

NATURVIDENSKAB OG TEKNOLOGI  
DIREKTE FRA FORSKNINGSVERDENEN

AKTUEL  
*natur* VIDENSKAB

**MINIHJERNER  
I REAGENSGLAS**

Kunstig intelligens bag nobelpriser  
Vandløb og klimaændringer  
Natur er kultur

NR. 6 - 2024 DECEMBER 50 KR.

## En ulykke kommer sjældent alene

Dinosaurernes uddøen for cirka 66 millioner år siden er blevet forbundet til en katastrofal begivenhed, hvor en kæmpe meteorit slog ned ved Yucatan-halvøen i den Mexicanske golf. Meget tyder nu på, at denne meteorit ikke var alene.



Foto: Shutterstock

I 2022 annoncerede forskere således, at de havde opdaget en begravet struktur ud for Guineas kyst i Vestafrika, som tydede på, at det kunne være et meteoritkrater af samme alder som Chicxulub-krateret ved Yucatan.

I en nylig afhandling i *Nature Communications* beretter Nicholson og kolleger, at de har kortlagt Nadir-krateret (som strukturen er døbt) i exceptionel stor detalje ved hjælp af 3D-seismik. De konkluderer på den baggrund, at der udenfor enhver rimelig tvivl er tale om et krater forårsaget af en kollision ved stor hastighed. Krateret har en indre næsten cirkelrund rand med en diameter på godt 9 km samt en ydre zone med koncentriske forkastninger på 23 km.

Kilde: *Commun. Earth Environ.* 5, 547 (2024)

## Quizzen

Hvad forstår man indenfor biologien ved en *posttranslational modifikation*?

1. En mutation i et gen
2. En kemisk ændring af et protein
3. En forandring i en hjerne-celle

Se svaret i artiklen om forskning med minihjerner.

## Skolebørn øger viden om bjørnedyr

I maj 2023 var næsten 28.000 folkeskoleelever fra 1.271 klasser over hele Danmark i felten for at hjælpe med at kortlægge mos, lav og bjørnedyr i forbindelse med Masseeksperimentet i 2023. Inden projektets start kendte forskerne til 14 danske arter af bjørnedyr fra mos og lav, men ved projektets afslutning var det samlede artsantal oppe på 55. Syv af disse arter er endnu ikke kendt af videnskaben og har derfor heller ikke noget navn. Og det er blot nogle af de opdagelser, som eleverne gjorde. Bag Masseeksperiment 2023 står det nationale naturfagscenter Astra og Statens Naturhistoriske Museum. Resultaterne er nu publiceret i *Frontiers in Zoology*.

Kilde: Statens Naturhistoriske Museum/[doi.org/10.1186/s12983-024-00547-x](https://doi.org/10.1186/s12983-024-00547-x)



Foto: Thomas Evaldsen

## Vejen til misinformation

Når internet-brugere havner på hjemmesider med misinformation, skyldes det mere deres egen målrettede adfærd end, at søgemaskinernes algoritmer leder dem derhen. Det konkluderer forskere i tidsskriftet *Science Advances* efter at have analyseret i alt 14 milliarder søgninger foretaget i en tremåneders periode i henholdsvis 2022 og 2023 på søgemaskinen Bing. Forskerne kategoriserede i analysen omkring 8000 af de besøgte hjemmesider som enten "pålidelige" eller "upålidelige". Analysen viste, at 82 % af de interaktioner, brugere havde med upålidelige hjemmesider skyldtes, at de specifikt havde søgt efter disse sider. I søgeresultaterne optrådte upålidelige hjemmesider i de to måleperioder i henholdsvis 1,4 og 0,9 % af søgeresultaterne og sjældent blandt topresultaterne.

Kilde: *Nature*/ DOI: 10.1126/sciadv.adn3750



Foto: Shutterstock

## Ny metode kan skelne mellem DNA fra levende og døde celler

En gruppe forskere fra det tyske forskningscenter for geovidenskab (GFZ) har sammen med internationale kolleger brugt en ny genetisk teknik til at afsløre en overraskende stor variation af specialiserede mikroorganismer



Foto: Dirk Wagner, GFZ

i den knastørre Atacama-ørken – et af Jordens mest ekstreme miljøer. Den nye metode kan skelne mellem DNA fra døde celler og DNA fra levende celler, hvilket gør det muligt separat at analysere henholdsvis levende og døde mikroorganismer. Det giver et mere præcist billede af, hvilke mikroorganismer, der reelt er aktive i ekstreme miljøer, hvor andre metoder fejler.

Kilde: *Appl Environ Microbiol* 0:e01443-24.

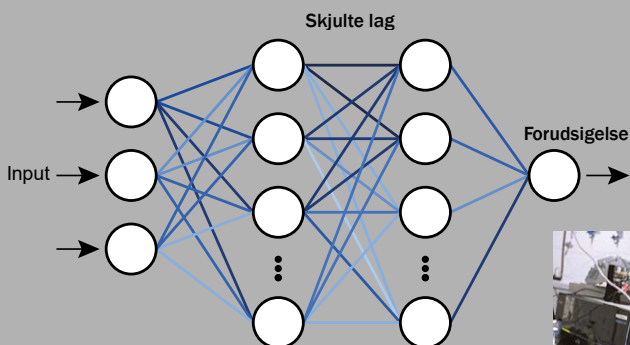
## Fagfællebedømt af ChatGPT

Forskere ved Stanford University, USA, har i et nyt studium analyseret 50.000 fagfællebedømmelser af datalogi-artikler publiceret i forbindelse med konferencer. De fandt, at mellem 7 og 17 % af sætningerne i disse bedømmelser var skrevet af kunstig intelligens som ChatGPT baseret på skrivestilen og frekvensen, hvormed bestemte ord optrådte.

I dag kan både arbejdet med at skrive en artikel og bedømme den således klares af kunstig intelligens. Nu mangler vi bare, at den også klarer læsningen. Så er mennesket taget helt ud af ligningen.

Kilde: *Nature*/ *NEJM AI* 2024;1(8)

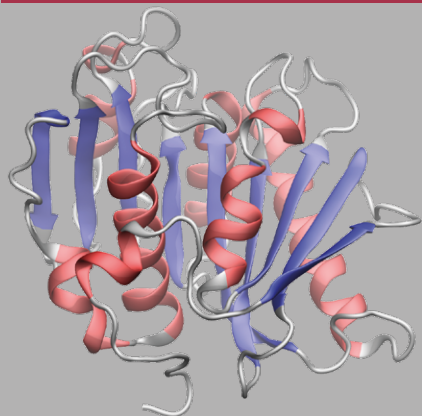
# indhold



## Kunstig intelligens baner vejen for katalytiske materialer

Udviklingen indenfor kunstig intelligens har åbnet døren for, at materialeforskere kan forudsige nye materialer med nyttige egenskaber.

8



## Kunstig intelligens fik has på proteinfoldningsproblemet

At forudsige proteiners struktur ud fra deres aminosyresekvens har vist sig at være en næsten umulig nød at knække. Men årets nobelpristagere i kemi fik brudt koden.

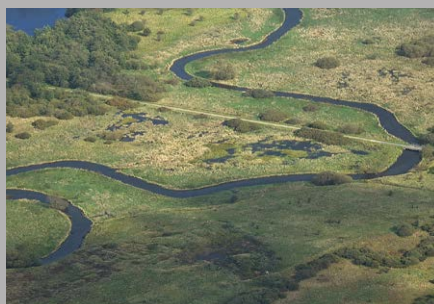
14



## Minihjerner i glas gør forskere klogere på psykiske sygdomme

Forskere har udviklet en metode til at lave stamcellebaserede "minihjerner" i reagensglas.

26



## Vandløb og klimaændringer

Et vandløbs tværsnit og strømhastighed kan beskrives som matematiske funktioner af den mængde vand, der strømmer i det.

32

## FORSKNING OG NYHEDER

4 KORT NYT

## NOBELPRISER 2024:

- 8 Kunstig intelligens baner vejen for fremtidens katalytiske materialer
- 14 Biologisk kodebrydning – Kunstig intelligens fik has på proteinfoldningsproblemet
- 20 Ny teknologi bruger DNA som spion i cellen
- 24 Hvis du klør på, kan du mere end du tror
- 26 Minihjerner i reagensglas gør forskere klogere på psykiske sygdomme
- 32 Vandløb og klimaændringer
- 37 Fossil lort fortæller om dinosaurernes udvikling
- 38 DEBAT: Natur er kultur
- 42 BØGER & SERVICE
- 44 BAGSIDEN: Algen på tavlen

## AKTUEL NATURVIDENSKAB

### Udgiver

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

- Det Natur- og Biovidenskabelige Fakultet, Københavns Universitet
- Det Naturvidenskabelige Fakultet, Syddansk Universitet
- Roskilde Universitet

### Ansvarshavende

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

### Redaktion

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



DET NATURVIDENSKABELIGE FAKULTET

SPONSOR-  
ABONNENT



# Så hurtigt lærer børn heller ikke...

**B**ørn er hurtigere til at lære nye motoriske færdigheder end voksne – hvad enten det er at mestre et par ski eller rulleskøjter, lære nye sprog, slå vejrmøller eller at indøve dansmoves fra TikTok. Sådan lyder en udbredt opfattelse.

