

AKTUEL *natur* VIDENSKAB

Katrine jagter fortidens spor på havbunden

Ukendte stenalderbopladser, skibsvrag og geologiske strukturer i undergrunden: Katrine Juul Andresen afslører havbundens hemmeligheder.

Fremtiden for mikrochips er lys

Teoretisk fysik hjælper forskerne med at finde nye måder at styre lys på, som skal bane vejen for fremtidens hurtigere og mere energieffektive elektronik.

Fra rumfart til middagsmad

Et kontrolsystem udviklet af NASA til at sikre astronauternes mad er i dag med til at beskytte os mod farlige bakterier og giftstoffer. Dødelige listeriaudbrud viser, hvor afgørende det er at forstå naturvidenskaben bag fødevarer sikkerheden.



■ OM AKTUEL NATURVIDENSKAB

ANSVARSHAVENDE

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

REDAKTION

Carsten Rabæk Kjaer (CRK), redaktør
Jørgen Dahlgaard (JD), redaktør
Rasmus Kern-Jespersen (RKJ), kommunikationschef
Henriette Stevnhøj (HS), journalist
Jeppe Kyhne Knudsen (JKK), journalist

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

ABONNEMENTSSERVICE

Har du fået ny adresse eller ønsker du at bestille et abonnement på bladet?
Kontakt os på telefon: 3036 0662
E-mail: abo@aktuelnaturvidenskab.dk
Abonnement kan også bestilles via hjemmesiden: aktuelnaturvidenskab.dk

UDGIVER

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

KONTAKT

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

LAYOUT

Jørgen Dahlgaard

TRYK

Jørn Thomsen Elbo

ISSN

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

OPLAG

3.700

FORSIDEFOTO

Professor i geoscience, Katrine Juul Andreasen,
Aarhus Universitet, på forskningsskibet Aurora.
Foto: Andrea Lif, AU Foto



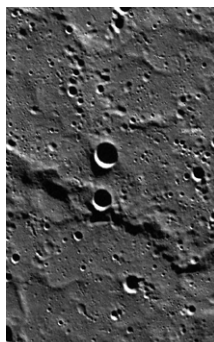
AARHUS
UNIVERSITET

SPONSORABONNENT

GRUNDFOS



INDHOLD



04

Kort nyt

Merkurs rynker afslører, at planeten svinder ind

DNA-pioner blev forbigået

Gekkoens evne til at gendanne hjertevæv er godt nyt for forskning i regeneration

Tjernobyls glemte køer klarer sig fint uden mennesker.



06

Katrine kigger dybt i havbunden

»Skal vi forstå nutiden, må vi forstå fortiden.« Professor i geoscience, Katrine Juul Andreassen studerer stenalderbopsteder, skibsvrag og geologiske strukturer under havets overflade.

14

Styr på lyset

Forskere vil bruge lys i stedet for elektrisk strøm i fremtidens mikrochips.

22

Europas vigtigste maskine

En hollandsk virksomhed "tegner" verdens mest avancerede mikrochips.



26

Ingen raketmåls, tak!

Madproduktionen overvåges i dag af et kontrolsystem, som NASA udviklede i 1960'erne.

32

Immunsystemets skarpskytter

To vigtige receptorer hjælper kroppen med at opspore sygdom.



40

Nøglen til liv på andre planeter findes på Jorden

Forskere studerer ekstreme miljøer på jorden for at lære om liv andre steder i rummet.

44

DNA-nål snyder cellens forsvar

Ny nanoteknologi kan bane vejen for at levere medicin direkte ind i celler.



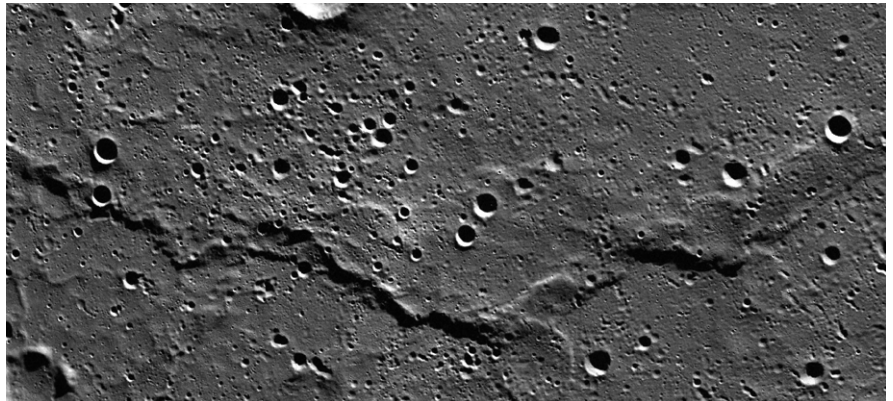
47

Guld i komposten

Lokal kompostbunke gemte på det bedste enzym til at nedbryde plastik.

KORT NYT

MERKUR PÅ SKRUMP



Rynke på Merkur. Foto: NASA/Johns Hopkins Univ. Applied Physics Lab./Carnegie Inst. of Washington

Solsystemets mindste planet, Merkur, skrumper ind i takt med, at den afkøles. Nu har forskere sat nye tal på, hvor meget planeten er skrumpet, siden den blev dannet for cirka 4,5 milliarder år siden. Svaret er, at planetens diameter er svundet med cirka 23,2 kilometer, hvilket er op til 6,6 kilometer mere end hidtidige estimer. Den nye forskning giver ikke blot et mere præcist tal, men også bedre rammer for at forstå planetens indre. Når planeten skrumper, opstår der "rynker" i form af karakteristiske højderygge og klippefremspring på overfladen. Det er ved at analysere disse rynker, at forskerne kan udlede, hvor meget planeten er skrumpet. Men nogle steder er planetoverfladen meget mere ujævn end andre steder – formentlig på grund af meteoritnedslag – og det kan have gjort rynkerne usynlige.

For at teste den hypotese har Gaku Nishiyama fra Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt i Berlin og hans kolleger brugt satellitbilleder og laserdata til at kortlægge, hvor ujævn Merkurs overflade egentlig er. Og disse målinger viser, at der netop er færrest skrumpningsrynker i de mest ujævne områder. Ved at korrigere for effekten af de skjulte rynker, når forskerne frem til det nye resultat.

Den nye viden kan nu indgå i fortolkningen af data fra den europæisk-japanske mission til Merkur, BepiColombo, som forventes at gå i kredsløb om planeten i november måned 2026.

CRK, Kilder: *Nature* 657, 859 (2026), *Geophys. Res. Lett.* 53, e2026GL124067 (2026).

KAMPEN OM FORTÆLLINGEN OM DNA

DI skrivende stund uddeles der nobelpriser på livet løs, og det er en god anledning til en aktuel historie om en af de forskere, der ikke fik nobelprisen, men nok kunne have fortjent sin andel af den.

Da Francis Crick, James Watson og Maurice Wilkins i 1962 fik Nobelprisen for deres opdagelse af DNA's struktur i 1953, var et af de afgørende beviser et røntgenkrystallografisk billede af DNA som den engelske kemiker Rosalind Franklin og hendes ph.d.-studerende Raymond Gosling havde taget. James Watson har i sine beskrivelser af forløbet promoveret den fortælling, at han øjeblikkelig indså billedets betydning, mens Franklin selv ikke gjorde. Men en artikel i tidsskriftet *Journal of the*

History of Biology af videnskabshistoriker Alistair Sponsel og røntgenkrystallografen Brian Sutton sætter et stort spørgsmålstegn ved den påstand.

De har kigget nærmere på Franklins laboratorienotesbøger og fundet, at Franklin allerede på et tidligere foto af den samme prøve havde noteret, at der var tegn på en helix-struktur og brugt data til at beregne længden på en snoning på helix'en. Dette foto var dog dårligt centreret, hvilket havde motiveret hende til at tage nye og mere publikationsvenlige fotos. Og da hun jo allerede havde noteret sine observationer på det tidligere billede, var der ikke nogen grund til at gentage dem.

CRK, Kilde: *J Hist Biol* (2026).

GEKKOEN KAN HELE SIT HJERTE UDEN ARVÆV

Hvorfor kan nogle dyr reparere beskadigede organer, mens menneskekroppen ofte må nøjes med at lappe skaden sammen med arvæv? Det spørgsmål er professor i zoofysiologi Tobias Wang fra Aarhus Universitet med sine kolleger kommet et nøk tættere på et svar ved at vise, at det skælklædte krybdyr, gekkoen, kan reparere beskadiget hjertevæv uden at danne ar.

»Zebrafisken har i årevis været et vigtigt forsøgsdyr i forskningen i hjerteregeneration, fordi den kan gendanne beskadiget hjertevæv. Men zebrafisken er langt fra mennesket, når det gælder hjerte og kredsløb. Derfor har vi ledt efter et dyr, der kan bygge bro mellem fiskens og menneskets fysiologi,« siger han som baggrund for studiet med gekkoer, der er lavet i samarbejde med forskere fra Charles University i Prag og publiceret i *Experimental Physiology*.

Krybdyr som gekkoen har et hjerte med et kompakt muskellag og et højere blodtryk, som minder mere om mennesket, og derfor kan den være en mere repræsentativ dyremodel for menneskets hjerte og kredsløb, forklarer Tobias Wang.



Foto: Martina Gregorovicova

I laboratoriestudiet åbnede forskerne ind til gekkoens hjerte og påførte det en kortvarig forfrysning med en metalplade dyppet i flydende kvælstof. Den iskolde plade udløste en kontrolleret celledød, der efterlignede den vævsskade, der opstår, når en blodprop lukker for blodforsyning til hjertet. Hos et pattedyr vil sådan en skade typisk efterlade stift arvæv, hvis man overlever blodproppen – og hjertet kommer aldrig helt tilbage til sin oprindelige tilstand.

Men i gekkoens hjerte gik det anderledes: I den første uge efter forfrysning og celledød mistede vævet sin funktion, men i uge to begyndte hjertevævet at gendanne sig selv. Efter 21 dage viste målinger af hjertets elektriske aktivitet, at signalerne igen bredte sig over hele hjertekammeret. Efter fire uger var den beskadigede del af hjertet regenereret, og hjertets funktion var genoprettet.

Det er første gang, at den regenerative evne er dokumenteret og kortlagt så præcist hos en krybdyrart, fortæller Tobias Wang. Resultatet er dog ikke et hurtigt fiks til behandling af hjertesygdomme, men et vigtigt skridt på vejen mod at forstå, hvilke biologiske knapper der skal trykkes på, hvis menneskekroppen en dag skal lære at reparere sig selv. Næste skridt for forskerholdet er at undersøge slanger. De har endnu højere blodtryk end gekkoer, og foreløbige observationer tyder på, at deres hormonelle respons under nærsøptagelse kan sætte endnu mere fart på helingsprocessen.

HS, Kilde: *Experimental Physiology*, 111, 3310–3321.

EFTERLADTE KØER KLARER SIG FINT VED TJERNOBYL

Da reaktor fire på Tjernobyl-atomkraftværket nedsmeltede den 26. april 1986, blev folk i området evakueret. Og der blev efterfølgende etableret en såkaldt eksklusionszone i en radius på 30 kilometer omkring kraftværket – et område på størrelse med Fyn – hvor folk kun måtte færdes i korte tid ad gangen med en særlig tilladelse. Der var dog nogle mennesker, der trodsede myndighederne og vendte tilbage til deres huse i eksklusionszonen – primært ældre mennesker, som boede på mindre gårde i landsbyer. I en af de små landsbyer, Lubyanka, døde den sidste beboer Olga i 2016 og efterlod en lille flok malkekøer. Og de har siden klaret sig overraskende godt viser ny forskning, som postdoc Anastasiia Zymarioieva, Center for Ecological Dynamics in a Novel Biosphere (ECONOVO) ved Institut for Biologi på Aarhus Universitet, står bag.

»Køerne overnatter stadig i laderne, men vandrer rundt i området og græsser. De klarer sig helt uden hjælp fra mennesker og har dannet en flok med et klart hierarki. Der er endda en tyr, som leder og beskytter flokken,« forklarer hun.



Køerne ved Tjernobyl fotograferet i 2021. Foto: Sergey Zhili

Sammen med en række kolleger fra Ukraine har hun i en årrække fulgt flokken, som giver et unikt indblik i, hvad der sker, når domesticerede dyr lukkes ud i naturen. Forskeren har på afstand fulgt køerne for at dokumentere, hvordan de klarer sig. Og de klarer sig glimrende: De får masser at spise, og ser sunde og raske ud. Flokken er endda vokset fra syv til 20 individer. I det hele taget trives naturen i det enorme område omkring Tjernobyl uden menneskelig

indblanding – på trods af de negative effekter af det høje niveau af stråling, især tæt på atomkraftværket. For eksempel er bestanden af ulve syv gange højere end i lignende naturreserver, og losser og brune bjørne, som havde været udryddet i mere end 100 år, er vendt tilbage. Anastasiia Zymarioievas forskning kan også have betydning i forbindelse med rewilding i Danmark.

»Resultaterne viser, at dyrene og naturen nok skal klare sig. Det viser, at rewilding faktisk virker. Selv domesticerede dyr, der har levet tæt op ad mennesker og været vant til at blive fodret, kan omstille sig ret hurtigt – og det giver håb for fremtiden,« siger hun. »Hvilken dyreart, man vælger til rewilding, er nok ikke så vigtigt for dyrets evne til at overleve og formere sig. Det, der betyder noget, er, om dyrene er i stand til at udfylde de økologiske funktioner, vi vil have genskabt. Vores observationer i Tjernobyl viser, at selv domesticerede malkekøer hurtigt kan udvikle en adfærd, der lader dem overleve uden mennesker.«

JKK, Kilde: *Mamm Res* 71, 36 (2026).

Katrine finder hemmeligheder på havbunden

Ukendte stenalderbosættelser, skibsvrag og geologiske strukturer i undergrunden. Professor i Geoscience Katrine Juul Andresen gør os klogere på, hvad der gemmer sig i dybet.

■ Af Jeppe Kyhne Knudsen, Aktuel Naturvidenskab



KATRINE JUUL ANDRESEN

Professor i Geoscience på Aarhus Universitet, hvor hun leder en gruppe der er specialiseret i seismiske undersøgelser af undergrunden – især under havet. Som hun selv siger, hænger hendes karriere tæt sammen med forskningsskibet Aurora, som blev indviet i 2014. Fra første færd har hun på skibet udviklet nye metoder til at undersøge havbunden for at finde tegn på bopladser fra stenalderen, skibsvrag fra verdenskrigene og hjælpe vindmølleindustrien med informationer, så de kan beregne hvor meget stål, de skal bruge i de fundamenter, havvindmøllerne skal stå på. Hun har en hest, hun elsker science fiction og krimier, går til gymnastik og ejer to katte samt en trompet.

katrine.andresen@geo.au.dk

Morgensolen står lavt ind på dækket af forskningsskibet Aurora. På skibet, oppe og nede, inde og ude, suser Katrine Juul Andresen rundt. Hun er ved at tjekke, at alt udstyret til dagens feltarbejde i Aarhusbugten er om bord. Om lidt stævner Aarhus Universitets forskningsskib ud, og minutterne på skibet er dyre: 40.000 kroner per døgn, så det er med at udnytte tiden effektivt.

45-årige Katrine Juul Andresen har sit lyse hår sat op i en fletning, er iført grønne vandrebukser og en sweatshirt fra en tidligere ekspedition. Praktisk tøj, der gerne må blive beskidt. Som gerne må slides. Hun går hjemmavant rundt på skibet. Gennem årene har hun været på mange ekspeditioner, overnattet på skibet i dagevis, kæmpet mod søsygen i høj søgang i Nordsøen og nydt solen og et blikstille hav i Aarhusbugten.

Denne morgen blæser en kraftig vind fra syd-øst, og de store bølger får skibet til krænge fra side til side, så snart vi forlader havnens beskyttende moler. Egentlig var planen, at skibet skulle et godt stykke ud i Kattegat, men Katrine og besætningen bliver enige om, at bølgerne vil gøre arbejdet for besværligt. I stedet sejler vi mod Kaløvig.

Katrine skal sammen med et par kolleger fra Institut for Geoscience og fra Institut for Biologi teste, hvor meget det larmer, når de laver seismiske undersøgelser af havbunden. Dokumentationskravene for at få tilladelse til at lave seismiske undersøgelser er stigende, fordi myndighederne i stigende grad er bekymrede for, hvor meget det forstyrrer dyrelivet i havet.

»Jeg bruger mange timer hvert år på at få tilla-

delse til studentertogter og mine forskellige forskningsprojekter – og kravene stiger hele tiden. Vi ved en del om vores udstyr allerede, men vil gerne have nye og flere målinger på, hvor meget vi egentlig larmer«, siger hun.

Foruden sin forskning sejler Katrine hvert efterår ud med studerende fra geoscience, hvor de får lov til at prøve kræfter med at foretage målinger og indsamle data, mens de er på et skib. Et tilbud hun ikke selv fik som studerende.

»Da jeg studerede, var det ikke en mulighed. Jeg er glad for, at vi kan give de studerende den læring og erfaring, da det giver en bedre forståelse af data, hvis man selv har prøvet at indsamle det. Men det kræver selvfølgelig, at vi har tilladelserne på plads. Hvis jeg kan spare tid på ansøgningerne med bedre målinger, så vil det være fantastisk«, siger hun.

Mikrofoner under vandet

For at teste hvor meget de seismiske undersøgelser larmer, sætter Katrine og hendes kolleger fra biologi en række undervandsmikrofoner i vandet. Mikrofonerne – også kaldet hydrofoner – bliver hejst op i en lille kran og sænket i vandet med præcise mellemrum.

Katrine noterer GPS-lokationen for hydrofonerne samt vanddybden på en blok papir, mens hun holder øje med skærme, der viser vanddybden og strukturen af havbunden. Når hydrofonerne er sat i vandet – en 100 meter væk fra nulpunktet, en 200 meter og så videre op til 3200 meter – sejler skibet tilbage til nulpunktet, hvor der skal tændes for det seismiske apparat.

Apparatet er en såkaldt luftkanon, der kan



Luftkanonen og tilhørende luftslanger sættes i vandet. Foto: Andrea Lif, AU Foto



Katrine måler lydhastigheden gennem vandet som bruges i efterbehandlingen af data fra hydrofonerne. Foto: Andrea Lif, AU Foto



En hydrofon til måling af støjen hænger under nogle netflåd. En lille kran sænker det hele ned i vandet. Foto: Andrea Lif, AU Foto

Air-gun'en eller luftkanonen er en metalcylinder med en række luftslanger koblet på. Den sidder under en stor gul bøjle, som skal trækkes efter skibet. En kran sænker bøjlen ned i vandet.

Fotos: Andrea Lif, AU Foto



sammenlignes med en gigantisk trykluftpistol, der kan sende trykbølger flere kilometer ned i havbunden og på den måde kortlægge, hvad der gemmer sig dernede. På dækket af skibet står en lang, blå container. Den indeholder to store kompressorer, som suger luft ind og presser det sammen, klar til at luftkanonen kan sende trykbølger afsted. Ved at måle på de bølger, der kommer retur, kan Katrine og kollegerne altså kortlægge havbunden flere kilometer ned.

Spørgsmålet er bare, hvor meget det egentlig larmer.

Opvokset langt fra hav og blæst

Omtrent hver fjerde time snupper Katrine Juul Andresen en halv søsygetablet. Selvom hun bruger mange dage om året på havet, får hun stadig ofte kvalme, når hun sejler. Også skibets faste mandskab kæmper af og til med søsyge, fortæller de.

Katrine er ikke vokset op ved havet. Hun har ikke fået blæsten, bølgerne og skumsprøjtet

ind med modernælken. Hendes barndoms landskab ligger vest for Silkeborg i Funder Ådal. Et bakket område fyldt med skov og hede. Et område hun elskede at gå på opdagelse i.

»Når jeg kedede mig, gik jeg tur i skoven. Jeg kan huske, at jeg legede en leg, hvor jeg fortsatte i én retning, indtil jeg fandt et sted, jeg kendte, så vendte jeg om. Det udviklede sig nogle gange til temmelig lange vandreture. Så allerede dengang kunne jeg godt lide at udforske og gå på opdagelse i det ukendte«, siger hun.

Naturen spillede en stor rolle i Katrines opvækst. Hun var spejder og brugte mange timer udendørs, og hun var da heller ikke i tvivl om, at hun ville studere naturen, når hun blev voksen.

»Jeg elsker at komme ud. Mine børn er blevet slæbt med til mange geologiske seværdigheder gennem årene. Jeg er enormt nysgerrig på, hvordan tingene ser ud, og hvordan de er kommet til at se sådan ud.«

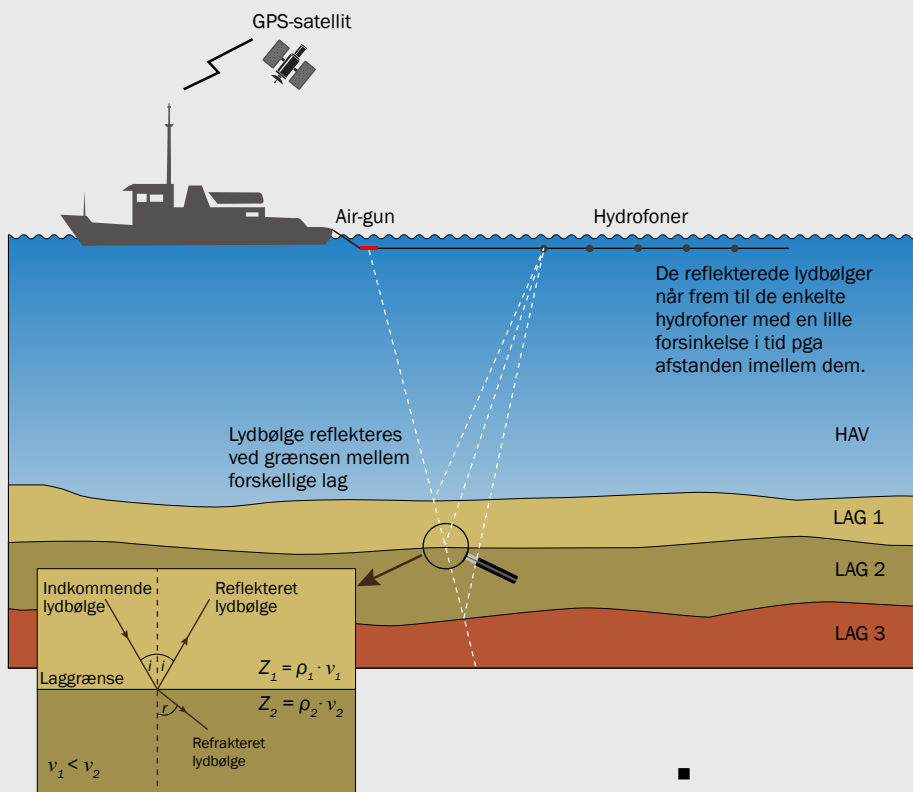
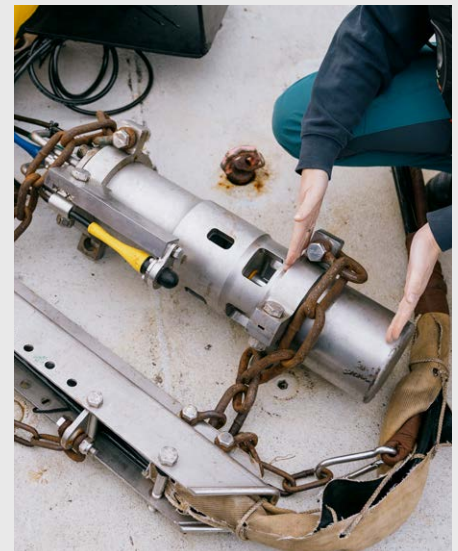
Da hun efter gymnasiet skulle vælge vej i livet, troede hun, at det var matematik-fysik, hun skulle læse. Men til et uddannelsesarrangement på universitetet satte hun sig ind i et auditorium og hørte en professor fortælle om geologistudiet – og fra da af var hun solgt:

»Da vidste jeg, at det var det, jeg skulle.«

På dybt vand

Efter nogle år på geologistudiet fik Katrine mulighed for at skrive en ph.d. Selvom hun havde været glad for at gå på gymnasiet og fået fine karakterer, havde hun nu virkelig fundet hjem. Hun klarede sine eksaminer flot, og så var det naturligt at fortsætte med en ph.d.

