

NATURVIDENSKAB OG TEKNOLOGI
DIREKTE FRA FORSKNINGSVERDENEN

AKTUEL *natur*VIDENSKAB

ATOMKRAFT – FRA FORBUD TIL KLIMADEBAT

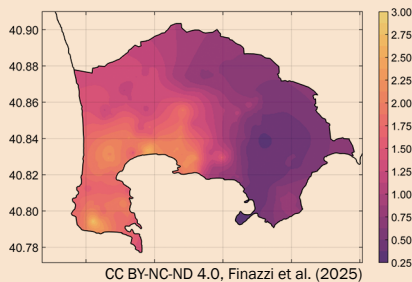


Et atom tykt:
Søren bygger det tyndeste materiale i verden
Sådan kan de færøske jorde hjælpe klimaet
Atomaffald kræver langtidsplanlægning

Smartphones kortlægger jordskælvsrisiko

I et nyt studium publiceret i *Nature Communications* rapporterer forskere fra Italien, Tyskland og Frankrig, at man kan bruge almindelige smartphones til at skabe detaljerede kort over, hvordan den helt lokale geologi i et område har betydning for risikoen i forbindelse med jordskælv. En smartphone kan via dens indbyggede accelerometer, som typisk bruges til spil, registrere vibrationer ved jordskælv. I det nye studium har forskerne kombineret måledata fra tusindvis af telefoner i den italienske Campi Flegrei-region med statistisk modellering. Og det viser, at det herved er muligt at kortlægge, hvordan den lokale geologi forstærker rystelser, i langt højere detaljegråd end seismiske stationer alene kan præstere. På kortet betyder farveværdier over 1, at seismiske bølger forstærkes, mens farveværdier under 1 betyder, at de dæmpes.

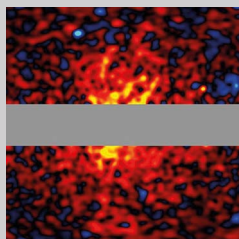
Kilde: *Nat Commun* 16, 9527 (2025).



Signal fra det mørke stof?

Såkaldt mørkt stof menes at udgøre næsten 27 % af al masse i Universet, men man ved ikke, hvad det er, og det kan kun "ses", fordi det påvirker synligt stof via tyngdekraften. I en ny artikel i tidsskriftet *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* rapporterer professor Tomonori Totani fra universitetet i Tokyo nu, at han via observationer af gammastråling muligvis har set det mørke stof mere direkte. Hypotetiske partikler af mørkt stof vil nemlig ifølge teorien udsende gammastråling med høj energi, når de udslettes (annihilerer). Og intensiteten af gammastråling i dette energispektrum fordeler sig i retning mod Mælkevejens centrum netop i en form, som nøje matcher den, man forventer af fordelingen af mørkt, rapporterer Totani. Figuren viser gammastrålingens intensitet i retning mod Mælkevejens centrum. Den grå bjælke svarer til det galaktiske plan, som er udeladt af undersøgelsen for at undgå stærk stråling.

Kilde: Tomonori Totani JCAP11(2025)080



Figur: Tomonori Totani, The University of Tokyo

Fremtidens proteinfabrik

En prototype på fremtidens proteinfabrik. Sådan beskriver forskerne et nyt anlæg, der for nylig er indviet på AU Viborg. Ved hjælp af grøn strøm og mikroorganismer omdannes CO₂ og hydrogen til eddikesyre i en iltfri reaktor. Syren bliver dernæst brugt som næring af gærceller, som vokser og danner en biomasse med mange forskellige slags proteiner. Forskerne håber med enkel oprensning at kunne trække proteiner med gunstige egenskaber ud, som kan udnyttes i fødevarerindustrien eller måske udvikles til helt nye produkter med klimavenlig profil. Anlægget er finansieret af Novo Nordisk Foundation CO₂ Research Center (CORC), der også står for driften.

Kilde: *tech.au.dk*

Quizzen

Hvad sker der, når man lægger to lag af materialet grafén ovenpå hinanden og roterer det ene lag 1,1 grad?

1. Materialet bliver uigennemtrængeligt for lys
2. Materialet bliver superledende
3. Materialet bliver magnetisk

Læs svaret i artiklen side 6.

Mineraler i massevis

Mineralsamlere Hans Kloster opbyggede gennem 48 år Danmarks største private samling af mineraler. For nylig har Statens Naturhistoriske Museum købt denne samling og dermed bragt museets mineralsamling helt op i den globale elite. Hans Klosters samling rummede flere end 13.000 stykker fordelt på mere end 4000 forskellige mineralarter. Af disse optrådte flere end 1000 mineraler ikke tidligere i Statens Naturhistoriske Museums samling (der kendes i dag i alt cirka 5900 mineraler i verden), og museets samling rummer således i dag næsten 70 % af alle kendte mineraler. På billedet ses mineralet pyrit fra Navajun i Spanien.

Kilde: Statens Naturhistoriske Museum



Foto: Statens Naturhistoriske Museum

Styr på krystallerne

Krystaller af såkaldt bly-halid perovskit spiller en vigtig rolle i udvikling af avancerede optoelektroniske materialer, dvs. materialer der kombinerer lys og elektronik. Typisk dyrkes krystallerne ud fra små krystalkim, men det er på den måde yderst vanskeligt at styre krystaldannelsen præcist i tid og rum. I tidsskriftet *ACS nano* beretter forskere ved Michigan State University nu, at de ved at rette en såkaldt kontinuerlig-bølge-laser (CW-laser) mod guld-nanopartikler og dermed opvarme dem, præcist kan kontrollere dannelse og vækst af perovskit-krystaller på disse guldnanopartikler. Forskerne vil nu blandt andet teste, om deres laboratoriefremstillede krystaller holder til at blive anvendt i elektroniske komponenter.

Kilder: *Nature/ ACS Nano Vol 19/Issue 43*

Abonnementsservice

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

Kontakt os på telefon: 3036 0662 / 8715 2094

E-mail: abo@aktuelnaturvidenskab.dk

Abonnement kan også bestilles via hjemmesiden: aktuelnaturvidenskab.dk

Til nye abonnenter:

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

indhold



Ét atom tykt: Søren bygger det tyndeste materiale i verden

Fysikeren Søren Ulstrup har udviklet en ny metode til at lave materialet grafén. Han undersøger nu, om det kan lede til et gennembrud i forståelsen af fænomenet superledning.

6



Rejsen mod havet: Et stenrev som første stop

I Naturpark Lillebælt skal et nyt stenrev give havørred en bedre start på rejsen mod det åbne hav og vise, hvordan sten på havbunden kan bidrage til et sundere havmiljø.

12



Atomkraft på dagsordenen igen: Fra forbud til klimadebat

Trods en historisk stærk modstand mod kernekraft, rører debatten på sig igen, og det er relevant i en tid med klimakrise og behov for energi, siger professor i kernefysik Hans Fynbo.

22



Den lange vej mod det absolutte nul

Vand koger ikke altid ved 100 grader. Jagten på et stabilt mål for varme førte fra 1700-tallets eksperimenter til kelvin – den absolutte skala for temperatur.

34

FORSKNING OG NYHEDER

- 4 KORT NYT
- 6 Ét atom tykt: Søren bygger det tyndeste materiale i verden
- 11 Med flagermus på fuglefangst
- 12 Rejsen mod havet: Et stenrev som første stop
- 18 Sådan kan de færøske jorder hjælpe klimaet
- 22 Atomkraft på dagsordenen igen: Fra forbud til klimadebat
- 28 Atomaffald kræver langtidsplanlægning
- 34 Den lange vej mod det absolutte nul
- 38 Genetik og depression
- 39 Bøger
- 40 BAGSIDEN: Mysteriet om murstensbygninger

OM AKTUEL NATURVIDENSKAB

Ansvarshavende

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

Redaktion

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

Redaktionsgruppe

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

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

Abonnementsservice:

Tlf.: 3036 0662 eller abo@aktuelnaturvidenskab.dk

Udgiver

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

Postadresse:

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

Layout: Jørgen Dahlgaard

Tryk: Jørn Thomsen Elbo A/S

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

Opplag: 3.700

Forsidefoto:

En del af atomkraftværket i Dukovany, Tjekkiet.
Foto: Shutterstock



DET NATURVIDENSKABELIGE
FAKULTET



Roskilde Universitet

SPONSOR-
ABONNENT



Rytme-aber

Mennesker har en unik evne til at opfatte og bevæge sig i takt med en stabil musikalsk rytme.

Det er en færdighed, der udvikles tidligt i livet, og det kræver, at man kan udtrække den rytmiske puls i en kontinuert lyd, forudsige denne i tid og time motoriske bevægelser, så de forudsiger fremtidige taktslag. Udover hos mennesket er "rytmesans" kun observeret hos nogle fugle og enkelte exceptionelle individer af andre arter. I et nyt studium rapporterer mexicanske forskere, at makak-aber også er i stand til at følge en musikalsk rytme. Og det udfordrer en fremtrædende teori – den såkaldte vokal-læring-hypotese – som går ud på, at evnen til at imitere og modificere lyde er en forudsætning for at kunne udvikle evner som tale, sang og netop rytmisk synkronisering.

Allerede tidligere forskning har vist, at selv om makak-aber ikke er vokale lærere, kan



Rhesusaben (*Macaca mulatta*) er en makak-abe og vidt anvendt i laboratorieforsøg. Foto: Shutterstock

de trænes til at trykke på en plade i takt med en metronom. I det nye studium har Vani Rajendran og kolleger undersøgt, om to makak-aber, der var trænet til at synkronisere deres tryk med metronomslag, kunne overføre denne færdighed til rigtig musik med al dens akustiske kompleksitet. De

to makak-aber hørte uafhængigt af hinanden en af tre menneskevalgte sange, og de blev belønnet, når de bevægede hånden i takt med hver sangs tempo. Observationerne viste, at begge aber udviklede konsistente rytmer på tværs af alle sange, og når forskerne ændrede musikkens tempo, fulgte makak-aberne tempo med. Denne adfærd blev observeret selv, når aberne blev præsenteret for en sang, de ikke havde hørt før, og når de ikke længere blev belønnet for at slå i takt med musikken.

Ifølge forskerne antyder resultaterne, at evnen til at opfatte en rytme og synkronisere bevægelse med den, spænder over et bredere evolutionært spektrum end tidligere antaget og altså ikke kun er begrænset til arter med vokal læring.

CRK, Kilde: Vani G. Rajendran et al: *Science* vol. 390, Iss. 6776, pp. 940-944

Årtusinders udsivning af metangas i Arktis

Et internationalt forskerhold har gennemført den hidtil mest omfattende kortlægning af havbunden ved Nordøstgrønland, og resultaterne lukker et stort hul i vores viden om naturlig udsivning af metangas og olie på de lavvandede arktiske sokler. Studiet viser, at gashydrater – en slags frosne gaslommer – kan begynde at tø op i takt med, at Arktis opvarmes som følge af klimaforandringer.

Forskerne kombinerede nye feltstudier i farvandet ud for Nordøstgrønland med geovidenskabelige datasæt fra tidligere industrielle ekspeditioner. Det har gjort det muligt at følge gassernes bevægelse fra kilde til udslip med stor detaljeringsgrad.

»De mange data har givet os ny indsigt i, hvordan naturligt metanudslip bidrager til carbonkredsløbet i Arktis. Det betyder, at vi kan skelne mellem udsivninger, der har stået på i tusindvis af år, og den øgede udsivning, vi ser som følge af klimaforandringer,« siger Christoph Böttner, adjunkt ved geologisk



Foto: Adriano Mazzini

institut ved Stockholms Universitet og hovedforfatter på studiet.

Forskerne har beregnet, at mellem 677 og 1.460 millioner ton gas – svarende til 0,5–1,1 milliarder ton carbon – er strømmet ud i havet siden den bundfrosne is trak sig tilbage fra soklen for omkring 15.000 år

siden. Det understreger, at naturlig udsivning af kulbrinter (carbonhydrider), herunder metan, har været en vedvarende proces i området gennem årtusinder. Arktis opvarmes op til fire gange hurtigere end resten af kloden, hvilket gør forskningen presserende, siger Christoph Böttner.

»Nordøstgrønland spiller en vigtig rolle i klimaforskningen. Udsivning af olie og gas påvirker ikke kun carbonstrømme i hav og atmosfære, men også livet i havet – fra mikroorganismer til dyr og havpattedyr.«

Han anbefaler, at resultaterne indgår i de modeller, forskere bruger til at forudsige fremtidens klima. De polare regioner ændrer sig hurtigt, og forståelsen af naturlige metanudslip er afgørende for at beregne den samlede drivhuseffekt.

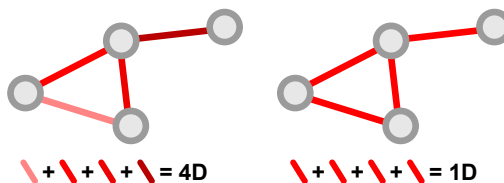
Henriette Stevnhøj, Aarhus Universitet.
Kilde: *Nature Communications Earth & Environment* 6, 879 (2025)

Når netværk lærer

Alt fra menneskehjernens milliarder af neuroner til hele byers omfattende netværk af ledninger og kommunikationssystemer er eksempler på såkaldte adaptive netværk. Altså netværk, der tilpasser sig, mens de fungerer. Adaptive netværk er derfor vigtige at forstå for at kunne forklare en mangfoldighed af processer i vores krop og i vores samfund. Problemet er bare, at de er ekstremt vanskelige at analysere.

Lektor ved RUC Erik A. Martens har nu sammen med Christian Bick fra Vrije Universiteit i Amsterdam udviklet en ny matematisk ramme til at analysere adaptive netværk, som giver en vej til at gøre dem mere forståelige. Arbejdet er for nylig publiceret i det videnskabelige tidsskrift *Chaos*.

Et netværk består af noder (knodepunkter), som kan repræsentere for eksempel neuroner, hvor hver node er forbundet med en eller flere andre noder. Og disse forbindelser kan variere i styrke. I mange klassiske modeller for netværk betragtes forbindelserne som faste. Men i virkeligheden ændrer netværk sig konstant. I hjernen, for eksempel, styrkes forbindelser mellem neuroner, der er aktive samtidig – det er en af de vigtigste mekanismer bag læring. I adaptive netværk påvirker udviklingen af noder og forbindelser hinanden, så både netværkets struktur og dynamik ændrer sig over tid. Det gør syste-



met langt mere komplekst end et statisk netværk.

Kompleksiteten kan illustreres med et netværk med kun fire noder. Hvis hver node kun har én tilstand, skal vi holde styr på fire variabler. Men hvis alle fire kan forbinde sig med hinanden, findes der seks mulige forbindelser, som hver især kan ændre styrke. Det betyder, at systemet i alt har ti variabler. Hver ny node gør systemet endnu mere indviklet at analysere. Hjernen rummer til sammenligning omkring 86 milliarder neuroner forbundet gennem omtrent en billiard (10^{15}) synapser. Selvom en stor del af forbindelserne er svage eller inaktive, vokser antallet af mulige tilstande så enormt, at ingen computer i dag kan overskue dem fuldt ud.

Martens og Bick præsenterer i deres afhandling en løsning på dette problem. De viser, at adaptive netværk i mange tilfælde kan beskrives langt enklere, end det umiddelbart ser ud. Nøglen er at identificere begrænsninger – såkaldte constraints – der gør det muligt at reducere systemets dimensioner. Begrænsningerne kan være naturlige, fordi

netværket udvikler sig på en sådan måde, at visse forbindelser opfører sig ens. Men de kan også være pålagt, for eksempel ved at man lader hele netværkets samlede forbindelsesstyrke være konstant eller fastholder styrken på bestemte forbindelser. Under sådanne forhold kan de mange styrker i visse tilfælde reduceres til færre overordnede størrelser. I et netværk med fire noder behøver man dermed ikke længere seks variabler til at beskrive forbindelserne, men blot én.

På den måde kan forskerne som en approksimering systematisk skære ned på antallet af frihedsgrader, samtidig med at systemet bevarer dets væsentlige dynamik. Herved bliver selv de mest uoverskuelige systemer håndterbare og egnet til kvantitativ analyse. For eksempel kan det blive nemmere at bestemme de punkter, hvor et system pludselig ændrer karakter (kaldet en faseovergang). I hjernen kan neuroner eksempelvis skifte fra uorganiseret aktivitet til rytmisk fælles svingning, hvor store områder arbejder synkront.

Det nye matematiske værktøj åbner ifølge Erik A. Martens døren for en dybere forståelse af de dynamiske processer, der former vores verden. Næste skridt for forskerne bliver derfor at anvende metoden på netværk fra den fysiske og biologiske verden.

CRK, Kilder: RUC. dk Vid. artikel: *Chaos* 35, 103141 (2025), doi.org/10.1063/5.0289706

Nu kan vi aflæse DNA med telefonen

En forskningsgruppe fra Aarhus Universitet har designet proteiner, der kan lede efter bestemte DNA-stykker og lyse, hvis de finder dem. Et lys, telefonens kamera nemt kan fange. Forestil dig at en container med tomater ankommer til containerterminalen i Aarhus. I papirerne står der, at tomaterne kommer fra Spanien, men reelt har vi ingen chance for at vide, om det er rigtigt. Altså med mindre vi tager en prøve og får den analyseret på et laboratorium, hvor forskere ved hjælp af DNA-markører kan afgøre, om tomaten er spansk, sydamerikansk eller kinesisk. Det er dog både tidskrævende og dyrt.

Takket være et videnskabeligt gennembrud på Aarhus Universitet i professor Alexander Zelikins forskningsgruppe vil vi i fremtiden kunne undersøge tomater ved hjælp af særlige lysende proteiner, som vi kan aflæse med vores telefon. Gennembruddet blev for nyligt publiceret i tidsskriftet *Nature Communications*.

»Vi har fundet ud af, at instruere proteiner i at genere lys, når bestemte DNA-sekvenser optræder. Opdagelsen vil kunne bruges som i eksemplet med tomaterne, men vil også være brugbart i sundhedssektoren, indenfor landbruget eller i medicinalindustrien, til

nemt og billigt at tage prøver«, forklarer han. »Der er store perspektiver i det«.

Opdagelsen udspringer af Alexander Zelikins forskningsgruppes anstrengelser med at bygge syntetiske celler fra bunden. Gennem arbejdet lærer de en masse om cellernes basale byggesten, og det har altså ført til, at de har opdaget, hvordan man kan programmere proteiner til at lede efter bestemte sekvenser af DNA.

Jeppe Kyhne Knudsen.

Kilde: *Nat. Commun.* 16, 9638 (2025). doi.org/10.1038/s41467-025-64636-z

ÉT ATOM TYKT: SØREN BYGGER DET TYNDESTE MATERIALE I VERDEN

Fysikeren Søren Ulstrup har med sine kolleger udviklet en ny metode til at lave materialet grafén. Han undersøger nu, om materialet kan lede til et gennembrud i forståelsen af fænomenet superledning.

Om forfatteren

Jeppe Kyhne Knudsen er journalist ved Aarhus Universitet



**DANMARKS FRIE
FORSKNINGSFOND**
INDEPENDENT RESEARCH
FUND DENMARK

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

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

En konstant summen, hvislen og knagen af maskiner omgiver fysiker Søren Ulstrup.

Han står bøjet ind over et tårn af vakuumkamre, måleinstrumenter, rør og ledninger. Vi er i kælderen under et af de gule tårne i universitetsparken i Aarhus. Her når solen aldrig ned. Luften er tør og indeklemt, der dufter af elektronik. Bagved måleudstyret står et par sofaer rettet mod et fladskærms-tv.

»Det er til, når vores eksperimenter trækker ud,« siger han smilende.

»Så bliver vi her nogle gange hele natten. Den brune sofa sover man overraskende godt i.«

I mere end fem år har Søren Ulstrup bygget, modificeret, testet, bygget

om og rettet til på sit eksperiment. Han har hentet udstyr hjem fra et hav af forskellige special-leverandører og langsomt, men støt udbygget setuppet.

Og nu er han begyndt at høste frugterne af de mange nætter i laboratoriet.

»Det er lykkedes os at skabe et materiale, der kun er ét atom tykt. Går du 25 år tilbage, var forskningsverdenen overbevist om, at det var umuligt. Vi er ikke de eneste, der har gjort det, men vi har udviklet vores egen metode til det,« siger han.

På en computerskærm peger Søren Ulstrup på et billede af materialet. Fordi det er så tyndt, kan det ikke ses med det blotte øje, men med et

lysmikroskop med 100 gange forstørrelse er det muligt at fotografere det under særlige forhold.

»Vi placerer materialet på en overflade af siliciumdioxid. På grund af lysets brydning skabes en optisk kontrast, som gør det muligt at se skyggerne af det ultratynde materiale,« forklarer han.

På billederne ligner det lidt et visstent blad, der er så skrøbeligt, at det ved den mindste berøring forvandles til støv. Men materialet er faktisk enormt stærkt.

»Det er lavet af bittesmå flager af grafit. Samme materiale som sidder i spidsen af blyanter, og som er bygget op af carbonatomer. Vi kalder det grafén, når vi forvandler det til et enkelt lag af atomer, og i

den konfiguration er det stærkere end stål.«

Det lyder måske nemt, men et materiale, der kun er et atom tykt, er ekstremt svært at håndtere. Ikke blot kan Søren Ulstrup og hans kolleger ikke se materialet direkte, men kun en skygge af det, og der findes intet værktøj småt nok til at håndtere det direkte.

»Vi bygger materialerne under et lysmikroskop. Her kan vi forsigtigt flytte rundt på og styre materialerne med glas-slides, som vi monterer nogle klistrede polymerer på. Klistretet gør, at vi kan samle de atomtynde materialer op, flytte rundt på dem, skære i dem og stable dem med en præcis rotationsvinkel,« siger han.

Jagten på fysikkens hellige gral

Det er i sig selv fascinerende, at vi mennesker kan lave materialer, der er så tynde som naturens allermindste byggesten. De kan dog også vise sig at være meget brugbare, hvis vi forstår at udnytte dem på den rigtige måde, forklarer Søren Ulstrup.