»I populærvideenskabelig litteratur og i diverse lærebøger er der en antagelse om, at børn i en vis alder – fra cirka 8 år til puberteten – er bedre til at lære nye færdigheder end voksne. Det kaldes den motoriske guldalder. Men der er ikke noget fysiologisk rationale for, at den motoriske guldalder rent faktisk findes,« siger lektor Jesper Lundbye-Jensen fra Institut for Idræt og Ernæring på Københavns Universitet.

Den populære antagelse om den motoriske guldalder "provokerede" forskerne til at undersøge, hvilke aldersmæssige forskelle i vores centralnervesystem, der gør sig gældende i vores motoriske udvikling. Resultaterne er nu udgivet i tidsskriftet *Developmental Science*. I studiet har forskerholdet undersøgt den



Foto: Colourbox

motoriske indlæringssevne hos 132 personer i fire forskellige aldersgrupper: 8-10-årige, 12-14-årige, 16-18-årige og 20-30-årige. I laboratoriet fik deltagerne en specialdesignet

opgave, hvor de skulle øve sig i at styre en cursor på en computerskærm med så hurtige og præcise fingerbevægelser som muligt. Deltagernes præstation blev målt lige efter introduktionen til opgaven (baseline), undervejs i træningssessionen og igen 24 timer efter træningen. Resultaterne viser, at både de 16-18-årige og 20-30-årige forbedrede deres færdigheder markant mere end de 8-10-årige i løbet af selve træningssessionen.

»Så det tyder på, at både unge og yngre voksne har bedre forudsætninger for hurtigt at tilpasse sig nye færdigheder sammenlignet med børn – i al fald når det gælder korttidsindlæring og motoriske færdigheder, som er det, vi har undersøgt. Hos børnene er forbedringerne både mindre og foregår langsommere,« fortæller Mikkel Malling Beck, førsteforfatter til forskningsartiklen om studiet og tidligere ph.d.-studerende på Institut for Idræt og Ernæring og nu forsker på MR-afdelingen ved Hvidovre Hospital.

Maria Hornbek, Københavns Universitet.  
*Developm. Sci.*: doi.org/10.1111/desc.13536

## Træplantning i Arktis: en dårlig klimaløsning

**E**fterhånden som klimaet bliver varmere, kan træer plantes længere og længere mod nord. Både regeringer og virksomheder har derfor støttet store træplantningsprojekter i Arktis som en måde at afbøde de værste konsekvenser af klimaforandringer på. Det gælder også i Grønland. Men når træer plantes de forkerte steder – som på tundra og moseområder, hvor der normalt ikke vokser træer, samt store områder af boreale skove med relativt åbne trækroner – kan det forværre den globale opvarmning. Det skriver en international forskergruppe i en videnskabelig artikel i *Nature Geoscience*.

Ifølge artiklens hovedforfatter, adjunkt Jeppe Kristensen fra Aarhus Universitet, gør de unikke egenskaber ved arktiske og subarktiske økosystemer dem dårligt egnede til træplantning som klimaforanstaltning.



Træerne i denne plantage i Sydgrønland reducerer albedoeffekten. Foto: M. le Moulllec, Grønlands Naturinstitut

»Jord i Arktis lagrer mere kulstof end al vegetation på Jorden. Denne jord er sårbar over for forstyrrelser, såsom opdyrkning til skovbrug eller landbrug, men også træernes rødder. De mange lyse timer i foråret og den tidlige sommer, når sneen stadig ligger på jorden, gør også energibalancen i denne region ekstremt følsom over for, at overfladen bliver mørkere, da grønne og brune træer optager mere varme fra solen end hvid sne,« forklarer Jeppe Kristensen.

Desuden er områderne omkring Nordpolen i Nordamerika, Asien og Skandinavien udsat for naturlige forstyrrelser som skovbrande og tørke, der dræber vegetationen. Og den slags forstyrrelser vil blive både hyppigere og mere alvorlige med klimaforandringerne.

»Sådanne steder er det risikabelt at være et træ, især som en del af en ensartet plantage, der er mere sårbar over for den slags forstyrrelser,« siger Jeppe Kristensen.

Han påpeger, at det kulstof, der er lagret i disse træer, risikerer at blive frigivet tilbage til atmosfæren indenfor få årtier. Ifølge ham og hans forskerkolleger er træplantning ved høje breddegrader et klassisk eksempel på en klimaløsning, som har en ønsket effekt i én sammenhæng, men den modsatte effekt i en anden.

Peter Gammelby og Sarah Collins, Aarhus Univ. *Nature Geosc.* vol. 17, pp 1087-1092 (2024)

# Forsker finder “øer” af orden i trelegeme-problemet

Når tre tunge objekter mødes i verdensrummet, påvirker de hinanden med tyngdekraften på måder, der udvikler sig ganske uforudsigeligt og kaster objekterne ud i kaos. Det såkaldte “trelegeme-problem” (Three-Body problem) har fascineret forskere siden tyngdekraftens fader, Isaac Newton, for første gang beskrev det. Men nu har forskere fra Niels Bohr Institutet på Københavns Universitet opdaget en lille smule orden i det gamle problem.

»Three-body-problem er et af de mest berømte uløselige problemer i matematikken og den teoretiske fysik. Teorien siger, at når tre objekter mødes, vil deres interaktion udvikle sig kaotisk, uden regelmæssighed og samtidigt helt løsrevet fra udgangspunktet. Men vores millioner af simulationer viser, at der er huller i det kaos – eller øer af regelmæssighed, som er direkte afhængige af, hvordan de tre objekter er placeret i forhold til hinanden, når de mødes, og den hastighed og vinkel, de gør det ved,« forklarer Alessandro Trani fra Niels Bohr Institutet.



Billede: Alessandro Alberto Trani

Han håber at opdagelsen baner vejen for bedre modeller i astrofysikken. Three Body Problem er nemlig ikke bare en teoretisk udfordring. Tre objekter, der mødes, er noget, der sker hele tiden i universet.

»Hvis vi skal forstå bølger af tyngdekraft, som strømmer fra sorte huller og andre tunge objekter i rummet i bevægelse, så er interaktioner mellem sorte huller, der mødes og smelter sammen, helt afgørende. Især når tre af dem mødes, er der store kræfter i spil. Derfor kan vores forståelse af sådanne møder være en nøgle til at forstå fænomener som gravitationsbølger, tyngdekraften selv, og mange andre af universets mysterier helt grundlæggende,« siger forskeren.

Opdagelsen giver i første omgang forskerne en ny udfordring. Kaos ved man nemlig, hvordan man regner på ved hjælp af statistiske regnemetoder. Men når det kaos brydes op af regelmæssigheder, bliver det mere kompliceret.

»Når der pludselig er områder i det her kort over mulige udfald, der er regelmæssigt, så forstyrrer det beregningerne. Og så bliver forudsigelserne upræcise. Så nu er vores udfordring, at lære,

hvordan man blander de statistiske metoder med det, der hedder numeriske beregninger, som giver høj præcision, når systemer opfører sig regelmæssigt,« siger Alessandro Trani.

Billedet viser millioner af simulationer, der tilsammen danner et kort, der repræsenterer alle tænkelige udfald af tre tunge objekter som mødes. Hvis trelegeme-problemet var rent kaos, ville vi kun se en kaotisk blanding prikker. I stedet dukker regelmæssige “øer” op fra dette kaotiske hav, hvor systemet opfører sig forudsigeligt, hvilket fører til ensartede udfald – og derfor ensartede farver.

