantede fordybning midt på knoglen er selve bidmærket. Foto: Denver Fowler

som var til rådighed. Josephine Nielsen har ikke selv haft den originale knogle i hænderne, men har arbejdet med digitale billeder og 3D-versionen, som er printet i Aarhus.

sommeren 2024 gik nemlig turen til Montana, til det såkaldte badlands. Det er et helt særligt geologisk landskab, som er ekstremt eroderet, tørt og stort set uden planter.

Her tjekkede Josephine Nielsen ind i en camp og langt væk fra civilisationen og mobildekning. Om dagen gravede hun sammen med de andre frivillige – geologistuderende og enkelte pensionerede palæontologer – efter fossiler og knogler fra forhistoriske dyr. Om aftenen blev der snakket over bordene i frivilligteltet.

»Det var intense uger, men lærerigt, og det gav mig gode faglige forbindelser«, fortæller Josephine Nielsen.

Da erosionen hele tiden skræller nye lag af jorden, dukker nye fossi-

ler naturligt frem. Det er et hotspot for palæontologer, geologer og fossilsiljægere, og for den geologistuderende fra Aarhus var det et eventyr, som blev virkeligt, da hun fik rigtige dinosaur-knogler i hænderne.

»Man skal forestille sig, at stedet engang var frodige deltaer. Det er en fantastisk følelse at stå der og røre ved noget, som ikke har set dagens lys i millioner af år. Det er som Jurassic Park – man forstår pludselig, at de her enorme dyr virkelig har gået rundt lige her.«

Hun beskriver sit arbejde som en form for detektivarbejde.

»Hvordan har dyret levet, hvordan døde det, og hvordan er fossilet havnet her? Det er de mysterier, jeg skal finde svarene på.«

Hjælp fra internationale eksperter

Det var under den brændende sol i Montana, at Josephine Nielsen fandt en ryghvirvel fra en hadrosaur med tydelige bidmærker, der formede idéen til et bachelorprojekt.

»Jeg var klar over, at det var nu, jeg skulle bruge netværket omkring mig. Lederen af udgravningen var Denver Fowler, som er kurator ved Badlands Dinosaur Museum i Dickinson i North Dakota. Så jeg spurgte ham simpelthen om hjælp,« forklarer hun.

Selvom det var en hadrosaur-ryghvirvel, der startede idéen, endte det med at være et andet fund, der blev centrum for hendes bachelorprojekt: En venstre mellemfodsknogle fra en stor tyrannosaurus fundet i Judith River-formationen i Montana.



Josephine deltog som dinoekspert på den årlige nationale fossilfestival i Gram Lergrov i september 2025. Privatfoto.

den faglige dybde i projektet.

»Jeg fik stor hjælp af min interne vejleder på Aarhus Universitet, Christof Pearce, men da hans ekspertise ligger indenfor andre geologiske områder, var det afgørende at få specialister i palæontologi med på holdet. Og de sagde heldigvis ja!«

Fra store til små dyr

Josephine Nielsen brugte en stor del af efteråret 2024 på at få de formelle aftaler på plads. Selve bachelorprojektet skrev og afleverede hun i 2025. Den helt store belønning kom, da hun fik udgivet en artikel med afsæt i bachelorprojektet i tidsskriftet *Evolving Earth*.

»Det er en stor tilfredsstillelse, og det styrker min oplevelse af, at det er godt at formidle sin viden. Det er jeg bestemt ikke færdig med,« fortæller Josephine Nielsen.

Til gengæld skal de store dyr vige pladsen for de mindre, når speciale-tiden nærmer sig.

Josephine Nielsen ved allerede nu, at hun skal i felten med et forskningsskib til Island. Her skal hun studere mikrofossiler i havbunds-kerner. Selvom springet fra dinosaurer til små havdyr virker stort, giver det god mening for den unge studerende.

»Det kommer til at handle om klima, og her er fortiden vores vigtigste nøgle. For mig er der en direkte linje fra dinosaurerne i Montana til de små fossiler ved Island. Ved at forstå, hvordan livet og miljøet har ændret sig gennem millioner af år, kan vi bedre forstå de klimaforandringer, vi ser i dag. Det er den samme detektivjagt – nu handler det bare om at løse klimaudfordringerne i fælles fremtid,« siger Josephine Nielsen. ■

KVÆG PRESSER KENYAS LØVER VÆK

Flokke af kvæg fordriver løver og andre vilde dyr fra deres levesteder i Kenya – også selv om hyrderne lukker kvæget inde om natten, når rovdyrene er aktive. Et studie fra Aarhus Universitet peger på løsninger, der kan mindske konflikterne mellem husdyr og vilde dyr.