»Når man tager to lag af grafén, lægger dem ovenpå hinanden og roterer dem 1,1 grad, sker der noget ejendommeligt: Materialet bliver superledende. Det betyder, at det kan lede strøm uden tab af energi. Kan vi udnytte det, vil det være en revolution indenfor computerteknologi,« siger han og fortsætter:

»Selvom udviklingen af mikrochips fortsat drøner derudaf, rammer vi på et tidspunkt et naturligt loft. I din telefon sidder der flere milliarder transistorer klemte sammen på en meget lille chip. Fordi de leder strøm, udvikler de varme – og jo flere vi klemmer ind på mindre plads, desto større bliver problemet med at komme af med varmen. Det problem vil forsvinde med en superleder.«

I dag findes der en række superle-



Foto: Jeppe Kyhne Knudsen

Om forskeren

Søren Ulstrup er lektor i fysik ved Institut for Fysik og Astronomi på Aarhus Universitet. Han forsker i todimensionelle materialer. Efter at have færdiggjort sin ph.d. på Aarhus Universitet rejste han til Berkeley i Californien for at arbejde på Lawrence Berkeley National Laboratory. Her var han med til at udvikle en ny teknologi til at "tage billeder" af elektroniske egenskaber i materialer med atomar tykkelse. En teknologi han tog med sig tilbage til Danmark, da han i 2017 blev ansat som adjunkt på Aarhus Universitet. Søren Ulstrup leder nu sin egen forskningsgruppe, som forsker i udvikling og produktion af nye, ultratynde materialer.

Søren Ulstrup har modtaget en Sapere Aude-bevilling fra Danmarks Frie forskningsfond, Natur og Univers til at forske i grundvidenskabelige spørgsmål, der knytter sig til fænomener, der opstår i stakke af 2D-materialer, herunder superledning.

dere, men fælles for dem alle er, at de kun fungerer superledende ved ekstremt lave temperaturer.

»De fleste af dem skal køles ned til tæt på det absolutte nulpunkt – altså omkring $-273,15^{\circ}\text{C}$. Det er for det første enormt energikrævende at køle ned, og desuden er det umuligt at bygge en computer af superledere, som vi kan tage med os rundt, som vi er vant til med vores telefoner og bærbare.«

Søren Ulstrup håber dog på, at han kan designe materialet, så det fungerer superledende ved langt højere temperaturer.

Lige nu er der et globalt kapløb i gang om, hvem der først kan udvikle en superleder, der fungerer

ved almindelige temperaturer. Det er den hellige gral. Rent teoretisk burde det være muligt, men ingen har løst problemet endnu.

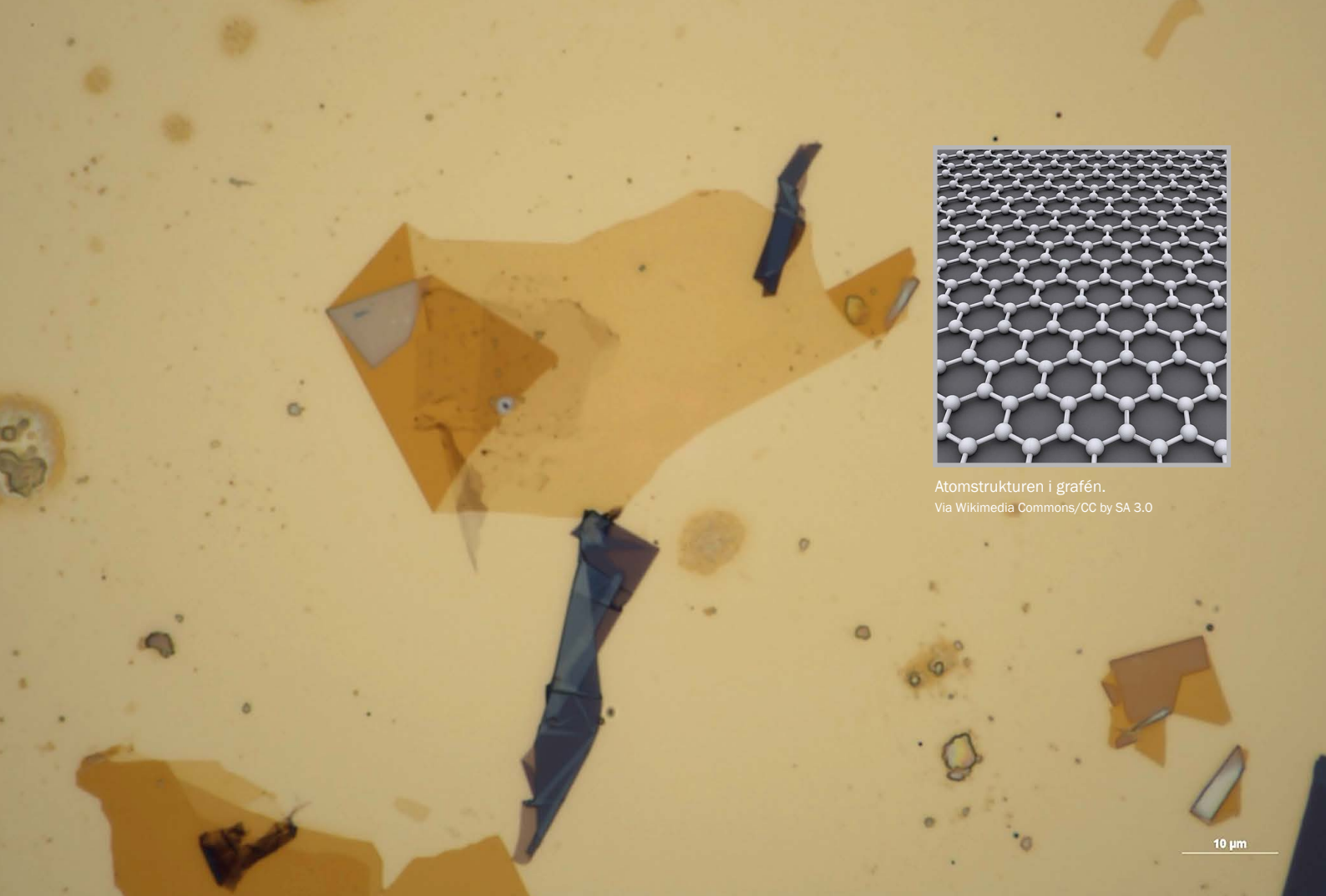
»Ved at fintune vores materiale, håber vi på at nærme os målet. Vi sigter efter at forbedre vores superleder, så den kun skal køles ned til $-196,15^{\circ}\text{C}$. Ved den temperatur kan man køle med flydende kvælstof i stedet for helium – og det er meget billigere.«

Superleder kan løse vores energikrise

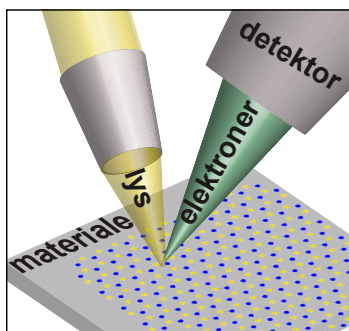
Hvis det engang i fremtiden lykkes at udvikle en superleder, der fungerer ved normale temperaturer, vil det ikke blot revolutionere vores elektroniske apparater. Det vil praktisk talt gøre energi gratis, fortæller Søren Ulstrup.



**DANMARKS FRIE
FORSKNINGSFOND**
INDEPENDENT RESEARCH
FUND DENMARK



Et billede taget med mikroskop af grafénflager. Flagerne er lavet i Søren Ulstrups laboratorium, og er et eksempel på de materialer, de eksperimenterer på, for at udvikle fremtidens superledere.



For at teste om der er opnået den helt rigtige vinkel mellem de to lag, bestråler man efterfølgende materialet med stråling fra Aarhus Universitets partikelaccelerator. Vi visualiserer elektronernes tilstand i materialet ved hjælp af strålingen. Hvis elektronerne har en "flad" energifordeling, har vi optimale betingelser for at stabilisere en superledende tilstand.

»Får vi udviklet et materiale, der både er billigt og superledende ved almindelige temperaturer, vil strømtabet være så lille, at computere og telefoner nærmest aldrig vil skulle oplades. Det vil fuldstændig ændre den måde, verden fungerer på. Pludselig vil vi vælte os i

billig energi. Det er ikke blot godt for os, men også for klimaet.«

Men der er lang vej endnu. Forskningen i superledere kan sammenlignes med en rutsjebanetur. Der har været enkelte nedkørsler, hvor vi virkelig har haft fart på de seneste 100 år, men de har hver gang været efterfulgt af lange og seje opkørsler med at finde bedre teorier og materialer. Endnu går jagten på at udvikle det helt rigtige materiale, og Søren Ulstrup tør ikke spå om, hvornår det store gennembrud kommer.

»Der kan gå årtier. Måske mere. Vi roder med universets helt basale byggesten her. Når det foregår på atomart niveau, er forskningen langsom og tidskrævende. Man skal nok væbne sig med tålmodighed.«

Endnu et uløst mysterium

Det var først i 2018, at en gruppe forskere opdagede, at man kunne

omdanne grafén til en superleder ved at rotere to plader i forhold til hinanden.

Forskergruppen kunne dog ikke forklare, hvorfor det skete. Det mysterium satte Søren Ulstrup sig for at løse for fem år siden, og i dag er han kommet et skridt nærmere på en forklaring.

»Med vores forsøgssopstilling kan vi registrere, hvad der sker inde i materialet, når det bliver superledende. Ved at bombardere de to lag med lys fra Aarhus Universitets partikelaccelerator, ASTRID2, kan vi med en detektor måle, hvilke kvantemekaniske tilstande elektronerne befinder sig i.«

»Sagt simplere kan vi se, hvordan elektronerne bevæger sig rundt om atomkernerne i materialet. I superledende materialer opstår der det, vi kalder Cooper-par – og det sker også her. Hvorfor det netop sker

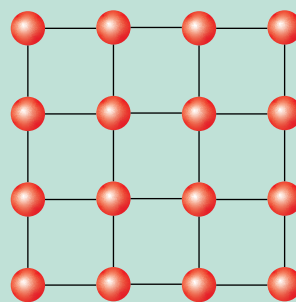
Cooper-par

I 1911 opdagede den hollandske forsker Heike Kamerlingh Onnes, at den elektriske modstand i kviksølv forsvinder, når det bliver kølet ned til $-268,96\text{ }^{\circ}\text{C}$. Det bliver med andre ord forvandlet til en superleder.

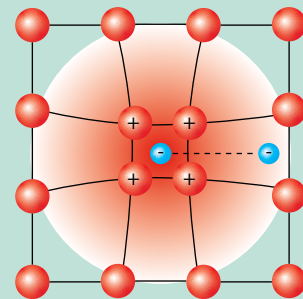
I mange år kunne ingen forskere forklare, hvorfor det skete. Man kunne blot måle det. Indtil 1956. Det år udviklede den amerikanske fysiker Leon Cooper en teori om, at elektroner kan danne par over meget lange afstande i materialer – og dermed befinde sig i den samme kvantemekaniske grundtilstand. Den fuldstændige teori om disse såkaldte Cooper-par udviklede Leon Cooper i samarbejde med John Bardeen og John Robert Schrieffer i 1957. Den blev døbt BCS-teorien efter initialerne i deres efternavne. BCS-teorien er bredt accepteret som grundlaget for lav-temperatur-superledning, og de tre modtog Nobelprisen i fysik i 1972.

Det centrale i BCS-teori er forklaringen på, hvordan to elektroner under særlige betingelser kan danne par. Normalt frastøder elektroner hinanden, fordi de har samme negative ladning. En elektron kan dog tiltrække de omkringværende positivt ladede atomkerner, hvilket skaber en "sky" af positiv ladning omkring elektronen, som kan virke tiltrækkende over lange afstande på en anden elektron (se figur).

Normal struktur



Struktur med cooper-par



Strukturen af materialer er beskrevet ved atomer (røde cirkler), der er bundet til hinanden i en perfekt gitterlignende struktur (figur til venstre). Til højre ses en situation, hvor en elektron (blå) har forvrænget gitteret og dannet et cooper-par med en anden elektron.

Når Cooper-par fører til, at et materiale bliver superledende, sker det, fordi elektronerne ikke længere kolliderer med hinanden, med vibrationer i atomgitteret eller med urenheder i materialet. Det er nemlig disse kollisioner, der skaber elektrisk modstand. Fordi elektronerne i en superleder alle befinder sig i samme grundtilstand, kolliderer de ikke, men strømmer roligt og parvist rundt.

ved den vinkel, kan vi endnu ikke forklare.»

Ekstremt følsomme målinger

For at Søren Ulstrup og hans kolleger kan måle, hvordan elektronerne opfører sig inde i det ultratynde materiale, må de arbejde i vakuum. Selv enkelte molekyler fra luften i rummet kan forstyrre måleudstyret, som er ekstremt følsomt.

»Vores forsøg fungerer kun under det, vi kalder for ultrahøjt vakuum. Derfor har vi bygget det her vakuumkammer,« siger han og peger på det tårn af instrumenter, han tidligere var bøjet ind over.

»Den summende lyd stammer fra en masse pumper, der hele tiden holder kammeret fri for luft og andre gasser. Trykket derinde er 10^{-10} millibar. Det svarer til 10^{-13} af trykket ved jordoverfladen. Så lavt et tryk, at man skal ud forbi den

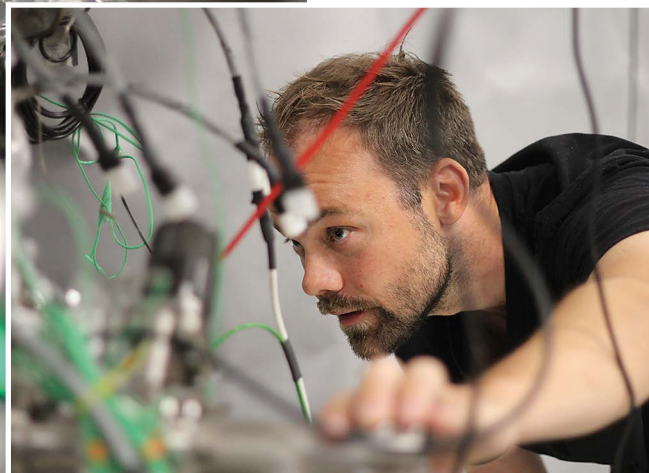
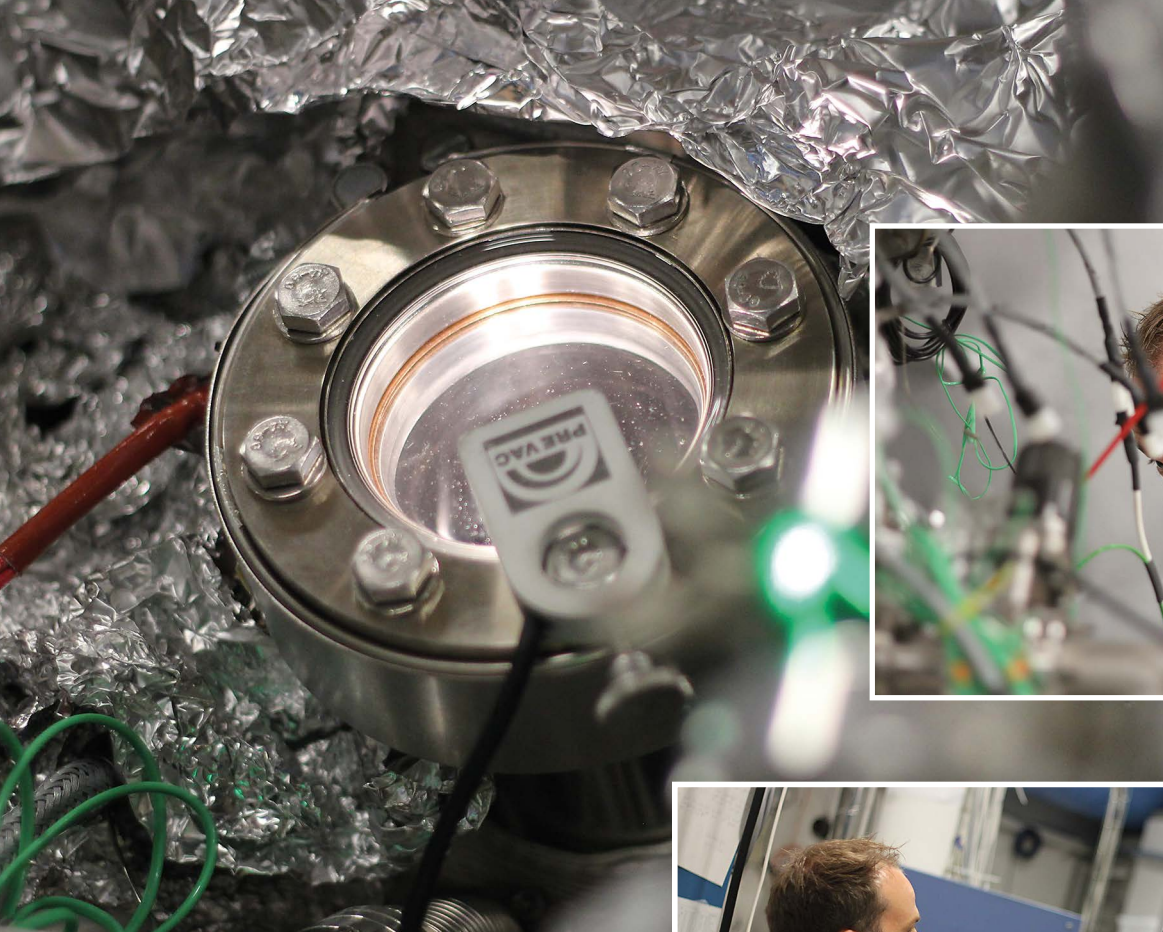
Hvad er superledere?

Superledere er materialer, der kan lede strøm uden varmespild. Det betyder, at når man først sender strøm ind i et kredsløb af superledere, vil strømmen i teorien drøne rundt i materialet i en uendelighed.

I almindelige kredsløb, eksempelvis vores computere og telefoner, taber materialet hele tiden energi i form af varme. Det er derfor computeren bliver varm og skal køles – og jo mere strøm den bruger, desto varmere bliver den.

I dag ved vi, at superledere opstår, fordi elektronerne i materialet danner Cooper-par. Men fordi den tiltrækkende vekselvirkning mellem de to elektroner gennem forvrængningen af atomkernerne er meget svag, kan Cooper-par nemt ødelægges igen. Det kræver blot, at materialet tilføres små mængder energi – eksempelvis i form af varme. Superledning forekommer derfor oftest ved ekstremt lave temperaturer.

I 1986 opdagede forskere de såkaldte højtemperatur-superledere. Det er superledere, der fungerer ved temperaturer over $-196,15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Netop den grænse er sat, fordi det er ved den temperatur, nitrogen (kvælstof) bliver flydende. Den nuværende rekord for en fungerende superleder er på $-139\text{ }^{\circ}\text{C}$. Den blev opnået i komplekse kobberoxider. Der findes endnu ikke en bredt accepteret teoretisk forklaring på højtemperatur-superledning. Fysikere er enige om, at der også dannes Cooper-par i disse materialer, men det er endnu ukendt, hvordan de dannes – og hvorfor de ikke går i stykker ved høje temperaturer.

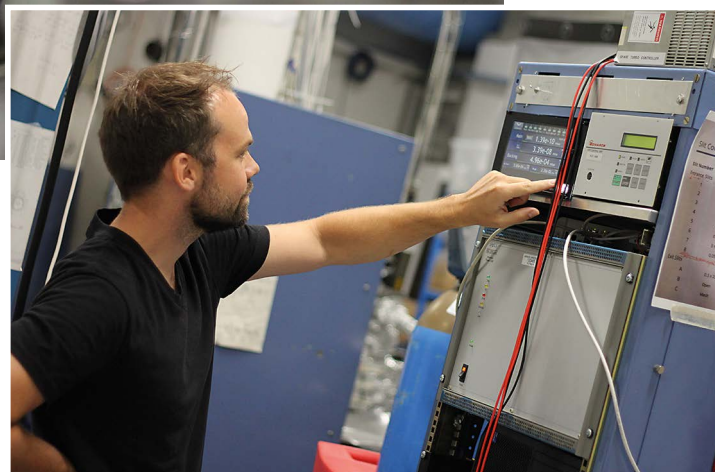


Fotos: Jeppe Kyhne Knudsen

Et nærbillede af et inspektionsvindue til vakuumkammeret. Det er nødvendigt for Søren Ulstrup og hans hold at kunne følge med i, at alt er som det skal være inde i kammeret.

Øverst til højre: Søren Ulstrup tjekker op på vakuumkammeret. Hans forsøg kræver, at han konstant skal være over kammeret og tjekke, at alt er okay. Det er svært at opretholde et ultrahøjt vakuum, og kun små ting skal gå galt, før et forsøg må tages om.

Nederst: Søren justerer det udstyr, som styrer vakuumkammeret.



Videre læsning:

Podcast på Videnskab.dk: Strøm uden energitab...

Om "twistronics" og superledning i grafen: Cao, Y., Fatemi, V., Fang, S. et al. Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices. Nature 556, 43–50 (2018).

Formidlingsartikel: quantamagazine.org/how-twisted-graphene-became-the-big-thing-in-physics-20190430/

Aktuel artikel i Science: Jeong Min Park et al. , Experimental evidence for nodal superconducting gap in moiré graphene. www.science.org/doi/10.1126/science.adv8376

Ny formidlingsartikel i Chemistry World: New evidence sheds light on mystery of 'magic-angle' graphene's superconductivity.

Nobelprisen i fysik i 2010: nobelprize.org/prizes/physics/2010/press-release/

internationale rumstation, 400 km ude i rummet, for at opnå noget tilsvarende.»

Pumperne suger stort set alle gaspartikler ud. Lige på nær hydrogen, som kan trænge gennem næsten alt – også metalvægge.

»For at holde hydrogenatomerne væk, har vi installeret ionpumper, som anvender højspænding til at fange restgasser af hydrogen i væggene af vakuumkammeret.«

Det tog Søren Ulstrup flere år at få samlet, tilpasset og kalibreret vakuumkammeret. Men nu fungerer det, og han kan lave nøjagtige forsøg med de ultratynde materialer for at blive klogere på, hvad der præcist sker, når de bliver superledende.

»Vi håber, at vi løbende kan lave små justeringer af materialet, så det bliver superledende ved højere temperaturer. Det er det, vi arbejder på lige nu. Eksempelvis afprøver vi forskellige rotationsvinkler, og vi eksperimenterer også med andre materialer såsom wolfram.«

Et eftertragtet materiale

Vi har sat os på Søren Ulstrups kontor. Et grønt skær fra træerne i universitetsparken under os, fylder det lille kontor. På reolerne ligger grundbøger i fysik, godt slidte efter gentagne opslag gennem årene. En computer fylder skrivebordet, og rundt omkring ligger et par stakke papirer. Ellers er kontoret overraskende tomt. En kontrast til laboratoriet i kælderens med ledninger, rør og dioder, der stak ud overalt i, hvad der virkede som rent kaos.

Søren kigger drømmende ud ad vinduet. Han er lige nu ved at søge penge til at omsætte sin forskning til en forretning. Et såkaldt spin-out. For der er mange, der gerne vil have fat i det ultratynde materiale, forklarer han.