Kristian Bjørn-Hansen, Københavns Universitet, A&A, 689, A24 (2024)

## Svært at undgå liv på prøver fra rummet

Tilbage i 2020 bragte den japanske Hayabusa2-mission prøver fra asteroiden Ryugu tilbage til Jorden. For at minimere risikoen for forurening af prøverne, er de siden 2020 blevet opbevaret i et sterilt og tørt miljø. På trods af dette, har Matthew Genge fra Imperial College og kolleger for nylig fundet spor af jordiske bakterier på en partikel fra Ryugu. For at forberede partiklen til analyse, indstøbte forskerne den i resin (en slags syntetisk harpiks). En uge efter denne behandling undersøgte forskerne partiklen og fandt 11 cylinderformede mikroorganismer, som lignede bakterier af slægten *Bacillus*. Efter tre uger var antallet



Asteroiden Ryugu. Foto: JAXA Hayabusa 2

vokset til 147, hvorefter det faldt de følgende 6 uger. Dette mønster tyder kraftigt på, at partiklen var blevet forurennet under prøveforberedelserne.

At bakterierne tilsyneladende med lethed kunne “infcere” prøven på trods af alle anstrengelser for at undgå det viser, at man skal være meget skeptisk overfor enhver påstand om, at der er fundet liv i prøver bragt til Jorden, advarer forskerne. Desuden er det faktum, at jordiske bakterier tilsyneladende fint kan leve af organisk materiale fra asteroider, en grund til, at vi mennesker på vores rummissioner skal være ekstra påpasselige med at forurene vores “nærmiljø” i Universet.

Kilde: Nature / Meteorit Planet Sci. doi.org/10.1111/maps.14288

# Teknologi helt i toppen

**I** november måned var en række af verdens førende forskere i biodiversitet samlet i Rio de Janeiro for at overvære prisoverrækkelsen i konkurrencen XPRIZE Rainforest – en af verdens største videnskabskonkurrencer. Blandt de præmierede projekter var en slags paraply, der kan flyves ind i en regnskov med drone og sættes af i kronen af de høje træer. Heroppe filmer, lytter og måler apparatet alle de dyr, der er i nærheden. Projektet – kaldet ETH BiodivX – er et internationalt forskningssamarbejde ledet af forskere fra Schweiz og med deltagelse af forskere fra Aarhus Universitet. Her har ingeniørdocent Claus Melvad fra Institut for Mekanik og Produktion og professor Toke Thomas Høye fra Institut for Ecoscience sammen med deres respektive forskningsgrupper været med til at opfinde teknologien.

Særligt i trækrone lever der masser af upopdagede arter, men forskerne har travlt,



En drone flyver apparatet dybt ind i Amazonas.  
Foto: ETH BiodivX on YouTube

hvis de skal nå at kortlægge dem. Regnskoven forsvinder nemlig i disse år med faretruende hast. Desuden er trækrone et temmelig utilgængeligt sted for de forskere, der udforsker regnskoven.

Opfindelsen har allerede vist sit værd. I løbet af de fem år konkurrencen løb over har forskerne opdaget 40 nye arter af insekter – alene i de trækrone, apparatet har siddet i.

Med prisen følger knap 1 million kroner,

som gruppen kan bruge til at fortsætte projektet – og der er da også allerede stor interesse for opfindelsen, fortæller Toke Thomas Høye.

»Vi er i dialog med folk i både Centralafrika og Columbia, som er meget interesserede. Begge steder har de store områder med regnskov, og der kan vores teknologi muligvis gøre en stor forskel,« siger han.

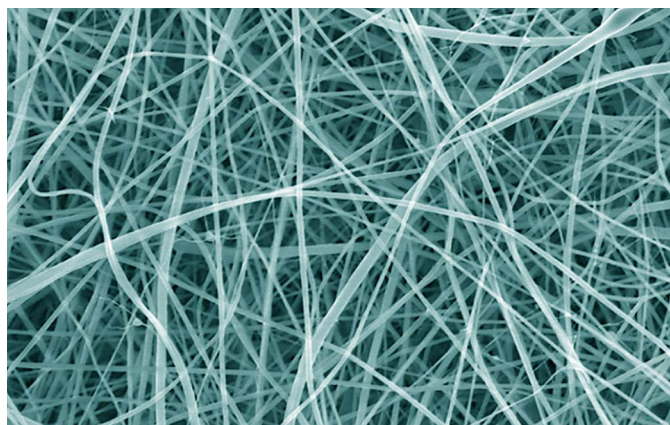
Toke Høye blev i sin tid spurgt, om han ville være med i projektet og konkurrencen på grund af sin erfaring med billedgenkendelse af arter og fortolkning af biodiversitetsdata. Han kontaktede derefter Claus Melvad, som han vidste var superdygtig til at bygge og udvikle nye teknologier. Claus Melvads hold byggede derefter både en rover, der kørte rundt i regnskoven i Singapore og samlede prøver ind samt platformen til trækrone.

Jeppé Kyhne Knudsen, Aarhus Universitet

## Forskere laver nano-pasta

**D**en tyndeste spaghetti i verden menes at være "su filindeu", som håndlaves på Sardinien og kun er cirka 0,4 mm i diameter. Den rekord er dog nu overgået med flere længder rapporterer engelske forskere i tidsskriftet *Nanoscale Advances*. De har således fremstillet spaghetti med en tykkelse på kun 372 nanometer.

Beatrice Britton fra University College i London og kolleger brugte en metode kaldet elektrospinning, hvor tynde tråde af mel og væske blev trukket ud gennem spidsen af en nål af en elektrisk ladning. Slutresultatet er helt tilsvarende spaghetti produceret ved at presse mel og væske gennem huller



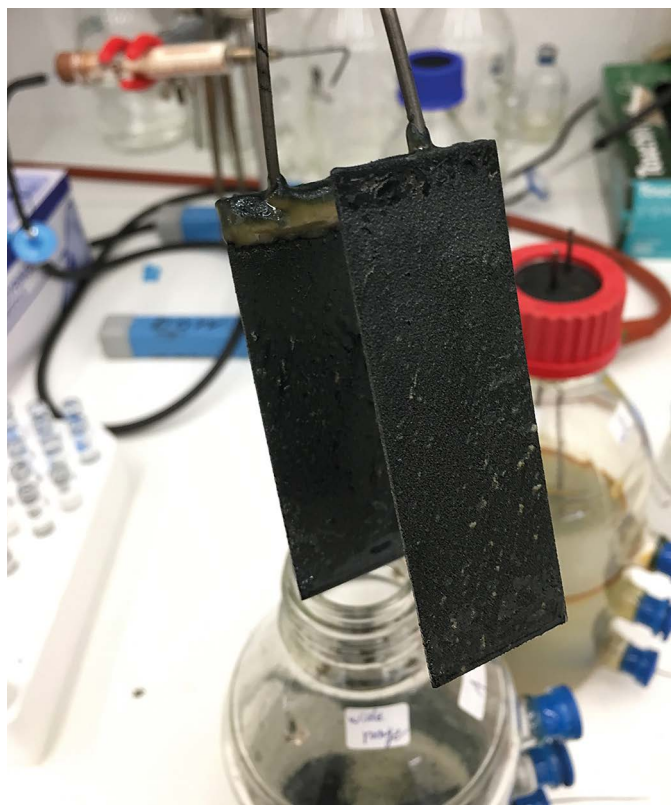
Billedet viser nano-spaghetti optaget ved hjælp af elektronmikroskop.  
Foto: Beatrice Britton / Adam Clancy.

i en metalplade – blot meget tyndere. De individuelle tråde er for tynde til at se med det blotte øje eller under et almindeligt lysmikroskop, men forskerne brugte dem til at

fremstille en måtte af nanofibre med en bredde på omkring to centimeter, dvs. i praksis en meget lille lasagneplade.

Man skal nok ikke forvente, at nano-pasta vil finde vej til supermarkedernes hylder, da så tynd spaghetti vil blive helt udkøgt på mindre end et sekund. Til gengæld vil forskerne nu undersøge, om nanofibre baseret på stivelse i stedet kan bruges i medicinske sammenhænge såsom til at dække sår, udgøre stilladser for gendannelse af væv eller måske til at aflevere medicin i kroppen.

CRK, Kilde: *Physics World/ Nanoscale Adv.*  
10.1039/D4NA00601A



Billederne viser stålplader før og efter, at de i en måned er blevet udsat for metanogene arkæer i laboratorieforsøg. Fotos: Satoshi Kawaichi

## Sådan spiser mikrober jernrør

**N**år olieselskaber må skifte jernrør og anden jernbaseret infrastruktur under jorden eller under havbunden ud på grund af nedbrydning, skyldes det sjældent slitage eller elementernes rasen. I stedet skyldes det jern-elskende mikrober, der angriber jern i iltfrie miljøer. Mikroberne er så effektive, at de koster virksomheder milliarder af dollars hvert år.