»Det var egentlig først på ph.d.'en, jeg udelukkende begyndte at beskæftige mig med havet. Projektet handlede om at blive klogere på, hvorfor noget olie og gas bliver fanget i olieelterne, mens andet siver op. Processen kalder vi for migration, og når det sker, opstår der bestemte geologiske strukturer.



Nærbillede af air-gun'en. Foto: Andrea Lif, AU Foto

SÅDAN FUNGERER SEISMISK KORTLÆGNING AF HAVBUNDEN

Når Katrine undersøger havbunden, bruger hun ofte en luftkanon (airgun). Kanonen består af to kamre fyldt med luft under meget højt tryk (100-120 bar). Når hun fyrer kanonen af, danner den en trykboble i vandet. Når det sker, lyder et højt dunk; det er den lav-frekvente lydbølge, som bevæger sig i alle retninger.

Lydbølgen rejser gennem vandet med en hastighed på omkring 1500 m/s. På den måde kan Katrine omregne tiden, det har taget lydbølgen at rejse ned på havbunden og tilbage igen til hydrofonerne ved skibet, til den dybde, den har nået.

Der er dog stor forskel på, hvordan lyden opfører sig i vandet og i materialerne på havbunden og i undergrunden. Jo hårdere materialet i havbunden er, desto flere lydbølger reflekteres tilbage. Det afhænger af kontrasten i den akustiske impedans (Z) mellem vandet og havbunden, og den beskrives med denne formel:

$$Z = \rho \cdot v$$

Hvor ρ (rho) er materialets densitet og v er lydhastigheden i materialet.

Katrine kan kortlægge de forskellige lag i havbunden ved at be-

regne reflektionskoefficienten (R). Jo højere en koefficient, desto flere bølger sendes tilbage mod skibet. Den udregnes med denne formel:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

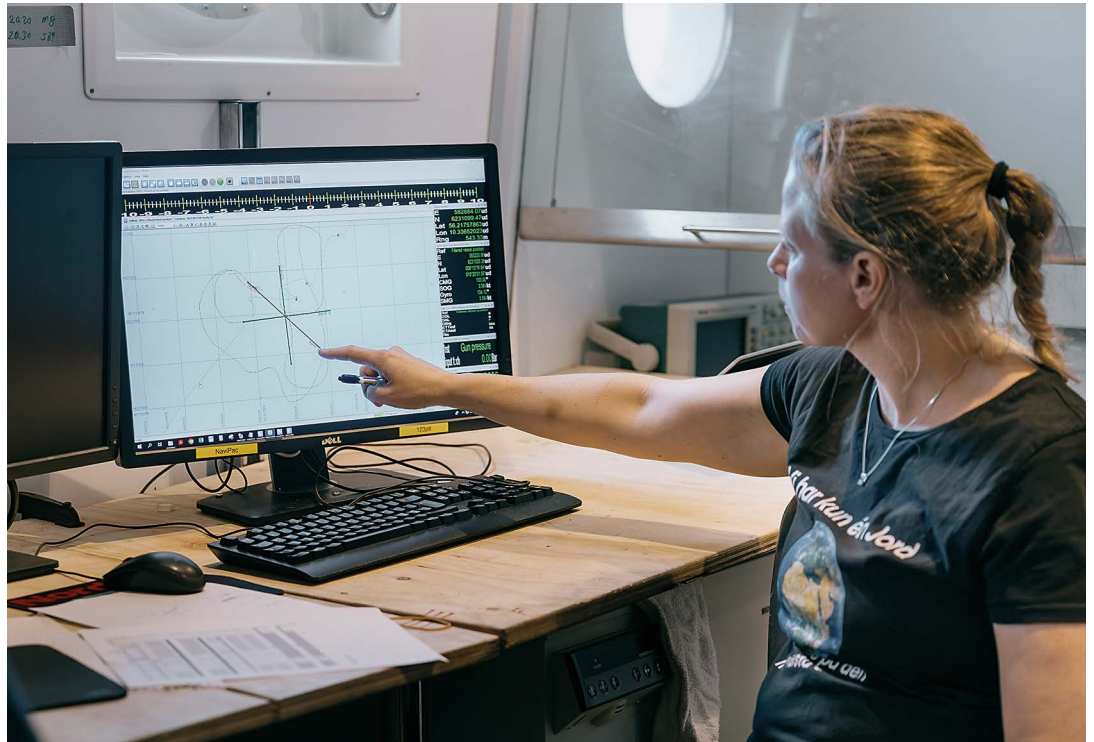
Hvor Z_1 er den akustiske impedans i det øverste lag og Z_2 i laget under.

Når lydbølgen rejser gennem lagene i havbunden, ændrer den form og karakter. Det kalder man også nogle gange for dens "signatur". Det seismiske datasæt viser det samlede ekkomønster gennem hele undergrunden – et seismogram eller en seismisk profil. Ud fra den seismiske profil, kan Katrine kan finde ud af, hvordan geologien i undergrunden ser ud. Det gør hun blandt andet ved at kortlægge de refleksioner, som opstår ved laggrænser, hvor der er akustisk impedanskontrast.

Hvis der er behov for specifik viden om de fysiske egenskaber af jordlagene, bruger Katrine en metode, som hedder seismisk inversion. Her kan man fra det seismiske signal udtrække forskellige former for information om jordlagene – eksempelvis akustisk impedans, porøsitet og densitet.

Katrine viser tre nøje fastlagte ruter, som skibet skal sejle ad. En rute, der ligger vinkelret på linjen af hydrofoner, og to ruter, der er forskudt henholdsvis 45 grader i den ene og den anden retning.

Foto: Andrea Lif, AU Foto



Olieindustrien ville gerne blive klogere på disse strukturer og smed derfor penge efter forskningen,« fortæller hun.

Ved hjælp af seismisk data fra olieindustrien, kortlagde Katrine strukturer og processer omkring olieforekomsterne. Data fra dybt under havet ude i Nordsøen – ofte mere end to kilometer nede. Og industrien var glade for hendes arbejde. Da ph.d.'en var afleveret, var der ikke en stilling ledig på universitetet, men det var der hos Mærsk Olie.

»Jeg fik job som konsulent for Mærsk. I et halvt år arbejdede jeg for dem, mens jeg arbejdede på at få finansiering på plads til en postdoc-stilling på universitetet. I mellemtiden søgte jeg også job i havvindindustrien, og jeg var tæt på at lande et job. Havde jeg fået det, var jeg nok ikke endt, hvor jeg er i dag. Jeg er glad rigtig for, at jeg endte på universitetet.»

På sporet af stenaldermenneskerne

Tilbage på universitetet begyndte Katrine at interessere sig for det landskab, der ligger tættere på overfladen. Her fandt hun nemlig spor af et landskab, hvor der engang levede mennesker.

»I geologisk forstand skete stenalderen jo blot for et øjeblik siden. Her arbejder vi ofte i millioner af år. Men jeg fandt ud af, at de informationer, jeg kan grave frem fra havbunden, kan hjælpe arkæologerne, for hvem stenalderen er den fjerneste fortid.«

Helt konkret begyndte Katrine at rette sine seismiske undersøgelser af Nordsøen mod de øverste lag af havbunden. Ved at lave undersøgelser med mere højfrekvente lydbølger fra forskellige apparater, kan hun lave en 3D-model. Ud fra den model træder et landskab fra fortiden frem nogle meter under havbunden.

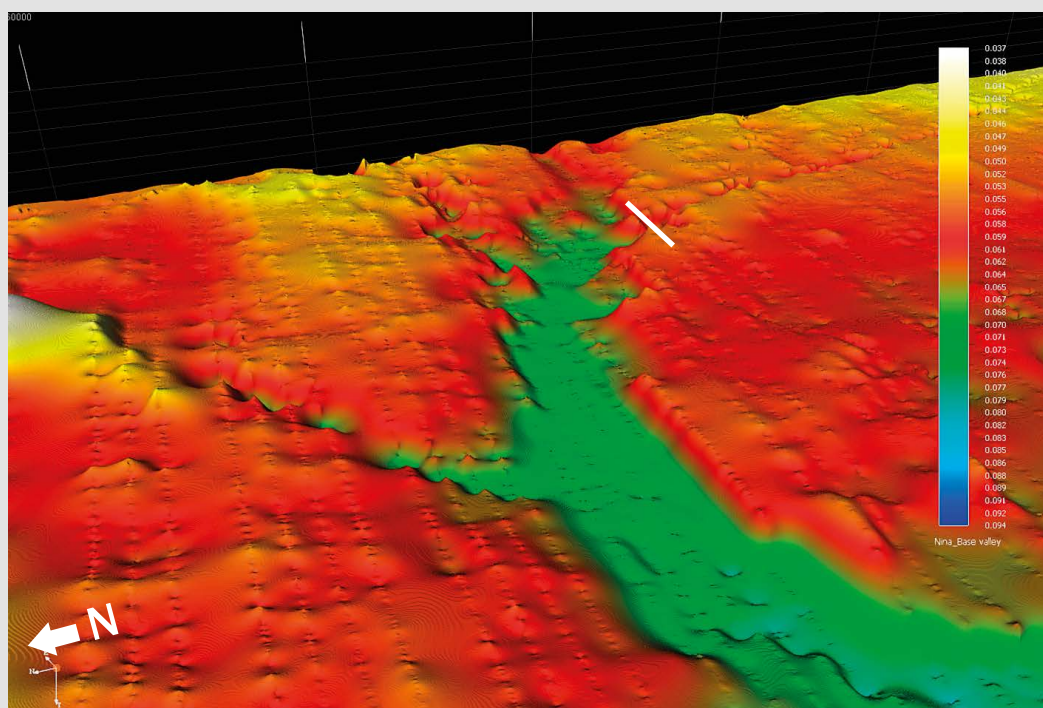
»Formålet med det projekt, Subnordica, som jeg er leder af nu, er at udvikle en metode til at finde oversvømmede stenalderbopladser på dybt vand. Det er relativt nemt at finde dem på 5-6 meters vand, men længere ude i Nordsøen, hvor havbunden er 30-50 meter nede, er det meget vanskeligere. Vi drømmer om, at metoden bliver så god, at vi kan sejle ud, tage prøver fra havbunden og finde forarbejdede genstande fra stenalderen, som eksempelvis forarbejdet flint. Lige nu er det som at lede efter en nål i en høstak – bortset fra, at vi endnu ikke ved, hvor høstakken er.«

Sammen med arkæologer arbejder hun på en metode, de kalder for prædiktiv modellering. Ved hjælp af masser af geologiske data fra havbunden, arkæologisk viden om stenaldermenneskene og kunstig intelligens, giver modellen en række bud på, hvor i Nordsøen det er mest sandsynligt at finde spor efter stenalderens mennesker.

»Vi har fodret modellen med arkæologernes viden om de stenalderssamfund, vi allerede kender i dag. Hvor tæt de boede på floder og moser, som vi genkender som tørvelag i sedimenterne. Og hvor de typisk bosatte sig i landskabet. Sammenkørt med geofysisk kortlægning af det nu oversvømmede palæo-landskab, kommer modellen så med nogle bud på, hvor det kunne være. Den virker faktisk allerede nogle steder i Nordsøen nu, men udfordringen er at få den til at virke på endnu dybere vand,« forklarer Katrine.

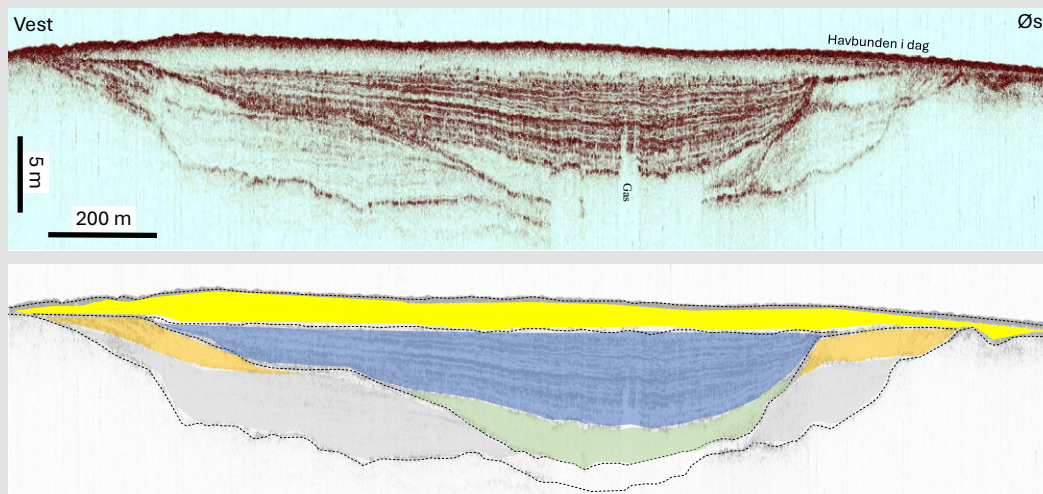
Har startet sit eget forskningsfelt

For blot få år siden var det nærmest utænkeligt at finde bopladser fra stenalderen under havet i Nordsøen. Takket være Katrine er der opstået et helt nyt forskningsfelt i Danmark. Et felt med det mundrette navn marin geoarkæologi. Hun er pioner på områ-



3D model af et gammel flodsystem (estuarie), der engang eksisterede i Doggerland. Estuariet ligger i dag begravet 0-10 meter under den nuværende havbund. Modellen er lavet ud fra seismiske profiler indsamlet i den danske del af Nordsøen. Sammen med resten af Doggerland blev estuariet oversvømmet for omkring 10.000 år siden, da havspejlet steg. Den hvide streg viser placeringen af det seismiske profil vist nedenfor.

Illustration: Katrine Juul Andresen.



Seismisk profil der viser det gamle flodsystem i Doggerland. Øverst ses profilet uden fortolkninger. Nederst er indtegnet fortolkninger, hvorfra man kan se at flodsystemet blev fyldt op i forskellige trin (de forskellige farver). Ud fra disse trin kan geologerne sige noget om hvor hurtigt havspejlet steg og hvordan floden ændrede sig fra at være en flod med hurtigt strømmende vand langt væk fra kysten, til en flod tæt ved kysten hvor havvandet var begyndt at trænge ind (et estuarie).

Illustration: Katrine Juul Andresen.

DOGGERLAND

De fleste har nok hørt om Doggerbanke i vejrudsigten. Banken er en stor, lavvandet sandbanke, der ligger midt i Nordsøen mellem Danmark og England. Nogle steder er der kun 13 meter dybt, selvom vi midt på havet. Doggerbanke var den højest beliggende del af et område, der forbandt Danmark og England under sidste istid (Weichsel), som vi kalder for Doggerland. Idet enormt meget havvand var bundet op i iskapen mod nord, var havniveauet 120 meter lavere end i dag. Det betyder, at man kunne gå tørskoet fra Danmark til England.

Landskabet var meget varieret med floder, indsøer, moser og åbne skov- og steppeområder – ideelt for mange af de dyr, som stenalderens jægere var på jagt efter. Der er fundet spor efter mammutter, kronhjorte, urokser og sabelkatte. For omkring 12.000 år siden sluttede istiden, og iskapen begyndte at smelte. Det førte til en hurtig stigning i havniveauet, og Doggerland blev i løbet af de næste tusinder af år gradvist oversvømmet. De sidste rester af Doggerland forsvandt under bølgerne for omkring 6000 år siden.

det herhjemme og en af de førende i verden.

»Ud over mine samarbejdspartnere fra landene omkring Nordsøen og Østersøen, er der få andre steder i verden, hvor marin geoarkæologi også er en bredt anvendt metode. I Israel bruges den til at studere ruiner fra romerriget i Middelhavet, og der findes også forskningsgrupper i USA og i Australien, der fokuserer på marin geoarkæologi. Men det er en ny disciplin, som der er meget fokus på i disse år. Jeg håber, at mit aftryk, når jeg engang går på pension, bliver at have været med til at starte dette forskningsfelt i Danmark,« fortæller Katrine.

De nye metoder har allerede ført til en række opdagelser i Nordsøen, men vi er kun i den spæde begyndelse, fortæller hun.

»Der ligger et kæmpe område, vi kan undersøge i Nordsøen. Doggerland hedder det. Indtil for omkring 10.000 år siden var Danmark og England landfaste, for havniveauet var meget lavere end i dag. Vi regner med, at der var en del mennesker, rensdyrjægere, i området, og det er spor efter dem, vi leder efter under havbunden.«

Som at være midt i et søslag

Alle hydrofonerne er blevet placeret i vandet med præcise mellemrum, og Katrine og kollegerne er nu klar til at lave målingerne. Katrine trækker i redningsvest, sikkerhedssko og hjelm og går ud på dækket.

Sammen med kollegerne rigger hun luftkanonen til. Den ser ikke ud af meget. En metalcylinder med en række luftslanger koblet på. Cylinderen sidder bundet godt fast til en stor gul bøjle, som skal trækkes efter skibet. Bøjen ligner en stor udgave af den torpedobøjle, som David Hasselhoff altid løb med i hånden, når han skulle redde folk i Baywatch.

Udstyret bliver løftet op med kranen og sat i vandet. Bøjen og kanonen trækkes godt ti meter bag skibet, da det første drøn lyder. Lyden er dyb og hul. Som når en kanonkugle bliver fyret af i en Hollywood-film.

Skibet sejler nu frem og tilbage ad tre nøje, fastlagte ruter. En rute der ligger vinkelret på linjen af hydrofoner og to ruter der er forskudt henholdsvis 45 grader i den ene og den anden retning.

»Ved at sejle rundt i disse fastlagte ruter, tester vi, hvordan støjen fra luftkanonen spredte sig fra forskellige udgangspunkter. Det giver os et meget bedre billede af, hvor meget vi egentlig støjer i området,« forklarer Katrine.

»Skal vi forstå nutiden, må vi forstå fortiden«

Solen er på vej ned, da den sidste hydrofon er hevet om bord igen, og skibet har sat kursen mod Aarhus. Flere af forskerne er samlet i messen, hvor der deles kiks ud og drikkes Ribena-saftvand.

Katrine kommer ind og sætter sig. Det har været en lang dag, næsten 13 timer til søs, men hun ser ikke specielt træt ud. Hun er vant til værre.

Hun reflekterer et øjeblik over, hvorfor hun laver den forskning, hun gør. Hvad formålet egentlig er med at bruge tid og penge på at undersøge en havbund og et landskab, som for længst er forsvundet:

»Skal vi forstå nutiden, må vi først forstå fortiden. De geologiske processer, der er på spil i dag, er de samme som dengang for tusinder eller for millioner af år siden. Vi kan derfor bruge de geologiske arkiver til at studere processer og landskabets respons på noget, som er aktuelt i dag. Vi ser ind i havniveauustigninger i fremtiden, og der er et stort behov for at forstå, hvordan vores kyster vil udvikle sig i takt med, at havet stiger. Ved at studere, hvordan Doggerland blev oversvømmet, kan vi få ny og brugbar viden om de geologiske processer.«

Skibet er i havn. Katrine og kollegerne bærer udstyr over landgangsbroen og over i en af universitetets biler. Klokken nærmer sig otte om aftenen. De nye højhuse på havnen lyser op højt over os. Dokk1 står mørklagt hen.

Snart sætter Katrine sig ind i sin bil og kører mod det lille landsted, hun bor på. Det er nok for sent at ride en tur på hesten, men hun har muligvis tid til at kaste sig over en krimi eller en god film, siger hun og smiler. Der er trods alt et liv udenfor universitetet – også selvom man er professor og lægger mange timer på havet. ■

VIDERE LÆSNING

Andresen, K.J. (2012): Fluid flow features in hydrocarbon plumbing systems: What do they tell us about the basin evolution? *Marine Geology*, Vol. 332–334.

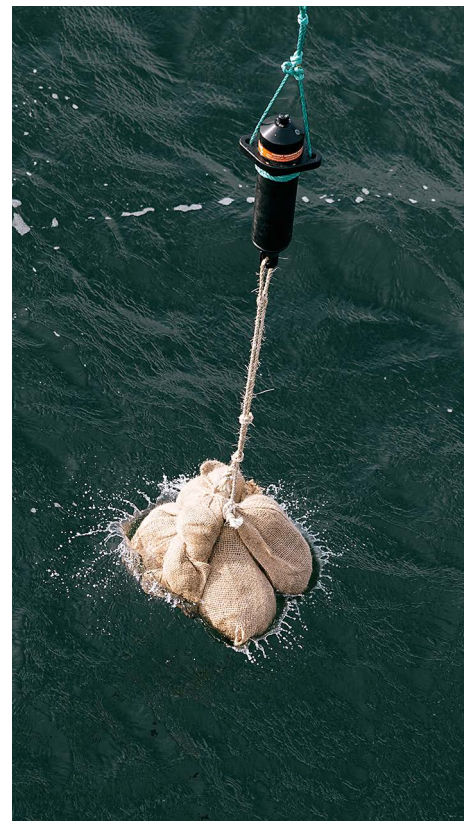
Andresen, K.J., Hepp, D.J., Keil, H. & Spiess, V. (2022): Seismic morphologies of submerged late glacial to Early Holocene landscapes at the eastern Dogger Bank, central North Sea Basin – implications for geo-archaeological potential. *Geo. Soc. London Spec. Publ.*, 525(1):SP525-2021-155.

Andresen, K.J. et al (2025): Palaeo-landscape reconstruction of a shallow coastal embayment in Kattegat, Denmark—influence of sea-level changes during the latest Pleistocene and Holocene. *Boreas*, 55: 560-584.

Schuster, R.M. et al (2026): Environmental risks from world war shipwrecks: Field-based biomarker evidence from caged mussels in the North Sea. *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 229..



Det er godt at kunne forskellige knob og stik til sikring af udstyr. Foto: Andrea Lif, AU Foto



En hydrofon sænkes ned. Foto: Andrea Lif, AU Foto

Når død giver liv



Dansk Center
for Organdonation

Biologi og bioteknologi

iBogen *Når død giver liv* kobler faglig viden med konkrete opgaver og personlige fortællinger om organdonation.

Brug organdonation som indgang til bl.a.:

- **ABO-blodtypesystemet og immunsystemet**
- **Blodtypetest og ELISA-test**
- **Konstatering af døden og transplantation**
- **Fagligt samspil i store opgaver**



Alle skoler og elever har fri adgang
Scan her og se materialet i biologi og bioteknologi



Teoretisk fysik kan vise vejen til at styre lys i fremtidens teknologi

Nutidens elektronik er ved at nå loftet for, hvor hurtig og strømbesparende den kan blive. En mulig vej videre frem er at lade lys overtage noget af arbejdet fra den elektriske strøm. Men først skal forskere lære at styre lyset lige så præcist, som man i dag kan styre elektricitet.

■ Af Kristian Sjøgren, videnskabsjournalist. ksjoegren@gmail.com



**DANMARKS FRIE
FORSKNINGSFOND**
INDEPENDENT RESEARCH
FUND DENMARK

Udviklingen indenfor computere har nået en korsvej, hvor vi skal beslutte, hvilken retning den skal bevæge sig i. Problemet er flerfoldigt. For det første bruger alle de mange datacentre, som bliver bygget i disse år, enorme mængder strøm. En meget stor del af den strøm går alene til at køle de store datacentre ned, fordi computere altid vil have et varmetab. Det varmetab kan du for eksempel mærke, når du sidder med din laptop i skødet. Varmen er et tegn på, at der hele tiden går energi tabt, når de elektriske signaler farer frem og tilbage inde i maskinen og møder modstand undervejs. Lige nu frygter mange, at verden slet ikke kan producere den mængde strøm, som de store datacentre skal bruge.

Det andet problem er, at den udvikling, der i årtier har gjort vores elektronik hurtigere og hurtigere, er begyndt at gå i stå. Der fandtes engang en tommelfingerregel om, at computerens regnekraft omtrent fordobles hvert andet år, men den vækst er langsomt fladet ud. Vi rammer nu nogle helt grundlæggende grænser for, hvor små og hurtige de elektroniske komponenter kan blive.