»Vi er et af de eneste steder i verden, der kan lave det. Der findes måske en håndfuld steder på verdensplan, men vi kan nogle specielle tricks, som giver materialer af meget høj kvalitet.

Planen er i første omgang at sælge materialet til andre laboratorier. Ikke blot vil det være en god forretning, det vil også hjælpe forskningen på feltet fremad, da flere vil få adgang til at lave forsøg med det. Jeg håber, at det lykkes for os. ■

GYMNASIELÆRERDAG PÅ BIOLOGI

Institut for Biologi inviterer **tirsdag den 17. februar 2026** til et fagligt heldagsarrangement på Aarhus Universitet for undervisere i biologi og bioteknologi.

Hør forskere fortælle om bakteriers forsvarsmekanismer og dyrs tilpasninger til ekstreme miljøer, og deltag i øvelser om bl.a. planter vandbalance og bioinformatiske metoder som du kan tage direkte med hjem i klasselokalet.

Tilmeld dig **gratis** i dag!



AARHUS
UNIVERSITET



Læs mere og tilmeld dig på
forms.office.com/e/HXxNGHUcVL

Med flagermus på fuglefangst

Et internationalt forskerhold med deltagelse fra Aarhus Universitet har kastet lys over, hvordan Europas største flagermus jager og æder småfugle. Resultatet er for nylig offentliggjort i tidsskriftet *Science*, og det er fascinerende læsning om natlig luftakrobatik, drab og lemlæstelse.

Forskerne har praktisk talt sat sig til rette på ryggen af Europas største flagermusart – stor brunflagermus (*Nyctalus lasiopterus*) – ved at forsyne nogle af dem med bittesmå rygsække, der indeholdt biologgere, udviklet på Aarhus Universitet. Biologgerne er instrumenter, der kan optage flagermusenes bevægelser, acceleration, højde og lyd (inklusive flagermusenes ekkolokalisering-kald) – og derved kan de afsløre flagermusenes jagtteknikker i over en kilometers højde i mørket.

Forskerne var heldige, for biologgerne afslørede, at to af flagermusene havde været på fuglejagt. Flagermusene var fløjet over en kilometer op i nattermørket for at finde og an-



En stor brunflagermus. Foto: Jorge Sereno

gribe de intetanende fugle (mange trækken-fuglearter flyver højt oppe og om natten blandt andet for at undgå dagaktive rovfugle). At flagermusene kan opdage fuglene på den afstand skyldes, at deres ekkolokalisering-kald er kraftige og relativt lavfrekvente. Så snart de har udvalgt deres bytte, går de til angreb – det kan høres på den lange strøm af korte ekkolokalisering-kald. Fuglene kan for deres del modsat visse insekter ikke høre flagermusenes kald, så i bedste fald opdager de faren i sidste øjeblik og forsøger at flygte.

Dataene fra biologgerne viser, at de to flagermus forfulgte deres bytte i halsbrækkende dyk mod jorden, omtrent som jagerfly i nærkamp. Den ene gav tilsyneladende op efter 30 sekunders styrtduk, mens den anden flagermus fangede sit bytte tæt på jorden efter næsten tre minutters jagt. Mikrofonen opfangede 21 nødskrig fra fuglen (en rødhals) efterfulgt af 23 minutters tyggelyde fra flagermusen, mens den fløj vandret i lav højde.

Kombineret med røntgen- og DNA-analyser af spurvevinger, som er fundet under disse flagermus' jagtmarker, giver dataene fra de to flagermus et klart billede af, hvordan det sidste slag udspiller sig: Flagermusene bider fuglene ihjel for derefter at bide deres vinger af – formentlig for at mindske vægt og luftmodstand. Forskerne tror, at flagermusene derefter bukker haleflyvehuden mellem bagbenene frem som en kurv og gnasker fuglen i sig, mens den flyver.

Peter Gammelby, Aarhus Universitet. Kilde:
Science vol. 390, iss. 6769, pp. 178-181

Smolt-revet ved ekstremt lavvande. Bemærk, at alle sten er dækket af tang. Foto: Marion Brophy, DTU Aqua

Forfatterne



Kaja Vestrup West er studerende på Danmarks Tekniske Universitet (DTU) i Life Science Engineering. Kaja har arbejdet med forskningsprojektet omkring smolt-revet hos DTU Aqua i 2025. s222156@dtu.dk kaja.west@outlook.dk



Marie Hartlev Frausing er ph.d.-studerende ved DTU Aqua med Jon C. Svendsen som hovedvejleder. Marie er uddannet biolog og har de seneste år arbejdet med akustisk telemetri ved flere stenrev i Naturpark Lillebælt, herunder smolt-revet.



Matthew Chapman er kandidatstuderende i økologisk forvaltning og naturbevaringsbiologi ved Queen's University Belfast. Matthew har været i praktik hos DTU Aqua i foråret 2025 og har her arbejdet med smolt-revet.



Jon Christian Svendsen er seniorforsker på DTU Aqua og arbejder med forvaltning og genopretning af marine ressourcer. Jon udfører forskningsprojekter i tæt samarbejde med lokale og landsdækkende organisationer, der styrker livet i havet. jos@aqu.dtu.dk



Rejsen mod havet: ET STENREV SOM FØRSTE STOP

I Naturpark Lillebælt skal et nyt stenrev give havørred en bedre start på rejsen mod det åbne hav og vise, hvordan et simpelt greb som sten på havbunden kan bidrage til et sundere havmiljø.

Langs de danske kyster strækker Lillebælt sig som et smalt farvand, men under overfladen kæmper havet en stille kamp for livet. Økosystemet er nemlig under pres, især på grund af menneskelige påvirkninger. I årtier er store mængder næringsstoffer strømmet ud fra landbrug og spildevand, som usynlige floder af nitrogen og fosfor, der gøder havet til døde. Dette har ført til *eutrofiering* – en ubalance i næringsforholdene, der blandt andet kan føre til iltvind, så især bundlevende dyr har svært

ved at overleve. Årtiers overfiskeri har ligeledes ført til udtømming af fiskebestandene. Derudover er millioner af sten i tidens løb hentet op fra havbunden for at anvende dem til havnemoler, kystbeskyttelse og bygninger på land. Det har efterladt store områder med ensformig, sandet bund, hvor det kan være svært for vegetation og dyr at etablere sig og trives.

Men nu blæser der nye vinde over Lillebælt. Naturpark Lillebælt har sat kurs mod forandring med projektet Bælt i Balance. Projektet

forbedrer og genopretter havmiljøer i området, der strækker sig fra Trelde Næs til Hejlsminde, som rummer hav, fjorde og kystnære landskaber. Et vigtigt skridt blev taget i foråret 2023 ved Varbjerg, hvor over 2.400 kubikmeter sten blev udlagt på havbunden ved udløbet af Storå. Her danner stenene et nyt stenrev, skabt særligt med havørreden (*Salmo trutta*) i tankerne. Her er det meningen, at unge havørreder, kaldet smolt, kan finde skjul og tryghed, imens de tilpasser sig saltvandet som begyndelsen på rejsen til det åbne hav.

Sten skaber liv

Når du ser en stor sten på land, er den måske begroet af lidt mos eller lav. Løfter du stenen, kravler der måske nogle invertebrater (f.eks. regnorme) rundt nedenunder. Men det blegner i forhold til det myldrende liv, der tit udfolder sig omkring sten i havet. Sten og stenrev er afgørende for havet, da de i sig selv gør den ensformige sandbund til et mere varieret habitat. Stenene fungerer også som opvækst-områder, hvor yngel og småfisk kan gemme sig og finde ly. Det, der især bidrager til det livsunderstøttende habitat, som sten skaber, er forekomsten af makro-alger. Makro-alger (dvs. tang) hæfter sig til sten for ikke at blive revet løs af bølger og strøm. På den måde kan sten på havbunden fungere som ankre for tætte tangskove.

Disse skove har en central rolle i det kystnære økosystem og skaber talrige livsrum for mikroskopiske organismer, større bundlevende dyr, og fisk. Makro-alger klassificeres taksonomisk efter farven på deres plantelegeme, og inddeles i grønne, røde, eller brune alger. Farven er ikke bare kosmetisk, den er afgørende for, hvilke lysbølger algerne bedst kan udnytte til fotosyntese og dermed også, hvor dybt i vandet de kan vokse. Gennem fotosyntesen omdanner makro-alger lysenergi og CO₂ til ilt og glukose. På den måde

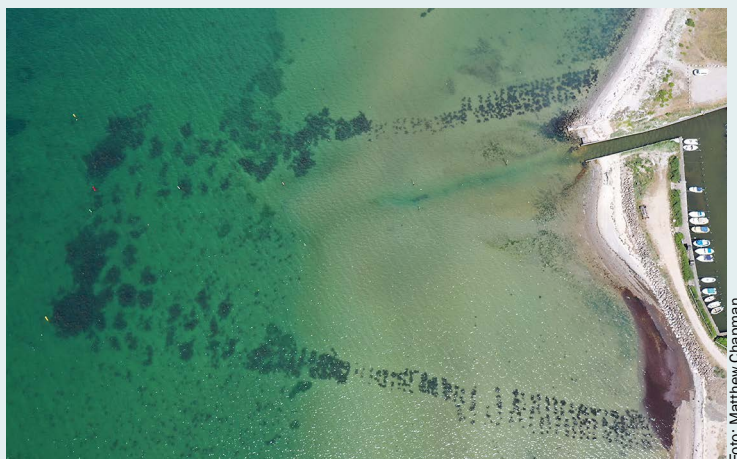
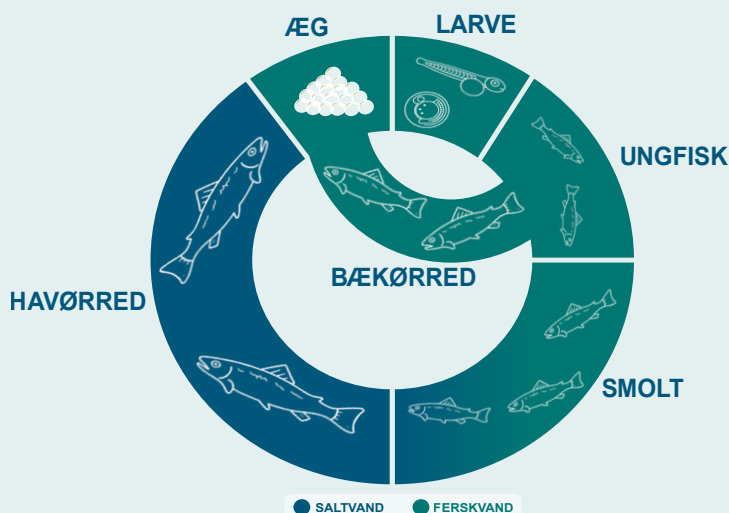


Foto: Matthew Chapman

Det V-formede smolt-rev set ovenfra ved udløbet af Storå ved Varbjerg Havn på Fyn.



Typisk livscyklus for havørreden. Nogle ungfisk bliver i ferskvand hele livet og bliver til bækørred. Andre gennemgår smoltifikation, hvor de ændrer sig for at kunne leve i saltvand som havørred. Både bækørred og havørred yngler i ferskvand.

bidrager de ikke bare med mad og levesteder – direkte og indirekte – til havets øvrige organismer – men også med ilt, som næsten alle

organismer er afhængige af for at overleve. At lægge sten ud i havet kan virke simpelt, men det har som regel stor betydning for den lokale biodiversitet.

Det nye smolt-rev skal være med til at "genoplive" Lillebælt og skabe grobund for en højere biodiversitet, hvor flere arter kan finde plads i det genopståede undervandslandskab.

Vi ved nemlig, at i havets verden er variation ofte nøglen til overlevelse – for jo mere varierende et marint miljø er, desto flere arter kan det som regel understøtte. Det er netop derfor, at et simpelt greb som sten på en sandbund kan være et stærkt første skridt mod et rigere og sundere Lillebælt.

Fisk med hjemve

Havørred er en *anadrom* fisk – den tilbringer en stor del af livet i havet, men vender trofast tilbage til ferskvand for at reproducere. Fisken søger ofte tilbage til netop det vandløb, hvor den selv kom til verden, for at gyde i løbet af vinteren. Livet begynder som et lille æg, godt gemt under et lag beskyttende småsten. Reden af småsten graver hunnen i vandløbets bund. Når tiden er inde, samles flere hanner omkring hende – rivaler, der kæmper om muligheden for at befrugte æggene. De befrugtede æg dækker

hun med halen, der hvirvler et beskyttende lag af småsten over æggene. I løbet af få dage kan en hun anlægge flere reder med befrugtede æg, før hun vender tilbage til havet. Hannerne bliver ofte lænere tid i vandløbet og forsøger at befrugte æg fra andre hunner, der passerer forbi.

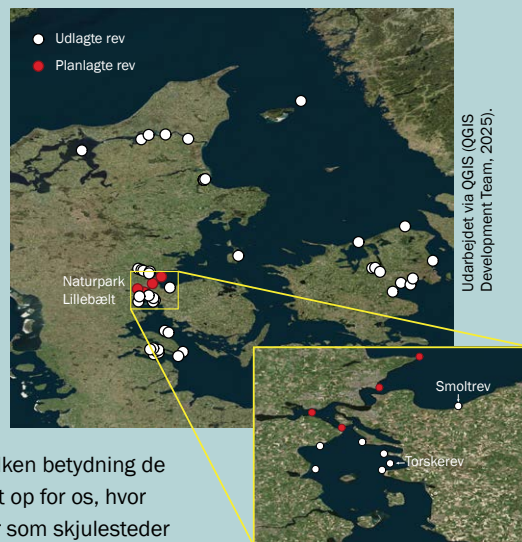
Når æggene er trygt placeret under småstenene, begynder inkubationen – den periode hvor den lille fisk begynder at tage form inde i ægget. Klækningen sker som regel om foråret, når vandet bliver var-

Da stenrevene forsvandt

De fleste danske havnemoler er bygget af sten med mange forskellige oprindelser – men man har især anvendt sten, som er opfisket direkte fra havbunden. Sten fra havbunden er også blevet anvendt til konstruktioner på land i langt over 100 år. Hvor mange sten, der præcist er blevet fjernet fra de danske farvande gennem tiden, er svært at sige. Men det skønnes, at hele 8,3 millioner kubikmeter sten blev fjernet fra havbunden mellem 1900 og 1999. Selvom det omfattende stenfiskeri i praksis stoppede ved årtusindskiftet, blev stenfiskeri først officielt forbudt i 2009.

Havbundens sten er i årevis blevet fjernet uden tanke for, hvilken betydning de havde for livet under overfladen. Men efterhånden er det gået op for os, hvor afgørende stenene – og de makro-alger, der gror på dem – er som skjulesteder og levesteder for et væld af marine dyr. Engang var fiskebestanden i Sejerø Bugt så stor, at det næsten virker ubegribeligt i dag. I 1960'erne, samtidig med at det intensive stenfiskeri tog fart i området, begyndte man at se en tilbagegang i torskbestanden. I samspil med andre negative påvirkninger som intenst overfiskeri og iltvind, førte denne udvikling til, at det i slutningen af 1990'erne ikke længere var muligt at leve udelukkende af torskefiskeri i bugten.

I dag forsøger vi at rette op på skader skabt af fortidens stenfiskeri. Danmark er i fuld gang, og det bugner med genopretningsprojekter. I Naturpark Lillebælt er fem stenrev blevet udlagt som følge af projektet Better Bird Life og to stenrev, smolt-revet og torske-revet, udlagt i projektet Bælt i Balance. Desuden er det planlagt, at der alene i Naturpark Lillebælt skal udlægges hele fire stenrev mere.



Placeringen af udlagte og planlagte rev i Danmark.



På billederne ses, hvordan den unge ørred, som lever i ferskvand, ændrer udseende under smoltifikation. Foto: DTU Aqua.

mere. Den nyklækkede ørredlarve er blot et par centimeter lang og bærer rundt på en lille "madpakke", nemlig blommesækken fra ægget, som ørreden lever af i de første par uger. Når blommesækken er ved at være tom, begynder larven forsigtigt at svømme ud fra reden og lede efter rigtig føde for første gang. I takt med at fisken vokser, stiger appetitten, og den må ud på opdagelse i et stadig større område for at finde nok mad og et godt sted at leve.

Ørredens forvandling

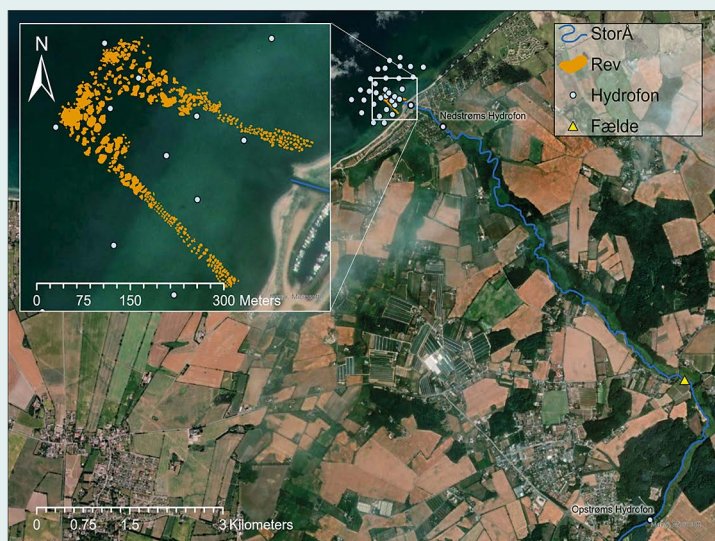
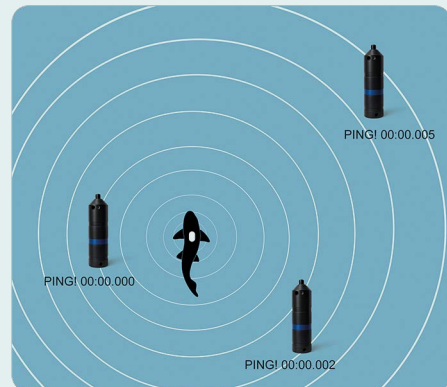
Nogle af de unge ørreder vælger at blive i det ferske, rindende vand hele livet og vokser op som bækørreder. De finder sig til rette i vandløbs skjulesteder og lever der. Men andre får mere eventyrlyst i blodet: Når de er blevet imellem 10-25 cm lange, efter et til fem år i ferskvand, begynder de at gennemgå en forvandling, kaldet smoltifikation. Det er under denne fase, at fiskene betegnes smolt.

Lyd som et værktøj til at følge fisk

I mange sammenhænge har vi brug for viden om, hvor dyrene i et bestemt område af havet bevæger sig hen, og hvornår de gør det. Den viden kan vi få via akustisk telemetri, en metode hvor lydsignaler bruges til at spore dyrenes færden i vandet. Ved smolt-revet er der placeret over 30 hydrofoner til at registrere mærkede fisk. En hydrofon er undervandsmikrofon, som opfanger lydsignaler fra sendere (transmittere), der er opereret ind i fiskene. Hver transmitter udsender et lydsignal med faste mellemrum og et unikt ID, så man kan kende forskel på de individuelle fisk.

Kort fortalt fungerer det på denne måde: Når mange hydrofoner opfanger det samme signal fra én fisk, kan vi bruge en metode kaldet triangulering til at beregne, hvor fisken befinder sig. Lyd bevæger sig med en kendt hastighed i vandet (omkring 1500 meter i sekundet) men hastigheden kan variere lidt afhængigt af vandets temperatur og dermed dets densitet. Hvis én hydrofon hører signalet en smule før de andre, betyder det, at fisken var tættest på netop den hydrofon. Fordi vi kender den nøjagtige placering af alle hydrofonerne, kan vi ved at sammenligne de små forskelle i modtagelsestid regne ud, hvor signalet kom fra. Dermed kan vi estimere fiskens position.

Figuren viser den præcise vandring for en enkelt mærket smolt indenfor en periode på 1,5 time, hvor data er indsamlet fra hydrofoner i Storå-udløbet i april 2022. Netop denne fisk svømmer tæt langs strandlinjen – en adfærd der blev observeret hos flere andre smolt.



Fotos: Matthew Chapman

Kortet viser placeringen af smolt-revet og de udlagte hydrofoner (bemærk, at der også er placeret en hydrofon opstrøms og en nedstrøms for fiskefælden i Storåen). Billederne til højre viser henholdsvis en hydrofon og en af de transmittere, der indopereres i smolt.

Smoltifikation er betegnelsen for de forandringer, som fisken gennemgår for at kunne leve i saltvand. Den mest i øjenfaldende forandring er fiskens farve: Den går ofte fra at være brunlig med røde prikker, til at blive blank og sølvskinnende med små sorte prikker. Sølvfarven fungerer som camouflage i havvandet og

hjælper fisken med at undgå rovdyr. Ud over farven skal fisken også kunne tilpasse sig det salte miljø. Det kræver, at fisken kan regulere salt- og vandbalancen i kroppen, en proces, der kaldes osmoregulering. I ferskvand optager fisken salte og udskiller overskydende vand, mens det i saltvand er omvendt: Her mi-

ster fisken vand og kan ende med for meget salt. For at klare denne udfordring justeres fiskens gæller under smoltifikation. I gællerne dannes særlige saltpumper, som aktivt kan pumpe salt ud af kroppen. Kroppen ændrer også form: Ørreden bliver slankere og mere strømlinjet, bedre tilpasset til det nye liv som



Foto: Matthew Chapman

Billederne viser fiskefælden, der er placeret omkring 4 km opstrøms for udløbet i Varbjerg Havn. Fiskefældens net ender i en lukket kasse, som ses på det store billede.



Foto: Kaja West

Billedet viser opsætningen, når smolten får indopereret den lille transmitter. Den grønne slange bruges til konstant at føre vand til fiskens gæller under hele operationen.



Foto: Matthew Chapman

Billede af en smolt med markering af, hvor den lille transmitter placeres indeni fisken.

langdistancesvømmer i havet. Smolt begynder ofte deres migration mod havet i foråret, hvor vandet bliver varmere. De passerer munden af vandløbet, i brakvandet, som tillader dem at tilpasse sig deres nye liv i saltvandet som havørred.

Smolt i knibe

I Danmark er lystfiskeri efter havørred populært. Det skyldes blandt andet, at der er over 7.000 km kystlinje i Danmark, hvilket nogenlunde svarer til kystlinjen omkring meget større lande som Tyrkiet eller Indien. Havørreden jager ofte tæt på land, og derfor ser man tit lystfiskere stå i deres waders et stykke ude i vandet, eller helt inde ved kysten. De fanger rigtig mange havørred hvert år, men fordi en stor

del af fiskene genudsættes, er det sjældent lystfiskere, der udgør den største trussel – det er tit naturens egne farer. Især for smolt, der jo svømmer fra vandløbene og ud i det åbne hav.