Hvis man vil gøre sig håb om at stoppe eller hæmme mikroberne, er det vigtigt først at forstå, hvordan de opererer. Det har mikrobiologerne, ph.d. Satoshi Kawaichi og professor, Dr. Amelia-Elena Rotaru fra Biologisk Institut ved Syddansk Universitet nu afdækket i et nyt studie publiceret i tidsskriftet *npj Biofilms and Microbiomes*.

Hovedrollen i studiet tilhører arkæ-arten *Methanococcus maripaludis*, der ikke kan tåle ilt – eller mere præcist; en stamme af arten, som er udtaget fra indersiden af en stål tank, der blev brugt til at opbevaring af olie. Denne stamme har vist sig at være ekstremt effektiv til at nedbryde jern i iltfrie miljøer.

Forskernes studie tilbageviser en ellers udbredt antagelse om, hvordan denne mikrobe "spiser" jern; at den frigiver nogle enzymer til sine omgivelser, som så finder vej til jernoverfladen, hvor de nedbryder jernet og i processen genererer hydrogen, som mikroben skal bruge for at vokse.

I stedet har forskerne vist, at mikroberne klæber sig fast direkte på jernoverfladen. De vigtige enzymer, der skal nedbryde jernet, sidder på mikrobecellens overflade og kan nedbryde jernet uden at forlade mikrobens celleoverflade først. Når mikroberne har sat sig fast på jernoverfladen, går nedbrydningen i gang, og det ses i første omgang som en sort film på jernets overflade.

»Mikroberne vil hurtigt skabe fordybninger under den sorte film, og indenfor et par måneder vil der opstå betydelige skader. Vi så, at fem gram jernkorn – en mængde, der er synlig med det blotte øje – blev nedbrudt til sort pulver i løbet af en måned eller to, siger Satoshi Kawaichi.

Ifølge forskerne er denne mikrobielle tilpasning et eksempel på, hvordan mikrober kan tilpasse sig i menneskeskabte miljøer. I dette tilfælde har *Methanococcus maripaludis* udviklet evne til at overleve og effektivt hente energi fra menneskeskabte jern-strukturer.

Sådan en mikrobiel tilpasning udgør ikke kun en økonomisk byrde, men også en miljø-mæssig:

»Disse mikrober er metanogene, hvilket betyder, at de producerer metan. Metan er en potent drivhusgas, så det skaber en vis bekymring, at mikrober, der tilpasser sig menneskeskabte miljøer, producerer metan mere effektivt. Det kan føre til øget udledning af metan til atmosfæren,« siger Amelia-Elena Rotaru.

Studiet er støttet af Danmarks Frie Forskningsfond.

Birgitte Svennevig, SDU, *npj Biofilms Microbiomes* 10, 100 (2024).



Katalysatorer medvirker i mange industriprocesser - fx fremstilling af kunstgødning, olieraffinering og fremstilling af medicin, og de bruges også til at rense udstødnings fra fossildrevne køretøjer.

Fotos: Shutterstock

#### Om forfatterne



Mie Andersen er lektor i teoretisk materialefysik. Hendes forskning har som mål at forstå og skræddersy katalytiske egenskaber af materialer - fra den atomare skala og op - ved hjælp af computermodellering og AI-metoder.  
mie@phys.au.dk



Nikolaj Rønne er postdoc i teoretisk materialefysik og forsker i udvikling af nye AI-metoder til materialeopdagelse på atomar skala.  
nrønne@phys.au.dk

Begge ved Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet.

# KUNSTIG INTELLIGENS baner vejen for fremtidens katalytiske materialer

Udviklingen indenfor kunstig intelligens har åbnet døren for, at materialeforskere kan forudsige nye materialer med nyttige egenskaber. Neurale netværk hjælper os således i dag med at finde nye katalytiske materialer, som er vigtige for en bæredygtig fremtid.

**K**atalytiske materialer spiller en afgørende rolle i industrien ved at fremskynde kemiske reaktioner. De bruges til alt fra fremstilling af medicin til produktion af ammoniak til landbruget. Men vi står nu over for en ny udfordring: At finde katalytiske materialer, der

kan hjælpe med at opnå en mere bæredygtig produktion og reducere vores klimaaftryk. Nye og mere effektive katalytiske materialer er afgørende, fordi de både kan sænke energiomkostningerne for de industrielle processer og reducere CO<sub>2</sub>-udledningen markant.

Moderne kunstig intelligens (AI), især neurale netværk, har revolutioneret måden, vi kan forudsige og udvikle nye materialer på. Traditionelt kræver det enorme mængder af computerkraft at forudsige stabiliteten og egenskaberne af et nyt katalytisk materiale. Neurale netværk kan erstatte disse



komplekse beregninger og give os svarene langt hurtigere. I stedet for at gennemføre computertunge, kvantemekaniske beregninger for at vurdere, om et materiale er stabilt, eller om det er en god katalysator, kan AI-modeller nu forudsige disse egenskaber ud fra tidligere data. Det betyder, at vi kan undersøge mange flere materialer på kortere tid.

En anden mulighed er at bruge AI-modeller til at foreslå specifikke materialer med ønskede egenskaber – for eksempel en katalysator, der virker effektivt ved lavere temperaturer. Dette kaldes generativ AI, og det har vi for nyligt opnået lovende resultater med. Denne nye mulighed for at designe materialer “fra bunden” giver os adgang til at udforske tusindvis af potentielle nye katalysatorer. Vi forventer derfor, at vi de kommende år vil se en rivende udvikling af nye materialer baseret på brug af generativ AI.

Sammenlagt betyder disse fremskridt, at vi nu kan undersøge og udvikle langt flere materialer end tidligere. Det giver håb om at finde nye og mere effektive katalysatorer, der kan hjælpe industrien med at mindske sit klimaaftryk.

### Forudsigelse af katalytiske egenskaber

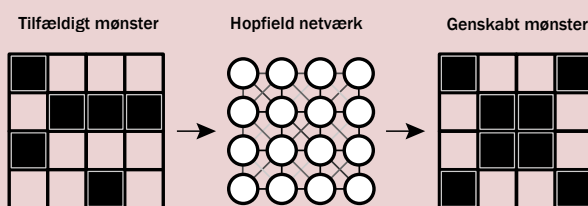
Hvordan kan man (op)finde et nyt og bedre materiale? Traditionelt har eneste redskab til rådighed været omstændelige laboratorieforsøg, hvor man ved “trial and error” fremstiller og tester forskellige mulige materialer. Et godt eksempel er Thomas Edison, som siges at have testet omkring 1600 forskellige materialer under udviklingen af glødepæren i 1870'erne. Samspelet mellem teori, kvantemekaniske beregninger og AI-modeller kan fremskynde denne proces ved at foreslå nye materialer med specifikke egenskaber, så krævende laboratorieforsøg kan reserveres til kun de allermost lovende materialer.

Når vi skal forstå og forudsige katalytiske egenskaber af et materia-

## Nobelprisen i fysik 2024

Nobelprisen i fysik 2024 er givet til John J. Hopfield og Geoffrey E. Hinton for deres banebrydende opdagelser indenfor neurale netværk – teknologier, der har lagt fundamentet for kunstig intelligens som ChatGPT.

John J. Hopfield udviklede Hopfield-netværket – en metode til at skabe computerhukommelse inspireret af, hvordan menneskets hjerne fungerer. Netværket bruger såkaldte neuroner, små enheder, der alle er forbundet med hinanden for at lære og gemme information. Hopfield-netværket er inspireret af fysikkens måde at beskrive magnetiske materialer på. Ligesom små magneter i et materiale kan finde et mønster, hvor de for eksempel alle peger i samme retning, kan neuronerne i et Hopfield-netværk finde og huske mønstre i data. Netværket “lærer” derfor at gemme information på samme måde, som magneter kan danne stabile mønstre i et magnetisk materiale.