Helt centralt i begge problemstillinger finder man konverteringen af information fra lys til elektriske signaler. Wifi, mobilsignaler og de fiberkabler, der ligger på bunden af verdenshavene, flytter data af sted med lysets hastighed og bruger meget lidt energi undervejs. Problemet opstår, når signalet når frem. For så skal det oversættes tilbage til elektriske signaler, før computeren kan arbejde med det. Og hver eneste oversættelse koster både tid og strøm.

En gruppe fysikere drømmer derfor om at slippe helt for det oversættelsestrin ved at lade lyset selv overtage regnearbejdet inde i computeren. En af disse forskere er professor og teoretisk fysiker Joel Cox fra POLIMA, Center for Polariton-driven Light-Matter Interactions, ved Syddansk Universitet.

»Lys er fantastisk til at transportere information hurtigt og næsten uden at bruge energi. Den store hovedpine er, at vi ikke rigtig kan styre lyset. Vi kan ikke tænde og slukke for det lige så let, som vi kan tænde og slukke for en elektrisk strøm. Kunne vi det, ville vi kunne erstatte en stor del af elektronikken med noget, der i stedet kører på lys,« fortæller han.

Lys er for "stort" til en mikrochip

Når Joel Cox taler om at styre lys, mener han noget mere vidtgående end at tænde

og slukke en lampe. Han vil kunne fokusere lyset ned på så små områder, at det kan bruges inde i en mikrochip på linje med de elektriske komponenter, vi kender i dag. Målet er at forstå, hvordan lys kan koncentreres på de allermindste længdeskalaer, hvilket på sigt kan bane vejen for nye optiske komponenter.

Det lyder måske simpelt, men man støder hurtigt ind i et fysisk problem, der indtil videre er uløst. En moderne computerchip rummer milliarder af bittesmå elektriske kontakter, transistorer, der er pakket så tæt sammen, at de mindste af dem kun måler nogle få nanometer. Så tæt kan man i dag ikke pakke lys. Synligt lys er nemlig en bølge, der måler flere hundrede nanometer fra den ene bølgetop til den næste. Vil man arbejde med lyset på en skala på ti nanometer, altså mange gange mindre, er selve bølgen simpelthen for stor til at være der. Fysikerne kalder den grænse for diffraktionsgrænsen.

»Det er lidt som at forsøge at presse en stor havbølge ned i et syltetøjsglas. Vi kan ikke bare skrumpe optikken ned på samme måde, som vi gennem årene har skrumpet elektronikken,« forklarer Joel Cox.

Særlig partikel opstår i kontakten mellem lys og materiale

Her kommer en særlig slags partikel ind i billedet. Partiklen hedder en polariton og er på samme tid både lys og stof. Når lys rammer det rigtige materiale, kan det nemlig smelte sammen med de elektriske ladninger i stoffet til en helt ny partikel, der arver egenskaber fra både lyset og stoffet. Lyset holder så at sige fast i overfladen af materialet i stedet for at brede sig frit, og netop det gør noget bemærkelsesværdigt. Når lyset og stoffet er koblet sammen på den måde, kan lyset presses ned på områder, der er langt mindre, end diffraktionsgrænsen ellers tillader. Derfor kan man alligevel forestille sig, at man kan klemme lys sammen i noget, der nærmer sig størrelsen på en transistor.

Joel Cox og hans kolleger arbejder især med polaritoner i de såkaldte todimensionelle materialer. Det mest kendte af dem er grafen, som er et lag af rent kulstof, der kun er ét atom tykt. Netop fordi materialet i sig selv er så tyndt, er det oplagt at bruge, hvis man vil bygge noget, der fylder så lidt som muligt. Derudover har det tynde lag grafen også en anden interessant egenskab: Jo tyndere man gør materialet, desto bedre bliver polaritonerne til at fokusere lyset.

»Når materialet bliver tyndt nok, kan det ikke



JOEL COX

Joel Cox er professor i teoretisk kvantenanooptik ved Syddansk Universitet, hvor hans forskningsgruppe er tilknyttet grundforskningscenteret POLIMA støttet af Danmarks Grundforskningsfond. Han er desuden professor ved Danish Institute for Advanced Study på SDU. Joel Cox er uddannet i Canada, hvor han i 2013 tog sin ph.d.-grad i fysik. Herefter fulgte år som postdoc ved fotonikinstituttet ICFO i Barcelona, hvor han specialiserede sig i ikke-lineær optik og i polaritoner i grafen. I 2019 kom han til Odense og etablerede senere sin egen forskningsgruppe *Kvante- og ikke-lineær Nanooptik* ved POLIMA. Hans forskning kredser om polaritoner og om de todimensionelle materialer. Målet er at forstå, hvordan man kan koncentrere lys på de allermindste længdeskalaer, og på sigt bane vejen for en ny slags optiske komponenter til fremtidens computere.

cox@mci.sdu.dk

■ ■ ■ ■ ■

Artiklen er sponsoreret af
Danmarks Frie Forskningsfond
| Natur og Univers.
Se mere på www.dff.dk

NANOFOTONIK

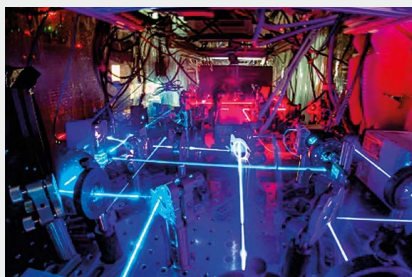
Almindelig optik som brilleglas eller kikkertlinser, kaldes også lineær optik. Her gælder den simple regel, at materialets reaktion på lyset er proportional med lysstyrken. Ved ekstreme lysintensiteter som en laser er materialets reaktion ikke længere proportional med lyset – det betyder for eksempel, at lyset kan skifte farve eller vekselvirke med sig selv.

Ikke-lineær optik er traditionelt blevet realiseret i systemer med meget intenst lys (dvs. mange fotoner) og en masse materiale, så der er en stor vekselvirkning mellem lys og materiale. Men Joel Cox og hans forskerkolleger arbejder på at nå hen i et regime af kvante-ikke-lineær optik, hvor der er den mindst mulige vekselvirkning mellem lys og stof – dvs. hvor kun få fotoner vekselvirker med et enkelt atom.

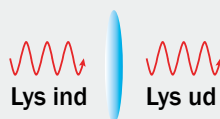
I kvanteoptiske laboratorier har man kunnet demonstrere, at dette faktisk kan lade sig gøre. Men det kræver i dag komplicerede opstillinger, som vanskeligt kan skaleres ned til de nanostørrelser, som for eksempel mikrochips i dag fremstilles i. For at komme videre er der derfor brug for at udvikle nanofotoniske teknikker, der fokuserer lys ned på nano-længder i designede nanostrukturer og 2-dimensionelle materialer.

Nutiden:

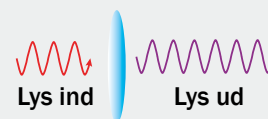
Komplicerede laboratorieopstillinger



Lineær optik

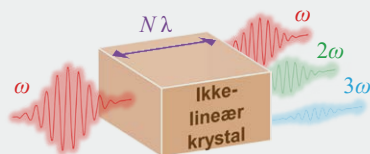


Ikke-lineær optik



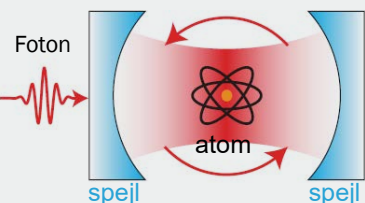
Lysstyrke:	Svagt/almindeligt lys	Ekstrem intenst (typisk laser)
Frekvens (farve):	Uforandret	Kan ændres fordobles eller opdeles
Fotoner:	Passerer uforstyrret	Kan vekselvirke med hinanden og materialet
Skalering af optisk respons i forhold til lysstyrke:	Proportional	Ikke-proportional

Traditionel ikke-lineær optik



- Frekvenskonvertering
- Ultrahurtige optiske kontakter

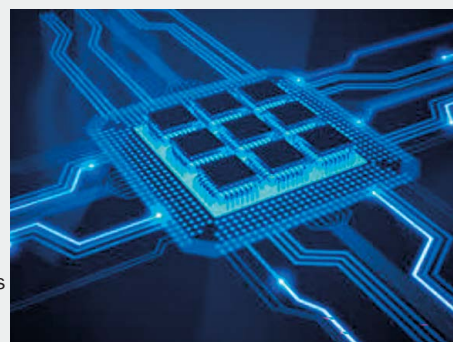
Kvante-ikke-lineær optik

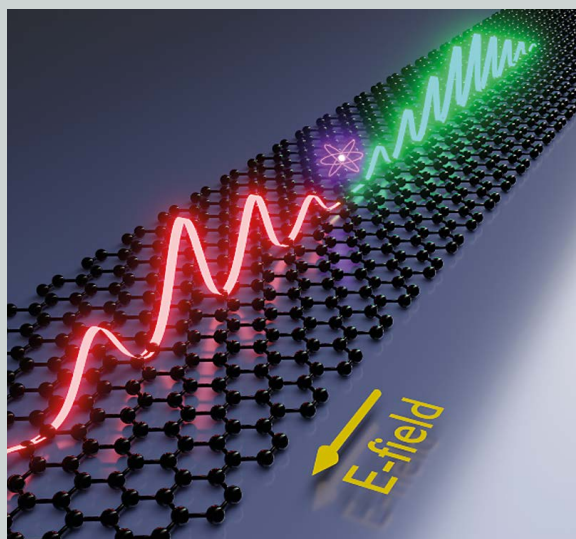
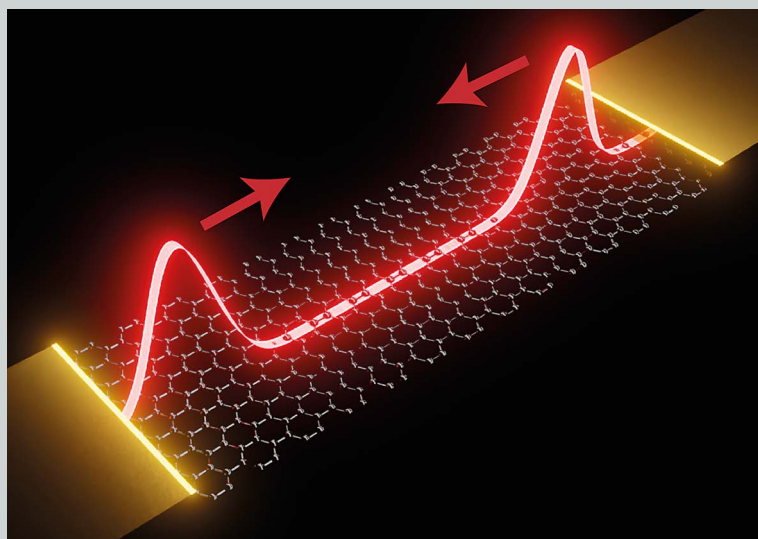


- Fotonfrekvens opkonvertering
- Enkeltfoton-kontakter

Fremtiden:

Nanofotonik
Optiske kvantechips med integrerede fotoniske kredsløb





De to illustrationer viser en kunstnerisk fortolkning af to forskellige situationer, hvor man teoretisk kan frembringe to polaritoner, der udbreder sig i stik modsat retning af hinanden, i en strimmel grafen. På figuren til venstre dannes polaritonerne af en kvante-lyskilde såsom et atom eller molekyle, og de udbreder sig forskelligt afhængig af deres retning i forhold til et påtrykt elektrisk felt. Til højre "kolliderer" to polaritoner udsendt af metalkontakter og reflekteres i modsat retning af hinanden ved deres ikke-lineære optiske vekselvirkning. Illustrationer Joel Cox.

HVAD ER EN POLARITON?

En polariton er en hybrid-partikel, der opstår, når lys og stof kobler så tæt, at de smelter sammen til én partikel. Lyset fanges lige ved overfladen af et materiale, hvor det låser sig fast til de elektriske ladninger inde i stoffet, og resultatet er en partikel, der på samme tid bærer træk fra lyset og materialet.

Der findes flere slags polaritoner, alt efter hvilke ladninger lyset kobler sig til. Kobler det sig til frit bevægelige elektroner som i et metal, taler man om plasmonpolaritoner. Kobler det sig til atomer, der vibrerer og skiftevis er lidt positive og negative, kaldes de fononpolaritoner. Løsriver lyset en elektron, så der bliver et positivt hul tilbage i atomet, opstår en excitonpolariton.

Fælles for alle polaritonerne er, at de kan holde lyset fanget på et langt mindre område, end lysets bølgelængde ellers tillader, og dermed bryde den diffraktionsgrænse, der normalt sætter en nedre grænse for, hvor småt man kan arbejde med lys. Jo mere lyset koncentrerer, jo kraftigere bliver dets samspil med det materiale, det befinder sig i.

På ovenstående baggrund er polaritoner blevet et af de mest loven- de værktøjer, hvis man vil bygge optik i samme lille målestok som nutidens elektronik. Polaritoner lever dog kun ganske kort, og en stor del af forskningen går ud på at få dem til at leve længe nok til at kunne bruges til noget.

længere flytte rundt på sine elektroner hurtigt nok til at udligne lysets elektriske felt. Derfor bliver det faktisk bedre og bedre til at koncentrere lyset, jo tyndere det er. Og et lag, der kun er ét atom tykt, kan man jo ikke gøre mindre. Vi er nået helt ned til den absolutte grænse for, hvor småt det kan blive,« forklarer Joel Cox.

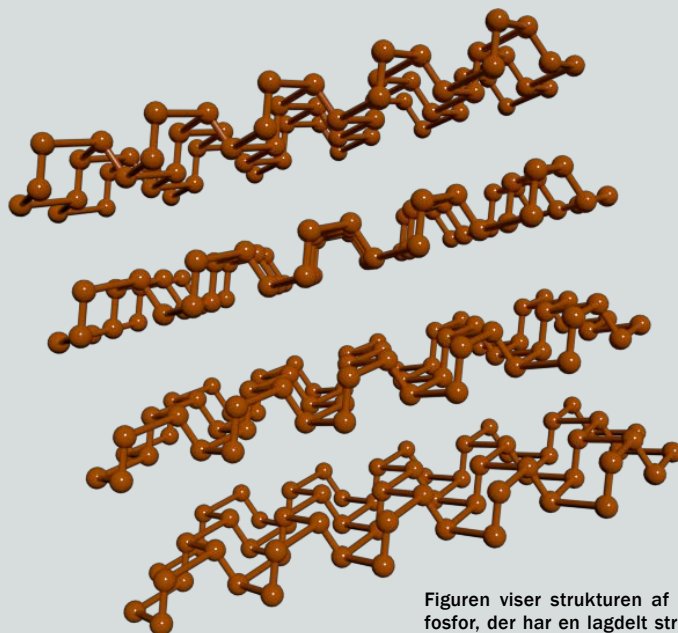
Vil styre lys med lys

Selve kernen i Joel Cox' forskning handler om det, fysikerne kalder ikke-lineær optik, hvilket blandt andet involverer muligheden for at styre lys med lys. Til daglig går lysstråler nemlig lige gennem hinanden, uden at den ene overhovedet mærker den anden. To lygtekegler, der krydser hinanden på en mørk vej, forstyrrer for eksempel ikke hinanden det mindste.

Vil man bruge lys som en kontakt, der kan tænde og slukke ligesom en transistor, er man nødt til at bryde den regel og få lyset til at reagere på lys. Det kan faktisk godt lade sig gøre, men normalt kræver det, at man skruer voldsomt op for styrken af lyset og sender millioner eller milliarder af lyspartikler af sted med en kraftig laser, så man kan få nogle af dem til at støde ind i hinanden. Et kendt eksempel på det er, at to lyspartikler med lav energi kan smelte sammen til én partikel med den dobbelte energi. Det er den slags proces, der ligger bag de grønne laserpointere, hvor usynligt infrarødt lys bliver lavet om til grønt lys. Det sker dog kun, når lyset er meget kraftigt, og derfor er det ikke en effekt, man uden videre kan bruge til at styre nogle få lyspartikler ad gangen.

Ideen med Joel Cox' forskning er, at polaritonerne energimæssigt kan gøre den slags langt billigere. Fordi de klemmer lyset sammen på så lille en plads, bliver det så koncentreret, at lyspartiklerne meget lettere mærker hinanden. Dermed skal der langt mindre effekt til, før den ikke-lineære effekt sætter ind, og man behøver ikke længere de allerkræftigste lasere.

For at afprøve ideen har Joel Cox og hans hold af forskere udviklet en helt ny type computersimulering, hvor de kan regne på hvert enkelt atom i et materiale og på, hvordan elektronerne bevæger sig, når lyset rammer.



Figuren viser strukturen af såkaldt sort fosfor, der har en lagdelt struktur. Et enkelt atomlag kaldes fosforen.

TODIMENSIONELLE MATERIALER

De todimensionelle materialer er en familie af stoffer, der kun er nogle få atomlag tykke. Startskuddet lød i 2004, da to forskere i England for første gang fik pillet et enkelt lag kulstof af en klump grafit ved hjælp af helt almindelig tape. Laget fik navnet grafen, og opdagelsen udløste seks år senere en nobelpris i fysik.

Siden 2004 har forskere fundet en lang række andre stoffer, der kan skilles ad i tilsvarende tynde lag. Et af dem er fosforen, som er et enkelt lag af grundstoffet fosfor. Tilsammen udgør de todimensionelle materialer en hastigt voksende familie med vidt forskellige egenskaber, hvor nogle leder strøm som metaller, mens andre opfører sig som halvledere.

Det, der gør materialerne så specielle, er, at fysikken skifter karakter, når man kommer helt ned til nogle få atomlag.

Elektronerne er tvunget til at bevæge sig i et fladt landskab, og det giver stofferne egenskaber, som de samme grundstoffer slet ikke har i tykkere form.

En anden styrke er, at materialerne kan styres udefra. Lægger man en elektrisk spænding over et lag grafen, kan man tilføje eller fjerne elektroner og dermed ændre, hvordan det svarer på lys, nærmest som med en knap. Man kan også stable flere forskellige lag oven på hinanden og skabe helt nye materialer med egenskaber, som ingen af lagene har hver for sig.

Fordi et enkelt atomlag ikke kan gøres tyndere, repræsenterer materialerne en yderste grænse for, hvor lille man kan bygge en komponent. Til gengæld gør den ekstreme tyndhed dem sarte og meget følsomme over for urenheder og over for det underlag, de ligger på.

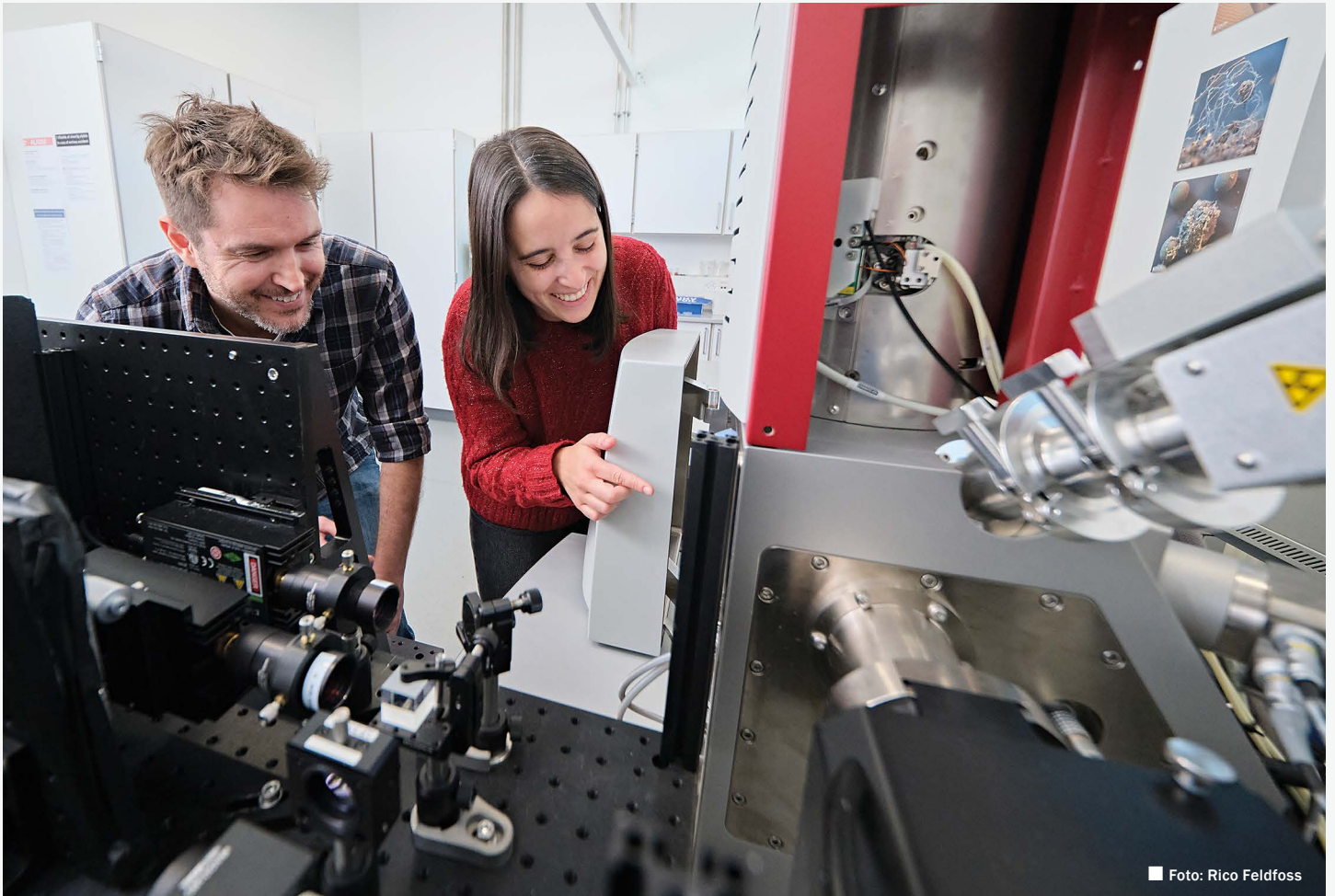


Foto: Rico Feldfoss

Joel Cox står med sin forskningskollega ved forskningscenteret POLIMA, postdoc Catarina Ferreira, ved centerets katodeluminescens-mikroskop. Det er et state-of-the-art instrument til at studere fundamentale vekselvirkninger mellem lys og stof i komplekse nanostrukturer og 2D-materialer.

~45 nm

Foto: IBM

Transistorer

400 nm

Synligt lys (violet)

En moderne mikrochip indeholder milliarder af transistorer. Hvis man vil lave mikrochips baseret på optiske komponenter, støder man på det problem, at bølgelængden af synligt lys er alt for stor til at kunne pakke et tilsvarende antal transistorer på en chip. Det er den udfordring, Joel Cox og kolleger, prøver at løse.

Chip fra IBM med cirka 100 milliarder transistorer.
Foto: IBM

Metoden kan holde styr på tusindvis af atomer på én gang.

»Vores beregninger bekræfter den grundlæggende idé i projektet. Polaritonerne sænker den tærskel, der skal til, før lys kan påvirke lys,« siger han.

Drømmen er to lyspartikler, der reagerer på hinanden

Den helt store drøm i feltet ligger endnu et stykke længere ude i fremtiden og handler om at nå derhen, hvor man kan sende bare to lyspartikler af sted og vide med sikkerhed, at de vil reagere på hinanden, i stedet for at skulle sende milliarder af sted og håbe på et enkelt sammenstød. Fysikerne taler ligefrem om den hellige gral, hvis det lykkes. I så fald vil man for alvor kunne bruge lys, som vi i dag bruger elektronik. Den ene lyspartikel vil kunne afbryde eller styre den anden, ligesom en elektrisk strøm i dag tænder og slukker en transistor.

Joel Cox har sammen med kolleger i Barcelona og Wien vist, hvordan man i teorien kan lade to polaritoner tørne direkte sammen inde i en tynd strimmel af grafen. Når polaritonerne mødes på præcis den rigtige måde, kaster den ene den anden tilbage, og det kontrollerede sammenstød kan fungere som en logisk byggesten i en fremtidig kvantecomputer. Der kan dog gå lang tid, før den teoretiske fysik bliver oversat til virkelig teknologi. Beregningerne viser, at det er fysisk muligt, men også at det stiller meget store krav til materialernes kvalitet, hvis det skal fungere ude i virkeligheden.