Her lurér én af deres største fjender: Skarven. Skarven er en elegant og effektiv rovfugl, hvis fjerdragt er helt sort med hvide og gule ansigtstegninger. Man ser den ofte langs de danske kyster og ved store søer, hvor den sidder med udstrakte vinger for at tørre sin fjerdragt, der ikke er vandskyende. Det lyder måske som en ulempe, men det er snarere en af dens evolutionære fordele. De tunge, gennemvædede fjer gør skarven i stand til hurtigt at dykke og forfølge

fisk i vandet. Og skarven er dygtig til sin jagtform. Undersøgelser viser, at skarven typisk æder op mod 50 % af de udvandrende smolt. For de små, blanke fisk, der forlader deres trygge barndomsbæk for at møde havet, kan skarven være forskellen mellem liv og død.

Lydbølger skal afsløre smoltens færden

DTU Aqua samarbejder med Naturpark Lillebælt og undersøger, om smolt-revet har en effekt på smolt fra Storå. I februar 2025 begyndte feltarbejdet i Varbjerg Havn. Med hjælp fra medlemmer af Varbjerg Motorbådsclub og lokale frivillige placerede vi hydrofoner rundt om revet. Hydrofoner er undervandsmikrofoner, som opfanger lydbølger

fra små transmittere, der er indsat i fiskene.

Hver transmitter har sit eget kodede signal, og når flere hydrofoner fanger signalet på forskellige tidspunkter, kan vi kortlægge, hvor fisken har svømmet. Hydrofonerne er forankret til bunden ved hjælp af enten cementblokke eller tunge metalkæder, så de bliver på den ønskede position. Samtidig er de fastgjort til en opdriftsenhed, såsom flagbøjer, der holder dem ophængt i den ønskede dybde i vandsøjlen.

Omkring 4 kilometer opstrøms fra udløbet i Varbjerg Havn har vi placeret en fiskefælde i Storå for at fange smolt. Fiskefælden består af et net langs åens bred og bund, som leder fiskene ind i en ruse, hvorefter de ender i en lukket kasse forbundet med nettet. Fælden er konstrueret, så den udnytter fiskenes naturlige bevægelse nedstrøms og gør det vanskeligt for fiskene at finde ud igen. Fælden placeres i vandet om aftenen, og fiskene sorteres om morgenen. Det er nemlig ikke kun smolt, som

fælden fanger, men også fisk som skrubbe, gedde og hundestejle. Fiskene migrerer oftest om natten, hvilket nedsætter risikoen for at blive set af rovdyr.

I alt fik 78 smolt, som alle var længere end 15 cm, indopereret en lille transmitter i bughulen. Før operationen blev fiskene placeret i vand med bedøvelse. Når fisken var bedøvet, blev den lagt på en bakke med rindende vand, og en lille slange førte frisk vand ind i fiskens mund, så gællerne kunne optage ilt fra vandet under hele operationen. Transmitteren blev forsigtigt lagt ind i bughulen via et lille snit lige bag fiskens brystfinne, som efterfølgende blev lukket med ét enkelt sting. Efter operationen blev fisken lagt i et kar med vel-iltet vand, så den stille og roligt kunne vågne op igen. Når fisken havde genoptaget normal svømmeadfærd, blev den genudsat i Storå, så den kunne fortsætte sin rejse.

Håber på succes!

Formålet med feltarbejdet, vi her har beskrevet, er at indsamle data, som kan vise, om smolt-revet fak-

tisk anvendes af smolt. I 2022 – før smolt-revet blev anlagt – udførte vi præcis det samme feltarbejde. Dengang fik også 78 smolt indopereret den lille sender, og kortlægningen af fiskenes bevægelse viste, at de primært opholdt sig langs kysten tæt ved land, hvor der er meget få skjulesteder. Smolt-revet er derfor etableret for at skabe skjulesteder og fouragerings-muligheder til fiskene. Ved at gentage feltarbejdet kan vi nu (2025) sammenligne fiskenes adfærd før og efter smolt-revets etablering og vurdere, om revet ændrer deres færden.

For at kunne erklære smolt-revet for en succes, skal de indsamlede data vise, at de mærkede smolt udviser et svømmemønster, hvor de opholder sig i længere tid ved smolt-revet, end de gjorde i det samme område i 2022, hvor der ikke var noget rev.

I august 2025 fjernede vi alle hydrofonerne omkring smolt-revet og i Storå. Nu begynder det store databehandlingsarbejde, hvor vi håber at kunne bekræfte vores hypotese. ■

Yderlig læsning
naturparklillebaelt.dk/smoltrev

Reenberg, C. H., Le, H. S., & Svendsen, J. C. (2023). Den, der fisker sten, fisker også fisk: Historisk beretning om fisk og fiskeri i Sejerøbugten. *Habitat*, 27, 28-37.

Miljøtilstand og presfaktorer i Lillebælt. DTU Aqua-rapport nr. 404-2022.

Havørredens livscyklus: Klemetsen, A. et al (2003): Atlantic salmon *Salmo salar* L., brown trout *Salmo trutta* L. and Arctic charr *Salvelinus alpinus* (L.): a review of aspects of their life histories. *Ecology of Freshwater Fish*, Vol. 12, Iss. 1.

Om brug af hydrofoner: Baden, C. et al: (2022): Using acoustic telemetry to locate flatfish spawning areas: Estuarine migrations of turbot *Scophthalmus maximus* and European flounder *Platichthys flesus*. *Journal of Sea Research*, vol. 183, 102187

Nielsen, C., Aarestrup, K., & Madsen, S. (2003). Udsætning og fysiologi hos ørredsmolt. *Fisk og hav*, (56), 12-21.

Læs Naturvidenskabelig Bachelor

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

RUC
Roskilde Universitet

Arbejd på tværs af naturvidenskabelige felter.

Arbejd med topforskere i moderne laboratorier.

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

Læs mere her:



Et får græsser i udmarken.
Foto: Bo Elberling

Forfatterne



Anders Bojen er kandidatstuderende.
twb613@alumni.ku.dk



Rose Cathrine Due er kandidatstuderende.
cnp760@alumni.ku.dk



Gyula Mate Kovács er postdoc. Han forsker i den rumlige udbredelse af landskabstyper og deres forandringer ved hjælp af remote sensing.
gmk@ign.ku.dk



Hans Frederik Engvej Hansen er ph.d.-studerende.
hfeh@ign.ku.dk



Bo Elberling er professor. Han forsker i processer i jordmiljøet herunder ændringer i arealanvendelse og drivhusgasser.
be@ign.ku.dk

Alle er ved Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet.

SÅDAN KAN DE FÆRØSKE JORDER HJÆLPE KLIMAET



Jordbundsanalyser sammenholdt med satellitdata fra Færøerne giver viden om, hvordan man kan binde mere carbon i den færøske jord. At reducere arealet med græssende får kan få en stor effekt, mens det derimod er tvivlsomt, om det vil hjælpe meget at rejse skov, viser analysen.

De fleste forbinder klimaforandringer med billeder af smeltende is, ekstremt vejr og stigende havniveau. Færre er måske klar over, at jorden under vores fødder har afgørende betydning for mængden af drivhusgasser i atmosfæren, og at en hensigtsmæssig arealanvendelse samtidig kan være en del af løsningen. Færøerne hører til blandt de lande med størst CO₂-udledning per indbygger i verden, primært som en konsekvens af landets omfattende fiskeindustri. Det har åbnet en debat om, hvordan man kan nedbringe frigivelsen af drivhusgasser og samtidig bruge landskabet på en måde, der øger carbonoptaget i de færøske jorder. Som et led i den proces har vi kortlagt carbonpuljerne i jorden, og samtidig undersøgt hvad skovrejsning, genopretning

af vådområder og græssende får betyder, hvis man gerne vil trække mere CO₂ ud af atmosfæren, og gemme det i jorden. Det viser sig, at skovrejsning ikke altid er en god idé, men at færre får derimod kan være en effektiv måde at binde mere carbon (kulstof) i jorden.

For at kortlægge carbonpuljerne er det nødvendigt at kende både landskabets sammensætning og jordens anvendelse. Det særlige færøske landskab er fra gammel tid delt op i indmark og udmark, en opdeling som stadig eksisterer. Indmarken udgør de indhegnede, opdyrkede arealer omkring bygderne, hvor der dyrkes grøntsager, og græs til fårenes vinterfoder. Disse arealer finder man i bunden af dalene, hvor der er læ for vinden, og terrænet er tilstrækkeligt fladt til, at der kan

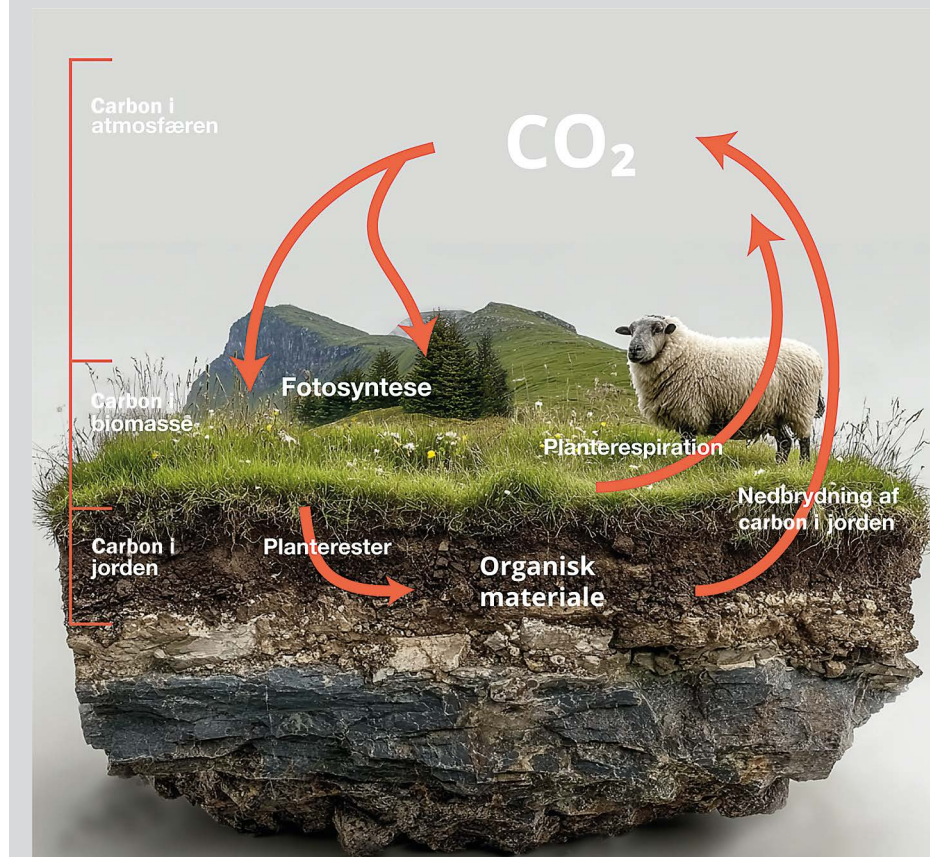
bygges huse, og jorden kan dyrkes. Det våde klima betyder, at store mængder nedbør samler sig i de flade dalbunde, og dræningskanaler, der leder vandet væk og gør jorden mere anvendelig, er en integreret del af landskabet her. Det betyder også, at mange vådområder, som i Danmark, er blevet drænet for at skabe mest muligt opdyrket areal. Udmarken, der udgør 76% af landets areal, er præget af stejle fjeldsider, som rejser sig til over 800 meters højde. Her findes gode vækstbetingelser for forskellige græsarter – året rundt græsser op mod 70.000 moderfår i landskabet, som hvert år får cirka 50.000 lam. Fårehold er dybt forankret i den færøske historie, kultur og livsstil. At Færøerne på dansk direkte betyder "fåreøerne" understreger, hvor central en rolle fårene har spillet.

Selvom Færøerne har begrænset naturlig skovvækst, har behovet for brændsel og rekreative områder siden begyndelsen af 1900-tallet ført til anlæggelse af plantager. De består primært af ikke-hjemhørende træarter hentet fra områder med lignende klima. I dag findes der 25 små plantager med et samlet areal på bare 0,6 km² – nogle med træer helt fra Patagonien.

Historiske pollendata, hentet fra bunden af søer på øen Sandø, peger på, at her aldrig har været en naturlig tæt skovvækst, som vi kender det fra Danmark. Der er dog fundet spor af piletræer, dun-birk og enebær. Bevoksningen har ændret sig i flere omgange, til dels på grund af klimaforandringer, men også som konsekvens af det stigende antal græssende får, som både holder bevoksningen nede og lægger pres på biodiversiteten. Dette er vigtig viden, eftersom mængden og typen af vegetation har stor indflydelse på, hvor meget carbon der ophobes i jorden i takt med, at planterne dør og delvist nedbrydes. I år 2000 blev der igangsat forsøg med hegnede områder i udmarken – ikke for at holde fårene inde, men for at holde dem ude. Formålet var at undersøge, hvordan vegetationen udvikler sig uden påvirkning fra græssende får. Disse hegnede forsøgsplot indgår i vores indsamling af jorddata i samarbejde med Erla Olsen fra Færøernes Universitet. Vores resultater viser, at fraværet af får har givet markant mere carbon i de øverste jordlag her 25 år efter forsøgets start.

Feltmålinger koblet med satellitdata

Fra hver arealtype har vi taget jordprøver for at analysere carbonindholdet i de forskellige jordlag og dermed at kunne beregne, hvordan landskabets topografi og anvendelse hænger sammen med mængden af carbon i jorden. Jordprøver giver generelt gode målinger, men med den indbyggede udfordring, at de målte værdier er afgrænset til netop det sted, hvor jordprøverne er taget. Fordi der hverken er tid eller



Forsimplet illustration af carbonkredsløbet på Færøerne. Illustration: Anders Bojen

Økosystemer og carbonlagring

Økosystemer kan både være en kilde til og et dræn af CO₂ i forhold til atmosfæren. Planter optager CO₂ fra atmosfæren gennem fotosyntesen, og herved bliver carbon bundet i planternes biomasse. Når planter dør, transporteres en del af det organisk bundne carbon ned i jorden som dødt organisk materiale. Under iltrige forhold kan der gennem en række mikrobielle processer blive frigjort til atmosfæren som CO₂. Hvis forholdene er rigtige – for eksempel hvis jorden er fugtig og kold – sker nedbrydningen af organisk bundet carbon meget langsomt, og der kan ophobes store mængder carbon i jorden over tid.

Klimatiske og geografiske forhold bestemmer derfor i høj grad, hvordan carbonpuljerne fordeler sig over og under jorden. I et koldt og fugtigt klima som det færøske, vil op mod 90% af carbonindholdet på et givent areal være under jorden. Hvis den våde jord tørrer ud, for eksempel ved dræning, øges nedbrydningen af dødt organisk materiale. Netop derfor er der brug for en større bevidsthed om, hvordan den eksisterende carbonpulje i jorden beskyttes bedst muligt gennem en god forvaltning, samtidig med at jorden også kan bruges aktivt til at binde mere carbon.

ressourcer til at tage jordprøver i hver en afkrog af Færøerne, bygger vi i stedet på den antagelse, at hver jordprøve er repræsentativ nok til, at vi med en vis sandsynlighed kan sige noget om carbonindholdet for hele arealet af samme type.

Men hvornår er jorden våd nok til, at vi betegner det som et vådområde og ikke udmark, hvor mange km² skov findes der, og er der mon lige

meget carbon i jorden på toppen af fjeldet og i bunden af dalen, spørger geografen. Svaret på disse spørgsmål, og mange andre, er en forudsætning for at kunne vurdere carbonpuljernes størrelse og geografiske fordeling. Heldigvis er der hjælp at hente fra rummet, hvor talrige satellitter hver dag indsamler enorme mængder data. De nyeste satellitter gør os i stand til at overvåge store arealer med avancerede sensorer,



Opdelingen af det færøske landskab i indmark og udmark ses tydeligt. Indenfor hegnet dyrkes græs, og der er gravet dræningskanaler i regulære intervaller. Udenfor hegnet strækker udmarken sig op ad fjeldsiden. Foto: Bo Elberling



Forsøgsområde med hegnede arealer i udmarken. Til venstre for hegnet har fårene ikke adgang, og vegetationen er præget af højt græs, lyng og små buske. Til højre, hvor fårene græsser, er vegetationen lavere og mere ensartet. Foto: Bo Elberling

der ikke bare tager flotte billeder, men som også kan kigge gennem skyer, give detaljeret viden om terrænets hældning, mængden af vand i vegetation og meget andet.

Brugen af satellitdata er blevet et centralt værktøj i klimaforskningen. Analyse af satellitdata giver mulighed for at se de store sammenhænge i en skala, som er svært at opnå gennem feltmålinger alene. Ved hver ny overflyvning sendes nye data ned til os, så vi kan følge udviklingen i store økosystemer over tid. I denne undersøgelse har

værktøjer til analyse af satellitdata blandt andet gjort det muligt for os at registrere små forandringer i vegetationen, vurdere variationer i jordfugtighed og knytte mønstre i vegetationen til områder, hvor får græsser. Alt sammen for at kunne bringe den detaljerede viden vi har fra jordprøverne op i en skala, der dækker hele Færøerne.

Carbonlagring i vådområder

Ikke overraskende er der mest carbon lagret i de færøske vådområder. De våde betingelser i jorden betyder, at dødt plantemateriale

ikke nedbrydes så hurtigt, og derfor opbygges tykke, carbonrige jordlag. I fjeldområderne er carbonlagringen begrænset af, at grundfjeldet ofte ligger tæt under overfladen. Resultater som disse er vigtige at sætte ind i en geografisk kontekst. Ifølge vores kortlægning er der få reelle vådområder tilbage, og deres andel af den samlede carbonpulje udgør derfor kun 1-2%.

Man skal huske, at uden dræningskanalerne ville et langt større areal være at betragte som vådområde. Det rejser spørgsmålet: Hvad sker der, hvis dræningskanalerne dækkes til? Studier fra Island og vestlige Irland med et lignende nordatlantisk klima viser, at der er betydelige klimagevinster ved at sløjfe dræningen, og genoprette vådområderne. Det ligner plukning af en lavthængende frugt, som man ynder at udtrykke det i klimadebatten – altså et tiltag, som giver en stor effekt for en relativt lille indsats.

Omvendt er dræningskanalerne jo gravet af en grund. Den færøske natur byder på få arealer, der egner sig til græsdyrkning, og dem har man villet udnytte bedst muligt. Behovet for arealer til græsdyrkning hænger dog tæt sammen med fårebestanden og produktion af foder. Reduceres antallet af får, falder efterspørgslen på foder tilsvarende – det kunne frigive arealer i indmarken, som i dag holdes tørre med dræning.

Færre får

Ifølge kortlægningen findes mere end 80% af carbonpuljen i udmarken. Vi har taget jordprøver fra udmarkarealer, der afgræsses af får, og sammenlignet dem med prøver fra nærliggende arealer, hvor får ikke har haft adgang siden år 2000. På de afgræssede arealer viser prøverne 14 kg carbon pr. m² i den

øverste halve meter jord, mens der på de ikke-afgræssede arealer er hele 24 kg carbon pr. m² – altså tæt på en fordobling af carbonindholdet.

Med denne viden har vi beregnet et scenarie, hvor 10% af udmarken hegnes, så fårene ikke har adgang. Ifølge vores beregninger giver det en øget årlig binding på 35.900 ton carbon – svarende til cirka 132.000 ton CO₂ – fra atmosfæren og ned i jorden. For at sætte det tal i perspektiv, udgør det op mod 13,5% af Færøernes årlige CO₂-udledninger. Beregningen rummer usikkerheder, men det ændrer ikke på, at der er tale om en betydelig reduktion, som ovenikøbet kan opnås billigt. Fåreholdet betyder nemlig relativt lidt for den færøske økonomi.

Skovrejsning på Færøerne

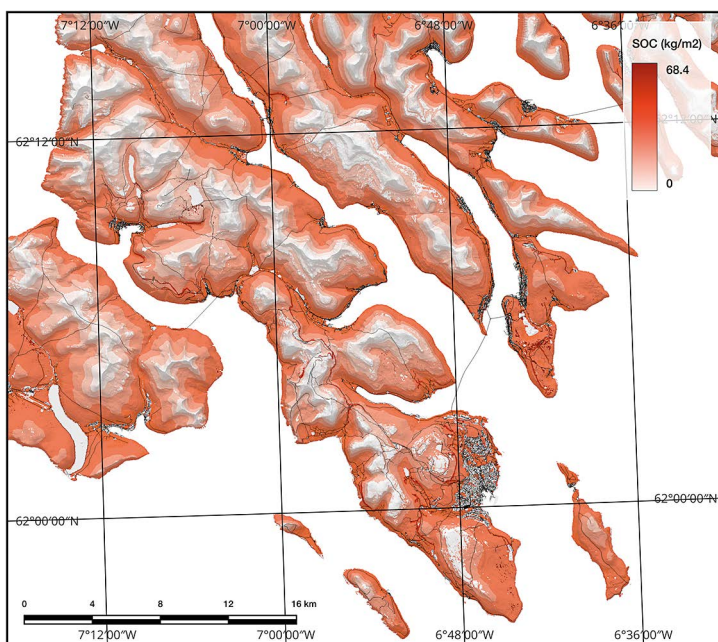
Formålene med at plante skov på Færøerne er mange. Ønskerne har blandt andet omfattet flere træer til rekreative værdier, læ, erosionskontrol og CO₂-binding via fotosyntesens optagelse af CO₂. Gode og vigtige formål, men er skovrejsning nødvendigvis en effektiv måde at binde CO₂ på under betingelser som de færøske?

Der er flere udfordringer med skovrejsning her, som har indflydelse på den samlede carbonbinding i skoven. Skovvæksten i de 25 små plantager er spredt, og træerne bliver ikke særlig høje, og det betyder, at mængden af biomasse, og dermed mængden af carbon, bliver betydeligt mindre sammenlignet med skove længere mod syd. Dertil kommer, at den våde jord ofte drænes, så træerne bliver mere rodfaste – med for meget vand risikerer rødderne at rådne. Den opmærksomme læser har måske allerede gættet ulempen her. Dræning af jorden kan betyde et øget tab af carbon fra jorden til atmosfæren, og effekten af skovrejsningen er således i minus fra starten. Vores resultater underbygger denne hypotese: I jorden under den dræned skov målte vi 12,6 kg carbon per m² – altså mindre end i udmarken, hvor jorden får lov at passe sig selv. Vi har sammenlignet vo-



Foto: Elise B. Elberling

Jordbundsanalysen starter med indsamling af jordprøver. Der tages ringprøver i fire forskellige dybder, så ændringer af carbonindholdet i dybden kan analyseres. Det øverste jordlag er en anelse mørkere på grund af et højere carbonindhold.