Et eksempel på, hvordan et trænet Hopfield-netværk kan genskabe et mønster fra et tilfældigt mønster. Illustration: Nikolaj Rønne

Geoffrey E. Hinton, ofte kaldet “den kunstige intelligens’ fader”, populariserede den metode, vi bruger til at træne neurale netværk i dag – kaldet “backpropagation”. Han udviklede også Boltzmann-maskinen, et neuralt netværk, der kan bruges til at genkende mønstre og klassificere data. Boltzmann-maskinen er inspireret af ideer fra statistisk fysik og fungerer ved at finde mønstre i data på samme måde, som partikler i et materiale søger mod de mest stabile tilstande. Ligesom partikler tiltrækkes af lavere energi, justerer maskinen sine forbindelser for at finde de mest sandsynlige mønstre – en proces, der hjælper med at genkende komplekse mønstre i data.



le, er det vigtigt at forstå, hvor godt molekyler binder sig til materialets overflade. Energien, der kræves for at adskille molekylet fra overfladen – bindingsenergien – er en afgørende parameter for, hvor god katalysatoren er. Bindingsenergien kan beregnes ved hjælp af kvantemekanikkens komplekse ligninger. Men der er et problem: Disse beregninger er utroligt tidskrævende på trods af, at vi i dag har adgang til supercomputere. Det skyldes, at beregningstiden vokser voldsomt med antallet af elektroner i materialet. Hvis det for eksempel tager

en dag at regne på et materiale med 1000 elektroner, ja så vil beregningen på et materiale med det dobbelte antal elektroner typisk tage otte gange så lang tid – det vil sige otte dage! Ydermere kræver hvert materiale typisk mange forskellige beregninger, hvilket gør det umuligt at undersøge ret mange materialer.

### Den moderne vej til materialeinnovation

Det er her AI kommer ind i billedet. En AI-model kan forudsige bindingsenergier på en brøkdel af

## Katalytiske materialer

Et katalytisk materiale er et materiale, der kan øge hastigheden i en kemisk reaktion, uden selv at blive opbrugt eller omdannet i processen. Et godt eksempel er kobber, som kan bruges til at få carbon-dioxid,  $\text{CO}_2$ , til at reagere med hydrogen,  $\text{H}_2$ , og danne ønskede produkter, for eksempel metanol,  $\text{CH}_3\text{OH}$ . Kobber kan altså hjælpe os med at reducere mængden af  $\text{CO}_2$  i atmosfæren og opnå et carbon-kredsløb uden fossile brændstoffer ved at omdanne  $\text{CO}_2$  til et andet molekyle – metanol – som der er stor efterspørgsel på i den kemiske industri, og som også kan bruges som et syntetisk brændstof.

Reaktionen mellem carbondioxid og hydrogen (reaktanterne) sker på overfladen af det katalytiske materiale. Hvis reaktionen forsøges uden katalysator (ved blot at blande reaktanterne), er der en høj energibarriere. I praksis betyder det, at reaktionen tager så lang tid, at det ikke er økonomisk rentabelt. På overfladen af det katalytiske materiale kan energibarrieren sænkes ved at bryde den overordnede reaktion ned i små trin, hvor hvert trin har en lavere energibarriere. Et sådant trin er for eksempel dannelsen af molekylet format,  $\text{HCO}_2$ , ved reaktionen mellem carbondioxid og et

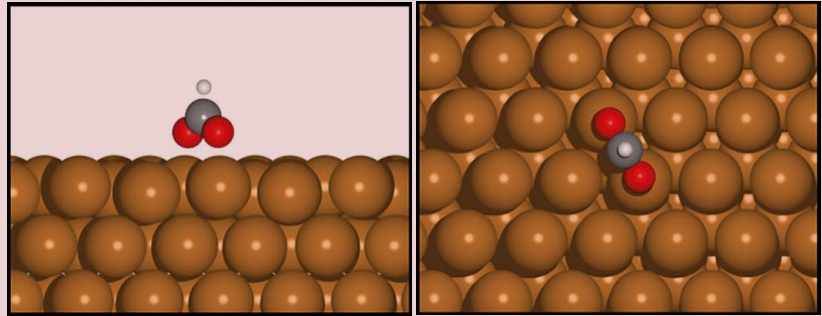


Illustration af molekylet format,  $\text{HCO}_2$ , der binder til en kobber-overflade (set fra siden og ovenfra).

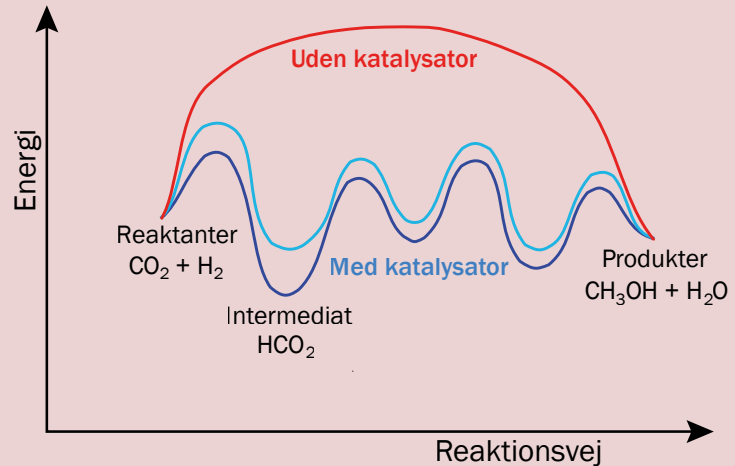
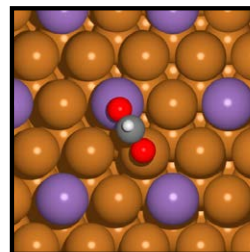
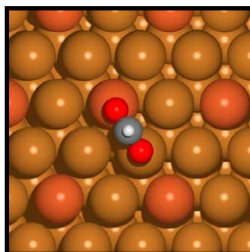
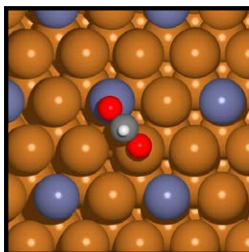
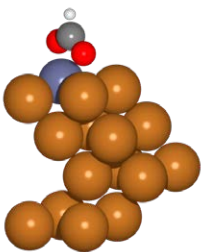


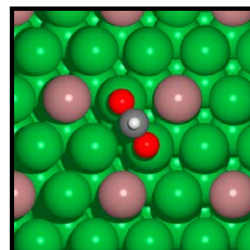
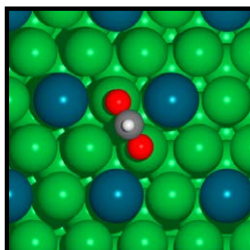
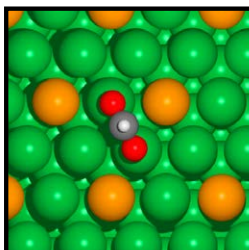
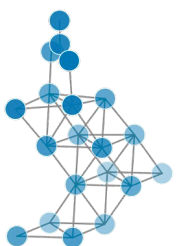
Illustration: Mie Andersen og Raffaele Cheula

hydrogenatom. En vigtig parameter, der er afgørende for energibarrieren og dermed, hvor godt katalysatoren virker, er bindingsenergien – dvs. hvor stabil bindingen mellem intermediære molekyler som format og overfladen er. I forskning, hvor AI-modeller anvendes til at forudsige, om nye materialer er gode

katalysatorer, fokuseres der derfor ofte på at forudsige bindingsenergi mellem molekyler og overflader. Bindingsenergien skal være netop tilpas, hverken for svag eller for stærk, for at overfladen er en god katalysator for dannelsen af det ønskede produkt.



Venstre: Den geometriske struktur (øverst) og strukturen repræsenteret som en matematisk graf (nederst) for molekylet format ( $\text{HCO}_2$ ) på en kobber-overflade iblandet zink.



Højre: Format på forskellige materialeoverflader dannet ved at blande elementer fra det periodiske system: Zink, jern og mangan i en kobber-overflade (øverst) samt selen, palladium og gallium i en nikkel-overflade (nederst). Finjustering af materiale-kompositionen gør det muligt at justere vigtige parametre som bindingsenergi af molekyler til overfladen. Illustration: Mie Andersen.

den tid, vi skal bruge med traditionelle metoder. Men, der er også en hage ved historien. For at virke godt, skal AI-modellen først trænes på data for kendte materialeegenskaber. Og disse data skal stadig beregnes på supercomputere. Derfor er det afgørende, at AI-modellen kan udnytte informationen gemt i data optimalt og lære mest muligt fra så lidt data som muligt.

I vores forskning har vi blandt andet arbejdet på at udvikle nye AI-modeller, der er bedre til at lære, hvordan komplekse molekyler binder til overflader. En vigtig indsigt, vi har fået under dette arbejde, er, at det er afgørende, hvordan de enkelte atomer er placeret geometrisk i molekylet, og hvordan hvert atom er bundet til molekylets andre atomer og til atomerne i katalysatoroverfladen.

Ved at benytte matematisk graf-teori kan vi give vores AI-model disse informationer og få den til at bruge dem effektivt. I grafen er hvert atom et "knodepunkt" med specifikke egenskaber, der afhænger af atom-typen, og bindingerne mellem atomer er "forbindelser".