»Vi løser ikke problemet i det her projekt, men vi tager nogle vigtige skridt på vejen og finder frem til metoder, der ser lovende ud. Det er stadig langt fra en færdig teknologi, og det vil jeg gerne være helt ærlig omkring. Da forskningen samtidig foregår i computersimuleringer på atomniveau, er der langt fra at regne på et materiale i en computer til at bygge en færdig teknologi i laboratoriet,« siger Joel Cox.

Lyspartikler som bud på fremtidens kvantecomputere

Forskningsarbejdet kan også være relevant i forhold til udvikling af kvantecomputere. Lysets fotoner regnes nemlig for at være

blandt de allerbedste bærere af kvanteinformation, altså den type information, som en kvantecomputer skal regne med. De kan bevæge sig hurtigt og over lange afstande uden at blive forstyrret synderligt.

Hvor en almindelig computer arbejder med bits, der enten er nul eller et, arbejder en kvantecomputer med kvantebits, der kan være i en slags superposition af begge tilstande på én gang. En foton kan bære sådan en kvantebit, for eksempel i den måde, den svinger på, og derfor forestiller forskere sig, at lys en dag kan blive selve ryggraden i et net, der sender kvanteinformation rundt mellem fremtidens kvantecomputere.

Skal den drøm gå i opfyldelse, kræver det, at man kan skabe og styre lyset helt nede på niveauet af de enkelte lyspartikler, og at man kan sende dem af sted uden at miste dem undervejs. Det er præcis den slags kontrol, de todimensionelle materialer og deres polaritoner måske en dag kan levere, og derfor er de to grene af forskningen tæt knyttet til hinanden.

Materialer er aldrig helt perfekte

Trods de mange resultater er Joel Cox meget bevidst om, at der stadig står en stor forhindring i vejen, før teori kan blive til virkelighed. Virkelighedens materialer er nemlig aldrig helt perfekte, og det er noget ganske andet at regne på et materiale i en computer end at fremstille det i laboratoriet.

I den virkelige verden vil der i materialer altid være små fejl, hvor et atom sidder forkert, og det atomtynde materiale er samtidig meget følsomt over for sine omgivelser. Netop den følsomhed er både en velsignelse og en forbandelse. På den ene side kan man finjustere materialets egenskaber udefra. På den anden side taber lyset let energi til alt det, der ikke er, som det skal være, og det svækker effekten.

»Det handler i bund og grund om støj. Polaritonerne mærker de defekter, de mærker urenhederne i omgivelserne, og de mister energi til alt muligt undervejs. Den udfordring med tab og materialefejl vil altid være der,« forklarer Joel Cox.

De teknikker, man har til at fremstille materialerne, bliver dog hele tiden bedre, og eksperimenterne haler langsomt ind på teorien. Joel Cox nævner selv, at der for nylig er kommet nye metoder til at lave sølvfilm, der kun er få atomer tykke, og som tegner lovende for optikken.

»Feltet rykker sig hele tiden, og der kommer nye ting næsten hver dag. Jeg vil rigtig gerne opleve, at vi en dag når helt derved, hvor lys kan styres partikel for partikel. Vi er der ikke endnu, men vi har fundet nogle veje, der ser lovende ud, og jeg glæder mig oprigtigt til at se, hvor det bærer hen,« siger han. ■

VIDERE LÆSNING

L. Jelver and J. D. Cox*, Nonlinear thermoplasmonics in graphene nanostructures, *Nano Lett.* **24**, 13775 (2024).

L. Jelver and J. D. Cox*, Electron-induced nonlinear dynamics in atomic chains, *Phys. Rev. Research* **5**, L022015 (2023).

M. H. Eriksen, J. E. Olsen, C. Wolff, and J. D. Cox*, Optoelectronic control of atomic bistability with graphene, *Phys. Rev. Lett.* **129**, 253602 (2022).

T. P. Rasmussen, P. A. D. Gonçalves, S. Xiao, S. Hofferberth, N. A. Mortensen, and J. D. Cox*, Polaritons in two-dimensional parabolic waveguides, *ACS Photonics* **8**, 1860 (2021).

SRP OG SOP I SAMARBEJDE MED AARHUS UNIVERSITET

Giv dine elever
mulighed for at
lave forsøg og få
sparring i vores
forskningsmiljøer

Aarhus Universitet tilbyder SRP- og SOP-forløb inden for
naturvidenskab, teknik og matematik.

Vi tilbyder:

- Adgang til laboratorier og eksperimentelt arbejde
- Faglig sparring fra forskere eller ph.d.-studerende
- Hjælp til litteratursøgning



AARHUS UNIVERSITET



Læs mere på:
nat.au.dk/SRP
agro.au.dk/SRP

Europas vigtigste maskine tegner verdens mest avancerede chips

Maskiner fra den hollandske virksomhed ASML tegner i dag alle de meste avancerede computerchips i verden. Virksomhedens teknologiske succes bygger på en særlig type lys, kaldet ekstremt ultraviolet lys, som det tog mange år at lære at beherske.

■ Af Oskar Stanislav Matras



OSKAR STANISLAV MATRAS

Oskar Stanislav Matras er student fra Vordingborg Gymnasium & HF. Han skrev srp om EUV-litografi i fagene fysik og dansk.

Oskar brænder for fysik og teknologi og drømmer om at arbejde med teknologi og videnskab, der for alvor rykker verden fremad ligesom ASML's vilde teknologi.

oskarstanislav@gmail.com

Dybt inde i en hollandsk fabrik står der en maskine, som 50.000 gange i sekundet skyder bittesmå tindråber ud, som drøner afsted med 100 meter i sekundet. Tindråberne bliver ramt af en kæmpe laser, der tilintetgør dem i et lysglimt varmere end solens overflade. De forvandles til en sky af glødende ioner. Som bruges til at tegne mikrochips med.

Sådan kunne beskrivelsen af en maskine i en Blockbuster-film af George Lucas måske lyde, men i modsætning til Star Wars er det her faktisk virkelighed. Og den maskine, der bliver beskrevet, er en EUV-litografimaskine hos den hollandske virksomhed ASML. For ASML er de eneste i verden, der kan bygge en sådan maskine. Maskinen er så avanceret, at selv George Lucas ville få svært ved at finde på de krumspring, der kræves for at producere det lys, som EUV-litografi bygger på.

I denne artikel vil jeg fortælle om nogle af de elementer, der ligger til grund for EUV-litografi, og hvordan det har gjort alt fra telefonen i din lomme til AI-revolutionen mulig.

Sådan fremstiller man EUV-lys

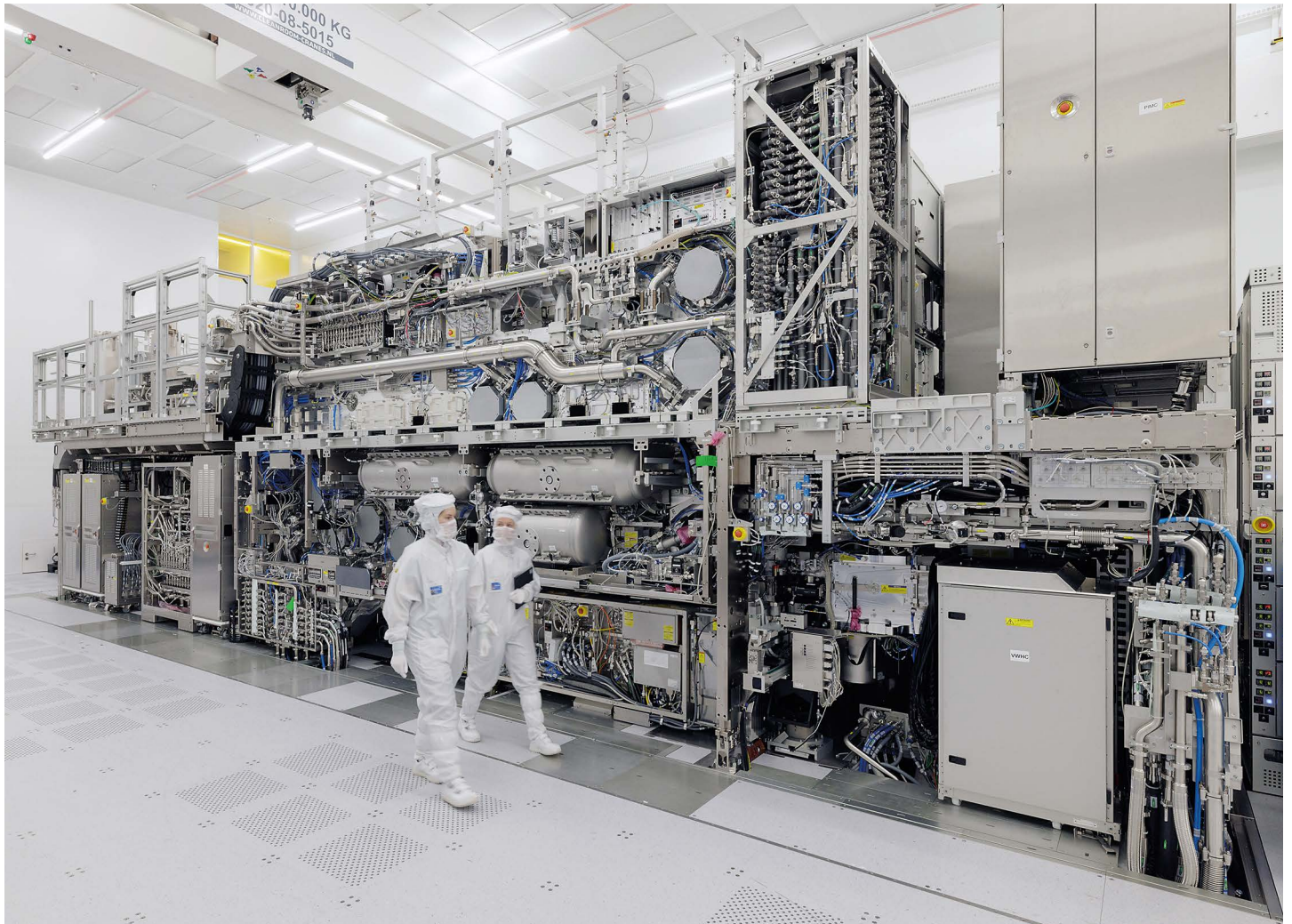
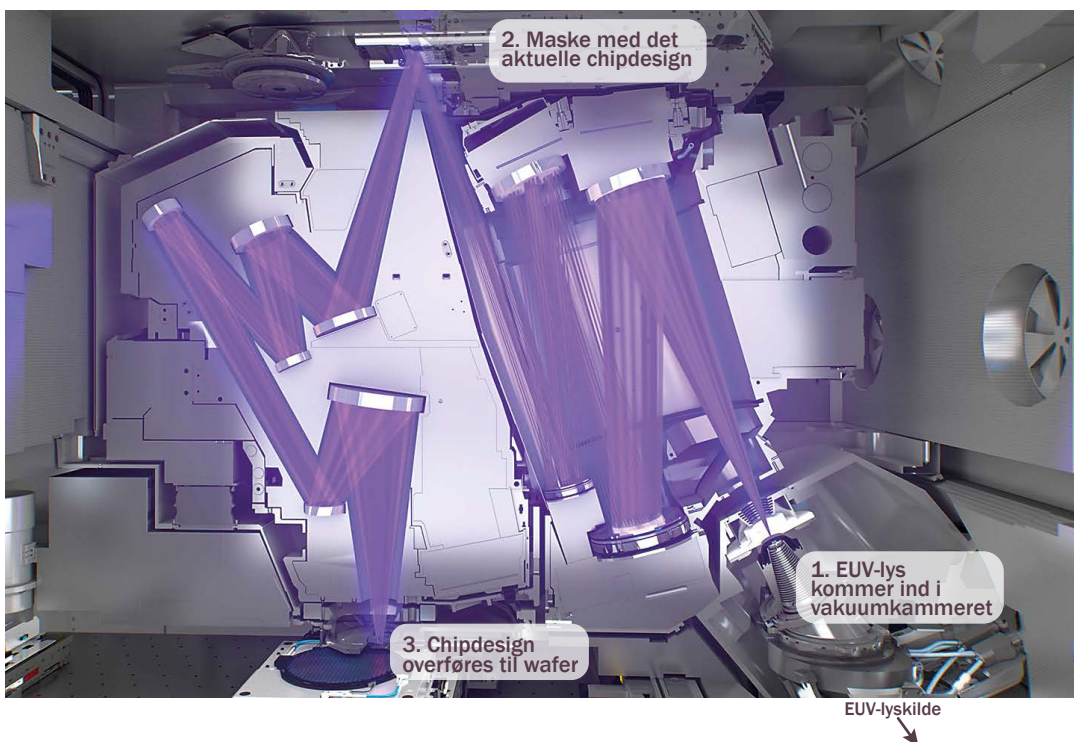
For at lave det lys – Ekstremt Ultraviolet (EUV) lys – som er hemmeligheden bag EUV-litografi, starter du med den kraftigste laser, du kan finde – en industri-CO₂-laser er her det foretrukne værktøj. For at opnå den nødvendige energi lader du lyset fra laseren passere gennem en række forstærkere, indtil det rammer en effekt på 25 kilowatt (kW). Nu skal du sigte meget præcist: Lysstrålen skal nemlig ramme en mikroskopisk dråbe

tin, der ikke er større end diameteren af et menneskehår. Og for at udnytte energien i din laser optimalt, affyrer du ikke bare et, men to skud lige i rap.

Det første skud er svagt og skal bare flade tindråben ud til en lille pandekage. Det gør arealet større, så det næste og langt kraftigere skud kan få mere kontakt. Når det andet skud med den fulde effekt på 25 kW rammer, rives tindråben fuldstændigt fra hinanden og forvandles til en glødende plasmasky. I plasmaskyen optræder tinatomerne i en tilstand af ioniseret gas, og når de ladede tinatomer straks efter falder tilbage til en lavere energitilstand, frigiver de deres overskydende energi som lys. Ekstremt Ultraviolet (EUV) lys med en bølgelængde på 13,5 nanometer (nm).

Kun 5 procent af laserenergien ender som EUV-lys. De resterende 95 procent forsvinder som røntgenstråling og varmeenergi i plasmaet. Det er ikke noget designproblem, men simpelthen bare, hvad der sker, når du river tinatomer fra hinanden ved 200.000 grader. Selvom 5 procent ikke lyder som særlig meget, er det faktisk enormt meget. En enkelt EUV-foton bærer 40 gange mere energi end en foton af synligt lys. En enkelt laserpuls har en energi på 10 millijoule, og med en konverteringseffektivitet på 5 procent, produceres der 3,4 milliarder EUV-fotoner per puls. Da det foregår 50.000 gange i sekundet, giver det rigeligt med fotoner til at skabe en EUV-lyskilde, der kan bruges til praktiske formål.

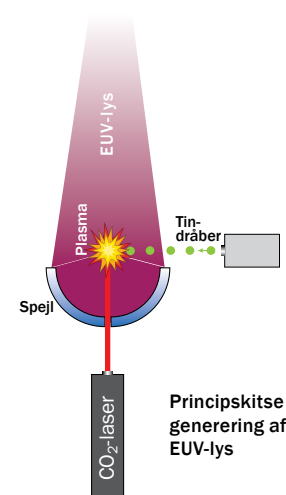
Det vilde ved de 5 procent er, at det faktisk er et rekordhøjt resultat opnået efter flere

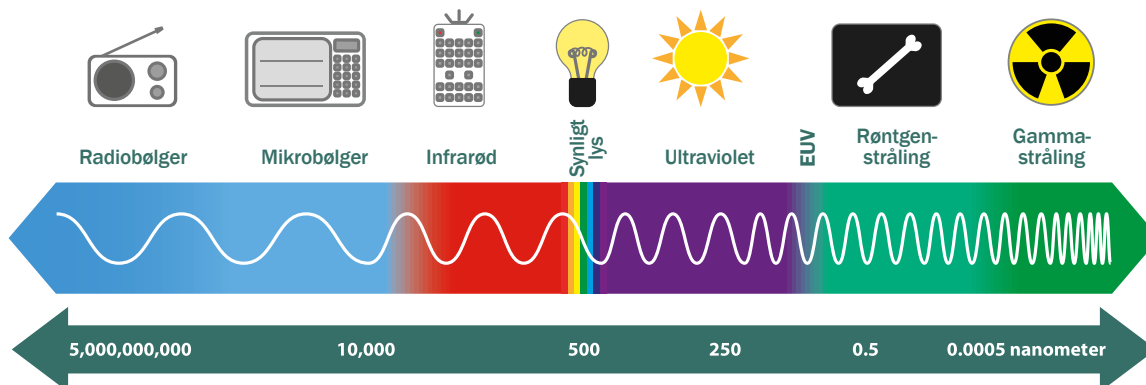


På billedet ses indmaden af en af ASML's avancerede litografimaskiner i Veldhoven, Holland. Sådan en maskine kan købes for en pris i omegnen af 2,5 milliarder kroner.

På illustrationen til venstre ses EUV-lysets snørklede vej fra lyskilden til waferen inde i maskinen.

Foto og grafik: ASML





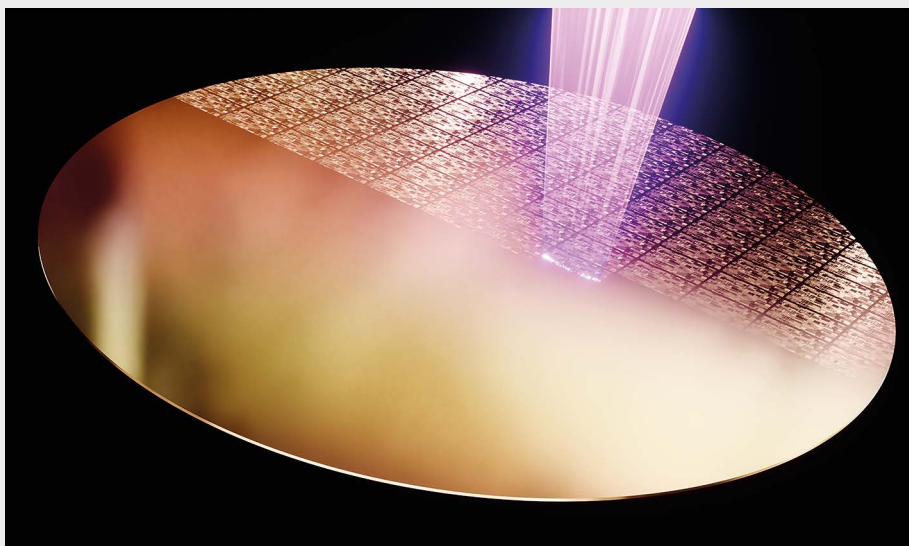
Figuren viser det elektromagnetiske spektrum. Ekstremt Ultraviolet Lys (EUV) er bølglængder i området mellem 10 og 121 nanometer. Til chipproduktion bruges EUV-lys med en bølglængde på 13,5 nanometer. Figur tilpasset efter Shutterstock.

SÅDAN FREMSTILLES AVANCEREDE MIKROCHIPS

Fremstilling af moderne mikrochips kræver enorm præcision og foregår i ultrarene rum, da de mindste støvpartikler nemt kan ødelægge chippen. Udgangsmaterialet er sand, der primært består af kvarts (siliciumdioxid, SiO_2). Fra dette laves silicium med en renhed på 99,9999999% formet som cylindriske krystaller. Disse skæres ud i ultratynde siliciumskiver, kaldet wafer.

Derefter er rækkefølgen af trin i fremstillingsprocessen:

- Typisk deponeres et tyndt film på overfladen, som kan være et ledende materiale, en isolator eller en halvleder.
- Waferen coates med et lysfølsomt materiale og sendes ind i litografimaskinen fra ASML.
- Maskinen projicerer ekstremt ultraviolet lys (EUV-lys) ned på waferen gennem en maske, der indeholder selve chippens design (med milliarder af transistorer). Dermed printes chippen på waferens overflade.
- Når waferen kommer ud af litografimaskinen, opvarmes den, og det lysfølsomme lag vaskes væk fra områder, som ikke er hærdet af belysningen.
- Overfladen ætzes, så der udgraves



Stillbillede fra en animation, der viser et chipdesign blive overført til en silicium-wafer ved hjælp af EUV-lys. Billede: ASML

- nanosmå riller og strukturer ned i siliciummet, der hvor det lysfølsomme materiale er fjernet. Dermed bliver det printede mønster tredimensionelt.
- Waferen bombarderes med positive eller negative ioner for at "dope" silicium og dermed finetune dets elektriske egenskaber.
- Endelig fjernes det tilbageværende lag af det lysfølsomme materiale.

- Disse trin kan gentages op til hundrede gange for at opbygge den komplekse 3D-struktur af de enkelte chips. Når strukturerne er helt færdige, testes hver enkelt chip på waferen for fejl. Fungerende chips skæres derefter ud og pakkes i et hus, hvor de elektriske kontakter tilsluttes, og chippen er klar til brug.

Kilde: ASML

års forskning. Tin er det eneste stof, man har fået til at komme i nærheden af 5 procent. Den effektivitet, der kan virke skuffende lille, er i virkeligheden en af grundene til, at EUV-litografi overhovedet er mulig.

Ideen ingen troede på

For at forstå, hvordan en af det 21. århundredes mest imponerende teknologiske bedrifter blev til, skal vi skruer tiden helt tilbage til 1980'erne. Dengang blev selve ideen om at tæmme lys med en bølgelængde på 13,5 nm betragtet som nærmest umulig. Idet EUV-lys absorberes af næsten alle materialer, mente de fleste forskere, at det var en teknologisk blindgyde. Da den japanske forsker Hiroo Kino-shita i 1986 præsenterede en ide om at bruge en ny type spejle til at reflektere lyset, nægtede hans kollegaer simpelthen at tro på det.

Året efter præsenterede den amerikanske forsker Andy Hawryluk en lignende ide, med den tilføjelse, at teknologien potentielt kunne bruges til at lave mikrochips. Derefter blev han bogstaveligt talt grinet ned af scenen.

Det var først 15 år senere, at de to forskeres idé blev taget op igen, og det var kun fordi hele mikrochipindustrien var i panik. Siden 1976 havde industrien været i stand til at fordoble antallet af transistorer på en mikrochip hvert andet år – en vækst kendt som Moores lov efter den amerikanske forretningsmand og ingeniør Gordon Moore. Men omkring årtusindeskiftet så Moores lov ud til at være døende.

Problemet bundede i det, fysikere kalder Rayleigh-kriteriet. I sin mest simple form fortæller det os, at størrelsen på de detaljer, du kan tegne med lys, er direkte afhængig af lysets bølgelængde. Forestil dig, at du skal male et flot og detaljeret maleri. Hvis din pensel er en bred malerrulle, er det fuldstændig ligegyldigt, hvor rolig en hånd du har, det er fysisk umuligt at male noget som helst detaljeret.

Før EUV-revolutionen brugte industrien lys med en bølgelængde på 193 nanometer. Men transistorerne var ved at blive så små, at lyset simpelthen var for "tykt" til at skære de fineste små detaljer.

EUV-litografi – fra malerrulle til spids pensel

Hvis den teknologiske udvikling skulle fortsætte, var der altså brug for helt ny tekno-

logi, der brugte lys ved endnu mindre bølgelængder.

Teorien om de utrolige spejle og utæmmelige lys så derfor lige pludselig slet ikke så latterlig ud mere. For det lille firma ASML i den stille hollandske by Veldhoven, som lavede litografimaskiner til mikrochipindustrien, så ideen endda ganske glimrende ud. De begyndte i slutningen af 1990'erne at studere muligheden for at bygge en maskine, der udnyttede det sagnomspundne EUV-lys til at tegne mikrochips. Det lykkedes – men det var en svær nød at knække: Først i 2015 var de i mål.

Da den første telefon med en EUV-chip kom på gaden i 2018, mærkede verden umiddelbart ingenting. Det var ikke en verdensomspændende sensation i nyhederne. Det var bare en telefon, marginalt hurtigere end den forrige.