Kort over carbonpuljer i jorden for et udsnit af Færøerne, angivet i enheden kg carbon per m² i den øverste halve meter. Illustration: Anders Bojen & Cathrine Rose Due

res resultater med studier fra Norge, Island og Skotland, og konklusionen er rimelig klar. Klimagevinsten ved skovrejsning på Færøerne vil være meget lille, hvis overhovedet nogen.

Sammenfattende kan vi konkludere, at det ikke nødvendigvis er en god idé at male med den brede skovpensel alle steder. Analyse af lokale processer og brug af jorden er afgørende for at forstå, hvad der virker netop her. En reduktion af

fårebestanden giver mere biomasse over jorden og dermed øget carbonlagring i jorden. Samtidig mindskes behovet for foder, hvilket igen øger incitamentet til at tilbageføre opdyrkede arealer til vådområder. I det globale klimaregnskab har Færøernes forvaltning af jorden og landskabet en ganske lille effekt, men undersøgelser som denne kan højne vores bevidsthed om, hvordan landskabet kan bidrage til både carbonlagring og klimahandling. ■

Projektet er delvist finansieret af Global Wetland Center ved Københavns Universitet, som er finansieret af Novo Nordisk Fonden.

Videre læsning

Kaj Sand-Jensen, Marta Bauman, Lars Båstrup-Spohr og Hans-Henrik Bruun (2021): Hvilken natur kan vi få på våde lavbundslande? *Aktuel Naturvidenskab* nr. 6.

Veihe, A., Thers, M. (2007): Pedogenesis and root development in a complex geomorphologic setting of the Faroe Islands. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 38, 293–314.

Verbrugge, L.N.H. et al (2022): Navigating overgrazing and cultural values through narratives and participatory mapping: a socio-cultural analysis of sheep grazing in the Faroe Islands. *Ecosyst. People* 18, 289–302.

Elberling, Bo., Kovács, G.M., Bojen, A., Due, R.C., Hansen, H.F.E. & Erla Olsen (2025) Soil carbon stocks and storage potential in relation to land use changes in Faroese soils (artikel-udkast)

Det finske Olkiluoto-atomkraftværk består af tre reaktorer, hvor den nye reaktor 3 alene har en effekt på hele 1.600 MW. Den har dermed den største effekt for en enkelt reaktor i Europa. Foto: Shutterstock.



Atomkraft på dagsordenen igen: **FRA FORBUD TIL KLIMADEBAT**

Atomkraft har i årtier været fortællingen om ulykker med nedsmeltede reaktorer, radioaktivt udslip og uanbringeligt atomaffald. Trods en historisk stærk modstand mod kernekraft i Danmark, rører debatten på sig igen, og det er relevant i en tid med klimakrise og et næsten umætteligt behov for energi, siger Hans Fynbo, professor i kernefysik ved Aarhus Universitet.

Forfatteren
Henriette Stevnhøj,
journalist, Aarhus
Universitet



Om forskeren

Hans Fynbo er professor i kernefysik ved Institut for Fysik og Astronomi ved Aarhus Universitet.

Han arbejder primært med grundforskning om atomkerner og kerneastrofysik og har siden 2023 undervist i reaktorfysik.

fynbo@phys.au.dk

Faktaboksene er udarbejdet af Aktuel Naturvidenskab.

Få emner indenfor energiforsyning har vakt så stærke følelser som atomkraft eller kernekraft, som er den mere teknisk korrekte betegnelse, fordi energien netop kommer fra spaltning af atomets kerne (fission). Mange danskere kender formentlig det gule logo med den smilende sol og teksten "Atomkraft? Nej tak" – et symbol, der i 1970'erne og 1980'erne blev ikonisk for modstanden mod atomkraft i Danmark.

Modstanden førte til, at et flertal i Folketing i 1985 stemte nej til atomkraft som en del af fremtidens energiforsyning. Beslutningen gjorde Danmark til et af de få lande i Euro-

pa, som aktivt fravalgte atomkraft. Modstanden byggede blandt andet på en stærk antiatomkraft-bevægelse (Organisationen til Oplysning om Atomkraft, OOA), som havde skabt stor skepsis i befolkningen. Ulykker som Three Mile Island forstærkede modstanden og frygten for udslip af radioaktive stoffer.

Det spillede også ind, at der ikke fandtes, hvad der blev anset for en tilfredsstillende løsning på, hvad man skulle stille op med radioaktivt affald. Det blev set som uacceptabelt at efterlade affald, som kunne være farligt i tusindvis af år – de planer, der var for deponering af det brugte brændsel, blev af nogle betragtet som usikre.

I stedet satsede Danmark i første omgang på fossil gas og nye kul-kraftvarmeværker med Avedøreværket (1990), Fynsværket (1991), Esbjergværket (1992) og Nordjyllandsværket (1998), hvoraf det sidste stadig er i brug. Samtidigt udvikledes vedvarende energi som vind- og solkraft i kombination med biomasse og energibesparelse.

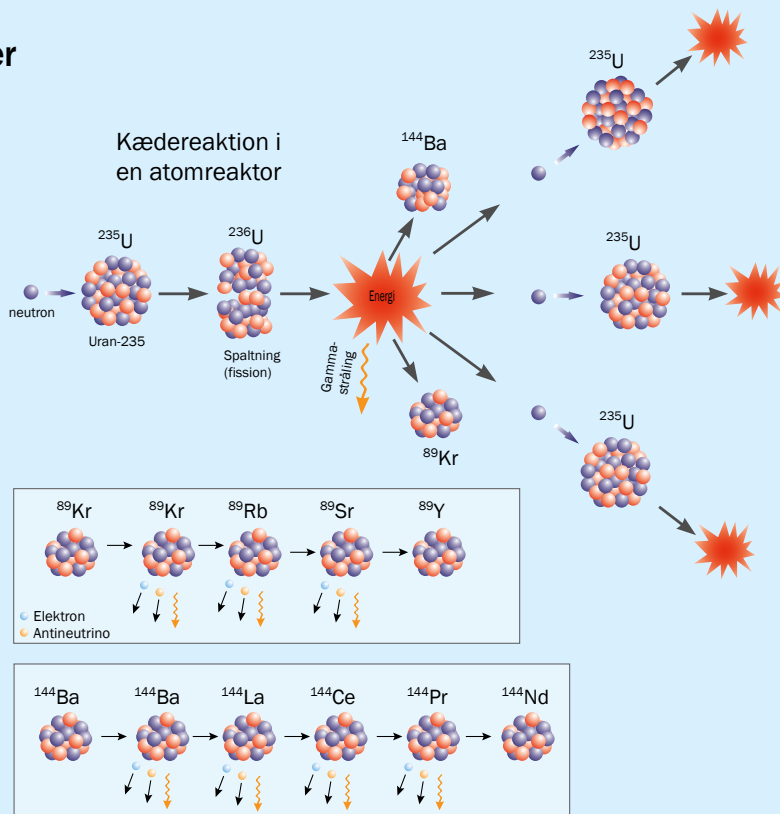
Det har blandt andet banet vejen for Danmarks vindmølleindustri, men har omvendt ledt til en stor afhængighed af i første omgang kul og sidenhen biomasse og kun en ret beskeden reduktion af vores CO₂-udledning, når biomassen regnes med.

Kernespaltning og kædereaktioner

Kravet til brændslet i en atomreaktor, er, at atomkernerne i brændslet skal kunne spaltes, når de optager en neutron – sådanne atomkerner kalder man fissible. Den naturlige isotop uran-235 udmærker sig ved at kunne netop det. Det kan den langt mere almindelige isotop uran-238 (som udgør over 99 % af naturligt forekommende uran) derimod ikke umiddelbart. Men når uran-238 har optaget en neutron, henfalder den efter kort tid ved udsendelse af en elektron (betapartikel) til neptunium-239 og derefter ved endnu et henfald til plutonium-239. Og plutonium-239 er fissibel. I lighed hermed kan isotopen thorium-232 optage en neutron og derefter henfalde til den fissible isotop uran-232. Isotoperne uran-238 og thorium-232, der kan "forædles" til brugbart brændsel, kalder man fertile. Denne forædling foregår typisk i en såkaldt formeringsreaktor, men i princippet kan de laves i enhver reaktor.

Figuren viser en kædereaktion i en reaktor, hvor uran-235 optager en neutron og derefter spaltes til krypton og barium (det kan også være andre isotoper, der dannes ved spaltningen). Samtidig frigives tre neutroner, der efterfølgende kan optages af nye uran-235-kerner, som dermed spaltes osv.

Nedenunder er vist, hvordan spaltningsprodukterne krypton og barium efterfølgende kan henfalde til andre isotoper ved udsendelse af en elektron (betahenfald), antineutrino og gammastråling – i nævnte rækkefølge, men indenfor så ultrakort tid, at der i praksis er tale om samtidige hændelser. Selvom disse spaltningsprodukter også er radioaktive, er det ikke



dem, der udgør den største udfordring ved opbevaring af atomaffaldet, da deres halveringstid typisk er relativt kort (i størrelsesordenen få hundrede år). Det er derimod den "ubrugte" del af uranbrændslet – eller tunge isotoper som plutonium-239, der også dannes i kerneprocesserne, som er det største problem, da halveringstiden af disse er flere tusinde år. Faktisk er der meget energi gemt i disse tunge grundstoffer, og der arbejdes derfor på at udvikle reaktorer, der kan udvinde denne energi i stedet for at deponere elementerne i slutlagre.

Atomkraft igen på dagsordenen

Den seneste tid er debatten om atomkraft blevet vakt til live igen. For eksempel har Liberal Alliance for nylig fremlagt et udspil, som handler om at gøre op med forbuddet og indføre atomkraft i Danmark.

Hans Fynbo, professor i kernefysik ved Aarhus Universitet, fornemmer, at debatten stadig er en varm kartoffel, men også, at interessen for regulær viden om atomkraft er vokset. Det mærker han ikke kun hos de studerende, han har undervist i emnet de seneste tre år, men også ude blandt folk, når han holder foredrag i erhvervsklubber og på Folkeuniversitetet.

»Efter Ruslands invasion i Ukraine blev forsyningssikkerhed pludselig meget konkret, og energi er ikke længere bare et spørgsmål om miljøhensyn og klima. En del unge tager også afstand fra den ældre generations modstand, fordi de ikke har tillid til, at sol og vind kan stå alene som løsning på klimakrisen. Det har givet et fornyet syn på atomkraft som en mulig energikilde«, siger Hans Fynbo.

Det 40 år gamle forbud mod atomkraft i Danmark har dog sat sine spor, mener Hans Fynbo.

»Set fra et forskningsperspektiv står vi mere eller mindre på bar bund, hvis forbuddet om atomkraft i Dan-

mark bliver ophævet. Forskningsområdet har ligget på vågeblus i årtier, og det er ikke bare ærgerligt, men også en problematisk position«, mener Hans Fynbo.

En kædereaktion i en reaktor

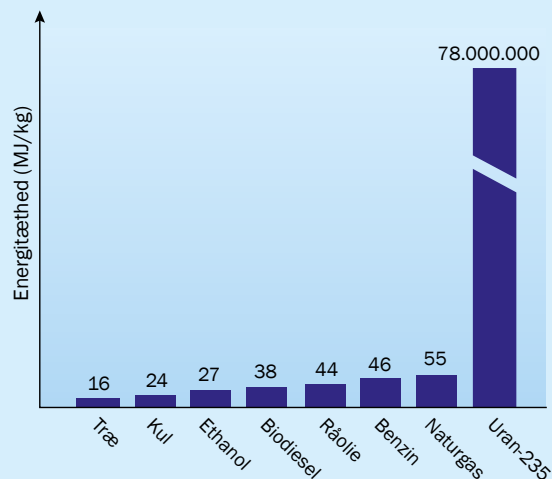
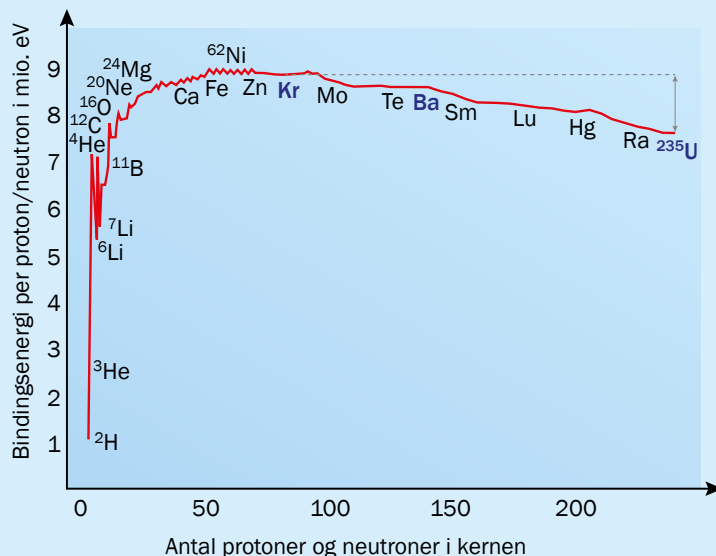
Før debatten kan forstås, må vi først en tur ned i selve reaktorkernen for at se, hvordan energien overhovedet bliver skabt. Grundlæggende er atomkraft at frigive energi, der kommer ved at spalte store atomkerner. I et atomkraftværk bruges et tungt grundstof som uran som brændsel. Når en urankerne spaltes, frigøres der en stor mængde energi i form af varme. Samtidig dannes nye neutroner, som kan ramme andre ker-

Energi i atomkerner

At atomkraft er en så potent energikilde, hænger sammen med, at kræfterne i atomkerner er langt stærkere end kræfterne mellem atomer. Derfor kan kerneprocesser producere meget større energimængder end kemiske processer, hvor atomer og molekyler reagerer med hinanden. I fysikken og kemien beskriver den såkaldte Q-værdi den energi, som frigives i en reaktion – eller som kræves, for at den kan foregå (en positiv Q-værdi betyder, at der frigøres energi i processen). Q-værdien for en kernereaktion beregnes ud fra forskellen mellem massen af atomkerner og partikler i starttilstanden og i slutttilstanden. Denne masseforskel kan omregnes til energi ved hjælp af Einsteins formel $E=mc^2$, som netop viser, at masse og energi er ækvivalente størrelser.

Figuren viser bindingsenergien per proton/neutron (målt i millioner elektronvolt, eV) for en række forskellige isotoper i forhold til det samlede antal protoner/neutroner i kernen (den samlede bindingsenergi for isotopen kan altså findes ved at gange tallet på y-aksen med det samlede antal protoner/neutroner i kernen). Når uran-235 spaltes til for eksempel barium og krypton, har de sidstnævnte en højere bindingsenergi per partikel – forskellen er cirka en million elektronvolt per proton/neutron. Denne energiforskel frigives ved spaltningen, hvilket betyder at der samlet frigives cirka 200 millioner elektronvolt ved spaltning af en enkelt uran-235-kerne. Hvis man regner det om til enheden joule, vi normalt bruger om energi, svarer det til 3×10^{-11} joule per spaltet uran-235-kerne, da 1 elektronvolt er lig med $1,6 \times 10^{-19}$ joule. Det betyder, at 1 kg rent uran-235 kan producere 78 millioner megajoule energi. Energitætheden i uran er altså helt enormt stor sammenlignet med konventionelle brændsler (se figur).

Bemærk i øvrigt, at hvis man ser på den modsatte ende af kurven, fremgår det, at man i stedet for at spalte



atomer kan frigøre en masse energi ved at fusionere to lette kerner til en tungere – for eksempel to tunge hydrogenisotoper (deuterium) til helium.

ner og få dem til at spaltes – det kaldes en kædereaktion. Varmen fra spaltningen bruges til at opvarme vand, så der dannes damp. Dampen driver en turbine, der er koblet til en generator, som producerer elektricitet. Eller varmen alene kan bruges til for eksempel fjernvarme.

Brændslet i et atomkraftværk afhænger af typen af reaktor, men normalt er det uran, der er et tungt, naturligt metal, der findes i jordskorpen. Den naturlige isotop uran-235 kan bruges direkte, mens uran-238, som udgør over 99 % af naturligt forekommende uran, først

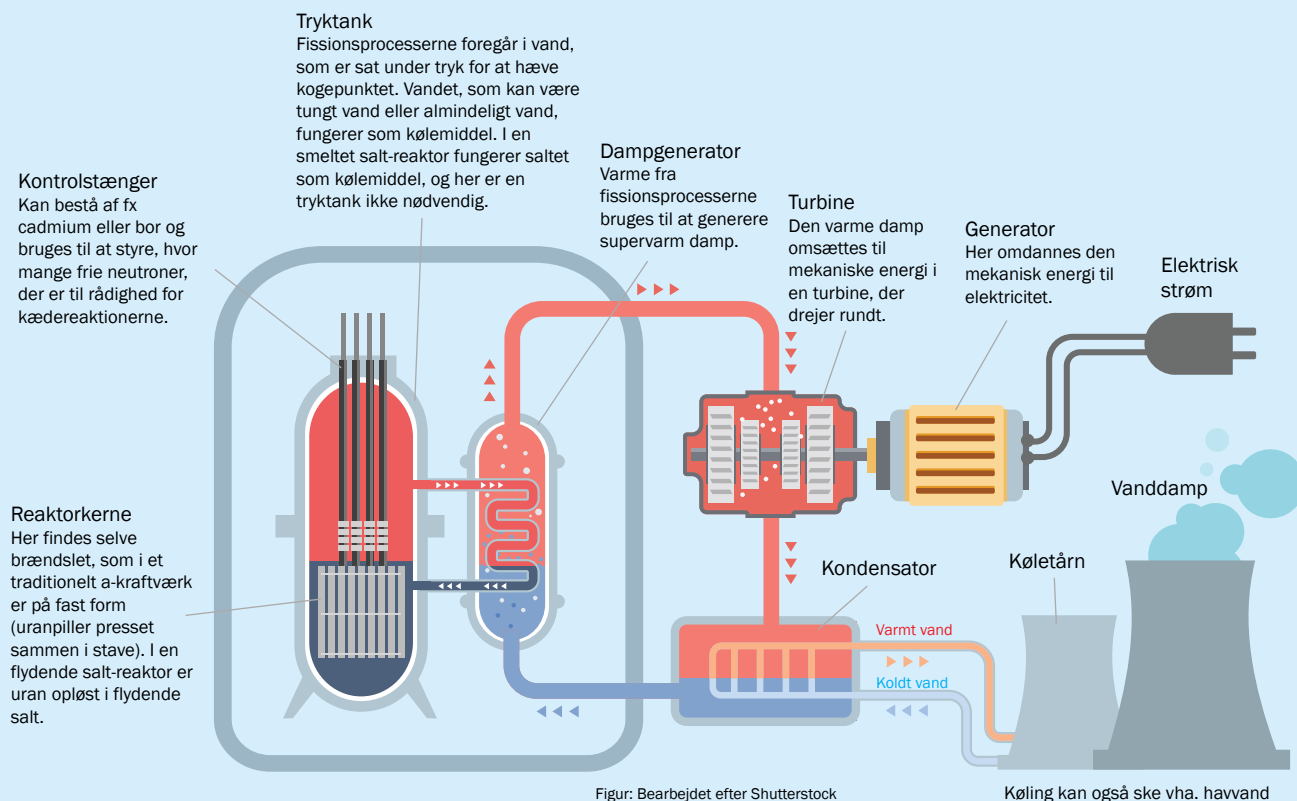
skal omdannes til plutonium-239 for at kunne spaltes i kædereaktioner (se boks).

I forhold til traditionelle kraftvarmeverker, der bruger kul, affald eller biomasse som brændsel, skal et atomkraftværk bruge en forsvindende lille mængde uran. I praksis svarer cirka 1 kilo uran til energien i cirka 2,5 millioner kilo træ.

De første kommercielle atomkraftværker blev bygget i 1950'erne. De oprindelige reaktordesigns er siden blevet udviklet, så man i dag taler om, at moderne reaktorer tilhører generation 3.

I dag er der på verdensplan 31 lande, der udnytter atomkraft til produktion af elektricitet, fordelt på cirka 440 reaktorer. Samlet bidrager det med cirka 9 procent af verdens elektricitetsproduktion. USA er klart det land i verden med flest atomkraftreaktorer i drift – 94 styk – mens Kina ligger nummer 2 med 57.

I Europa er Frankrig med 56 reaktorer det land med flest aktive atomreaktorer, som dækker cirka 70 procent af landets elektricitetsbehov. Herefter kommer Rusland med 36 reaktorer, Ukraine med 15 reaktorer og Storbritannien med ni.



Sådan virker et atomkraftværk

Et atomkraftværk er i princippet et dampkraftværk, hvor varmekilden er en kernereaktor. Processen består af fire hovedtrin: I reaktoren skaber kontrollerede fissionsprocesser en enorm mængde varmeenergi. Den overføres via et kølemiddel (for eksempel vand) til at producere damp. Dampen driver en turbine, som er forbundet til en generator, der omdanner den roterende bevægelse til elektrisk energi. Selvom princippet er det samme, findes der mange forskellige reaktortyper. Forskellene ligger i selve reaktorens design, som har betydning for værkets effektivitet, sikkerhed og brændselstype. De afgørende designvalg er: Kølemiddel og moderator. Hvilket stof bruges til at transportere

varmen væk fra kernen (kølemiddel) og til eventuelt at nedbremse neutronerne for at holde fissionen i gang (moderator). Ofte er det den samme ting, for eksempel almindeligt "let vand" eller "tungt vand". De fleste reaktorer i dag bruger langsomme (termiske) neutroner, som er blevet nedbremset (modereret). Fremtidens reaktorer kan i højere grad komme til at bruge hurtige neutroner, som ikke nedbremses. Her kan kølemidlet for eksempel være smeltet bly eller smeltet natrium. Hvad angår selve brændslet bruger langt de fleste reaktorer fast brændsel i form af stave, men der udvikles også typer med brændslet opløst i flydende salt.