AI-modellen kan forudsige bindingsenergier af nye kombinationer af molekyler og overflader, for eksempel overflader dannet ved at blande forskellige elementer fra det periodiske system. Den kan dermed hjælpe til med hurtigt at afgøre, hvorvidt et nyt materiale er så lovende, at det er værd at investere dyre laboratorieforsøg på at undersøge det nærmere.

### AI for materialer

Kan AI-modeller også bruges til andet end at forudsige bindingsenergier?

Ja, faktisk kan vi lære dem at forudsige næsten alle tænkelige materialeegenskaber, inklusiv den totale energi af strukturer, vi kunne finde på at bygge ud fra elementerne i det periodiske system. Det vil være nyttigt i mange andre sammenhænge.

## Neurale netværk

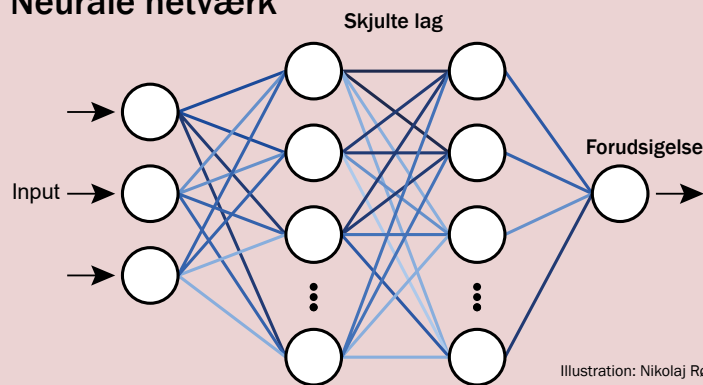


Illustration: Nikolaj Rønne

Illustration af et neuralt netværk. Hver cirkel repræsenterer en neuron, som afgør om den indsendte information skal videresendes i netværket. Hver forbindelse er farvet i henhold til hvor meget vægt der lægges på den. Disse vægte læres igennem træningen.

Et neuralt netværk er hjertet i kunstig intelligens. Det er denne teknologi, der gør det muligt for AI at lære, genkende og huske mønstre. I sin enkleste form består et neuralt netværk af mange små enheder, kaldet neuroner, som er forbundet med hinanden. Du kan tænke på en neuron som en lille kunstig "hjerne-celle" i netværket. I netværket strømmer information fra én ende til den anden gennem flere lag af neuroner. Hver neuron afgør, om den skal sende informationen videre, ved hjælp af en såkaldt aktiveringsfunktion – en "tænd/sluk"-mekanisme, der gør det muligt for netværket at lære komplekse mønstre i data.

Store AI-modeller som ChatGPT og

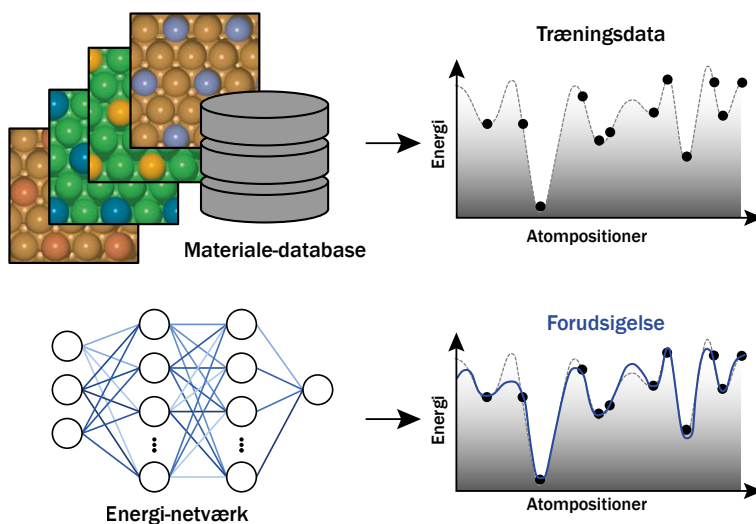
billedgenkendelsesprogrammer består af milliarder af forbundne neuroner, der arbejder sammen for at løse komplekse opgaver. Selvom netværkene er store, bygger de på samme grundlæggende idé.

For at træne et neuralt netværk skal det "fodres" med data, som kan være alt fra tekst og billeder til lyd, video eller katalytiske materialer, afhængigt af opgaven. Under træningen vurderer netværket sin egen præstation ved hjælp af en "fejl-funktion", der måler, hvor tæt netværkets svar er på det korrekte svar. Netværket justerer derefter sine forbindelser for at forbedre sig, og denne proces gentages igen og igen, indtil det opnår den ønskede nøjagtighed.

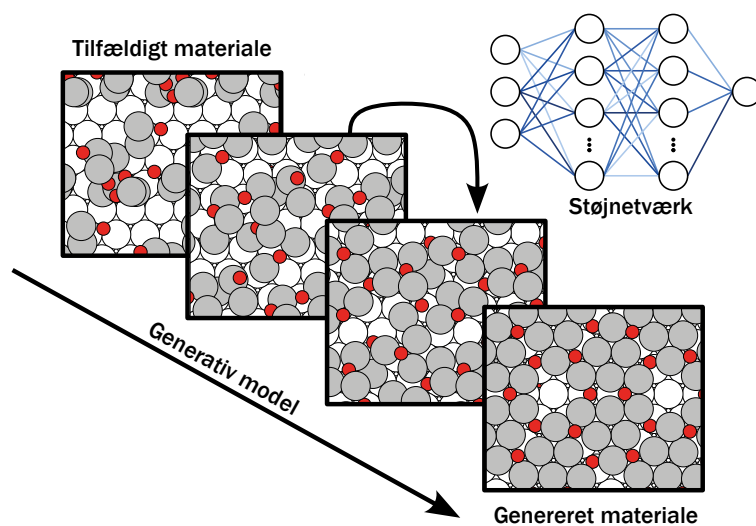
Som et eksempel: Inden vi begynder at regne på, om en given overflade er en god katalysator, ja så skal vi først undersøge, om overfladen overhovedet er stabil nok til, at det vil være muligt at syntetisere den i et laboratorium. I naturen eller i laboratoriet dannes materialer spontant i strukturer med lav energi, så stabile strukturer er her strukturer, der har en lavere energi end andre mulige strukturer. Også i denne sammenhæng har det vist sig nyttigt at beskrive materialer som grafer. I et såkaldt graf-neuralt netværk lærer AI-modellen, hvordan atomer i grafen vekselvirker med sine naboer. Netværket lærer

ved, at hvert atom "snakker" med sine naboatomer og udveksler information om, hvilke typer atomer de er, og hvordan de er forbundet. Forestil dig, at hvert atom sender beskeder om sine egne egenskaber til de atomer, det er bundet til, og får beskeder tilbage om deres. Denne udveksling sker flere gange, og AI-modellen lærer dermed at forstå, hvordan atomerne interagerer i materialet som helhed.

Når AI-modellen først har lært disse mønstre, kan den forudsige energien for nye, ukendte materialer, næsten som om den har sin egen indbyggede fysikforståelse.



En database af materialer med tilhørende kvantemekaniske energier beskriver delvis energi-funktionen for materialerne. Energi-netværket kan lære at forudsige energien af materialerne på en brøkdel af den tid, som skulle bruges for at beregne den kvantemekaniske energi. Illustration: Nikolaj Rønne



Figuren viser princippet i at generere et nyt katalytisk materiale ved hjælp af en diffusionsmodel. Modellen starter med et tilfældigt materiale, som igennem et støj-netværk fjerner "støj" fra materialet, indtil det har genereret et materiale med optimale egenskaber. Illustration: Nikolaj Rønne

Idet vi her undgår at tage hensyn til alle de detaljer, der normalt kræves i kvantemekaniske beregninger, kan modellen gøre arbejdet langt hurtigere. Og for at sikre, at AI-modellen rammer plet, tester vi den på nye materialer og sammenligner resultaterne med de traditionelle kvantemekaniske beregninger. Det viser sig ofte, at AI-modellen kan være lige så nøjagtig som de traditionelle metoder.

### Fra forudsigelse til opdagelse

Men lad os gå et skridt videre. AI kan ikke kun hjælpe os med at forudsige energierne af kendte materialer – den kan også være med til at opfinde nye! Ligesom du kan bede en AI-model om at lave et billede af en by i fremtiden eller et portræt i en bestemt stil, kan vi bruge generativ AI til at skabe materialer med ønskede egenskaber.