Men i praksis var der tale om en revolutionerende teknologisk udvikling. Ved at tage det absurde spring til EUV-lys med en bølgelængde på kun 13,5 nanometer havde ASML groft sagt skiftet industriens malerrulle ud med en malerpensel, så spids, at ingen andre hidtil har kunnet gøre dem kunsten efter. Og i dag er det således ASML's EUV-litografimaskiner, der tegner alle de mest avancerede chips, der står bag alt fra AI-revolutionen og dansende robotter til de iranske kamikaze-droner.

Bliver monopollet brudt?

I mere end 10 år har en lille hollandsk by altså været det eneste sted i verden, hvor man ved, hvordan man bygger EUV-maskiner til at tegne mikrochips. Men konkurrencen i mikrochipindustrien er benhård, og stormagterne USA og Kina forsøger af al magt at gøre sig uafhængige af andre lande, når det gælder teknologi af kritisk strategisk betydning. Derfor investerer de mange ressourcer i at gøre sig uafhængig af maskiner fra ASML – enten ved at lave litografimaskiner, der bygger på anden teknologi end EUV-lys, eller simpelthen ved at gøre ASML kunsten efter.

Det forlyder, at det faktisk nu er lykkedes kineserne at bygge en fungerende EUV-litografimaskine, så de indenfor de næste par år vil kunne begynde at tegne de mest avance-

rede mikrochips med egne maskiner.

Fremstillingen af mikrochips er øvrigt også ømfindelig, fordi langt størstedelen foregår i Taiwan, som Kina gør krav på. Hvis det kommer til en voldelig konflikt om Taiwan i den nærmeste fremtid, er det derfor ikke godt at vide, hvad der sker med verdens mikrochip-produktion.

Alt i alt går både ASML og resten af verden en spændende tid i møde! ■

PRØV SELV AT LAVE EUV-LYS

Ved at scanne QR-koden kan du selv prøve at eksperimentere med en række parametre for at se, hvordan man opnår det største udbytte af EUV-lys. Til de mere nørdede er der også en liste over, hvilke formler der bliver brugt til beregningerne.

digisim.io/museum/euv-lithography



VIDERE LÆSNING

ASML

www.asml.com/en/products/euv-lithography-systems

Video om ASML's maskiner på YouTube-kanalen Veritasium:
The worlds most important machine



.....

Fra NASA til middagsbordet: Naturvidenskaben vogter din mad

Bag hvert måltid ligger et usynligt naturvidenskabeligt sikkerhedsnet – et kontrolsystem, som oprindeligt blev udviklet af NASA i 1960'erne. Metoden bygger på systematisk risikovurdering i hele produktionen. Dødelige listeriaudbrud i fiskefrikadeller og methanolforgiftninger i Laos viser, hvorfor dyb naturvidenskabelig forståelse er afgørende for fødevarer sikkerheden.

■ Af Lene Vammen Søndergaard



LENE VAMMEN SØNDERGAARD

Cand. agro, ph.d. og seniorkonsulent ved Teknologisk Institut. Hendes faglige profil kombinerer 10 års erfaring som gymnasielærer med praktisk erfaring fra fødevarerbranchen, hvor hun som kvalitetschef har siddet med ansvar for HACCP og fødevarer sikkerhed i en produktionsvirksomhed. I dag underviser og rådgiver hun virksomheder om fødevarer sikkerhed, kvalitetsledelse og HACCP.

lvs@teknologisk.dk

Hver dag spiser vi mad, der er transporteret over kontinenter, har mødt sprøjtemidler og forurening på markerne og gennemgået højteknologisk forarbejdning på fabrikkerne. Men hvordan sikrer vi, at den globale forsyningskæde ikke serverer livsfarlige bakterier eller kemiske giftstoffer? Svaret skal findes i et system udviklet til rumrejser – og i en dyb, levende forståelse af biologi og kemi.

Forestil dig, at du sidder i en rumkapsel 400 kilometer over Jorden. Pludselig rammes du af en voldsom madforgiftning med dertilhørende opkast og diarré i vægtløs tilstand. Det er ikke blot ekstremt ubehageligt; det er potentielt dødbringende for både dig og missionen.

Som man kan læse i NASA's historiske arkiver, stod det amerikanske rumfartsagentur i 1960'erne over for netop dette skrækszenarie, da de skulle sende de første astronauter i kredsløb. De traditionelle metoder til kvalitetskontrol af fødevarer, hvor man udtog stikprøver af det færdige produkt, var utilstrækkelige. Hvis man tester fem procent af maden og finder ud af, at den er fin, hvad så med de resterende 95 procent?

I begyndelsen af 1960'erne udviklede NASA, U.S. Army Natick Laboratories og levnedsmiddelkoncernen Pillsbury Company i fællesskab det forebyggende fødevarer sikkerhedssystem Hazard Analysis and Critical Control Point – i dag kendt som HACCP. Dette system er ikke længere forbeholdt astronauter – det danner selve fundamentet for fødevarer sikkerhed i både dansk og international lovgivning. Men HACCP er ikke bare en administra-

tiv metode – det er anvendt naturvidenskab i sin mest potente form.

Når maden bliver en trussel

Vores moderne fødevarer system er et logistisk mesterværk, men det er også sårbart. Vi spiser i stigende grad industrielt fremstillet mad, og vores globale forsyningskæder er ekstremt komplekse. Samtidig vokser den del af befolkningen, som ikke tåler selv små fejl i produktionen – herunder ældre, gravide, små børn og mennesker med allergier eller nedsat immunforsvar.

Når det går galt, går det virkelig galt. I sommeren 2026 sporede Statens Serum Institut et salmonellaudbrud, der ramte 109 personer i 10 europæiske lande – heriblandt fire danskere. 17 blev indlagt, og en person mistede livet. Sporingen pegede på lucernespirer som den sandsynlige smitekilde.

Det er ikke tilfældigt: De varme, fugtige forhold, der får frø til at spire, er også ideelle for bakterier. Høj vandaktivitet og en temperatur omkring 20-25 °C giver *Salmonella* gode vilkår for at formere sig – længe før spiren når forbrugerens tallerken. Undersøgelser tyder på, at nogle af lucernefrøene allerede var forurenede ved import fra Indien. Herfra blev de distribueret til spireproducenter i flere europæiske lande. Sagen viser, hvor sårbare den globale forsyningskæde er: En forurening opstået ét sted i verden kan via frø og import sprede sig til middagsbordet i et helt andet.

Endnu mere tragisk var hændelsen i Laos i 2024, hvor flere udenlandske turister, herunder to unge danske kvinder, mistede livet



Fra risikovurdering til virkelighed: Kontrol og dokumentation sikrer, at HACCP-planen efterleves i den daglige produktion. Foto: Shutterstock.



HACCP i praksis: Ingredienser bliver til genstand for videnskabelig analyse, før de når forbrugers bord. Foto: Shutterstock

HVAD ER HACCP?

Hazard Analysis Critical Control Point (risikofaktoranalyse og kritiske styringspunkter) er et systematisk værktøj, der bruges til at identificere, vurdere og styre biologiske, kemiske og fysiske risici i fødevarereproduktionen. HACCP er beskrevet i Codex Alimentarius' General Principles of Food Hygiene. Systemet, som i dag anbefales af FN's fødevarereorganisation (FAO), bygger på syv grundlæggende principper, herunder identifikation af risici, fastlæggelse af kritiske grænseværdier og løbende overvågning.

efter at have drukket alkohol forurenet med methanol. Methanol – også kendt som træsprit – kan anvendes som en billig erstatning for ethanol, men selv små mængder kan føre til blindhed, organsvigt og død. Sagen illustrerer, hvordan kemiske risici i fødevarer og drikkevarer kan få katastrofale følger, hvis kontrolsystemerne svigter.

For at forhindre sådanne hændelser må fødevarereproducenterne agere videnskabelige detektiver. De skal kende deres fjender til bunds: de biologiske og kemiske risikofaktorer.

De usynlige biologiske fjender

De hyppigste syndere bag fødevarereoverførte sygdomme er mikroorganismer. For bakterier er vores fødevarer blot et næringsrigt substrat – de anser med andre ord vores mad for at være deres mad. Opfyldes mikroorganismernes specifikke fysiologiske vækstbetingelser, kan de overleve i, formere sig i og kolonisere fødevaren, som derved bliver kilde til infektion eller forgiftning.

Tag for eksempel bakterien *Listeria monocytogenes*. DTU Fødevarereinstituttet peger i deres risikovurderinger på denne bakterie som en af de største udfordringer i fødevarereindustrien. Den kan nemlig – i modsætning til de fleste andre bakterier – formere sig ved køleskabstemperaturer og trives i fugtige produktionsmiljøer. For en sund voksen giver den måske kun milde symptomer, men for en gravid eller en svækket ældre person kan den føre til hjernehindebetændelse, abort eller død. Det så man et alvorligt eksempel på i efteråret 2022, hvor Statens Serum

Institut og Fødevarestyrelsen måtte spore et alvorligt listeriaudbrud tilbage til fiskefrikadeller produceret hos en dansk fødevareproducent. Her blev mindst syv personer smittet med den samme stamme af *Listeria monocytogenes*, og en person døde, fordi listeriabakterien havde fundet vej til de færdige frikadeller.

For at dæmme op for så hårdføre mikroorganismer må fødevareproducenterne skrue på de knapper, der styrer mikrobiel vækst. Skal man producere en mikrobiologisk sikker fødevare – hvad enten det er en fiskefrikadelle eller en salat med lucernespirer – skal man derfor mestre mikrobiologiens tre fundamentale parametre:

Vandaktivitet (a_w): Et mål for det frie, biologisk tilgængelige vand i fødevaren. Bakterier skal bruge vand for at formere sig. Ved at tørre eller salte maden sænkes vandaktiviteten, så mikroorganismene ved osmose "tørster" ihjel eller går i dvale.

pH-værdi: De fleste patogene (sygdomsfremkaldende) bakterier foretrækker et neutralt miljø ($pH \approx 7$). Ved at fermentere maden (for eksempel yoghurt eller salami) danner mælkesyrebakterier mælkesyre, der sænker pH-værdien og derved konserverer produktet ved at forringe vækstbetingelserne for skadelige mikroorganismer.

Temperatur: Varmebehandling (pasteurisering) får bakteriernes proteiner, herunder enzymer, til at denaturere, mens hurtig nedkøling forhindrer overlevende sporer i at spire.

Uden en dyb forståelse af disse biologiske mekanismer famler fødevareproducenten i blinde.

Kemiske farer i råvarerne

Hvor de biologiske risici ofte handler om levende organismer, handler de kemiske risici om molekyler, der er giftige og kan skade menneskekroppen – enten akut eller over tid. Et af de mest kritiske områder er allergener. Ifølge EAACIs (European Academy of Allergy and Clinical Immunology)



Hygiejne og kontrol i fødevareproduktionen: Beskyttelsesudstyr og løbende inspektion er afgørende led i HACCP-systemet. Foto: Shutterstock.

	Min. a_w for vækst	Min. pH for vækst	Max. pH for vækst
Salmonella	0,94	4,5	9,5
<i>Listeria monocytogenes</i>	0,92	4,4	9,6
<i>Clostridium botulinum</i>*	0,94 - 0,97	4,6	9,0

Tabellen viser de absolutte minimumskrav til vandaktivitet (a_w) og pH-værdi, som tre udvalgte bakterier skal have opfyldt for at kunne vokse i en fødevare. Hvis producenten formår at holde produktets værdier under disse grænser (for eksempel ved at salte eller syrne), kan bakterierne ikke formere sig, og maden forbliver sikker. Egen sammenstilling efter ICMSF (International Commission on Microbiological Specifications for Foods).

* Grænserne for *Clostridium botulinum* afhænger af den specifikke stamme i fødevaren. De kuldetolerante (ikke-proteolytiske) stammer, som ofte findes i for eksempel vakuumpakket fisk, er mere følsomme og kræver en højere vandaktivitet (min. 0,97) og højere pH (min. 5,0) for overhovedet at kunne vokse. De mere hårdføre (proteolytiske) stammer kan vokse helt ned til pH 4,6 og a_w 0,94.

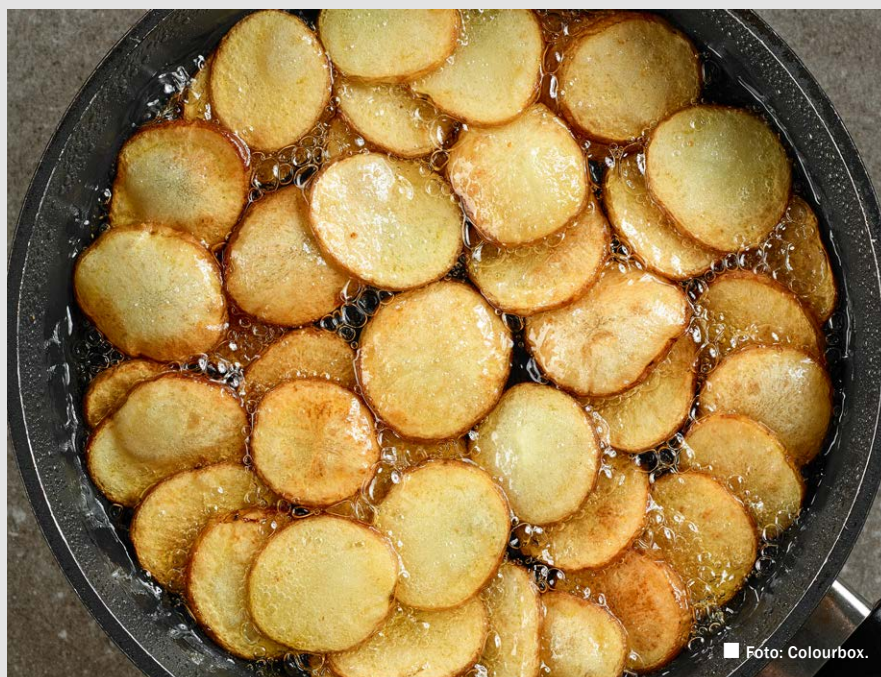
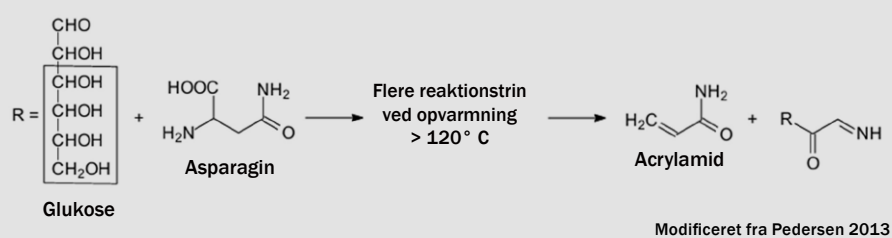


Foto: Colourbox.



MAILLARD-REAKTIONEN OG AKRYLAMID

Den Europæiske Fødevaresikkerhedsautoritet (EFSA) har længe haft fokus på akrylamid i vores mad. Når vi bager brød eller steger pommes frites i oven eller friture, sker der en kompleks serie af kemiske reaktioner mellem proteiner og kulhydrater. Ved temperaturer typisk over cirka 120 °C, reagerer aminosyren asparagin og danner det potentielt kræftfremkaldende stof akrylamid.

Ved at forstå denne kemiske reaktion kan producenter minimere dannelsen af akrylamid, for eksempel ved at kontrollere stivelsesindholdet i kartoflerne eller optimere bageprocessen.

guidelines for fødevareallergi og anafylaksi er proteinerne i for eksempel peanuts ikke bare mad for en allergiker – de udløser immunforsvarets kraftigste alarmberedskab. Ved kontakt danner kroppen antistof-fet IgE, der sætter sig på overfladen af særlige immunceller (mastceller) og får dem til at frigive store mængder histamin. Det kan udløse et anafylaktisk chok, hvor blodtrykket falder dramatisk, og luftvejene snører sig sammen. Fødevareproducenten skal derfor have fuldstændig styr på at undgå krydskontaminering. Det kræver for eksempel, at en maskine, der har kørt med peanuts, rengøres så grundigt, at allergenholdige proteinrester fjernes fra overfladerne, før maskinen bruges til andre produkter. Her kommer kemisk viden om rengøringsmidler ind i billedet; man skal forstå, hvordan midlernes kemiske egenskaber – såsom pH-værdi og overfladeaktive stoffer (tensider) – nedbryder og opløser de genstridige proteinstrukturer, så de slipper maskinens overflader.

Andre kemiske trusler opstår undervejs i forsyningskæden eller selve produktionen:

MOSH/MOAH: Mineralske olier, der kan vandre fra genbrugspap og trykssvæerte i emballagen over i for eksempel ris og havregryn. Den Europæiske Fødevaresikkerhedsautoritet (EFSA) advarer om, at MOSH ophober sig i vores organer, mens MOAH mistænkes for at være kræftfremkaldende. Derfor arbejder EU på at indføre harmoniserede grænseværdier og anvender allerede en meget restriktiv tilgang til forekomst af MOAH i fødevarer.

Mycotoxiner: Giftstoffer dannet af skimmel-svampe på marken eller under lagring af for eksempel korn og nødder. De kan give akutte forgiftninger, men den største trussel er langtidseffekterne: Visse mycotoxiner, orchra-toksin A, angriber leveren og nyrerne, mens andre, som aflatoxiner, skader cellernes DNA og klassificeres som kræftfremkaldende af Det Internationale Kræftforskningscenter (IARC). Da stofferne er ekstremt varmestabile, overlever de uforstyrret processer som bagning og ristning.

Akrylamid: Et kræftfremkaldende stof, der utilsigtet dannes, når stivelsesrige fødevarer (som kartofler eller brød) opvarmes til over 120° C. Det sker via Maillard-reaktionen, hvor aminosyren asparagin reagerer med reducerende sukkerarter (for eksempel glukose). Det giver den brune farve og sprøde skorpe, vi elsker – men altså med en kemisk bagside.

Detektiven i hvid kittel: Risikovurderingen

Hvordan omsætter man så al denne kemiske og biologiske viden til praksis? Det gør man gennem HACCP-analysen. I den globale standard for fødevarerhygiejne fra Codex Alimentarius – FN's globale organ for fødevareresikkerhed – beskrives denne proces som en systematisk og videnskabelig kortlægning i flere trin:

1. Produktbeskrivelse:

Man kortlægger produktets indre kemi. Hvad er pH-værdien? Hvad er vandaktiviteten? Er der allergener til stede?

2. Procesdiagram:

Hele rejsen fra råvaremodtagelse til færdigt pakket produkt tegnes op trin for trin i et flowdiagram.

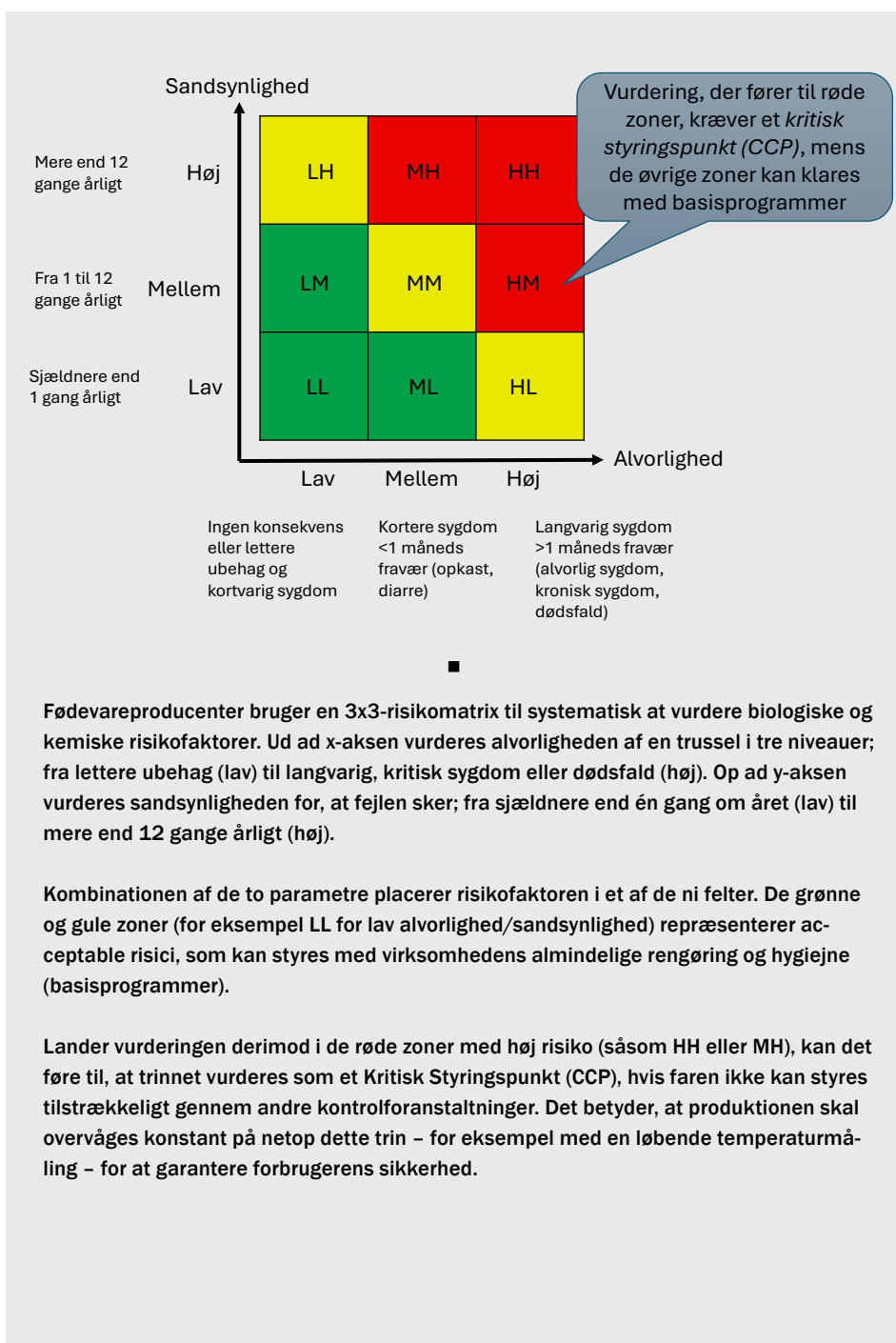
3. Risikofaktoranalyse:

For hvert eneste trin spørger man: Hvilke risikofaktorer kan introduceres, overleve eller vokse her?

4. Vurdering (Alvorlighed x Sandsynlighed):

Man vurderer, hvor alvorlig konsekvensen er for forbrugeren, og hvor sandsynligt det er, at en fare optræder.

Hvis sandsynligheden er høj, og konsekvensen er alvorlig (for eksempel overlevelse af *Clostridium botulinum*-sporer i konserves), udpeges dette trin som et Kritisk Styringspunkt (CCP). Her opstilles præcise krav til processen – for eksempel en bestemt kombination af temperatur og tid, som videnskabeligt er dokumenteret at uskadeliggøre bak-



terien. Hvis målingen viser, at kravet ikke er opfyldt, spærres partiet øjeblikkeligt.

Mindre kritiske risici styres af mere generelle procedurer – de såkaldte basisprogrammer – som sikrer alt det, der ligger rundt om selve produktion: At der er rent, at der ikke er skadedyr, at medarbejderne vasker hænder osv.

Fra teori til bureaukrati:

At bevise sikkerheden

I praksis stopper arbejdet ikke, når risiciene er kortlagt på papiret. For en fødevarevirksomhed kræver HACCP et omfattende dokumentationsarbejde. Det er ikke nok at have en god plan; man skal også kunne bevise, at den virker. Her skelner man mellem to afgørende begreber:

Validering (Virker vores plan på papiret?):

Før en ny proces startes op, skal virksomheden videnskabeligt bevise, at den valgte metode reelt kan eliminere truslen. Det gøres for eksempel via laboratorieforsøg eller videnskabelig litteratur.

Verificering (følger vi planen i virkeligheden?):

Dette er den løbende kontrol af, at planen faktisk bliver overholdt i hverdagen. Det sker gennem interne audits med inspektion, kalibrering af måleudstyr og mikrobiologiske analyser af de færdige produkter.

Hvis en måling eller kontrol ikke er skrevet ned og dokumenteret, betragtes det i fødevarekontrollens øjne som "ikke sket".