Generation I

Tidlige prototype-reaktorer



Fermi-1, USA

Generation II

Kommercielle atomreaktorer



Cattenom, Frankrig

Generation III/III+

Evolutionære designs – avancerede letvands-reaktorer



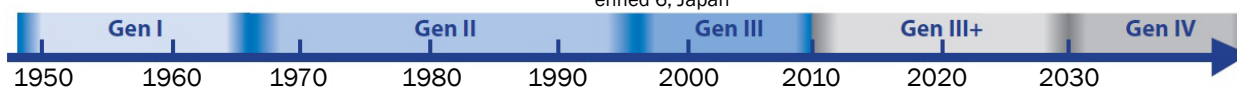
Kashiwazaki-Kariwa, enhed 6, Japan



Novovoronezh II, Rusland

Generation IV

Nye designs – fx små modulære reaktorer eller smeltet-salt-reaktorer



Overordnet inddeler man kernereaktorer i fire generationer, hvor de fleste aktive atomreaktorer i dag vil klassificeres som generation II, som i princippet har samme design som de første kommercielle kernereaktorer. Moderne kraftværker er generation III (eller III+), som er videreudviklinger af generation II-reaktorer med forbedret sikkerhed og effektivitet. Generation IV henviser derfor til fremtidens reaktorer, der endnu er under udvikling som smeltet-salt-reaktorer, og som først forventes at komme i kommerciel drift fra cirka 2030.



Foto: Shutterstock

Ulykker har sat sit præg på debatten om atomkraft og gør det stadig. Tjernobyl-ulykken skete den 26. april 1986 på Tjernobyl-atomkraftværk nær byen Pripjat i det daværende Sovjetunionen, nu Ukraine. En sikkerhedstest gik galt, og reaktoren overophedede, hvilket førte til en eksplosion og brand. Store mængder radioaktivt stof blev spredt, et ukendt antal mennesker døde eller blev syge, og tusinder måtte evakueres. Området omkring reaktoren er fortsat ubeboet, og ulykken førte til strengere sikkerhedsregler for atomkraft verden over. I baggrunden ses det halvrunde ståltag, som dækker den ødelagte reaktor 4 med den midlertidige sarkofag. Taget er 275 meter bredt, 108 meter højt og har kostet cirka 12 milliarder kr. at fremstille i 2016. Det skal forhindre yderligere udslip.

Foruden atomkraft til energiproduktion, findes der på verdensplan omkring 220 forskningsreaktorer, som udover forskningsformål også bruges til for eksempel produktion af medicinsk udstyr eller isotoper brugt i industrielle processer. Også i Danmark har vi været med på vognen, idet Risø Forskningscenter i perioden 1957-2001 drev tre forsøgsreaktorer, som siden blev nedlagt og afviklet. Selvom vi ikke har kernekraft i Danmark, findes der to virksomheder (Saltfoss og Copenhagen Atomics), som arbejder med udvikling af små smeltet-salt-reaktorer.

Lange udsigter til el fra a-kraft

Hans Fynbos motivation til at bringe viden om atomkraft ind i debatten om energiforsyning i Danmark er for at balancere diskussionen.

»Energipolitik handler om miljø, sikkerhed og økonomi, der skal afvejes. I den diskussion skal viden om

atomkraft som energiforsyning tages med ind. I takt med, at vi bliver stadig flere mennesker på jorden og klodens temperatur stiger, haster det med at finde driftssikre alternativer til fossil energi. I Frankrig og Sverige er det lykkedes at reducere brug af fossile brændsler, og forklaringen er mestendels atomkraft», siger Hans Fynbo.

Selv om forbuddet mod atomkraft blev ophævet i Danmark, vil det tage noget tid, før der løber strøm fra kernekraft i danske elledninger, vurderer han.

Det internationale atomenergiagentur (IAEA) har en køreplan for opbygningen af de nødvendige faglige og myndighedskompetencer. Hvis vi i Danmark i dag beslutter os for at indføre atomkraft, vil det tage 10-15 år, før vi kan få dansk atomkraftstrøm i ledningerne. Men selv om Danmark ikke står med egne reaktorer, får vi allerede i dag strøm fra atomkraft fra Sverige.

Myter har defineret manges holdning til a-kraft

Sikkerhed er altafgørende for tilliden til at tage atomkraft i brug. Værket skal være konstrueret til ikke at nedsmelte, som i teorien er risikoen, hvis brændslet overopheder og kølingen svigter. Der må ikke ske udsivning af radioaktivt materiale til omgivelserne. Desuden skal værket været passivt sikret. Det vil sige, at det skal kunne »klare sig selv» i et betydeligt stykke tid, hvis det rammes af for eksempel jordskælv, tsunami eller andre udefrakommende ulykker.

Netop spørgsmålet – eller tilliden – til sikkerheden er et tema, som fylder meget i debatten om atomkraft. Og her har misinformation fået lov til at sprede sig, siger Hans Fynbo.

»Myter om atomkraft er et studie i sig selv, og mange af dem er afsæt for den store mistro til energiformen. Manges frygt bundet i, at

atomkraft forekommer unaturligt, og det er svært at forstå, hvordan det fungerer. Det trigger angst, og så kommer modstanden,« siger Hans Fynbo.

Han fremhæver ulykkerne på værkerne Tjernobyl og Fukushima, som har inspireret til flere film og dokumentarer om atomkraft-ulykker. Det gælder eksempelvis Fukushima-ulykken, som fandt sted den 11. marts 2011 i Japan. Her forårsagede et kraftigt jordskælv og en efterfølgende tsunami, at voldsomme vandmængder strømmende ind over Fukushima Daiichi-atomkraftværket og ødelagde strømforsyningen og kølesystemerne til kraftværket. Flere reaktorer blev overophedede, og der opstod delvise nedsmeltninger af kernerne og eksplosioner i reaktorbygninger. Mere end 150.000 mennesker blev evakueret, og området omkring blev forurenet af radioaktivt materiale. I dag er der stadig omkring 20.000 mennesker, der ikke har kunnet vende tilbage til deres hjem.

Hans Fynbo mener ikke, at ulyk-

kerne på atomkraftværkerne skal bagatelliseres, men:

»Ulykkerne har historisk fået stor opmærksomhed og er ofte blevet fremstillet som særligt katastrofale. De er uden tvivl alvorlige, men de sker sjældent og deres konsekvenser er, set i forhold til naturkatastrofer som oversvømmelser, dæmningsbrud eller langvarig tørke, relativt begrænsede,« siger Hans Fynbo og tilføjer:

»10 år før ulykken på Tjernobyl-værket brast Banqiao-dæmningen i Kina, og et sted mellem 20.000 og 200.000 mennesker blev revet med af vandmasserne, og over 10 millioner blev hjemløse. De færreste associerer noget med ordet "Banqiao", mens alle kender "Tjernobyl".«

Alle teknologier bør overvejes

Han peger på, at der, efter hans opfattelse, gennem årene har været en tendens til at omtale ulykker på atomkraftværker som værre end andre ulykker eller katastrofer. Det hænger ufortjent ved, mener han.

»Sikkerheden på de værker, der bygges i dag, er meget højere end på gamle værker. Ingen vil bygge en Tjernobyl-reaktor i dag, og sammenligningen holder slet ikke. Det er misinformation at påstå andet. Atomkraft er en af de energiformer, som har kostet færrest menneskeliv gennem historien i forhold til den mængde energi, der er produceret,« siger Hans Fynbo.

»Om Danmark skal indføre atomkraft er et politisk spørgsmål. Min vurderinger er, at vi i en tid med klimakrise har brug for alle teknologier, der kan reducere udledningen af CO₂ og andre drivhusgasser. Derfor bør alle energiløsninger overvejes, når vi taler om grøn omstilling. Fra atomkraft til sol, vind og andre alternativer til fossile brændstoffer.

Mange tror, at vi i Danmark er langt med at reducere CO₂-udslippet, men regner man biomassen med, har vi siden 1990 kun reduceret udslippet med 18 procent. Kun 12 procent af vores energi kommer fra sol og vind (2022- tal).« ■

Videre læsning

<https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today>

<https://www.dst.dk/da/Statistik/nyheder-analyser-publ/nyt/NytHtml?cid=46703#:~:text=Når%20CO2%20fra%20afbrænding,et%20fald%20på%2018%20pct.>

<https://www.dst.dk/da/Statistik/nyheder-analyser-publ/nyt/NytHtml?cid=49236>



Bliv studerende for en dag

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

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

Tilmeld dig på
sdu.dk/nat/studerendeforendag

Billedet er fra en lagerhal til midlertidig opbevaring lavradioaktivt affald i metaltønder. Foto: Thailand Institute of Nuclear Technology (TINT), CC BY-SA 4.0.



ATOMAFFALD

kræver langtidsplanlægning



Forfatteren
Nicolaj Kofod er uddannet ph.d. fra Københavns Universitet. De sidste to år har han arbejdet som postdoc på University of Manchester.

Hans forskning omhandler sjældne jordartsmetaller og nu også uran og atomkraft. Han er særligt interesseret i disse metaller elektroniske og foto-fysiske egenskaber, og hvordan de opfører sig i opløsning.

Hans forskning er støttet af Carlsbergfondet og Danmarks Frie Forskningsfond.
nicolaj.kofod@chem.ku.dk

Faktaboksene er udarbejdet af Aktuel Naturvidenskab.

Håndteringen af det radioaktive affald fra atomkraftværker – dvs. det brugte brændsel – har historisk været et af de helt store emner i debatten om atomkraft. Et nyt dansk forskningsprojekt skal se nærmere på et aspekt af denne affalds-problematik, nemlig hvordan uran opfører sig i vandige miljøer.

Danmark drukner i regn, og Sydeuropa koger – det er efterhånden svært at undgå at bemærke effekten af klimaforandringerne i Europa. Og selv om både Europa og Danmark udleder mindre CO₂ nu end omkring årtusindskiftet, stiger den globale CO₂-udledning stadig støt. I bestræbelserne på at gøre Danmark uafhængig af fossile energikilder er en gammel debat nu begyndt at røre på sig igen: Atomkraft.

Atomkraft er unik blandt grønne energikilder, fordi et kernekraftværk – modsat for eksempel vind-

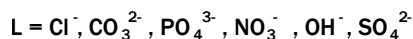
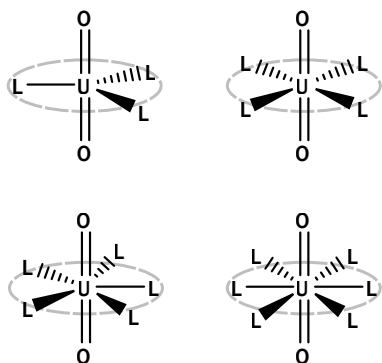
og solenergi – ikke er afhængig af vejret. Og den enorme energidensitet i atombrændsel bringer CO₂-udledningen per kilowatt på niveau med vind og sol, selv når udledningen forbundet med minedrift og konstruktion af kraftværker er taget med. Atomkraft er derfor en vigtig del af verdens fremtidige energiforsyning, og FN vurderer, at vedvarende energikilder som vind og sol ikke alene kan erstatte fossile brændstoffer.

I Danmark blev det i 1985 – efter massivt pres fra befolkningen – besluttet, at der ikke skulle være kerne-

kraftværker i Danmark. Men siden da er folkestemningen vendt, og nye meningsmålinger viser, at størstedelen af danskerne er positivt stemt over for mulighederne for atomkraft.

Fra uranmalm til atomaffald

En af de helt store udfordringer ved atomkraft ligger i håndteringen af atombrændstoffet. Fordi radioaktivt henfald kan være en langvarig proces, skal affaldshåndtering tænkes flere generationer frem. Hvis du havde arvet en tønde med atomaffald fra Julius Cæsar i år 44 før vores tidsregning, ville du skulle vente yderligere 2.000 år, før



Den lineære form af ionen molekylet uranyl (UO_2^{2+}) gør, at der i et bælte omkring uranatomet kan bindes 3-6 negativt eller delvist negativt ladede ligander via elektrostatiske kræfter.



Billedet viser det midlertidige opbevaringsbassin til brugt atombrændsel på atomkraftværket Fukushima Daiichi i 2013. Hertil overførte man brændsel fra reaktor 4, som blev beskadiget ved en hydrogeneksplosion fire dage efter tsunamien i 2011. Foto: Greg Webb / IAEA CC BY-SA 2.0

radioaktiviteten i affaldet var faldet til samme niveau som uranmalmen, det blev produceret fra – og mindst 100.000 år mere, før radioaktiviteten kan tolereres. Den tidsskala gør det enormt vigtigt, at vi forstår, hvordan komponenterne i atombrændsel opfører sig – både i designede systemer som geologiske depotfaciliteter og midlertidige opbevaringsbassiner samt i naturlige miljøer i tilfælde af udslip.

Atombrændselscyklussen starter ved udvindingen af uranmalmen, typisk i Kasakhstan, Canada eller Australien. Uranmalmen oparbejdes, og det rene uran bliver konverteret til uranhexafluorid (UF_6), så det kan blive beriget. Simpelt set foregår det ved, at uranhexafluorid bliver varmet op til kogepunktet (57°C) og centrifugeres. Derved kan man udnytte forskellen i atommassen på de to primære isotoper Uran-235 (^{235}U) og uran-238 (^{238}U) til at opkoncentrere isotopen uran-235, som er den isotop, der driver selve kædereaktionen i atomreaktoren. Typisk skal uran beriges fra 0,7 % uran-235 i naturligt forekommende uran til 2-5 %. Derefter kan den berigede uran omdannes til atombrændsel egnet til kernekraftværket. Anlæg til berigelse af uran findes mange steder i verden, men størstedelen af produktionen foregår i Rusland og Kina.

Gennem brændselsprocessen omdannes uran via fission til lettere grundstoffer, for eksempel radioaktive isotoper af iod, strontium og cæsium. Efter brændselsprocessen er det brugte atombrændsel varmt – både hvad angår radioaktivitet og temperatur. For at håndtere temperaturen sænkes det brugte atombrændsel ned i et midlertidigt opbevaringsbassin. Efter at have opholdt sig der i typisk 1-3 år, er de mest intense, kortlevede isotoper henfaldet, og varmeafgivelsen fra brændslet er reduceret nok til, at brændslet kan overføres til store, solide beholdere med flere beskyttelseslag. Disse beholdere sendes derefter til langsigtet opbevaring i geologiske depotfaciliteter.

Uran udgør klart størstedelen af det brugte atombrændsel (atomaffaldet), omkring 95 procent. Andre grundstoffer som promethium, americium og cæsium, der er dannet i brændselscyklussen, er kritiske at håndtere på den korte bane. I starten bidrager de nemlig med størstedelen af den kraftige radioaktivitet. Men i forhold til langsigtede løsninger er uran en vigtig komponent at kunne håndtere.

Hvor mobilt er uran?

Så længe atomaffald er i sin faste form, bliver det, hvor det er. Men, hvis det kommer i kontakt med

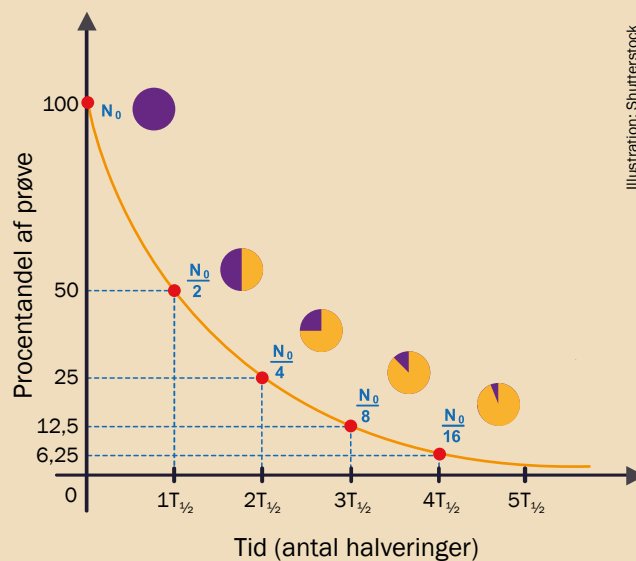
vand, kan det blive opløst og derved flytte sig ud i miljøet. Atomaffaldet bliver altså mobilt. Det kan ske enten ved udslip i de midlertidige opbevaringsbassiner, eller ved at grundvand trænger ind i de geologiske depotfaciliteter.

I vandig opløsning findes uran næsten udelukkende som ionen uranyl. Uranyl dannes ved, at et uran-atom afgiver 6 elektroner fra sin metalliske tilstand og bindes stærkt til to oxygenatomer, så det danner et lineært molekyle med den kemiske formel UO_2^{2+} . Molekylets lineære form frigør et "bælte", hvor negativt eller delvist negativt ladede ioner eller ligander kan binde elektrostatisk til uranyl-ionen. Alt efter bindingsstyrken og størrelsen af ionen kan uranyl have 3-6 ioner bundet. Typen og antallet af ioner, der er bundet til uranyl, kan have stor betydning for, hvor mobil ionen er i forskellige miljøer. Derfor er det vigtigt at forstå, hvordan uran binder sig i forskellige komplekse kemiske blandinger. Hvis vi ved, hvordan uran opfører sig kemisk, kan vi bedre forudsige, hvor uran vil bevæge sig hen i tilfælde af udslip.

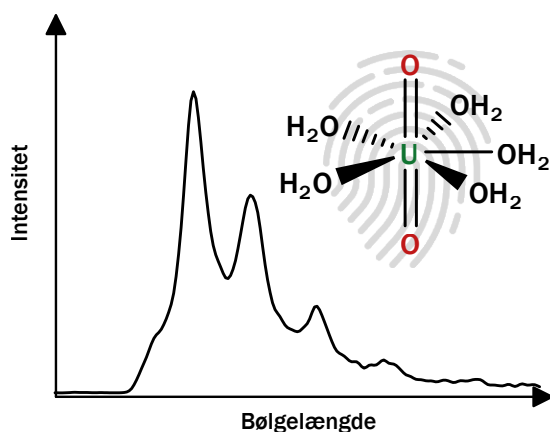
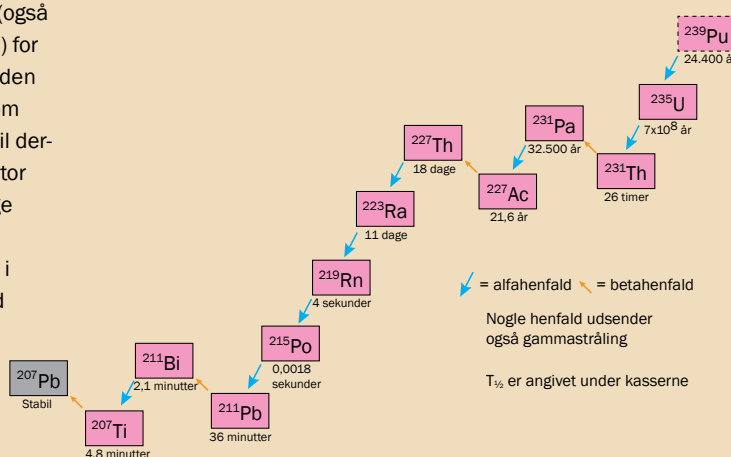
Ny forskning fra England viser, at der kan være god grund til at være opmærksom på netop det. En gruppe forskere fra University of Manchester har undersøgt Uran

Radioaktivt henfald og halveringstid

De to begreber radioaktivt henfald og halveringstid er helt centrale for at forstå problematikken omkring håndtering af atomaffald. Radioaktivt henfald er en proces, hvor ustabile atomkerner spontant omdannes til mere stabile kerner ved udsendelse af stråling. De mest almindelige typer henfald er: Alfahenfald, hvor kernen udsender en alfapartikel (der består af to protoner og to neutroner, dvs. en heliumkerne), betahenfald, hvor kernen udsender en elektron eller en positron (kaldet henholdsvis beta-minus og beta-plus) og gammahenfald, hvor kernen udsender elektromagnetisk stråling med høj energi. Halveringstiden er den tid, det tager, for halvdelen af atomkernerne i et materiale at henfalde. Grafen viser, hvordan henfaldet af et hvilket som helst radioaktivt stof beskriver en eksponentiel kurve.



De fleste radioaktive isotoper henfalder ikke direkte til et stabilt stof, men gennemløber en serie af henfald til den stabile isotop. På figuren ses en sådan henfaldsserie (også kaldet henfaldskæde, i dette tilfælde actinium-kæden) for isotopen plutonium-239, der ultimativt henfalder til den stabile isotop bly-207. Plutonium-239 kan bruges som brændsel i en atomreaktor, og alle de viste isotoper vil derfor være til stede i affaldet. Som det fremgår, er der stor forskel på, hvor lang henfaldstiden er for de forskellige isotoper i henfaldskæden. Nogle har henfaldstider, der skal tælles i sekunder eller minutter, mens andre i dage eller år. Plutonium-239 selv har en halveringstid på 24.400 år (og uran-235 på millioner af år). Derfor er det i sidste ende disse isotoper, der udgør den langsigtede udfordring for opbevaring af atomaffald, selvom nogle af de mere kortlevede isotoper i starten kan bidrage med størstedelen af strålingen.



Figuren viser en illustration af det "molekylære fingeraftryk" af $[\text{UO}_2(\text{H}_2\text{O})_5]^{2+}$, den mest almindelige form af uranyl i vandig opløsning. Spektret vil være unikt for forskellige former for uranyl.

(IV) – dvs. uran, der har afgivet 4 elektroner fra sin metalliske tilstand – i systemer, der efterligner miljøet i midlertidige opbevaringsbassiner, hvor vandet har høj saltholdighed

og et højt indhold af jern. Uran (IV) bliver normalt anset som komplet uopløseligt i vandholdige miljøer og regnes derfor ikke som en mobil form for uran. Men den nye forsk-

ning viser, at Uran (IV) kan danne nanopartikler af uran-silikat, som findes i visse midlertidige opbevaringsbassiner. Da nanopartiklerne er mobile, kan de virke som transportører af uran og derved potentielt være en hidtil ukendt kilde til spredning af uran i miljøet.

Denne problemstilling vil jeg arbejde med de næste to år via en bevilling fra Danmarks Frie Forskningsfond. Min forskning udnytter, at en af egenskaberne ved uranyl er, at ionen er luminiscerende – altså at ionen kan optage og udsende lys. Det spektrum af lys, som ionen udsender, afhænger af den kemiske form og det kemiske miljø, som ionen befinder sig i. Derfor kan spektret bruges som et

Strålingens rækkevidde

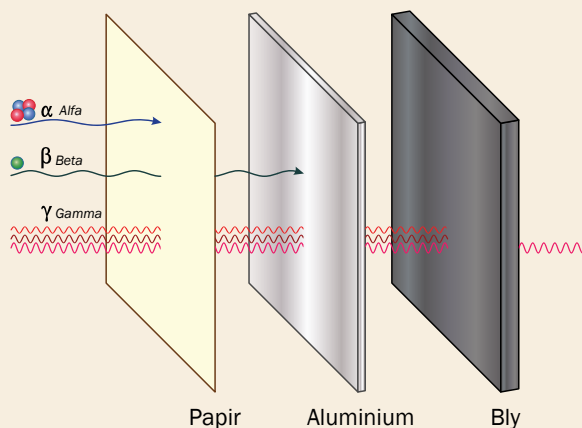
Alle typer af stråling kan være skadelig for levende væv, men i særlig grad alfastråling, fordi alfapartiklerne kan afsætte mest energi i kroppen. Til gengæld er alfapartikler lette at stoppe. De kan for eksempel ikke trænge igennem et stykke papir – eller hud. I den henseende er gammastråling mere problematisk, fordi den kan gennemtrænge mange typer materialer.