I forbindelse med et forskningsop-

hold på University of Toronto, hvor også Nobelprismodtager Geoffrey E. Hinton er professor, har vi udviklet generativ AI til ikke blot at kunne generere billeder, men med samme grundlæggende teknologi, at kunne opfinde nye materialer. Den metode, vi har udviklet, er en såkaldt diffusionsmodel for materialer, som lærer at "rydde op" i materialernes struktur og optimere atomerne, så de placeres på bedre måder. Det kunne være måder, der giver en lavere energi – eller i det mere generelle tilfælde – måder, der forbedrer egenskaberne af materialet.

Forestil dig, at vi starter med et materiale, hvor atomernes placering er lidt tilfældig, næsten som om vi ser på et sløret billede. Diffusionsmodellen lærer at "fjerne støjen" ved gradvist at ændre atomernes placering, så de ender i en bedre struktur. Processen kan minde om at rydde op i et rod – modellen arbejder trin for trin og flytter atomer rundt, indtil de står i den mest fordelagtige konfiguration.

For at træne sådanne diffusionsmodeller bruger vi store mængder data om materialer, der ligner dem, vi ønsker at designe. Ud fra disse eksempler lærer AI-modellen at foreslå kombinationer og strukturer, som mennesker måske aldrig ville have tænkt på. Og det går langt hurtigere, end hvis vi skulle prøve os frem i laboratoriet. AI-modellen kan nemlig både foreslå nye materialer og teste deres egenskaber ved hjælp af andre AI-modeller. På den måde kan vi afprøve langt flere materialer, end det tidligere var muligt. Og vi kan opdage nye løsninger, som kan ændre måden, vi udvikler katalytiske materialer på.

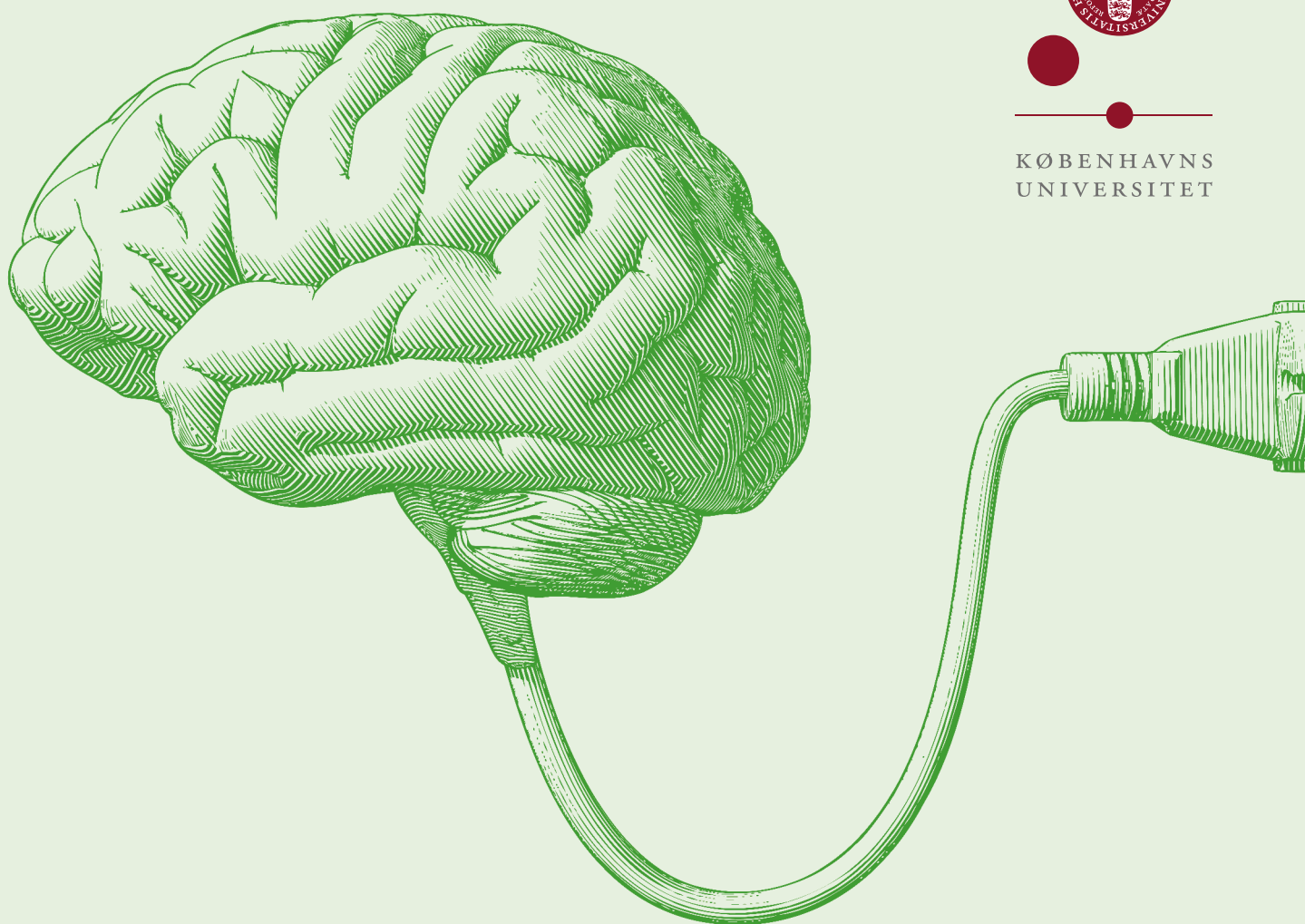
Al gør det muligt at tage et kæmpe spring fremad i materialeforskningen. Hvad vi tidligere brugte måneder – måske endda år – på at beregne og afprøve, kan nu gøres på få øjeblikke. Det åbner døren for en helt ny æra indenfor udviklingen af materialer med præcis de egenskaber, vi drømmer om. ■

**Videre læsning**  
Wenbin Xu, Karsten Reuter & Mie Andersen. Predicting binding motifs of complex adsorbates using machine learning with a physics-inspired graph representation. Nat. Comp. Sci. 2, 443 (2022); www.nature.com/articles/s43588-022-00280-7

Nikolaj Rønne, Alán Aspuru-Guzik & Bjørk Hammer. Generative diffusion model for surface structure discovery. arXiv preprint arXiv:2402.17404; arxiv.org/abs/2402.17404



KØBENHAVNS  
UNIVERSITET



# Inspirationsdag for gymnasielærere

Hør om den verdenskendte danske hygiejniker J.P. Müller som 1870'erne var arkitekten bag, at nøgenhed blev en del af det moderne oplysningsprojekt. Pensioneret professor fra Institut for Idræt og Ernæring Hans Bonde holder aftenforedraget på SCIENCES årlige Inspirationsdag for Gymnasielærere. Han fortæller om Müllers kropsrevolution og også om, hvorfor Bonde selv mener, man ikke kan skabe et nyt samfund med en gammel krop.

Om formiddagen kan du blandt andet høre om en helt ny rodtunnel, som kan give forskerne indblik i dybe rødders liv og om at bruge satellitfotos og kun-

stig intelligens til at overvåge verdens skove. Senere er der hands-on workshops med så forskellige emner som Van der Waals kræfter, Novo Nordisk Quantum Computing Programme, Statistikkens anvendelser og faldgruber, multivariat dataanalyse på fødevarer og meget mere.

Vi slutter dagen af med en middag. Inspirationsdagen finder sted **d. 31. januar 2025**.

Deltagelse er gratis, og tilmelding sker efter først til mølle-princippet. **Tilmeldingen åbner 5. december.**

Se programmet og tilmeld dig på

[science.ku.dk/inspirationsdag](https://science.ku.dk/inspirationsdag)

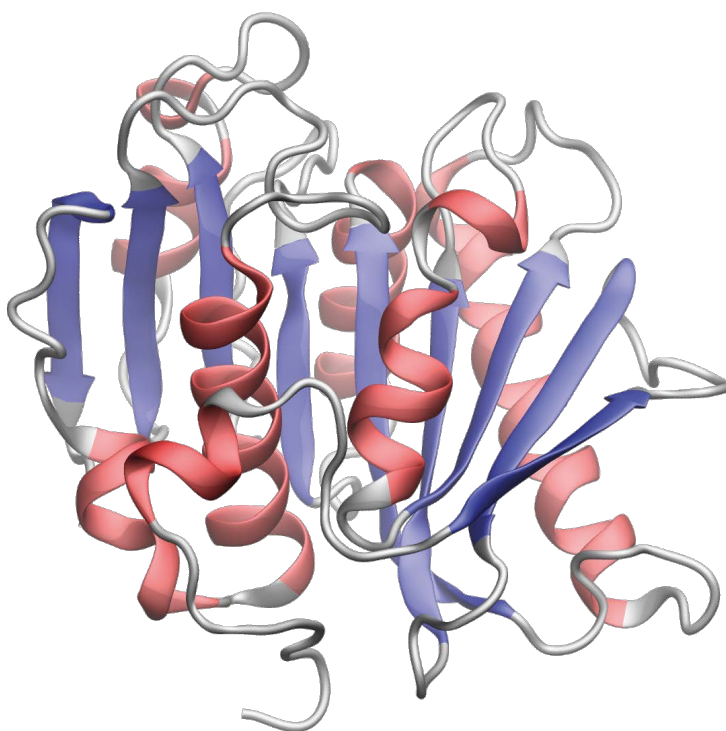
# BIOLOGISK KODEBRYDNING

## Kunstig intelligens fik has på proteinfoldningsproblemet

Proteiners funktion hænger nøje sammen med deres tredimensionelle struktur, som igen er dikteret af proteinets aminosyresekvens. At forudsige proteiners struktur ud fra deres aminosyresekvens har dog vist sig at være en næsten umulig nød at knække. Men årets nobelpristagere i kemi fik brudt koden.