Selvom dette kontrolapparat kan virke som et tungt, bureaukratisk papirvælde, er det i virkeligheden her, teorien møder virkeligheden. Det er det administrative skjold, der sikrer, at den naturvidenskabelige viden ikke blot bliver i laboratoriet, men rent faktisk beskytter forbrugeren hver eneste dag.

Naturvidenskab med kniv og gaffel

Kradser man i overfladen af de tørre paragrafer og HACCP-skemaer, finder man alt andet

end kedsommeligt kontorarbejde – man finder pulserende naturvidenskab.

At arbejde med fødevarer sikkerhed er at bruge biologi og kemi til at løse virkelige problemer, der direkte redder menneskeliv hver eneste dag. Det kræver, at man forstår bakteriers evolutionære overlevelsesstrategier og de komplekse kemiske reaktioner, der finder sted i råvarerne, under forarbejdningen og i det endelige produkt.

Rumfarten har givet os mange opfindelser, vi i dag tager for givet: velcrobåndet på børnenes vinterjakke, det isolerende foliestof i redningsfolien i bilens nødudstyr, og memoryfoam-madrassen, vi sover på hver nat. HACCP hører til i samme kategori af diskrete, men gennemgribende teknologi-overførsler fra rummet til hverdagen. Forskellen er blot, at hvor velcro og redningsfolie er synlige, konkrete objekter, er HACCP en usynlig infrastruktur af tænkning – et system, der ikke sidder i en genstand, men i den måde, hele fødevareindustrien systematisk tænker risiko på.

Tilbage i 1960'erne handlede NASA's udvikling af systemet om et afgrænset, men eksistentielt problem: At beskytte en enkelt astronaut i en lille kapsel, hvor der ingen skadestue var inden for rækkevidde. I dag er den samme grundlæggende udfordring blot skaleret op. Vores globale fødevarer system er selv blevet en slags rumfartøj – et lukket, sammenkoblet kredsløb, hvor en fejl ét sted i verden, som de forurenede lucernefrø fra Indien, hurtigt kan nå middagsbordet et helt andet sted.

Næste gang du tager en bid af en fiskefrikadelle, åbner en pose nødder eller spiser en salat med spirer, så send en kærlig tanke til naturvidenskaben. Det er de hvide kitler i laboratoriet og HACCP-systemets skarpe logik, der holder vores fælles rumskib på sikker kurs, måltid for måltid. ■

VIDERE LÆSNING

NASA (2024). Food Safety Program for Space Has Taken Over on Earth.

Honeyman, D. & Heslop, D. (2025). Deadly Mass Methanol Poisoning in Laos, 2024. *Journal of Global Biosecurity*.

Codex Alimentarius Commission (2022). *General Principles of Food Hygiene*.

DTU Fødevareinstituttet: EU strammer reglerne for listeria i spiseklare fødevarer. www.food.dtu.dk

Statens Serum Institut (2022). Fiskefrikadeller årsag til sygdomsudbrud med listeria.

ICMSF (2023). *Microorganisms in Foods 8: Use of Data for Assessing Process Control and Product Acceptance*. Springer.

EAACI Food Allergy and Anaphylaxis Guidelines: diagnosis and management of food allergy. doi.org/10.1111/all.12429

EFSA (2023). Mineral Oil Hydrocarbons (MOSH/MOAH). doi.org/10.2903/j.efsa.2023.8215

IARC (2002): Aflatoxins (IARC Monographs, Volume 82). International Agency for Research on Cancer.

EFSA CONTAM Panel. Scientific Opinion on Acrylamide in Food.

Hvordan ved immunceller, hvad de skal æde?

Når kroppens immunceller æder skadelige komponenter, spiller to specifikke proteiner (receptorer) en central rolle ved at genkende "spis mig"-signaler, som immunsystemet klistrer på de dødsdømte komponenter. Forskere forsøger at afdække den præcise struktur og funktion af disse receptorer, da det har perspektiver for forståelsen og behandlingen af sygdomme som Alzheimers.

■ Af Selma Thestrup Preisel, Kristian Juul-Madsen, Marlene Uglebjerg Fruergaard og Gregers Rom Andersen,

Vores immunsystem er konstant på arbejde for at fjerne celler i vores krop, der kan fremkalde sygdom. Det kan både være celler, der trænger ind i kroppen udefra eller celler i vores egen krop, der ikke længere fungerer, som de skal.

For at kunne udføre denne livsvigtige opgave er det afgørende, at immunsystemet kan genkende de potentielt sygdomsfremkaldende celler. Og det gør de ved hjælp af specifikke proteiner på overfladen af vores immunceller kaldet receptorer. Disse receptorer genkender specifikke mønstre på overfladen af de "mistænkelige" celler – det kan for eksempel være et bestemt protein på en bakterie.

På Aarhus Universitet arbejder vi i vores forskningsgrupper med to vigtige receptorer, der indgår i dette genkendelsessystem. De to receptorer kaldes mere specifikt for komplementreceptor 3 og 4, og de sidder på overfladen af en lang række immunceller fra det medfødte immunsystem.

I Gregers Rom Andersens forskningsgruppe forsøger vi at forstå komplementreceptorernes form, dynamik og funktion, så denne viden kan udnyttes i fremtidig behandling af sygdomme. I Kristian Juul-Madsens forskningsgruppe arbejder vi med at forstå, hvordan disse komplementreceptorer virker i forbindelse med de neurodegenerative sygdomme Alzheimers og Parkinsons.

Når immunsystemet æder skadelige celler

Komplementreceptorerne hedder sådan, fordi de hører til det såkaldte komplementsystem, der er en vigtig del af det medfødte immunsystem. Overordnet består komplementsystemet af en lang række proteiner, der findes i vores blod som frie molekyler og på vores immunceller som recepto-

OM FORFATTERNE



Selma Thestrup Preisel
Ph.d.-studerende ved Institut for Molekylærbiologi og Genetik, Aarhus Universitet. Forsker i komplementreceptorer med fokus på struktur og dynamik.
stp@mbg.au.dk



Kristian Juul-Madsen
Adjunkt ved Institut for Biomedicin, Aarhus Universitet, Aarhus Universitet. Forsker i proteinaggregater ved Alzheimers sygdom.
juul-madsen@biomed.au.dk



Marlene Uglebjerg Fruergaard
AC-TAP ved Institut for Molekylærbiologi og Genetik, Aarhus Universitet. Forsker i komplementreceptorer med fokus på struktur og dynamik.
marlenef@mbg.au.dk



Gregers Rom Andersen
Professor ved Institut for Molekylærbiologi og Genetik, Aarhus Universitet. Forsker i komplementreceptorer og konvertaser i komplementsystemet med fokus på struktur og dynamik.
gra@mbg.au.dk

■ Selma i gang med at oprense DNA, der koder for et protein, som hun vil undersøge med enkelt-molekyle FRET.
Foto: Krzysztof Jakub Pietrzak-Lichwa.



rer. Sammen med antistoffer og "ædeceller", fagocytter, hjælper komplementsystemet med at fjerne sygdomsfremkaldende celler. Komplementsystemet kan, i modsætning til det adaptive immunsystem, ikke tilpasse sig, men til gengæld kan det reagere hurtigt.

Komplementreceptor 3 og 4's rolle i dette system er at genkende et bestemt protein, som immunsystemet sætter på både vores egne døende celler og på indtrængende sygdomsfremkaldende organismer. Dette protein kaldes iC3b, og det fungerer som et "spis mig"-signal. Hver skadelig celle mærkes med mange iC3b-proteiner.

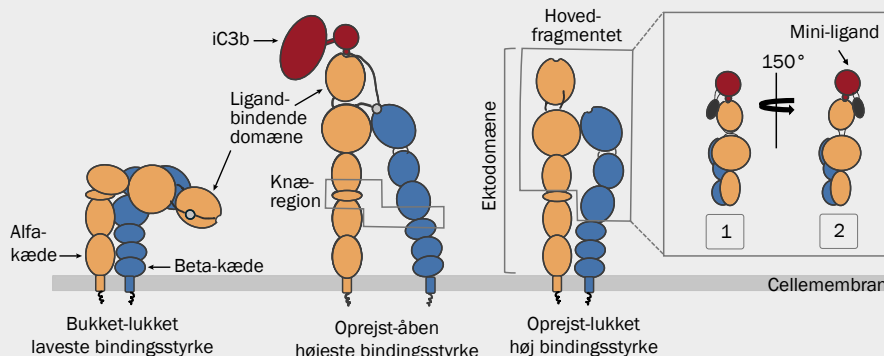
Når de to komplementreceptorer binder til iC3b, starter det en proces kaldet fagocytose. Her tilintetgør immuncellen den mærkede celle ved at omslutte den med sin cellemembran, for derefter at optage og til sidst nedbryde den.

Ved en infektion kan denne proces fjerne frie bakterier eller inficerede celler. Og når kroppen er i ligevægt (kaldet homøostase) opmærker og fjerner processen løbende vores egne døende celler, så disse ikke ophobes i kroppen. Den specifikke mærkning af skadelige og døende celler med iC3b sikrer altså, at immuncellerne ikke spiser kroppens raske celler.

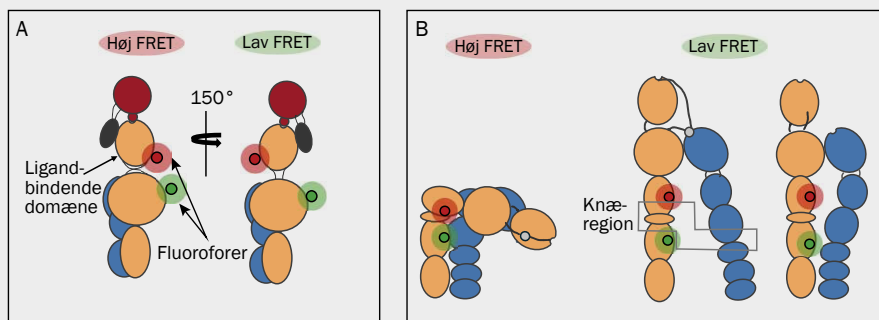
Både komplementreceptor 3 og 4 kan også genkende andre mønstre end iC3b på overfladen af celler eller frie proteiner i kroppen. Det kan få immunceller til at binde sig til blodkarrene og øge dannelsen af nye blodkar, kaldet angionese, ind i omgivende væv.

Komplementreceptor 3 under mikroskopet

Når vi kigger nærmere på de to komplementreceptorer (3 og 4), så er de selv proteinmolekyler opbygget af to aminosyrekæder; kaldet alfa- og betakæden. Betakæden er ens i de to komplementreceptorer, mens deres



Forsøgsdesign til at undersøge, hvor hurtigt komplementreceptor 3 skifter mellem konformationer



KOMPLEMENTRECEPTOR 3'S KONFORMATIONER

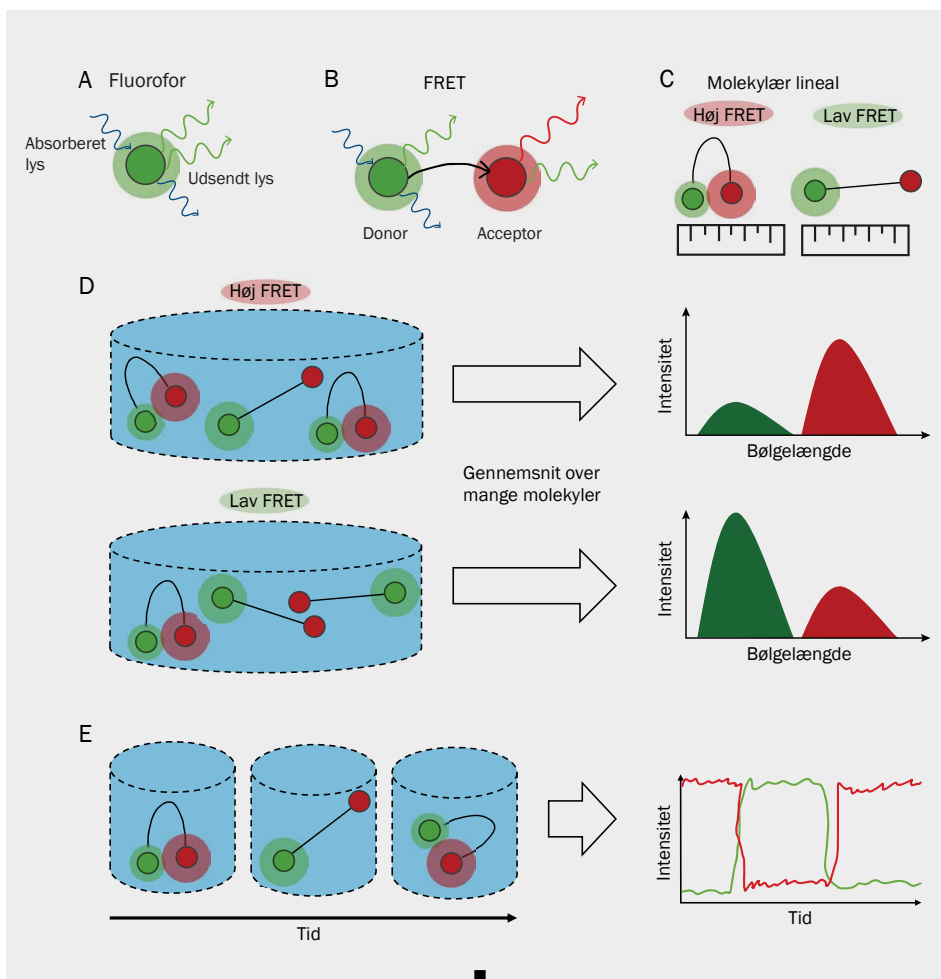
Komplementreceptor 3 består af flere såkaldte domæner skitseret med cirkler på figuren, som er rumligt afgrænsede dele af proteinet. Komplementreceptoren har tre konformationer – bukket-lukket, oprejst-åben og oprejst-lukket – der styrer bindingsstyrken til liganden. Kassen øverst til højre illustrerer, hvordan det ligand-bindende domæne kan dreje mellem to orienteringer, mens liganden stadig sidder på. Af tekniske grunde har vi opdaget dette ved at bruge en mini-ligand til strukturbestemmelsen. Når vi laver biofysiske målinger på receptoren, måler vi typisk kun på ektodomænet eller på den yderste del af det over "knæregionen".

På den nederste figur ses, hvordan vi ud fra vores atomare modeller af komplementreceptor 3 kan undersøge den tidlige dynamik i receptoren ved hjælp af enkelt-molekyle FRET (se boks). Her kobler vi to fluoroforer på receptoren på veldefinerede positioner. Den grønne fluorofor (donor)

kan, når den er tæt på den røde fluorofor (acceptor), overføre energi, som denne kan optage og udsende med en endnu længere bølgelængde end donoren. Jo tættere, de to fluoroforer er på hinanden, jo mere energi overføres og jo højere FRET, måler vi. Vi designer nu forsøgene sådan, at de to fluoroforer er tæt på hinanden, når receptoren er i én konformation, og langt fra hinanden, når de er i en anden. På den måde kan vi følge, hvor hurtigt receptoren skifter mellem konformationerne.

Figuren viser to mulige forsøgsdesign.

I A er de to fluoroforer placeret på komplementreceptor 3's hovedfragment for at følge rotationen af det ligand-bindende domæne. Vi forventer, at denne bevægelse er hurtig. I B er de placeret, sådan at vi kan følge bøjningen i receptorens knæregion. Da denne bevægelse kræver bevægelse af flere domæner, forventer vi, at den er langsommere end rotationen af et enkelt domæne.



ENKELT-MOLEKYLE-FRET

Man kan følge en defineret bevægelse i et biomolekyle ved at lave en slags molekylær lineal. Her udnytter man en type af molekyler kaldet fluoroforer.

En fluorofor er et molekyle, der absorberer lys ved en bølglængde og udsender en del af lyset ved en længere bølglængde med lavere energi (A). For at lave den molekylære lineal udnytter man et fænomen kaldet Förster-resonans-energioverførsel (FRET). Her bruges to fluoroforer samtidigt, en donor og en acceptor. Hvis de to er tæt på hinanden, kan donoren overføre energi til acceptoren, som denne så kan udsende som lys som vist i B og C. Jo tættere de to fluoroforer er på hinanden, des

mere energi overføres til acceptoren. Vi kan også måle, hvor meget lys, acceptoren og donoren udsender hver især. For at måle afstande i et protein kobler man de to fluoroforer på veldefinerede positioner i proteinet. Antag nu, at i en konformation af proteinet er de to fluoroforer tæt på hinanden (høj FRET) og i en anden langt fra hinanden (lav FRET). Hvis man måler på en sådan prøve samlet (D), kan vi få information om, hvor mange molekyler der er i hver konformation (fordeling). Men i en prøve er der mange molekyler, der giver signal samtidigt. For at følge, hvor lang tid et enkelt proteinmolekyle er i hver konformation, skal man derfor måle FRET på enkelt-molekyle niveau (E).

alfakæder er forskellige. Tilsammen danner de to kæder receptormolekylet, som har form som et par ben, hvor "fødderne" er forankret i cellemembranen på immuncellen. Den del af receptoren, der sidder udenfor cellemembranen, kaldet ektodomænet, kan ligesom et par ben bøjes, fordi en region af molekylet fungerer som et par knæ, eller hængsler.

For begge receptorer gælder, at selve bindingen til deres partnermolekyle – kaldet liganden, som i forbindelse med fagocytose er iC3b – sker med en helt central region af receptoren kaldet det ligand-bindende domæne.

I vores forskning har Josefine Lorentzen og Marlene Uglebjerg Fruergaard studeret denne region af komplementreceptor 3 ved hjælp af en teknik kaldet kryogen elektronmikroskopi for at blive klogere på bindingen mellem receptoren og dets partnerprotein iC3b.

Med denne teknik kan vi opnå stillbilleder af den tredimensionelle struktur af receptoren, og vi kan beskrive positionerne af atomerne i hvert stillbillede. På den måde opnår vi en meget detaljeret materiel forståelse af, hvilke forskellige strukturer, kaldet konformationer, proteinet kan antage.

Vi fandt til vores overraskelse, at det ligand-bindende domæne kunne optræde i to forskellige orienteringer i forhold til resten af receptormolekylet, hvilket ikke er set før indenfor denne receptorfamilie. Domænet kan således rotere 150° relativt til resten af proteinet.

Når immunceller spiser, fagocyterer, andre celler, krænges immuncellens cellemembran rundt om målcellen, indtil denne er helt omsluttet. Derfor må orienteringen mellem immuncellens komplementreceptor 3 og liganden iC3b på den celle, der bliver spist,

alt andet lige være variabel. En mulig forklaring på, at det ligand-bindende domæne kan rotere, kan derfor være, at receptoren på den måde effektivt kan holde fast i iC3b under fagocytose.

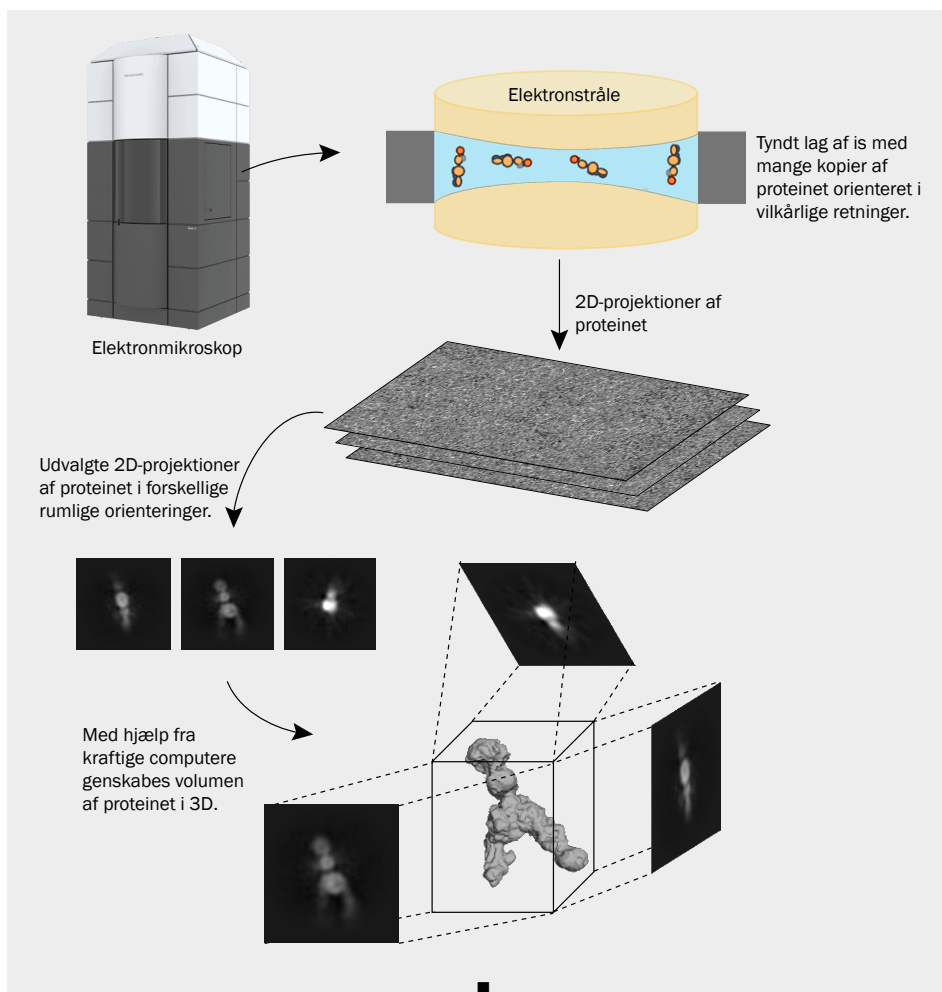
På vej mod en dybere forståelse

Udover de nye konformationer for komplementreceptor 3, som vi opdagede, ved man, at receptoren kan indtage tre overordnede konformationer, som bestemmer styrken af bindingen mellem receptoren og liganden (dvs. iC3b). Den laveste bindingsstyrke er i en konformation, hvor receptoren er bøjet i "knæene", hvilket placerer det ligand-bindende domæne tæt på cellemembranen. I de to andre konformationer med højere bindingsstyrke er receptoren strakt ud, så det ligand-bindende domæne løftes væk fra cellemembranen. I den ene konformation er receptorens to "ben" samlet, mens de er adskilt i konformationen med den højeste bindingsstyrke.

Hvis vi gerne vil endnu dybere i forståelsen af, hvad der sker, når komplementreceptor 3 binder sig til iC3b-liganden, har vi brug for at undersøge den tidslige dimension – altså hvordan og hvor hurtigt strukturelle ændringer i receptoren sker.

Det arbejder vi nu på at belyse ved hjælp af en anden teknik kaldet enkelt-molekyle FRET. Her kan vi udnytte vores detaljerede viden om de konformationer, som receptoren kan indtage. Ud fra vores atomare modeller kan vi finde to positioner, der er tæt på hinanden i den ene konformation og langt fra hinanden i den anden konformation. På disse positioner kan vi placere særlige fluorescerende molekyler, der gør det muligt at måle deres indbyrdes afstand som funktion af tiden.