Hvordan især gammastråling absorberes af stof kan beregnes ved hjælp af den såkaldte absorptionslov, som har formen $I(x)=I_0 e^{-\mu x}$

Her er $I(x)$ strålingens intensitet målt i afstanden x inde i et bestemt materiale

I_0 er strålingens intensitet målt ved overfladen af det absorberende materiale.

μ er absorptionskoefficienten, som er karakteristisk for et givet materiale. Materialer som bly, der absorberer megen stråling, har en høj absorptionskoefficient og vice versa.



slags molekylært fingeraftryk. Ved hjælp af avancerede spektroskopiske teknikker kan vi adskille fingeraftrykket for forskellige former af uranyl og derved lave et register med det karakteristiske fingeraftryk af de mest almindelige uranyl-molekyler. Ved at kombinere disse spektre med moderne kvantekemiske beregninger håber vi at kunne forudsige fingeraftrykket af ukendte molekyler og få en dybere forståelse af, hvordan spektret bliver påvirket af kemiske bindinger og det kemiske miljø.

Fortidens synder, fremtidens lektier

Danmark står i en interessant situation i forhold til atomkraft. 40 års politisk forbud har gjort, at Danmark har meget lidt ekspertise indenfor atomkraft og kernekraftværker sammenlignet med vores europæiske naboer. Derfor står et dansk kernekraftværk ikke lige om hjørnet – selv de mest optimistiske bud siger, at det vil tage tæt på et årti. Men det betyder ikke nødvendigvis, vi står i en dårlig situation, hvis vi beslutter, at vi skal have atomkraft.

En af de store fordele for Danmark er, at vi kan lære af vores naboers erfaring uden at stå

med problemet med såkaldt "Legacy Waste" – altså atomaffald fra produktion af atomvåben og atombrændsel i de tidligste projekter, før man havde en god forståelse for, hvordan affaldet skulle håndteres. Mange af disse faciliteter er kendetegnet ved at være nedslidte og indeholde atomaffald i svært håndterbare tilstandsformer – for eksempel i brændselsceller, som er rustet, eller i kontaminerede bassiner.

Sellafield i England – Europas største lagerplads for atomaffald – er et særdeles slemt eksempel på, hvordan Legacy Waste har skabt problemer for fremtidens generationer. Sellafield var hovedsæde for produktionen af Storbritanniens første atomvåben, som blev højt prioriteret under den kolde krig. På grund af det presserende behov for at være med i våbenkapløbet blev affaldshåndtering nedprioriteret. Det har nu efterladt Storbritannien med et meget komplekst atomaffaldsproblem, som vurderes at koste cirka 120 milliarder pund at håndtere over en århundrede lang opryddningsproces, der også involverer etableringen af en geologisk depotfacilitet.

I Danmark har vi en meget begrænset mængde atomaffald,

primært fra forskningsreaktorerne på Risø og fra radioaktive isotoper produceret i medicinalindustrien. I 2016 vurderede en rapport fra rådgivningsvirksomheden COWI og Dansk Dekommissionering, at et mellemlager til at håndtere det danske atomaffald, vil koste cirka 1,5 milliarder kroner over 100 år – håndterer i forhold til Sellafield i England.

Håndtering af atomaffald på den lange bane

Opbevaring af atomaffald på den helt lange bane, dvs. i hundreder af år, kræver geologiske depotfaciliteter – anlæg, der etableres i flere hundrede meters dybde i stabile klippeformationer. Indenfor dette område er Finland lige nu længst fremme i verden. Deres Onkalo-anlæg er i de afsluttende faser til at være klar til at kunne opbevare atomaffald, og efter planen skal anlægget tages i brug i 2026.

Anlægget bygger på den såkaldte KBS-3 teknologi, som er en særlig indkapslingsmetode til det brugte atomaffald der – i teorien – skal sikre mod udslip i op til 100.000 år. Princippet bag KBS-3 teknologien er, at atombrændslet indkapsles i flere beskyttelseslag.

Kilder og videre læsning

Øyen, M. Ny måling: Mere end hver anden vælger er åben for atomkraft i Danmark. *Altinget*, 2023.

International Atomic Energy Agency (IAEA) 1992: Annual Report www.statista.com/statistics/712841/median-construction-time-for-reactors-since-1981

Neill, T.S et al (2018): Stability, Composition, and Core-Shell Particle Structure of Uranium(IV)-Silicate Colloids. *Environ. Sci. Technol.* 52, 16, 9118–9127

The Guardian 23/10-2024: Sellafield cleanup cost rises to £136bn amid tensions with Treasury.

Ingeniøren 25. august 2016: Atomaffald koster 1,5 milliarder kroner over 100 år

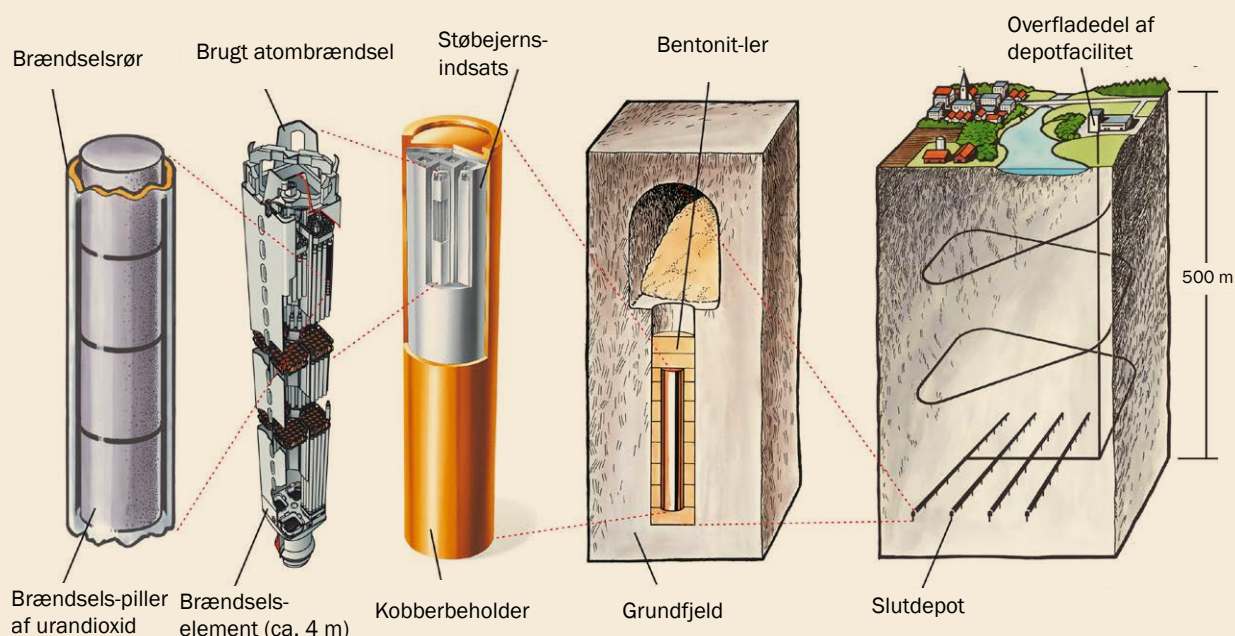
Nuclear Waste Governance – An international comparison. Springer 2015.

Om Onkalo i Finland: www.iaea.org/newscenter/news/finlands-spent-fuel-repository-a-game-changer-for-the-nuclear-industry-director-general-grosi-says

Langtidsopbevaring af atomaffald

I Forsmark i Sverige er konstruktionen af et anlæg med samme KSB-3-teknologi som den finske Onkalo-facilitet blevet påbegyndt her i 2025. Figuren viser, hvordan faciliteten vil tage sig ud, når den er fuldt udbygget – hvilket den først forventes at være engang i 2080'erne. Anlægget vil dog efter planen blive taget i brug indenfor cirka 10 år.

Illustrationer:
SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB).



Figuren viser princippet bag KSB-3-teknologien til geologiske depotfaciliteter til atomaffald. Det brugte atombrændsel bliver samlet i rør som bliver indkapslet i støbejern. Derefter kommer et lag af kobber efterfulgt af et lag af bentonit. Sidste lag er klippegrunden som depotet bygges ind i. KSB-3-teknologi er lige nu den førende teknologi indenfor sikker langtidsopbevaring af atomaffald.

Første og andet lag er et lag af støbejern efterfulgt af kobber, som skal beskytte mod rust og oxidation.

Tredje lag består af mineralet bentonit, som er et porøst og adsorberende materiale. Dette lag kan adsorbere de mobile og hurtigt henfaldende radioaktive isotoper, der løbende dannes i det brugte atombrændsel. Derved bliver disse isotoper fastholdt i bentonit-laget og trænger ikke videre ud af indkapslingen.

Det fjerde og sidste lag er klippegrunden, som anlægget bygges i, og som består af 400-500 meter klippe. Dette lag minimerer mængden af grundvand, der kommer i kontakt med resten af indkapslingslagene.

De fire uafhængige indkapslingslag virker som backup for hinanden – hvis ét lag fejler, vil det næste lag stoppe udslippet.

Selvom Danmark ikke har et oplagt område klar til at opbevare atomaf-

fald, vil vi have over et årtis erfaring fra Finland, før vi overhovedet vil være klar til at begynde at bygge et kernekraftværk.

Er atomkraft så løsningen for Danmark? Svaret er nok mest et spørgsmål om politik. Men uanset, hvad beslutningen bliver, viser atomaffaldet fra Risø og den voksende atomkrafts-industri i Danmark, at vi har brug for ekspertviden og specialister indenfor atomkraft. ■

STUDERENDE FOR EN DAG PÅ AU

Lad dine elever opleve en dag
på universitetet – helt tæt på

Som studerende for en dag får dine elever mulighed for at følge en studerende fra en naturvidenskabelig eller teknisk uddannelse.

De kan stille spørgsmål, komme med til forelæsning, mærke stemningen og få indblik i livet som universitetsstuderende – direkte fra en, der allerede er i gang.



TECHNICAL SCIENCES
AARHUS UNIVERSITET

Læs mere og find tilmelding:
nat.au.dk/studerendeforendag
tech.au.dk/studerendeforendag



NATURAL SCIENCES
AARHUS UNIVERSITET



DEN LANGE VEJ MOD DET ABSOLUTTE NUL

Vand koger ikke altid ved 100 grader.

Jagten på et stabilt mål for varme førte fra 1700-tallets eksperimenter til kelvin – den absolutte skala for temperatur.

Om forfatteren

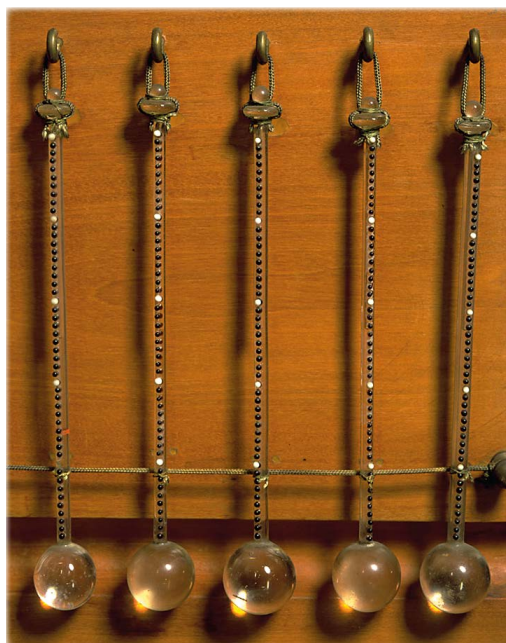


Kristian Hvidtfelt Nielsen er lektor og leder af Center for Videnskabsstudier ved Aarhus Universitet. Hans forskningsinteresser er indenfor videnskabs-historie og videnskabs-kommunikation. khn@css.au.dk

Der var engang, hvor selv det at koge vand kunne være et stort videnskabeligt problem. I slutningen af 1700-tallet forsøgte fysikere over hele Europa at finde et fast punkt på temperaturskalaen – et universelt udgangspunkt for at måle varme og kulde. Men vand viste sig at være et upålideligt referencepunkt. Det kogte ved én temperatur i bjergene, en anden i dalene, og endda forskelligt fra dag til dag i det samme laboratorium.

I 1776 nedsatte Royal Society i London et udvalg, ledet af Henry Cavendish, for at standardisere datidens termometre. Udvalget opdagede dog, at vands kogepunkt varierede med lufttrykket, og at de væsker, man målte varmen med i termometrenes glastrør, ikke havde samme varme overalt.

Det betød, at det i praksis var umuligt at lave entydige temperaturmålinger. Alligevel blev dette tidlige forsøg på jagt på at bruge vands kogepunkt som et fikspunkt på tem-



Termometre fra midten af det 17. århundrede beregnet til at måle lufttemperaturer med en skala, der spænder over 50 grader. De hvide prikker repræsenterer intervaller på 10 grader, mens de sorte er enkelte grader. Termometrene er udstillet på Museo Galileo i Firenze, Italien. CC BY-SA 4.0

peraturskalaen begyndelsen på den lange historie, der førte frem til den moderne temperaturmåling – og til den SI-enhed, vi i dag kalder kelvin.

Blod, smør og kogende vand

De første termometre med termometriske væsker som kviksølv, sprit og luft dukkede op allerede omkring år 1600. Galileo Galilei og hans samtidige lavede primitive "thermoskoper", som blot viste, at luften

udvidede sig, når det blev varmt. I løbet af 1600-tallet blev termometre taget i brug til mere videnskabelige målinger – men der var et problem: Ingen vidste, hvad tallene på skalaen betød.

Hver fabrikant havde sit eget system. Edmond Halley, bedst kendt for sin komet, beklagede sig i 1693 over, at "ingen termometre nogen-sinde viser det samme". Nogle brugte den koldeste vinterdag eller den varmeste sommerdag som referencepunkt, mens Isaac Newton valgte kropsvarmen, og andre igen kogepunktet for vin. Den franske fysiker Joachim Dalencé foreslog endda at bruge smørs smeltepunkt som en øvre temperaturgrænse.

Det var først i begyndelsen af 1700-tallet, at vands fryse- og kogepunkt begyndte at blive bredt accepteret som et fælles fikspunkt. Vand var tilgængeligt overalt og virkede som en "naturlig" reference. Men som Cavendish og hans kolleger i Royal Society-udvalget snart opdagede, var naturen mindre stabil, end man havde håbet.

Den omvendte Celsius-skala

I 1742 foreslog den svenske astronom Anders Celsius en temperaturskala med to faste punkter: Vandets kogepunkt ved 0 grader og frysepunkt ved 100 grader, altså det omvendte af, hvad vi kender i dag. Celsius' skala var centigrad, altså opdelt i 100 lige store grader.

Da Celsius døde året efter, valgte kollegerne i Uppsala – sandsynligvis Daniel Ekström eller Carl Linné – at vende hans skala om. Nu stod 0 grader for vands frysepunkt, og 100 grader for kogepunktet. Den omvendte skala passede bedre til den intuitive fornemmelse af, at varmen "stiger".



Et ældre lægesæt, hvor termometre var en vigtig del. Foto: Shutterstock.

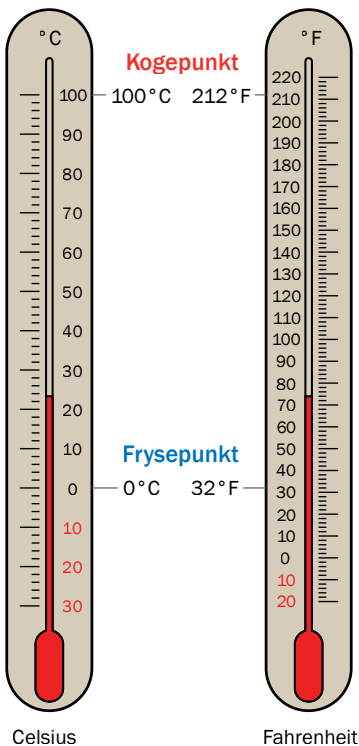
At Celsius oprindeligt valgte den modsatte retning på sin skala, er dog ikke så mærkeligt. I 1700-tallet talte man stadig om "kuldegrader" som en selvstændig størrelse, på linje med varme. Nogle fysikere mente endda, at kulde var en substans – en slags kulde- eller "frigorisk" væske, der flød ud af kroppen, når temperaturen faldt. Først i løbet af 1800-tallet blev denne idé endegyldigt forladt til fordel for teorien om varme som bevægelse.

Uanset retningen var Celsius' skala et vigtigt skridt mod standardisering af temperaturmåling. Den var enkel, præcis og tilgængelig, men den var også knyttet til vands og andre væskers fysiske egenskaber, som varierer med tryk og temperatur. Det var det, som voldte Royal Society-udvalget hovedbrud i slutningen af 1700-tallet.

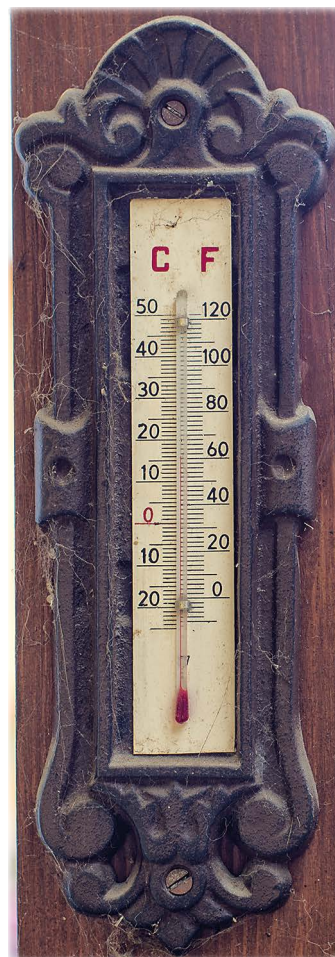
Fahrenheit grundlægger en anden tradition

Omtrent samtidigt som Celsius udviklede Daniel Gabriel Fahrenheit i Amsterdam sit eget kviksølvtermometer. Han indførte en skala, hvor 32° svarede til isvand, og 212° til kogende vand. Fahrenheit valgte dette interval for at undgå negative tal og for at have en højere opløsning på sin temperaturskala.

Hans termometre var mere stabile end de tidligere termometre, der brugte sprit som termometrisk



Sammenligning mellem skalaen for Celsius og Fahrenheit. Det er tydeligt, at sidstnævnte har en højere opløsning. Til højre ses et eksempel på et sprittermometer med begge skalaer.

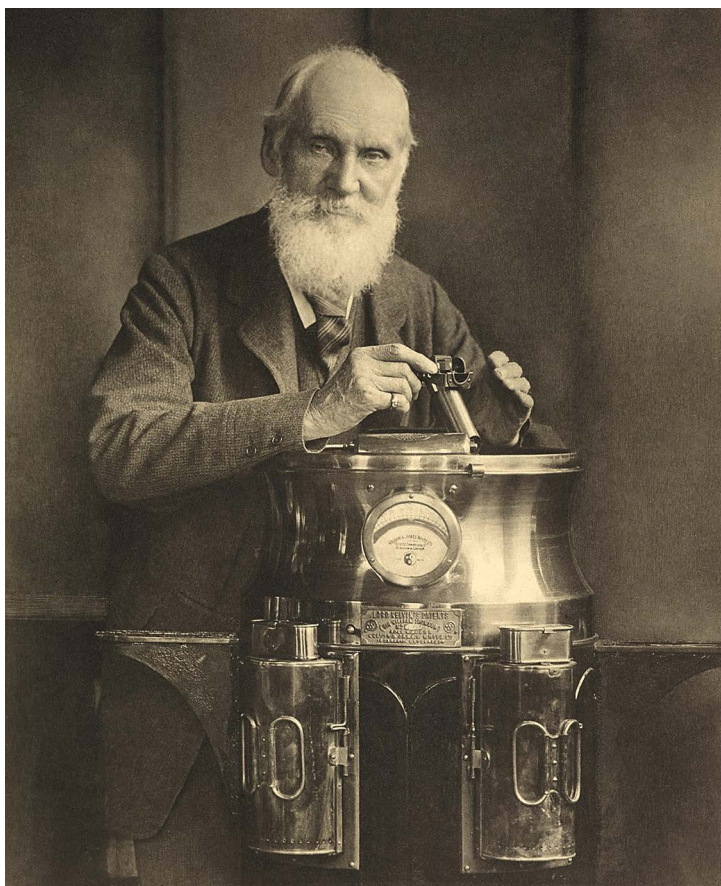


væske. De blev derfor hurtigt populære blandt læger og apotekere, der ville måle patienternes kropstemperatur eller temperaturen ved fremstilling af lægemidler med en hidtil uset nøjagtighed. Fahrenheit-skalaen blev standard i Storbritannien og senere i USA – et eksempel på, hvordan videnskabelige standarder

ofte følger handel, sprog og kultur og ikke kun er udtryk for universelle naturkonstanter.

Temperatur og termodynamikken

I 1800-tallet gennemførte den franske fysiker Henri Victor Regnault omfattende målinger med kviksølv-,



Sir William Thomson – bedre kendt som Lord Kelvin – cirka år 1900.

sprit- og lufttermometre for at finde en mere stabil sammenhæng mellem temperatur og volumenudvidelse. Regnaults metodiske arbejde afslørede, at ingen fysisk substans udvider sig fuldstændig ensartet med varmen. Det blev mere og mere uholdbart at bruge vand som fikspunkt.

William Thomson, bedre kendt som Lord Kelvin, blev den, der skabte et teoretisk fundament for temperaturbegrebet og -målinger. Inspireret af Sadi Carnots og James Joules tidlige arbejde indenfor termodynamik (læren om varmens bevægelse) definerede Kelvin i 1848 en absolut temperaturskala. Han ønskede, at den skulle være uafhængig af måleinstrument og gælde universelt for alle materialer.

I stedet for at tage udgangspunkt i vand, valgte Kelvin at betragte et legemes temperatur ud fra dets evne til at afgive varme og dermed udføre arbejde. Inspirationen kom særligt fra Carnots ide om den

ideelle varmemaskine, hvor varme strømmer fra et varmt til et koldt legeme og undervejs kan omsættes til mekanisk arbejde.