Forfatter
Henriette Stevnhøj
er journalist, Aarhus
Universitet

Forsker
Niels Mogensen er
ph.d.-studerende ved
Institut for Biologi,
Aarhus Universitet.
niels.mogensen@
bio.au.dk

På savannen i Kenya lever løver og husdyr i princippet i skiftehold: Kvæget græsser om dagen og lukkes inde på fold om natten, når løverne er aktive. Alligevel presses løverne væk fra deres habitater af de store kvæghold. Det har både konsekvenser for økosystemets balance og for den naturturisme, som mange masaier i Kenya er dybt afhængige af. Det viser et studie fra Aarhus Universitet, ledet af Niels Mogensen, ph.d.-studerende ved Institut for Biologi. Niels Mogensen har sammen med lokale registreret

de forskellige grupper af dyr – løver, andre rovdyr og græssende husdyr – i naturfredningsområdet Masai Mara, som ligger i den sydvestlige del af Kenya. Området er på størrelse med Lolland og en god luns af Falster og er kendt for sine mange løver og den årlige vandrings af gnuer. Masai Mara er samtidig et af Afrikas mest populære turistmål.

Særligt løverne er under pres fra masaiernes store kvægflokke. Niels Mogensen fortæller, at det er et meget omfattende studie med et stort datamateriale, som er indsamlet over ni år

og dækker flere bevaringsområder.

»Selv om kvæget er under opsyn af hyrder og trækkes ind i indhegninger om natten, når løverne bliver aktive, bliver de vilde dyr alligevel påvirket indirekte. Løverne har en naturlig frygt for kvæg og deres hyrder, og i takt med, at der kommer mere kvæg, er det løverne, der viger. De ændrer simpelthen adfærd,« forklarer Niels Mogensen.

Dataindsamlingen er foregået ved, at forskerne har delt studieområdet op i felter på hver én gang én kilo-

meter, og hver gang forskerne kørte gennem felterne, registrerede de alle løver og husdyr og antal kørte kilometer på deres vej. Herefter blev data analyseret ved brug af rumlige modelleringsmetoder, som i praksis betyder, at der er taget højde for geografiske eller rumlige forhold.

Mindre plads skaber nye problemer

Næsten 70 procent af Kenyas vilde dyr lever i dag uden for nationalparkerne – ofte i de samme områder, som lokalbefolkningen bruger til at græsse deres kvæg. I det lokalt drevne naturforvaltningsområde Masai Mara er målet, at vilde dyr, turisme og husdyrbrug kan eksistere side om side. Men det kniber med at finde balancen, siger Niels Mogensen.

»På trods af, at løverne og kvæget ikke opholder sig på græssletten på samme tid, viser vores data, at løverne undgår de områder, hvor kvæget græsser. Det sker meget sjældent, at mennesker slår løver ihjel eller direkte truer dem, når de befinder sig i naturområdet. Alligevel har menneskets brug af landskabet skabt områder, som løverne er bange for at bevæge sig ind i,« siger Niels Mogensen.

Konsekvensen er, at løverne får mindre plads at bevæge på, og det skaber nye problemer.

»Løverne bliver potentielt skubbet ind i uegnede habitater, deres evne til at få unger kan påvirkes, og de kan blive drevet ind i andre løveflokkes territorium. Samtidig stiger risikoen for, at løveflokken kommer tættere på landsbyerne, og det skaber utryghed.«

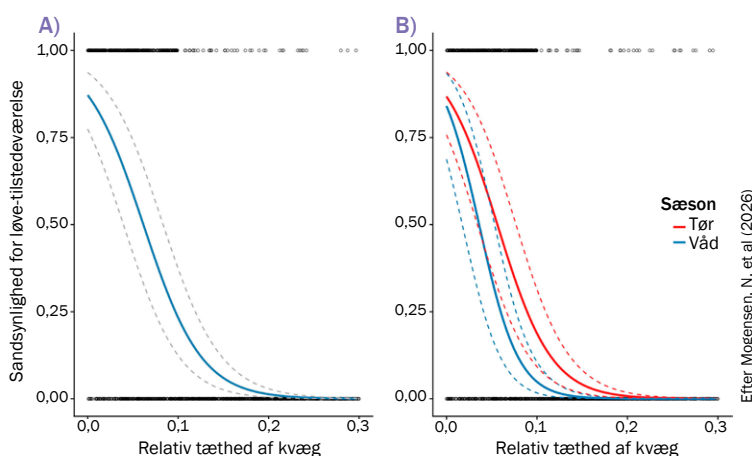
Skab flere fristeder

Niels Mogensen peger på flere løsninger; en af de vigtigste er at styre græsningen mere målrettet, så der ikke er for mange husdyr i de områder, løverne foretrækker. En anden anbefaling lyder, at der indføres klare grænser for, hvor husdyr må græsse, og at græsningen roteres, så nogle områder får perioder med ro. Løvernes sikre opholdssteder



Forskningsstudiet har givet et detaljeret billede af, hvordan løverne reagerer på kvæget i naturreservatet, og den viden bør bruges i naturforvaltningen, mener Niels Mogensen.

Foto: Niels Mogensen



Figurerne viser modelforudsigelser af, hvordan antallet af løver falder markant, når der kommer mere kvæg i området.