Når vi gerne vil forstå, hvordan komplementreceptor 3 opfører sig, er det blandt andet fordi, det kan hjælpe os med at forklare, hvorfor visse mutationer kan lede til sygdom. For eksempel ved vi, at en bestemt mutation i komplementreceptor 3 giver høj risiko



KRYOGEN ELEKTRONMIKROSKOPI

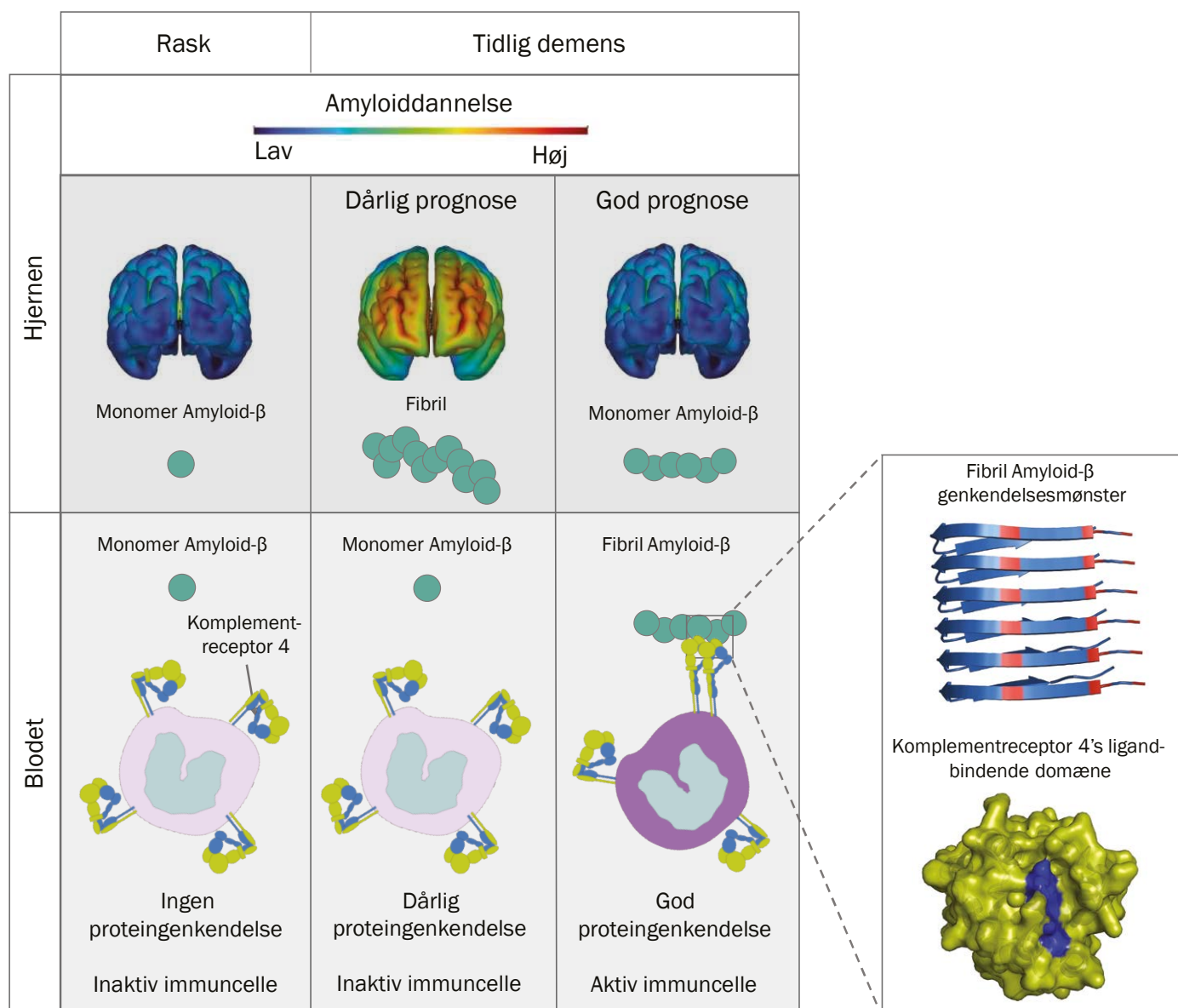
Et proteins funktion er bestemt af dets tredimensionelle form (struktur), og hvordan det bevæger sig (dynamik). Vi kan se immunceller under et normalt lysmikroskop, men vi kan ikke direkte se komplementreceptorerne.

Når vi vil studere strukturen af biomolekyler såsom proteiner, er kryogen elektronmikroskopi en udbredt metode. Her fryser vi først en prøve med det protein, vi ønsker at studere, meget hurtigt ned, så isen bliver klar som glas. Prøven indeholder mange kopier af proteinet, og når prøven er frosset i et meget tyndt lag is, vil proteinet derfor optræde i mange forskellige orienteringer i prøven.

Herefter bruger vi et elektronmikroskop til at skyde en elektronstråle igennem den tynde is. Elektronerne fra strålen

vekselvirker med proteinernes elektroner, og på en detektor placeret på den anden side af prøven vil dette kunne ses som 2D-projektioner af proteinet. Hver orientering af proteinet vil udmønte sig i en 2D-projektion, der er forskellig fra andre orienteringer. Og når man har rigtig mange af disse 2D-projektioner, kan man rekonstruere et tredimensionelt volumen af proteinet i prøven.

Til sidst tilpasser vi en atomar model af proteinet ind i dette volumen. Denne atomare model repræsenterer den tredimensionelle struktur af proteinet og beskrives med en såkaldt koordinatfil. I denne er hvert enkelt atom beskrevet med en position i et standard-koordinatsystem samt en temperaturfaktor, der angiver hvor meget atomet bevæger sig.



En rask person har hverken amyloid-dannelse i hjerne eller blod, og immunsystemet er derfor ikke aktiveret. For en person med tidlige tegn på demens kan tilstanden beskrives med to kategorier. Enten har personen en dårlig prognose og høj amyloiddannelse i hjernen, samtidig med at immuncellerne ikke er aktiveret i blodet, fordi de store amyloider kun findes i hjernen. Alternativt kan personen have en god prognose, fordi begyndende amyloider "vaskes" ud i

blodet, hvor de kan genkendes af immuncellerne gennem komplementreceptor 4, og de har derfor ikke amyloidophobning i hjernen. Genkendelsen i blodet gennem komplementreceptor 4 sker, fordi de negativt ladede sidekæder i amyloid- β danner et mønster, men kun når amyloiddannelsen er startet. De monomere amyloid- β proteiner kan derfor ikke aktivere immunsystemet, hvilket er grunden til, at den raske person ikke har et aktiveret immunsystem.

for at få den autoimmune sygdom Systemisk Lupus Erythematosus (SLE), der er en kronisk betændelsessygdom. På længere sigt kan den detaljerede forståelse af receptorens dynamiske egenskaber måske medvirke til at udvikle lægemidler til behandling af denne sygdom.

Når affaldsstoffer giver sygdom

Der er formentligt mange andre sygdomme, som vi kunne blive klogere på og bedre til at behandle ved at forstå, hvordan de to komplementreceptorer fungerer. Et oplagt sted at kigge hen er sygdomme, hvor ophobning af "affaldsstoffer" spiller en central rolle i sygdommens udvikling.

Blandt disse er demenssygdomme som Alzheimers og Parkinsons, der rammer mere end 10.000 nye patienter hvert år i Danmark alene.

En central hypotese for udviklingen af begge disse sygdomme er den såkaldte "amyloid-kaskade hypotese". Den beskriver, hvordan proteinerne amyloid-beta for Alzheimers og alfa-synuclein for Parkinsons kan samle sig (aggregere) primært i hjernen men også i blodet til først små proteinklynger og senere til lange fibriller og plak kaldet amyloider.

Denne aggregering giver den termodynamisk mest stabile struktur for proteinerne, og derfor er der tre faktorer, der spiller en rolle for udviklingen af aggregaterne – tid, temperatur og koncentration.

Tidsfaktoren er en af årsagerne til, at sygdommen udvikler sig i et meget langstrakt forløb.

Temperaturen er i praksis konstant i den menneskelige krop og spiller derfor en mindre rolle i denne sammenhæng.

Koncentration er til gengæld reguleret af en lang række faktorer, blandt andet i hvor høj grad proteinerne produceres, og dernæst med hvilken hastighed de fjernes igen, når de har udtjent deres normale rolle. Og her

kommer funktionen af komplementreceptorer ind i billedet.

Komplementreceptorer som mål for sygdomsbehandling

Det er velkendt, at komplementreceptor 3 spiller en generel rolle i at genkende og fjerne både små og store aggregater af amyloid-beta og alfa-synuclein. Men for nylig har man også opdaget, at komplementreceptor 4 er en central spiller i fjernelsen af særligt de større aggregater, der er associeret med sygdom.

Komplementreceptor 4 kan genkende de molekylære mønstre, som opstår, når amyloider dannes, og denne genkendelse kan udløse flere effekter, som kan bremse demenssygdommes udvikling. Først og fremmest kan genkendelsen lede til, at der optages mere amyloid i immunceller, som derefter nedbryder proteinerne, inden de aggregerer yderligere.

Dernæst kan genkendelsen lede til, at flere immunceller binder sig til celler og væv, hvor amyloid-aggregaterne sidder. I særligt Alzheimers er dette relevant, da mange patienter danner amyloid i deres blodkar i hjernen. Når komplementreceptor 4 genkender disse amyloider i hjernens blodkar, kan det lede til, at flere immunceller strømmer fra blodet og ind i hjernen og hjælper med at bremse sygdommens udvikling der.

I Kristian Juul-Madsens forskningsgruppe, opdagede vi, at amyloid kan detekteres i blodet fra patienter med tidlige tegn på sygdommen. Immunsystemet kan reagere på de små mængder amyloid i blodet ved at skrue op for produktionen og aktiviteten af komplementreceptor 4 i immunceller. Det har samtidig vist sig, at patienter med mange immunceller med høj aktivitet af komplementreceptor 4, danner mindre amyloid i hjernen og dermed har en bedre prognose end patienter, der har få af disse immunceller. Det modsatte gør sig gældende i patienter med en dårlig prognose. De danner meget amyloid i hjernen, men ikke så meget i blodet, og derfor har de en lav aktivitet af komplementreceptor 4.

Tilsammen peger disse fund på, at komplementreceptorer bidrager til den positive prognose, vi ser hos patienter med lav amyloiddannelse i hjernen.

Vores forskning er derfor nu fokuseret på at afprøve denne ide og undersøge potentialet for at udvikle en egentlig behandling mod de tidligere udviklingsstadier af Alzheimers. ■

Forskningen omtalt i artiklen er støttet af Novo Nordisk Fonden, Danmarks Frie Forskningsfond, Leo Fonden, Lundbeck Fonden og Weimann Fonden.

VIDERE LÆSNING

Vorup-Jensen T., Jensen RK. Structural Immunology of Complement Receptors 3 and 4. *Front Immunol.* 2018 Nov 26;9:2716. DOI: doi.org/10.3389/fimmu.2018.02716

Josefine Lorentzen et al. Three cryo-EM structures of complement C3d-bound α M β 2 reveal an unexpected layer of dynamics for α I-containing integrin receptors. *Sci. Adv.* 12, ea-7241(2026). DOI: doi.org/10.1126/sciadv.a7241

Juul-Madsen, K., Parbo, P., Ismail, R. et al. Amyloid- β aggregates activate peripheral monocytes in mild cognitive impairment. *Nat Commun* 15, 1224 (2024). DOI: doi.org/10.1038/s41467-024-45627-y



Fotoet viser såkaldte små strongylider (cyathostomer), som er en parasit alle heste har. Fotos: Martin Krarup Nielsen

100 PARASITARTER I EN ENKELT HEST ER HELT NORMALT

Heste er populære husdyr. Og er man hesteejer, vil man formentlig forbinde indvoldsorm hos hesten med noget, der skal bekæmpes. Men ifølge professor Martin Krarup Nielsen fra Institut for Husdyr- og Veterinærvidenskab ved Aarhus Universitet, skal vi måske til at tænke anderledes om den sag. For forskningen viser, at parasitter ikke er undtagelsen, men normen hos heste.

Faktisk er noget af det, der gør heste helt særlige blandt husdyr, deres usædvanligt rige "indre biodiversitet". Hvor hunde, katte og grise typisk kan bære 10-20 forskellige ormearter, og kvæg kan have mellem 20 og 35 arter, kan en enkelt hest være vært for mere end 100 forskellige arter af indvoldsparasitter. Det overraskende er, at forskerne stadig ikke ved, hvorfor heste huser så mange flere parasitarter end andre husdyr.

Traditionelt har mange heste fået ormekur flere gange om året som en fast rutine. Men denne strategi har haft en bagside. Flere af de vigtig-

ste hesteparasitter har udviklet resistens, så eksisterende ormemedler virker dårligere eller i visse tilfælde slet ikke virker længere. Samtidig er der ikke udviklet nye typer ormemedler i årtier.

»Vi står ved en korsvej, hvor vi er nødt til at tænke nyt,« siger Martin Krarup Nielsen.

Selvom parasitter kan forårsage sygdom, viser forskningen, at det sker relativt sjældent i forhold til, hvor udbredte infektionerne er. De fleste heste lever med deres indvoldsparasitter uden tegn på sygdom. Derfor bør målet ikke være at udrydde alle parasitter, men i stedet at forstå, hvornår de faktisk bliver et problem.

»Vi arbejder lige nu med DNA-analyser, som kan kortlægge både orme og tarmbakterier i hestens fordøjelsessystem. Målet er at forstå, hvordan de mange organismer påvirker hinanden, og om bestemte kombinationer af parasitter, bakterier og andre faktorer kan øge eller mindske risikoen for sygdom.«

For hesteejere kan den nye viden få praktisk betydning. Fremtidens parasitkontrol forventes i højere grad at bygge på overvågning af sygdomsprocesser frem for den nuværende strategi, som er baseret på at påvise parasitter. Samtidig peger forskningen på, at den rette pleje af de arealer, hestene græsser på, samt græsning sammen med andre dyrearter bør få en større rolle i bekæmpelsen af parasitter.

Martin Krarup Nielsen ser derfor ikke kun parasitter som fjender, men som en naturlig del af hestens indre økosystem.

»Hestens tarm rummer sin egen biodiversitet, og den er langt mere kompleks, end vi hidtil har troet.«

Shaila Ann Sigsgaard, Aarhus Universitet
Kilde: Conferenceoplæg, International Society for Equitation Science (ISES) 11.-13. august

Hvad kan Jorden lære os om liv i rummet?

Når forskere leder efter liv i rummet, spiller ekstreme miljøer som Atacamaørkenen på Jorden en særlig rolle. Disse miljøer kan nemlig lære os om, hvad vi kan forvente, når vi leder efter liv uden for Jorden og i særdeleshed, hvad vi skal kigge efter.

■ Af Kai Finster



KAI FINSTER

Kai Finster er professor i astrobiologi og mikrobiologi ved Aarhus Universitet. Hans forskning er drevet af en fascination af livets mangfoldighed, udvikling og evne til at tilpasse sig ekstreme miljøer. Han interesserer sig især for mulighederne for liv på Mars, hvordan vi kan genkende spor efter liv på andre planeter, og hvordan luftbårne mikroorganismer påvirker atmosfæren og skydannelsen på Jorden.

kai.finster@bio.au.dk

I august 2025 var de danske medier fulde af begejstrede overskrifter om, at danske forskere havde været med til at finde tegn på liv på Mars. Baggrunden var undersøgelser af en klippeblok på Mars med et leopardpletet mønster, hvor to jernrige mineraler – vivianit, et jern-fosfat, og greigit, et jern-sulfid – optræder tæt koblet til organiske stoffer.

På Jorden ser man netop sådanne kombinationer i miljøer, hvor mikroorganismer har været aktive, og hvor deres stofskifte har påvirket både kemi og mineraldannelse. Derfor tolker forskerne mønstrene som mulige biosignaturer – altså kemiske og mineralske spor, der kan pege på tidligere mikrobiologisk aktivitet i Mars' fjernere fortid, selv om de organismer, som har efterladt sporene for længst er forsvundet.

At man kan nå frem til så vidtgående hypoteser på baggrund af få, indirekte tegn, skyldes en analogislutning: Man overfører velafprøvet viden fra Jordens geologi og mikrobiologi til at fortolke observationer fra en anden planet. Indtil videre er Jorden det eneste sted, vi kender liv og dets aftryk i de geologiske lag, og derfor er næsten al søgen efter liv uden for Jorden forankret i, hvad vi ved om jordisk liv og jordiske analoger.

Da vi kun har relativt få missioner til andre planeter, bruger forskere særlige steder på Jorden som "prøveklude" for fremmede miljøer. Disse steder kaldes terrestriske analoger, og de er kendetegnet ved, at det lokale miljø på vigtige områder svarer til, hvad vi forventer at finde på andre planeter. Det kan for eksempel være ekstrem tørke, lav temperatur eller usædvanlig kemi.

Ved at studere, hvilke organismer der klarer sig her, og hvilke spor de efterlader, kan vi bedre vurdere, hvor liv kan gemme sig på for eksempel Mars eller dybt under overfladen på andre himmellegemer.

I det følgende ser jeg nærmere på tre meget brugte analoger: Atacamaørkenen, den sure spanske flod Río Tinto og den dybe jordiske undergrund.

Atacamaørkenen – en tør forsmag på Mars

Den centrale Atacamaørken i Chile er så tør, at der kan gå årtier mellem egentlige regnskyl, og jorden indeholder yderst lidt organisk materiale. Samtidig er UV-strålingen kraftig, og mange steder domineres overfladen af salte og mineraler, som vi også kender fra Mars.

Målinger af Atacamas jord har vist en organisk kemi, der på nogle punkter ligner de kulstoffattige overfladelag, de tidlige Marslandere målte. Derfor er området blevet et vigtigt testfelt for instrumenter, der skal lede efter svage spor af liv på andre planeter.

På trods af de barske forhold er Atacama ikke "livløs". Mange mikroorganismer lever skjult inde i lysgennemtrængelige sten såsom gips, hvor de får lys til fotosyntese, men er delvist beskyttet mod UV-stråling. De danner tynde biofilm lige under overfladen, og andre bakterier udnytter små lommer af fugt i de saltrige jordlag.

For at overleve kombinationen af tørke og stråling kan de gå i dvale, reparere DNA effektivt og danne pigmenter og slimagtige stoffer, som både skærmer mod UV-strå-



Atacama-ørkenen i Chile. Foto: Shutterstock.

ATACAMAØRKENEN – LIV VED GRÆNSEN FOR VANDAKTIVITET

Atacama-ørkenen er vigtig i astrobiologien, fordi den viser, at det er vandets tilgængelighed, der bestemmer, om mikrober kan være aktive. I de mest tørre områder findes salte som halit (stensalt), nitrat og perklorat, der kan optage vanddamp fra luften og danne ultratynde væskefilm. Den proces kaldes delikvescens og er interessant, fordi lignende salte også er fundet på Mars. Derfor bruges Atacama som model for, hvordan mikrobielt liv måske kan overleve i små, kortvarige mikromiljøer under overfladen.

De vigtigste processer, man studerer her, er knyttet til bakteriernes overlevelse, dvs. deres vedligeholdelsesmetabolisme (det stofskifte, der skal til for at opretholde cellen) og respiration ved meget lav

vandaktivitet. Hvis organismer har adgang til små organiske molekyler som acetat (salt af eddikesyre) eller formiat (salt af myresyre), kan de koble oxidation af disse til reduktion af nitrat, sulfat eller perklorat (et klorholdig salt). Perklorat ophobes i Atacama, fordi ekstrem tørke og stærk fordampning gør, at atmosfærisk dannet perklorat, som falder ned med støv og nedbør, næsten ikke vaskes ud igen og derfor kan koncentreres i jorden over geologisk tid. Samtidig bidrager langvarige atmosfæriske oxidationsprocesser til at omdanne klorid og klorat til perklorat, som så bevares i de nitrat- og saltrige aflejringer i ørkenen. Det er især relevant for Mars, fordi netop disse hygroskopiske (vandtiltrækkende) salte kan skabe kemiske nicher, hvor vand og elektronacceptorer (åndingsmiddel) findes samtidig.

ling og hjælper med at binde vand. Nogle udnytter endda vandtiltrækkende salte til at opsamle mikroskopiske mængder vand ud af den tørre luft en vandindsamlingsstrategi, som i princippet også kunne fungere på Mars.

Langvarige feltstudier fra Atacama har samtidig vist, at kraftig UV-stråling og oxiderende kemi hurtigt kan nedbryde biologisk materiale. Det betyder, at selv om der har været liv, kan sporene være så svage, at de er næsten umulige at skelne fra baggrundsstøj. For Mars-forskningen er det en vigtig påmindelse om, at fravær af klart målbare organiske signaler på overfladen ikke nødvendigvis betyder fravær af liv i planetens historie.

Río Tinto – når mikrober skaber et surt Marsmiljø

Río Tinto i det sydvestlige Spanien ser ved første øjekast meget "u-jordisk" ud: Rødt, jernrigt vand, meget lav pH og jern- og sulfatminerale, som ligner mineraler observeret på Mars. Netop den kobling har gjort floden til et centralt Mars-analogsted.

Det mest bemærkelsesværdige er, at de ekstreme forhold primært skyldes mikrobiel aktivitet. Jern- og svovloxiderende mikroorganismer angriber sulfidminerale i undergrunden og danner svovlsyre, som holder både surhedsgrad og jernniveauer oppe. Man står altså med et helt landskab, hvor geokemi og biologi er viklet tæt sammen.

I vandet og sedimenterne (aflejringer, der er dannet i vand) dominerer mikrober, der får energi ved at oxidere jern og svovl frem for

at udnytte sollys. Deres aktivitet kan danne de samme typer jern- og sulfatminerale, som Mars-rovere har fundet i gamle aflejringer på Mars. Río Tinto giver derfor en konkret model for, hvordan mikrobiel stofomsætning kan afsætte mineralske fingeraftryk, vi potentielt kan genkende på Mars.

Samtidig viser Río Tinto, at et miljø kan se livsfjendtligt ud, men faktisk være stærkt formet – og opretholdt – af liv. Et surt, metalrigt system vil på Jorden ofte være et resultat af fysisk-kemiske processer knyttet til vulkaner. Men Río Tinto viser, at det også kan være drevet af et samspil mellem mikrobiel aktivitet og passende geologiske forhold. For tolkningen af Mars-data betyder det, at nogle “ekstreme” mineralmønstre kan være indirekte spor af en tidligere og forsvunden biosfære.

Den dybe undergrund huser en skjult biosfære

Mens Atacama og Río Tinto ligger ved eller nær overfladen, findes nogle af de mest opsigtsvækkende analoger til andre verdener flere kilometer nede i Jordens skorpe. Her er der konstant mørke, højt tryk og ingen direkte forbindelse til økosystemer baseret på fotosyntese.

Forskere kan få adgang til disse miljøer via dybe miner og borehuller. I flere kilometer dybe miner har forskere fundet mikrobielle samfund i små vandførende sprækker, som kan have været isoleret fra overfladen i millioner af år. I et ekstremt tilfælde domineres et sådant økosystem af én bakterieart.

Energikilden er ikke sollys, men hydrogen, der dannes ved spaltningen af vand i hydrogen og oxygen ($\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$). Energien til denne spaltning leveres ved radioaktivt henfald af for eksempel det radioaktive stof kalium-40. Radioaktive grundstoffer findes naturligt i bjergarter i undergrunden. Mikroberne kan bruge hydrogen som brændstof til at ånde med sulfat. Dermed kan et helt økosystem opretholdes på basis af vand, sten og radioaktivitet – uden noget bidrag fra overfladens biosfære.

Den dybe biosfære er særlig interessant som analog til Mars' og ismåners indre. Selv hvis overfladen er frossen og hårdt bestrålet, kan flydende vand i dybe sprækker og vandførende lag stadig være beboeligt, hvis der findes geokemiske energikilder såsom radioaktive grundstoffer. Fundene fra Jordens undergrund viser, at dette ikke kun er en teoretisk mulighed, men en faktisk måde, en planet kan bære liv på.

Hvad kan vi bruge analogerne til?

De tre miljøer illustrerer tilsammen, at livets grænser på Jorden ofte bestemmes af flere samtidige stressfaktorer – ikke én ad gangen. I Atacama er det kombinationen af tørke og UV-stråling, i Río Tinto surhedsgrad og metaller, og i den dybe undergrund mørke, højt tryk og meget begrænset adgang til energi.

Analoge systemer giver også konkrete pejlemærker for, hvor vi bør lede efter spor af liv på andre verdener. Atacama peger på beskyttede nicher i eller under sten som gode kandidater for bevaring af spor efter liv (biosignaturer). Río Tinto viser, at selv små mikrobielle samfund kan efterlade tydelige geokemiske og mineralogiske spor. Den dybe undergrund minder os om, at væsentlige biosfærer kan være skjult dybt nede og derfor kræver mere avancerede missioner for at blive undersøgt.

Samtidig har analogforskning sine begrænsninger. Ingen jordisk loka-



Floden Río Tinto i det sydvestlige Spanien. Foto: Shutterstock.