I en sådan ideel proces afhænger mængden af det arbejde, der udføres, kun af forskellen mellem de to temperaturer – ikke af de materialer, der indgår i processen. Kelvin definerede forholdet mellem to temperaturer som forholdet mellem den varmeenergi, der optages fra det varme legeme, og den, der afgives til det kolde, når varme omdannes til arbejde i en Carnot-maskine.

Det absolutte nulpunkt

Med denne definition fik temperatur en teoretisk definition knyttet til begrebet energi frem for den empiriske måling af vandets kogepunkt. Den førte Kelvin videre til tanken om et absolut nulpunkt – den lavest mulige temperatur, hvor al varmebevægelse ophører, og intet arbejde længere kan udføres. Dette punkt, $-273,15^{\circ}\text{C}$, blev

nulpunkt for den nye temperaturskala.

Kelvin ændrede dog ikke størrelsen på graderne, kun nulpunktet. Han beholdt Celsius' inddeling, fordi den allerede var praktisk, velkendt og let at omsætte til eksperimentelle målinger. På den måde kunne forskere og ingeniører fortsætte med at bruge de samme temperaturskelle som før – blot målt fra et nyt, absolut udgangspunkt.

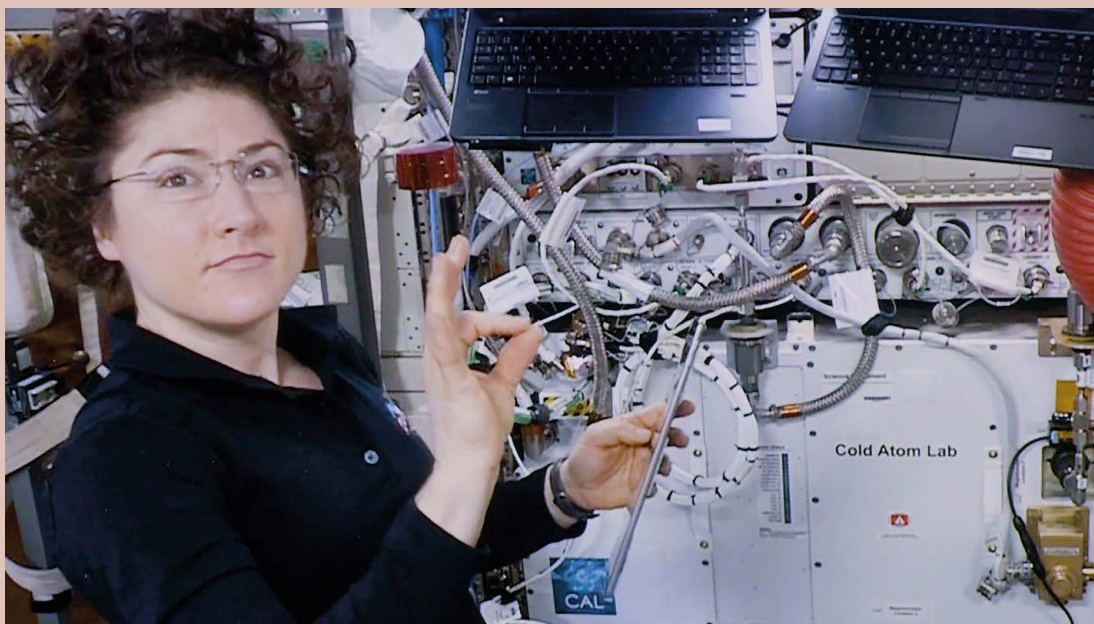
Fra CGS til SI

Kelvin var ikke blot teoretiker, men også organisator. Han arbejdede for at skabe et system af ensartede enheder – det såkaldte CGS-system (centimeter, gram, sekund). Dette dannede senere grundlaget for det internationale metriske system, som blev formaliseret med Meterkonventionen i 1875.

Efterhånden som flere lande tilsluttede sig, blev ideen om fælles standarder et symbol på oplysnings-tidens idealer: præcision, rationalitet og internationalt samarbejde. Standardisering er dog ikke kun videnskab, men også politik. Lande som Storbritannien og USA var tilbageholdende med at acceptere SI-systemet, fordi de ikke så nogen praktisk gevinst i at skifte.

Samtidig var der et kulturelt og sprogligt aspekt: SI-enhederne blev forbundet med kontinentaleuropæiske idealer og særligt en udpræget fransk form for abstraktion og matematisk idealisering, mens de engelske mål (for eksempel inch, pound, gallon, Fahrenheit) blev set som mere anvendelige og almindelige, fordi de allerede var etableret som tekniske standarder indenfor håndværk og industri.

Kritikken mod fransk abstraktion kan måske virke underlig, hvad angår temperaturmåling. Det var jo skotten Lord Kelvin, der først havde foreslået den teoretisk funderede og universelle temperaturskala, og han var lige så empirisk og praktisk anlagt som andre britiske naturvidenskabsmænd. Men sådan var



Et af de absolut koldeste laboratorier i verden findes ombord på den internationale rumstation, hvor det blev installeret i 2018. I Cold Atom Lab kan man nå ned på temperaturer få milliardtedele over det absolutte nulpunkt. Her studeres atomers opførsel under disse kolde og vægtløse betingelser. Foto: NASA

Videre læsning:
Chang, H. (2004)
Inventing Temperature:
Measurement and
Scientific Progress.
Oxford University Press.

Flood, R., McCartney,
M., & Whitaker, A.
(2008) Kelvin: Life,
Labours and Legacy.
Oxford University Press.

Det absolutte nulpunkt og kvantefysik

Det absolutte nulpunkt (0 K eller $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$) er den teoretiske grænse, hvor al termisk bevægelse ophører. Ifølge kvantefysikken kan atomer dog aldrig stå helt stille – de har altid en lille nulpunktenergi, som skyldes Heisenbergs usikkerhedsprincip. Ved temperaturer tæt på nulpunktet begynder stof at opføre sig kvantemekanisk: Atomer kan smelte sammen i én fælles bølgefunktion og danne Bose-Einstein-kondensater, hvor materien mister sine klassiske egenskaber. De koldeste laboratorier på Jorden når i dag ned til få milliardtedele af en kelvin over nulpunktet – så tæt på absolut nul, som det bedste eksperimentelle udstyr i dag tillader.

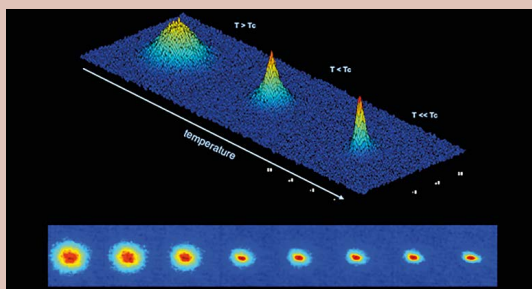


Illustration: NASA/JPL-Caltech

Denne serie af farvede billeder viser dannelsen af et Bose-Einstein kondensat i Cold Atom Lab. Temperaturen falder fra venstre mod højre, og toppen, der rejser sig over de øvrige atomer, er Bose-Einstein-kondensatet. Røde farver indikerer højere tæthed.

det – og er det til dels stadig, for USA har stadig ikke fuldt implementeret SI-systemet.

I SI-systemet fik Kelvin sin helt egen plads. Temperaturskalaen hedder nemlig kelvin (K), og i 1954 blev den fastlagt som $1/273,16$ af vandets tredobbelte punkt – den tilstand, hvor is, vand og damp eksisterer i ligevægt ved præcis $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Den nyeste definition

I 2019 blev SI-systemet omlagt, denne gang ud fra naturens mest fundamentale konstanter. Meteren blev knyttet til lysets hastighed,

kilogrammet til Plancks konstant, sekundet til atomernes svingninger.

Kelvin-enheden blev defineret ud fra Boltzmanns konstant ($k = 1,38 \times 10^{-23}\text{ J/K}$) – en størrelse, der forbinder energien i enkelt-partikler med den makroskopiske temperatur. Dermed forblev kelvin uafhængig af ethvert fysisk materiale, men stadig forankret i materiens mikroskopiske bevægelser.

Da Kelvin i 1848 offentliggjorde sin første artikel om en absolut temperaturskala, skrev han beskedent, at hans system kun var tænkt

som et forslag til praktiske formål. Han kunne næppe have forudset, at hans navn en dag skulle være kendt som en af naturvidenskabens mest fundamentale enheder.

Måske ville det have glædet ham, at målet stadig er det samme som i 1700-tallet: At finde orden midt i naturens mangfoldighed og evige forandring. For selv om vand stadig nægter at koge ved den samme temperatur uafhængigt af omgivelserne, har vi lært at gøre denne uorden til grundlaget for en af de mest præcise måleenheder, mennesket nogensinde har skabt. ■

GENETIK OG DEPRESSION

Af Carsten R. Kjaer, *Aktuel Naturvidenskab*

Depression er en udbredt psykisk sygdom, og den kan ramme mennesker på alle tidspunkter i livet. De bagvedliggende årsager til, at nogle mennesker udvikler depression, er et stort spørgsmål. Men forskerne er ikke i tvivl om, at både gener og miljø spiller ind. I jagten på at forstå genernes betydning for udvikling af depression, er forskerne bag et stort nordisk studium publiceret i *Nature genetics* nu nået frem til noget interessant: Nemlig, at generne tilsyneladende spiller en større rolle ved depression, der opstår tidligt – det vil sige før 25-års alderen – end depression, der opstår efter 50-årsalderen. I studiet er indgået data fra store nordiske biobanker, og i alt har forskerne analyseret genetiske data fra flere end en halv million mennesker, 150.000 mennesker med depression og 360.000 uden.

Gener på spil

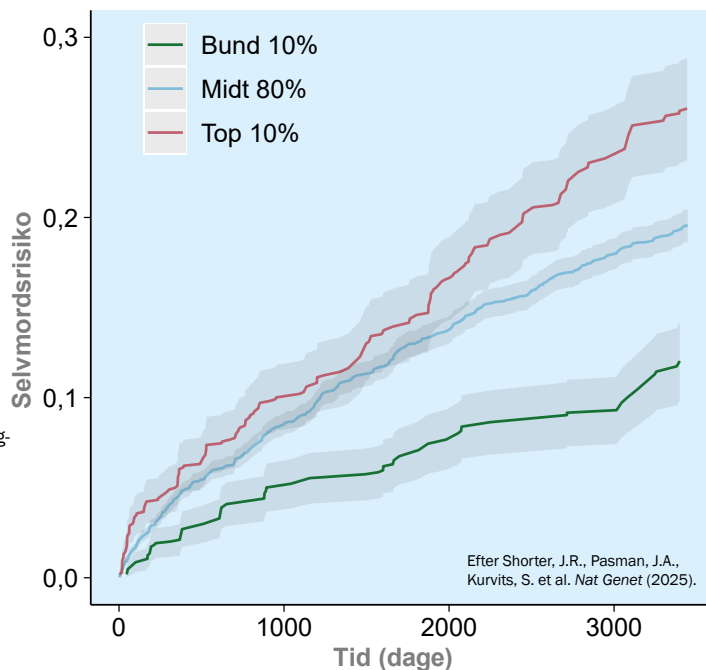
Lektor i biomedicinsk datavidenskab John Shorter fra RUC, som har ledet den danske del af studiet fortæller, at studiet har identificeret en række specifikke regioner i genomet, hvor der findes forskelle der statistisk korrelerer med depression udviklet henholdsvis tidligt og sent i livet. »Nogle af disse regioner rummer ikke gener, mens andre indeholder nogle få eller mange gener«, siger han.

Specifikt i forhold til tidlig depression fandt forskerne 12 regioner i genomet med tilsammen 17 gener. Det er generelt gener, der er involveret i fosterhjernens udvikling. John Shorter nævner som eksempel generne *KPNA2*, som er involveret i transport af proteiner i cellekernen og *SORCS3*, som koder for et såkaldt type-I-receptor membranprotein, og som også tidligere er blevet forbundet med depression.

»Generne associeret med tidlig depression er altså aktive før fødslen, og det kan understøtte ideen om, at nogle mennesker bærer en større sårbarhed over for psykiske lidelser fra fødslen,« siger John Shorter.

I forhold til depression udviklet efter 50-årsalderen fandt forskerne 2 regioner med i alt 4 gener.

Figuren viser den beregnede sandsynlighed for selvmordsforsøg efter en depressionsdiagnose (stillet før 25-årsalderen) for tre grupper baseret på deres genetiske risikoprofil. Data fra den estiske biobank.



»Disse gener er også meget interessante – ikke fordi de er impliceret i hjernen, men snarere fordi de er associeret med andre sygdomme som inflammatorisk tarmsygdom (IBD). Det har fået os til at spekulere på, om depression med sen debut faktisk kan skyldes, at man får diagnosen depression som et resultat eller snarere en bivirkning af at have en genetisk sygdom som IBD (eller kræft eller demens). Det kunne også forklare, hvorfor vi i studiet fandt, at den genetiske arvelighed for depression med sen debut er halvt så stor som for depression med tidlig debut,« siger John Shorter.

Fokus på selvmordsrisiko

Den måske vigtigste opdagelse kom ifølge John Shorter, da forskerne tog projektet et skridt videre og prøvede at lægge alle de genetiske risikofaktorer for tidlig depression sammen for at se, om det kunne bruges til at forudsige risikoen for selvmord i data fra den estiske biobank.

»Det viste sig, at personer diagnosticeret med depression i den estiske biobank kunne have over dobbelt så høj risiko for at forsøge selvmord indenfor 10 år, afhængigt af om de

scorede højt eller lavt i denne risikoanalyse (26 % mod 12 %),« fortæller John Shorter.

Ifølge John Shorter kan genetisk information og risikoscorer derfor i fremtiden potentielt blive et værktøj til at vurdere selvmordsrisiko og til bedre at skræddersy behandling og forebyggelse af depression. »Især unge, der rammes tidligt, kan have brug for særlig opmærksomhed og tæt opfølgning. Vi håber, at denne viden kan hjælpe med at identificere dem, der er i størst fare – og måske være med til at redde liv,« siger John Shorter.

Studiet er et samarbejde mellem RUC og Københavns Universitetshospital, Karolinska Institutet i Sverige, Universitetet i Oslo i Norge, FinnGen i Finland, Tartu Universitet i Estland samt det nordiske forskningsnetværk TRYGGVE. Forskningen er blandt andet finansieret af European Research Council (ERC) og US National Institute of Mental Health.

Kilder: RUC.dk, Videnskabelig artikel: Shorter, J.R., Pasman, J.A., Kurvits, S. et al. *Nat Genet* (2025). doi.org/10.1038/s41588-025-02396-8

F A K T A

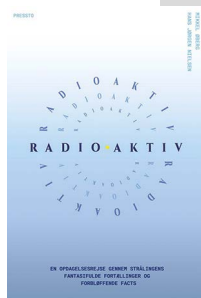


Kaj Sand-Jensen (red): Forunderlig natur. Gads forlag 2025. 240 sider, 269,95 kr.

Forunderlig natur

Bogen rummer 37 fortællinger om naturoplevelser med hvert sit personlige præg. Fortællinger om forundring, glæde og nysgerrighed, men også om bekymring, tab og håb. Bag fortællingerne står en broget flok af bidragydere, der på forskellig vis lever i og med naturen – fælles for dem er stor viden, en skarp iagttagelsesevne og en dyb naturglæde. Bogen er redigeret af professor i ferskvandsbiologi Kaj Sand-Jensen, som står bag talrige videnskabelige artikler og bøger om økologi, natur og biodiversitet.

F A K T A



Hans Jørgen Nielsen & Mikkel Øberg: Radioaktiv. Forlaget Pressto 2025. 287 sider, 249,95 kr.

Radioaktivitet

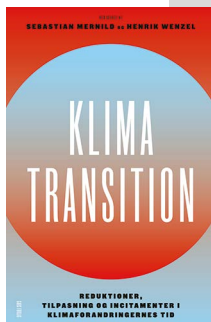
Den første bog på dansk om et fascinerende naturfænomen, der hverken kan ses, høres, føles, lugtes eller smages – og om vores forestillinger om stråling, der ofte er en rodebutik af skrækhistorier, fiktion og fri fantasi. I bogen vil du blandt andet lære: At Danmarks mest bestrålede lønmodtager er vores mand i rummet, Andreas Mogensen; at du selv faktisk er temmelig radioaktiv; at det er virkelig, virkelig svært at blive en succesfuld atomterrorist.

Cheminova 1938-1953

Hvorfor blev Harbøre hjemsted for Danmarks værste miljøskandaler? I denne bog kortlægges det dramatiske forløb om forurening, politiske og administrative svigt, mørklægning og milliardbeløb i virksomheden Cheminova i perioden 1938-1953. Historiker Jørgen Burchardt har gravet bag facaderne og afdækket forløbet bag de massive miljøproblemer, som vi i Danmark stadig lever med i dag.

F A K T A

Sebastian Mernild & Henrik Wenzel (red): Klimatransition - Reduktioner, tilpasning og incitamenter i klimaforandringerne tid. Gads forlag 2025. 208 sider, 249,95 kr.



Klimatransition

Hvordan bevæger vi os fra en evigt stigende bekymring om et klima i hastig forandring til en udvikling af samfundet, der er langsigtet, strategisk, teknologisk nyskabende, socialt retfærdig, økonomisk ansvarlig og med fokus på forbrugsadfærd? Denne bog – med bidrag af 24 af landets førende forskere, fagfolk og meningsdannere – er en rejse ind i den nyeste viden, de nødvendige valg og de fælles handlinger, som kræves for at skabe reel forandring. Den viser, hvorfor vi må bryde ud af vores vante roller, arbejde på tværs af fagligheder og give plads til det nye og uprøvede.

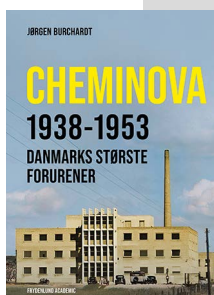
F A K T A



Kampen mod havet – Limfjordstangen 1825-1925. Nord Academic 2025. 352 sider, 349,95 kr.

Kampen mod havet

Limfjordstangen – en smal landstrimmel mellem hav og fjord – har i århundreder været et af Danmarks mest udsatte kystområder. Gennem kilder, beretninger og historiske analyser viser de otte forfattere, som kommer fra museer i limfjordsområdet samt Aalborg Universitet, hvordan sandflugt, storme og oversvømmelser formede tilværelsen, hvordan befolkningen tilpassede sig, og hvordan myndighederne greb ind for at kontrollere naturen. Teknologiske fremskridt i slutningen af 1800-tallet satte en ny kurs for kampen mod havet. Det er en bog, der giver historiske perspektiver på nutidens klimakamp.



F A K T A

Jørgen Burchardt: Cheminova 1938-1953 – Danmarks største forurener. Frydenlund 2025. 424 sider, 349,- kr.

Al henvendelse til:
Aktuel Naturvidenskab,
Ny Munkegade 126, 8000 Aarhus C
E: abo@aktuelnaturvidenskab.dk
T: 87152094

Foto: Susanne Pouplier.



Kaare Lund Rasmussen (tv) og bygningsarkæolog Thomas Bertelsen i færd med at tage prøver i Roskilde Domkirke.

Mysteriet om murstensbygninger

Af Carsten R. Kjaer, Aktuel Naturvidenskab

En murstensbygning er så dansk, som noget næsten kan blive! Alerede i 1160'erne blev de første murstensbygninger i Danmark opført i form af klosterkirkerne i Ringsted og Sorø. Men som det forholder sig med så mange "danske" ting, er det ikke en dansk opfindelse at bygge huse af mursten. Det er en teknik importeret fra det store udland. Kulturhistorikere har også i næsten 100 år ment, at de havde luret, hvor byggestilen oprindeligt blev importeret fra: Nemlig Lombardiet i Norditalien. Blandt andet fordi man her finder murstenskirker, der menes at være samtidige med de første danske.

Teorien om en sådan direkte teknologioverførsel fra Lombardiet til Danmark i 1100-tallet kan vi dog godt lægge i graven, fortæller professor emeritus ved Institut for Fysik, Kemi og Farmaci på Syddansk Universitet, Kaare Lund Rasmussen. Han er ekspert i kemiske analyser af kulturarvsgenstande, og sammen med danske og internationale kolleger står han bag et nyt studium publiceret i tidsskriftet *npj Heritage Science*, hvor forskerne tester teorien på baggrund af nye naturvidenskabelige analyser.

Konkret har forskerne analyseret i alt 305 murstensprøver fra de omtalte kirker i Ringsted og Sorø og de to italienske kirker Chiaravalle Milanese og Abaddia Ceretto i Lombardiet syd for Milano. Bevæbnet med metoder som termoluminiscens-datering, røntgendiffraction og spektrofotometriske farvemålinger har forskerne både kunnet fastslå alderen præcist samt opnå viden om, hvilke råmaterialer prøverne bestod af, og hvilke produktionsmetoder der i sin tid blev anvendt. På den baggrund kunne forskerne konstatere, at de danske kirker ganske mangler et italiensk fingeraftryk.

»Hvis italienske håndværkere på den ene eller anden måde har medvirket ved opførelsen af de danske kirker, burde vi kunne genfinde visse tekniske detaljer i de danske bygningsværker – for eksempel bestemte blandingsforhold i mørtel, karakteristiske brændingsteknikker eller dekorative elementer. Men de danske kirker har ikke disse særtræk,« siger Kaare Lund Rasmussen og nævner som specifikt eksempel, at fugerne mellem murstenene i de italienske kirker kun er få millimeter brede, mens de i Danmark er op til flere centimeter brede.

De kemiske analyser afslørede også, at en af de italienske kirker, Chiaravalle, er væsentligt yngre – cirka 75 år – end hidtil antaget. Og den anden, Cerreto, er ældre – murstenene til denne kirke blev brændt måske helt op til 100 år, før de danske kirker blev bygget. Samtidig har der altså ikke været tale om, og det udelukker, at det har været de samme bygmestre og håndværkere, der har været på spil. I det hele taget lader der til at være mange håndværksmæssige forskelle, hvor de italienske kirker er præget af større håndværksmæssig omhu i overfladebehandlingen, hvor stenene for eksempel blev slebet krumme, når de skulle indgå i søjler. Men når det nu ikke var italienerne, der lærte danskerne at bygge murstenskirker, hvem var det så? Her peget studiet på en mere kompliceret overførselsproces, hvor Cistercienserordenen, kendt for sit internationale klosternetværk, sandsynligvis spillede en central rolle. Samtidig voksede murstensbyggeriet parallelt i Nordtyskland omkring Lübeck i slutningen af 1100-tallet.

»Det er et godt eksempel på, hvordan teknologi og arkitektur i middelalderen over tid kan have spredt sig gennem netværk af munke, håndværkere og handelsruiter – ikke bare gennem konger og krige,« siger Kaare Lund Rasmussen.