(A) Grafen viser, at jo tættere der er pakket med kvæg, jo mindre bruger løverne området. Det gælder også, når der tages højde for, hvor grundigt forskerne har ledt efter dem. De sorte cirkler (ved tallene for 1,00 og 0,00) viser de faktiske fund af løver, og de passer præcist med det mønster, modellen forudsiger. De stiplede kurver viser den statistiske usikkerhed omkring selve kurven (95 %-konfidensintervallet).

(B) Grafen viser, at årstiden gør en forskel. Løver undgår områder med kvæg mere i regntiden, hvor husdyrene bliver gennet længere ind i de vilde naturområder. I tørketiden er denne effekt ikke lige så stærk.

Samlet set viser resultaterne, at når der kommer flere kvæg, begrænser det løvernes bevægelsesfrihed markant, især i de måneder, hvor kvæget spreder sig over større områder for at græsse.

bør også beskyttes bedre. Det gælder især områder langs floder og med tæt busk- og skovbevoksning, hvor løverne kan skjule sig og hvile i dagtimerne. Han fraråder derfor, at kvæg får lov til at græsse i løvernes fristeder og peger på vigtigheden af at bevare et varieret landskab. En tredje anbefaling handler om at bruge data mere aktivt i forvaltningen af bevaringsområderne. Ifølge Niels Mogensen bør viden om, hvor løver og husdyr faktisk opholder sig, spille en langt større rolle i planlægningen af græsningen.

»Vi har nu et detaljeret billede af, hvordan løverne reagerer på husdyr. Den viden bør bruges direkte i forvaltningen, så beslutninger om græsning bygger på fakta frem for antagelser,« siger han.

Endelig fremhæver Niels Mogensen, at overvågningen skal fortsætte. Han mener, at undersøgelser i fremtiden blandt andet bør se på, hvordan tættere bestande påvirker løvernes sociale struktur, stabiliteten i flokkene og ungers evne til at overleve. ■

Videnskabelig artikel: Mogensen, N. et al (2026): Human-driven landscapes of fear for Africa's largest terrestrial predator in human-used conservation landscapes. *Biological Conservation*, Vol. 313, 111599.

Når naturen kalder

Af Henriette Stevnhøj, *Aktuel Naturvidenskab*

Ekskursioner til ødemarker er selvskrevne for forskere og studerende på flere naturvidenskabelige uddannelser. Men selv for dedikerede naturmennesker har feltture til øde stenstrande eller åbne heder en bagside. Det ved Asta Zinck Kragh, studerende ved Institut for Geoscience på Aarhus Universitet.

»Jeg har prøvet at holde igen med både mad og drikke, fordi jeg vidste, at der var langt til et toilet – hvis der overhovedet var et,« fortæller hun.

Som studerende på 4. semester har hun allerede deltaget i flere feltture, som er en central del af Geoscience – studiet af Jordens opbygning, materiale og de processer, der former den over tid. Indtil videre har turene ført hende og hendes medstuderende rundt til spektakulære naturområder i både Danmark og udlandet, ofte med overnatning.

Feltturene er blandt studiets højdepunkter, understreger Asta. Men de kan også være forbundet med udfordringer, som rækker ud over kolde fingre på en rå martsdag. Turene foregår typisk i øde områder langt fra moderne faciliteter – herunder toiletter. Det kræver tilpasning, som Asta har mærket konsekvenserne af. For hende betød det dehydrering, utilpashed og manglende koncentration.

»Så forsvinder meningen med at tage afsted – så kan jeg jo lige så godt blive hjemme ved bøgerne,« siger hun.

Manglen på ordentlige toiletforhold har længe været et overset problem på studiet. Men under overfladen har det fyldt. Aastas medstuderende Rebecca Pedersen fortæller:

»Jeg stresser på forhånd, hvis jeg har menstruation og ikke kan komme til at skifte bind, fordi der ikke er et toilet. Som kvinde er jeg underlagt en biologi, som jeg er nødt til at tage hensyn til – og min cyklus indretter sig ikke efter, hvornår jeg skal på feltture.«



Et tresidet telt, som kan slås op med et snuptag, og en rygsæk med bind, tamponer, spade og sprit er nu fast inventar, når geoscience drager i felten, fortæller Asta (tv) og Rebecca. Foto: Henriette Stevnhøj

Løsningen har i virkeligheden været simpel: Institutets feltudstyr omfatter nu også et mobilt toilettelt samt et feltkit med bind og tamponer, spade, affaldsposer og håndsprit, pakket i en sort rygsæk. Letvægtsteltet kan, når det er foldet, bæres under armen. På den måde er problemet flyttet fra at være en privat bekymring til et fælles anliggende. Signalet om, at feltarbejde ikke kun er en disciplin for mennesker, der uden at kny kan klare sig uden de mest basale faciliteter, er blevet taget godt imod af de studerende.

»Universitetet forventer, at vi deltager i feltture, derfor er det også godt, at der er ordentlige rammer. Det gør en stor forskel for både trivsel og læring, at vi behøver at bekymre os om noget så basalt,« siger Asta. ■