RÍO TINTO – JERN, SVOVL OG ET SURT MILJØ

Río Tinto spiller en vigtig rolle i astrobiologisk forskning, fordi systemet drives af mikroorganismer, der udnytter energi fra jern- og svovlminerale i stedet for sollys. Miljøet er surt, metalrigt og stærkt oxiderende, og det minder derfor om nogle af de jern- og sulfatdominerede miljøer, som kendes fra Mars. Samtidig viser Río Tinto, hvordan biologiske processer kan være med til at danne mineraler som jarosit, goethit og hæmatit, som også spiller en central rolle i tolkningen af Mars' geologiske historie.

Samspillet mellem mikrobiel omsætning af jern- og svovlforbindelser holder systemet kemisk aktivt og er med til at producere både syre, opløst jern og nye mineraler. Det er netop denne kobling mellem stofomsætning og mineraldannelse, der gør Río Tinto til en så stærk Mars-analog.



■ Foto: Via Wikimedia Commons/ CC BY-SA 3.0.

STUDIER AF DEN DYBE BIOSFÆRE

Den dybe biosfære er et af de vigtigste eksempler for muligt liv uden for Jorden, fordi den viser, at mikroorganismer kan leve langt nede i undergrunden uden adgang til sollys. Her er energikilden kemiske reaktioner mellem vand, klipper og opløste stoffer og ikke fotosyntese. Ved disse processer dannes hydrogen og oxygen. Det gør miljøet særligt relevant for Mars' undergrund og for isdækkede oceanverdener som Europa og Enceladus.

I den dybe biosfære studerer man især hydrogendrevne processer, fordi hydrogen kan dannes kemisk, for eksempel når vand reagerer med jernholdige mineraler. Det giver et muligt grundlag for et helt økosystem, selv hvor organisk stof er sparsomt. De mest centrale processer er methanogenese (hvor kuldioxid bruges som åndingsmiddel og omdannes til metan), sulfatreduktion (sulfatånding), acetogenese (kuldioxid bruges som åndingsmiddel og omdannes til eddikesyre) og i nogle miljøer bruges metan som energikilde og oxideres under fravær af oxygen (proces-

sen anaerob methanoxidation).

Den dybe biosfære kræver dybe borer – for eksempel med det japanske bore-skib Chikyu vist på billedet. I 2024 satte Chikyu med 7906 meter den foreløbige rekord for en boring i oceanbund (på land er rekorden mere end 12 kilometer).

Da prøvetagning ved brug af et bor indebærer en risiko for at forurene materialet med havvand eller materiale fra lag højere oppe i borehullet, er det nødvendigt at sikre, at det materiale, man i sidste ende undersøger, ikke er forurenet. Derfor tilsætter man små fluorescerende perler til boreslammet, som viser, hvor langt forureningen er trængt ind i den del af borekernen, man undersøger for tilstedeværelse af bakterier. Når forskerne har taget borekernen op til overfladen, skraber de forsigtigt materiale af kernens overflade, indtil de ikke længere kan se fluorescerende perler i det afskrabede materiale med et mikroskop. Først derefter kan de være sikre på, at bakterier, de finder i borekernen, ikke stammer fra boreslammet.

litet er en perfekt kopi af Mars, Venus eller en ismåne, og alt kendt liv på Jorden stammer fra én fælles oprindelse. Det betyder, at vi ikke kan udelukke helt andre former for liv, som ikke har direkte paralleller på Jorden. Analogi er et nødvendigt udgangspunkt, men de må suppleres med laboratorieforsøg, modeller og passende grad af forsigtighed, når vi tolker data fra andre planeter.

Fremtiden: fra ørken til ismåner

I de kommende år bliver terrestriske analoger endnu vigtigere. Mars-missioner vil fortsat lede efter organiske molekyler og mulige biosignaturer, og kommende missioner til ismåner skal teste, om havene under isen er beboelige. Erfaringerne fra tørre ørkener, sure jernfloder og dybe undergrundsøkosystemer vil spille direkte ind i både instrumentdesign og valg af undersøgelsessteder.

Samtidig udvides kataloget af analogsteder globalt. Nye studier peger på højtliggende gletsjere, alkaliske søer og meget saltholdige søer som miljøer, der kan lære os mere om livets tilpasninger og de spor, det efterlader. Jo flere og mere forskellige analoger vi undersøger, jo bedre bliver vores forståelse af, hvordan liv kan overleve – og hvordan vi kan genkende det – på andre planeter. ■

VIDERE LÆSNING

På Aktuel Naturvidenskabs hjemmeside kan du finde en udvidet version af faktaboksene til denne artikel, hvor der er eksempler på de kemiske processer, der udspiller sig i de forskellige miljøer.

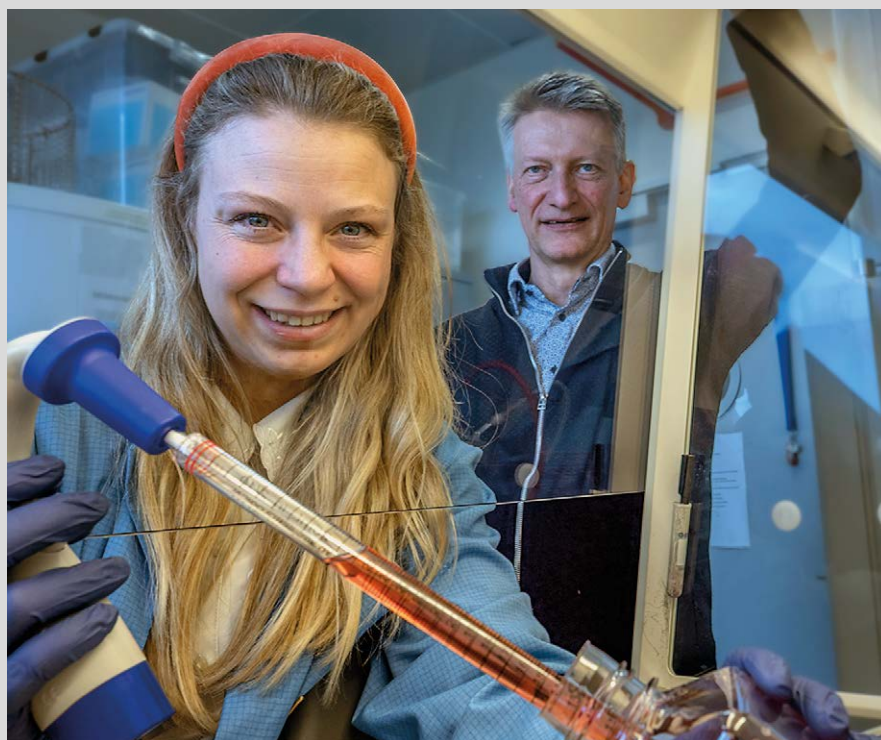
Evt. med QR-kode

■ ■ ■ ■ ■

Nål af DNA kan bane vej for bedre medicin

Forskere fra Aarhus Universitet har udviklet en mikroskopisk DNA-nål, der kan levere molekyler direkte ind i celler – og ikke mindst sikre, at de stadig virker, når de kommer frem. Det kan bane vejen for bedre medicin i fremtiden.

■ Af Peter F. Gammelby, journalist, Aarhus Universitet



Studiets redningskvinde, Mette Galsgaard Malle og Kurt Vesterager Gothelf i laboratoriet på Aarhus Universitet. Foto: Peter F. Gammelby.

OM FORSKERNE

Kurt Vesterager Gothelf er professor ved Institut for Kemi, Aarhus Universitet. Han forsker i DNA og proteiner til brug for biokemi, DNA-origami (nano-strukturer bygget af DNA-strenger) og multi-funktionelle lægemidler.

kvg@chem.au.dk

Mette Galsgaard Malle er adjunkt ved Institut for Molekylærbiologi og Genetik – RNA-biologi og -innovation, Aarhus Universitet. Hun forsker i biofysik, membraner og nanoteknologi med fokus på at observere biologiske processer i realtid.

malle@inano.au.dk

Virus er mestre i at bryde ind i celler. De lander på celleoverfladen, indsætter en nåleformet struktur i cellemembranen og afleverer en kopi af deres arvemateriale i cellens indre.

Det trick har forskere fra Aarhus Universitet nu forsøgt at kopiere. De har skabt en kunstig version af bakteriofager, som er en type virus, der kun angriber bakterier. Den kunstige adskiller sig fra ægte bakteriofager på flere interessante punkter – for eksempel:

- Den har intet arvemateriale, den kan injicere i en celle. I stedet kan den medbringe en last af skræddersyede molekyler, som den sender direkte ind i cellen.
- I stedet for kun at angribe bakterier, kan den programmeres til at gå efter specifikke celletype og aflevere sin last i dem.

Et muligt gennembrud

Men på et afgørende punkt opfører den sig som en ægte virus:

De molekyler, som nålen afleverer i cellen, kan bevæge sig rundt i cellens indre og løse deres opgave. De bliver ikke neutraliseret af cellens forsvarssystem, som fungerer ved at indkapsle indtrængende molekyler i endosomer, som er en form for bobler i den geleagtige væske mellem cellemembranen og cellekernen.

Netop det, at molekylerne ikke bliver fanget i endosomer, kan blive det virkelige gennembrud med den nye DNA-nål.

Det er nemlig et velkendt problem, at langt de fleste lægemidler, der optages af celler, aldrig når frem til deres mål inde i cellerne, fordi de bliver fanget og nedbrudt.

Med de moderne behandlinger af sjældne genetiske sygdomme, hvor man får celler til at optage små kunstigt fremstillede stykker af DNA eller RNA kaldet oligonukleotider, undslipper kun cirka 1 procent af nukleotiderne.

Foreløbig er det lykkedes forskerne at få de kunstige bakteriofager til at aflevere en last af farvestof inde i brystkræft-celler i et såkaldt proof-of concept-studie. Der er altså tale om et laboratoriestudium, som beviser, at metoden fungerer.

»Det næste store skridt vil være at få store molekyler ind i cellen med denne metode. For det vil være en milepæl for, om metoden kan bruges medicinsk,« fortæller kemiprofessor Kurt Vesterager Gothelf fra Aarhus Universitet. Han er hovedforfatter på studiet, som er offentliggjort i det videnskabelige tidsskrift *Advanced Science*.

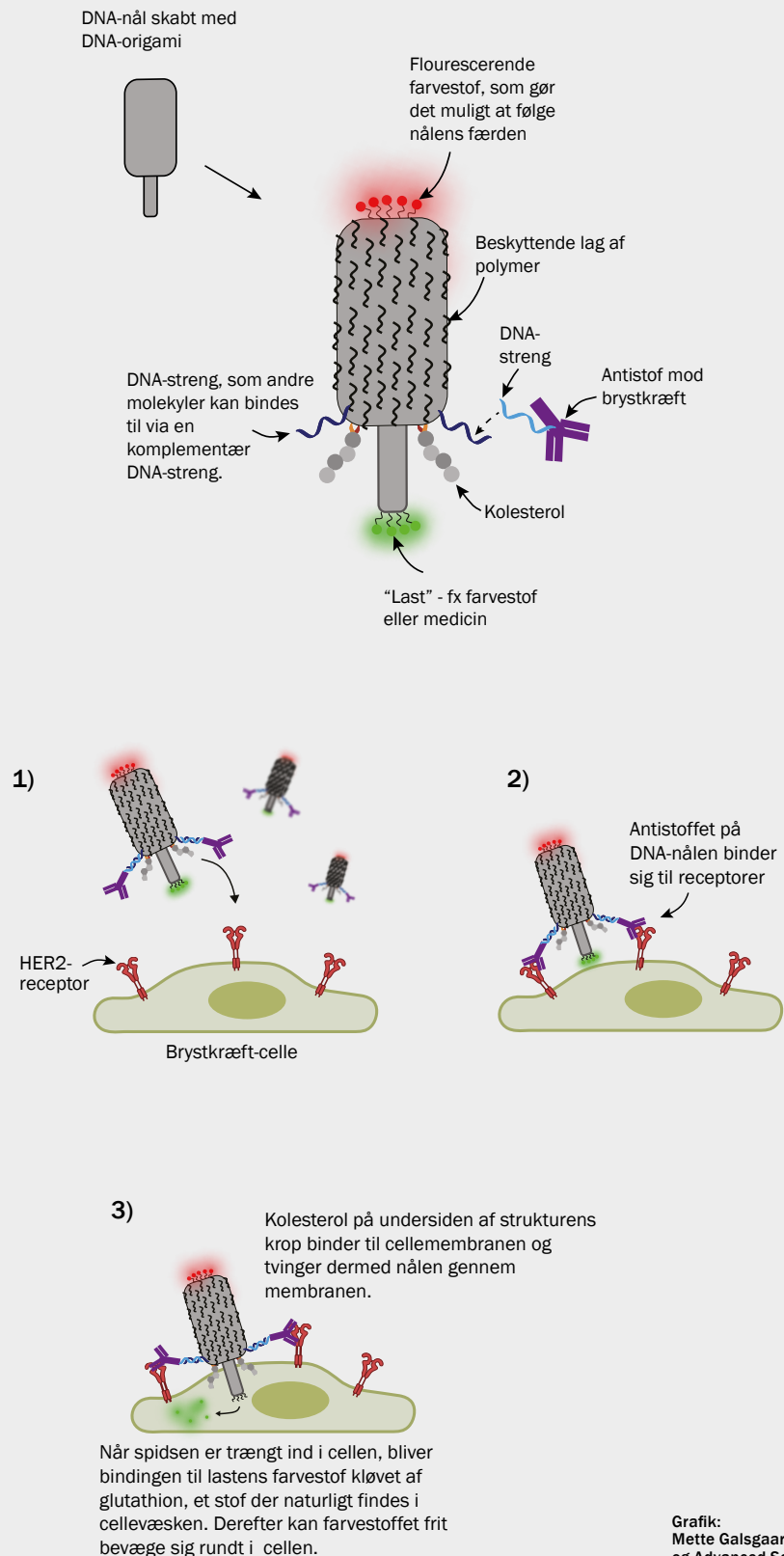
Ikke kun til kræftceller

Når forskerne har brugt brystkræftceller i studiet, er det af praktiske grunde. De har forsynet nålen med antistoffer, som er målrettet til at genkende receptorer på overfladen af såkaldte HER2-brystkræftceller (som udgør cirka 15 procent af alle brystkræfttyper). Navnet kommer af, at disse celler producerer særligt store mængder af proteinet HER2, der fungerer som receptorer på overfladen. Så ikke nok med, at nålen kan genkende disse kræftceller – der er også rigtig mange receptorer, den kan binde sig til.

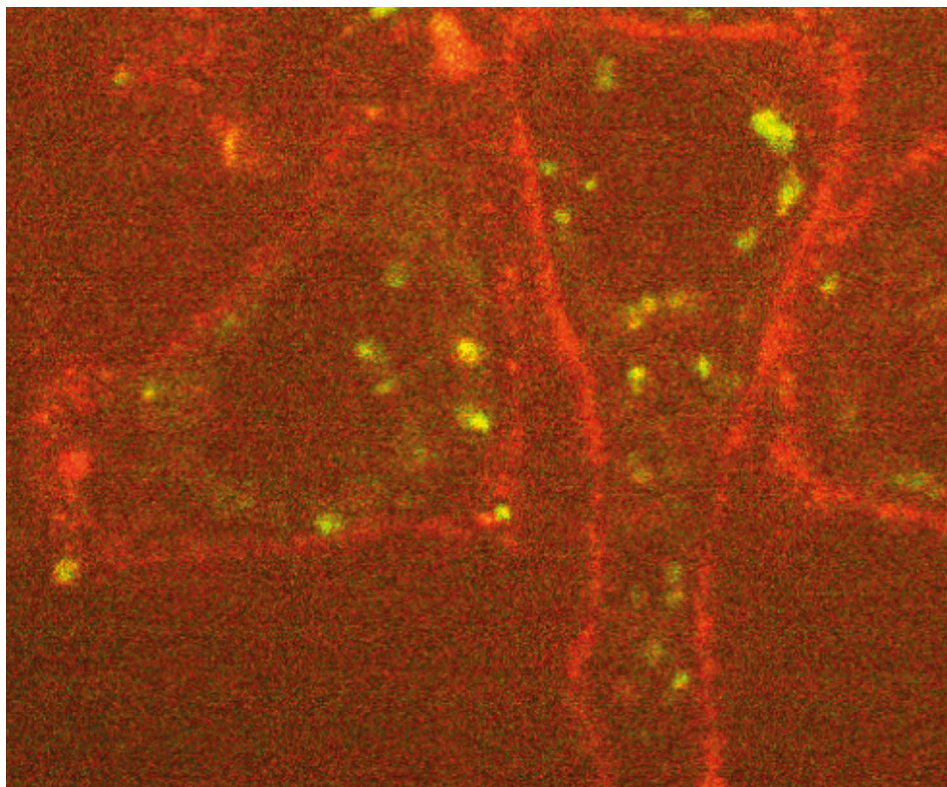
Metoden vil teoretisk kunne anvendes til behandling af mange forskellige sygdomme, hvor man skal have oligonukleotider eller proteiner ind i celler.

Kurt Gothelf forudser, at metoden i første

SÅDAN VIRKER DNA-NÅLEN



Grafik:
Mette Galsgaard Malle
og Advanced Science



DNA-nålen er markeret med en rød farve på toppen af nålen og en grøn kløv-bar farve på spidsen af nålen. Når DNA-nålen sætter sig ind i cellerne, vil nålen samt den røde farve forblive i membranen, mens den grønne kløv-bar farve bliver frigivet inde i cellen. På billedet kan der ses cellemembraner fra to en halv celle samt frigivet grønne farver inde i cellernes cytoplasma. Foto: Mette Galsgaard Malle og Advanced Science.

omgang vil kunne bruges til at behandle patienter med sjældne genetiske sygdomme, som de normalt dør tidligt af.

»Men på længere sigt, hvis man kan finde ud af at producere det billigere, vil det kunne breddes ud til mange andre behandlinger, herunder også kræft,« siger adjunkt Mette Galsgaard Malle, en anden af hovedkræfterne i studiet.

Men der går formentlig lang tid, til den nye DNA-nål bliver klar til menneskeceller. Ud over det med store molekyler mangler forskerne blandt andet at undersøge, hvor effektivt nålen får molekyler ind i cellen, samt risikoen for, at en sådan kunstig bakteriofag kan udløse immunreaktioner i mennesker – eller måske endda være giftig.

Der skal formentlig sættes endnu et beskyttende dæklag på, hvis eller når det skal bruges på mennesker. Det bliver dog næppe et problem. Den kunstige bakteriofag er opbygget af moduler, som skal kunne skiftes ud alt efter hvilken type celle eller nyttelast, den skal bruges til.

Byggeklodser til forskellige behandlinger

Det er lidt lige som med byggeklodser – bortset fra, at den samler sig selv. Forskerne programmerer små stykker DNA-strenger til at folde sig til det ønskede skelet og koble de andre mo

lektyler på, som skal bruges til den aktuelle opgave. Det kaldes DNA-origami.

Skelettet bærer antistoffer, der genkender

proteiner på celleoverfladen og leder nålen til den rigtige celle. Kolesterol ved basen binder strukturen fast til cellemembranen og tvinger nålen igennem. På spidsen sidder lasten – foreløbig et farvestof, men på sigt medicin – som kløves fri, når nålen er inde i cellen, så stoffet kan nå cellekernen. Hele molekylet er beskyttet af et lag polymer. Og så er nålen mærket med fluorescerende farvestoffer, så forskerne kan følge dens færd.

»Alle de funktionsenheder er vigtige for at opnå netop den funktion, vi ønsker. Hvis ikke den for eksempel har de kløvbare ender i nålen, der går ind i cellen for at levere lasten, så leverer den ikke noget. Samtidig har vi nu en platform til at undersøge, hvilke enheder der skal til for at konstruere en specifik leveringsmetode,« siger Mette Galsgaard Malle.

Var nær strandet

Mette Galsgaard Malle var i øvrigt ikke med i projektet fra begyndelsen.

Hun blev hevet ind og reddede det på et tidspunkt, da det var strandet. Kurt Gothelfs gruppe kunne ikke påvise, at de rent faktisk fik noget ind i cellen.

Det kunne Mette. Hun er specialist i billeddannelse og *tracking* af enkeltpartikler inde i celler, og kunne ved hjælp af såkaldt HILO-mikroskopi følge, hvordan farvemolekylerne bevægede sig inde i cellerne. ■

VIDERE LÆSNING

A. Samanta, M. G. Malle, E. Tsang, et al. "Bacteriophage-Mimetic DNA Origami Needle for Targeted Membrane Penetration and Cytosolic Cargo Delivery." *Advanced Science* 13, no. 10 (2026): e12844.
doi.org/10.1002/advs.202512844

■ ■ ■ ■ ■

Bingo i kompostbunken

■ Af Peter F. Gammelby og Carsten R. Kjær

Andreas Møllebjerg er på jagt. Ikke efter Astorvildt eller gode tilbud, men enzymer. Mere præcist enzymer, der kan nedbryde de yderst genstridige plastmaterialer polyuretan (PUR) og nylon.

Andreas' enzymjagt startede, da han tiltrådte en stilling som postdoc på det daværende Interdisciplinary Nano Science Center (iNANO) på Aarhus Universitet. Her blev han en del af et forskningsprojekt, der skulle undersøge naturens enzymeres evne til at nedbryde plastik. Bioprospektering kalder forskerne det, når de leder i naturen efter biologiske organismer og genetisk materiale, der kan bruges i forskning og industrien.

I forskningsprojektet stod Andreas for indsamlingen af bakterier rundt om i verden. Og han foreslog at lede efter enzymerne på steder, hvor det er varmt, så bakterierne har det godt og vokser fint året rundt. Det bragte ham blandt andet til en kæmpestor losseplads i Kenya for at samle prøver.

På de mere hjemlige breddegrader tog han sammen med ph.d.-studerende Malte Kjær Bendtsen til Randers Regnskov Tropical Zoo for at samle plastik-affald, og han købte en pose voksmøllarver fra en dyrefoderbutik for at undersøge enzymerne i deres tarme.

Og så hentede han en skovfuld kompost på en genbrugsplads cirka 10 km fra universitetet. Det viste sig at være en rigtig god ide! For af alle de 12 kandidater til et PUR- og nylonnedbrydende enzym, forskerne fandt i projektet, stammede den allerbedste fra en bakterie i netop denne kompostbunke.

Bakterien har det borgerlige navn *Chelatococcus composti*, og forskerne har navngivet enzymet CCPUR1. Det glimrer ved at have en meget bred bindingskløft, så det kan rumme store polymerer. Desuden er det ekstra stabilt og tåler højere temperaturer og forskellige opløsningsmidler bedre end de 11 andre enzymer, forskerne fandt.



Andreas Møllebjerg på enzymjagt på en losseplads i Kenya sammen med Iddi Khamisi fra Pwani University. Privatfoto.

I deres forsøg kunne CCPUR1 på tre døgn nedbryde lige under en procent af det madrasskum, som forskerne "fodrede" det med. Så der er lang vej igen, før enzymet kan pudsес på de millioner af tons PUR og nylon, der hvert år enten brændes af eller deponeres på lossepladser.

Et første lille skridt har forskerne allerede taget, idet de i et endnu nyt studium med en anden af Andreas' kolleger, postdoc Rosie Graham, som førsteforfatter har forbedret enzymet, så den modificerede version på tre døgn nedbrød omkring 1,4 procent af polyuretanet i skum fra en skosål.

I øvrigt er de 11 andre enzymer, forskerne fandt, bestemt ikke ubrugelige – tværtimod. De fungerer bedst på små stykker plastik og kan derfor komplementere CCPUR1 i fremtidige proceskombinationer. Fordi enzymerne er selektive, forestiller forskerne sig en slags enzym-cocktail, hvor man først fjerner polyuretanen med én type enzym, vasker den væk, og derefter bruger enzymer, der nedbryder nylon. Det kan man nemlig ikke gøre med traditionelle kemiske metoder.

Kilde: Angewandte Chemie,
doi.org/10.1002/anie.6159643



Udstyret spiller en afgørende rolle for forskningen, når Katrine Juul Andresen er på feltarbejde på havet. På billedet ses en luftkanon, der har en af hovedrollerne i at aflure undergrunden under havbunden sine hemmeligheder. Foto: Andrea Lif, AU Foto