**D**en 9. oktober i år er der en konference om proteiner på Københavns Universitet. Cirka kl. 12 går der et gisp gennem salen: Det annonceres, at Nobelprisen i kemi 2024 går til David Baker for databaseret proteindesign samt til Demis Hassabis og John Jumper for proteinstrukturforudsigelse. "De har knækket koden for proteiners fantastiske strukturer", står der i pressemeddelelsen. Men hvorfor skal vi være interesserede i, hvilke krøller og knuder der slås på de millioner af nanometer-store molekyler i dit, mit, din kats og din stueplantens indre?

I hverdagen møder du nok mest proteiner på forsiden af farverige indpakninger i supermarkedet, der, berettiget eller ej, praler af at være "high in protein". Proteinene har indtaget scenen i supermarkedet, i fitnesscenteret og på sociale medier. Du er måske endda en smule træt af at høre om dem. Årets nobelpris er en perfekt anledning til at fortælle om, at proteiners rolle for liv ikke blot er en historie om æg, bønner og skyr.



De fleste proteiner er cirka 5 nm (0,000005 mm) i diameter, og der er cirka 20.000 forskellige slags i menneskekroppen. Her ses en PETase, altså et enzym der kan nedbryde plastik. PETase blev opdaget i bakterier fra en japansk losseplads.

Når du trækker vejret, når bladene på træerne forgyldes og forgår, når du drømmer om natten, er det proteiner, der spiller en central rolle. Lange kæder af DNA indeholder opskriften på, hvilke proteiner der skal laves, og hvordan de skal se ud. Proteinerne er altså en slags molekylære maskiner, der indgår i et væld af biologiske processer.

### Struktur og funktion hænger sammen

Proteiner kan have mange forskellige former og størrelser, og lige præcis deres struktur er interessant, fordi den er tæt forbundet med deres rolle i organismen. Når du bøjer din arm eller rynker på næsen, så er det lange filamenter af proteinerne myosin og aktin, der

#### Om forfatterne



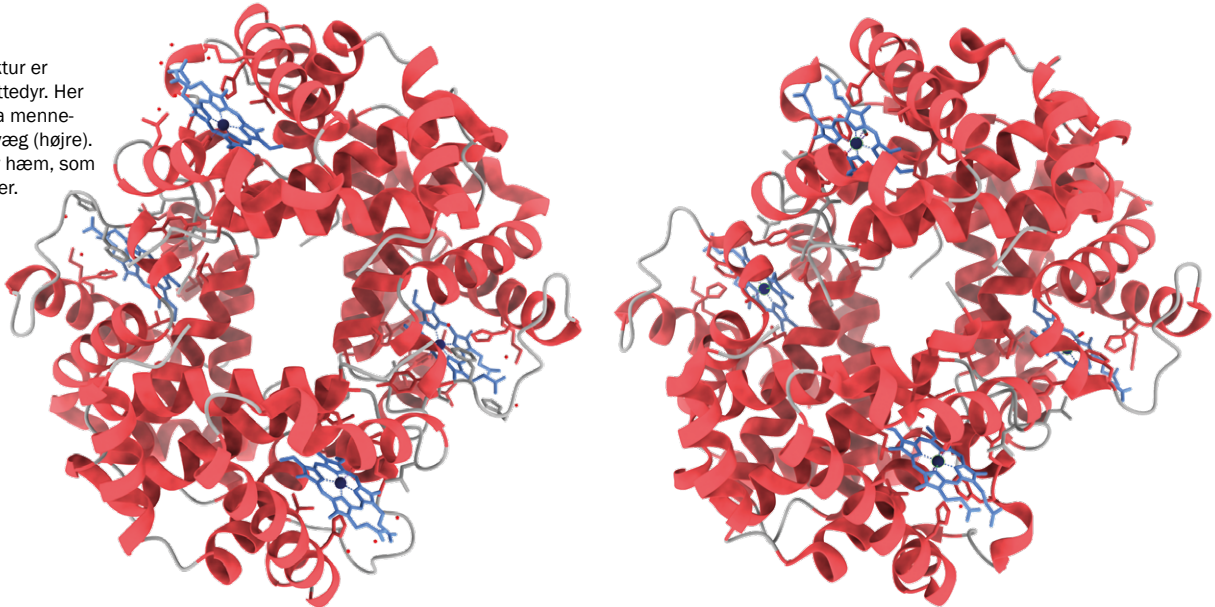
Anna Ida Trolle studerer biokemi på Københavns Universitet, hvor hun også forsker i proteiners struktur og dynamik. [anna.ida.trolle@bio.ku.dk](mailto:anna.ida.trolle@bio.ku.dk)



Kresten Lindorff-Larsen er professor ved Linderstrøm-Lang Centret for Proteinvidenskab, Biologisk Institut, Københavns Universitet. Han underviser og forsker i proteinstruktur, dynamik og design. [lindorff@bio.ku.dk](mailto:lindorff@bio.ku.dk)



Hæmoglobins struktur er velkonservet i pattedyr. Her ses hæmoglobin fra mennesker (venstre) og kvæg (højre). De blå molekyler er hæm, som koordinerer jernioner.



rer denne mutation, er der cirka 25 % sandsynlighed for, at deres barn vil mangle en aminosyre på position 508 i begge af deres kopier af proteinet Cystic Fibrosis Transmembrane conductance Regulator (CFTR). CFTR understøtter transporten af vand og kloridioner i lungeceller. Manglen på aminosyre 508 medfører sygdommencystisk fibrose, og betyder, at der over tid opbygges slim i lungerne, hvilket fører til vejrtrækningsproblemer og gentagne lungeinfektioner. Den forventede levealder med cystisk fibrose er 40-50 år i Danmark. Vores forståelse af proteinstruktur er altså bogstaveligt talt livsvigtig.

### Et tilsyneladende uløseligt problem

Vi skal tilbage til Anfinsens hypotese. Hvis alle proteiners struktur er 100 % forudbestemt af deres aminosyresekvenser, så må det være muligt at *forudsige* et proteins 3D-struktur. Solen går ned over det 20. århundrede, computere bliver stærkere og erfaringerne større, men "proteinfoldningsproblemet", som det blev kaldt, forblev uløst. Datamangel kan man ikke klage over: Siden 1971 er over 200.000 eksperimentelt bestemte proteinstrukturer blevet deponeret i databasen Protein Data Bank (PDB) sammen med deres aminosyresekvens.

Det er heller ikke af mangel på vilje eller anstrengelse; proteinernes grammatik er tåget og uklar, selv for avancerede AI-modeller, der kan fin-

de mønstre i de mindste sammenhænge. Hvert andet år, i over 20 år, konkurrerer forskningsgrupper fra hele verden ved eventet CASP (Critical Assessment of Structure Prediction) i at skabe modeller, der kan løse proteinfoldningsproblemet. I 1994 kan den bedste model forudsige en proteinstruktur med cirka 48 % nøjagtighed, når man sammenligner aminosyrernes position i forhold til en eksperimentel struktur.

Eksperimentelle metoder som røntgenkrystallografi kan bryste sig med mere end 90 % nøjagtighed. I 2002 nåede man op på omkring 58 %, og ti år senere opnår den vindende model 59 % nøjagtighed. Der er lang vej til en nogenlunde pålidelig model, hvis hvert procentpoints forbedring kræver ti års benhård konkurrence mellem nogle af de bedste forskere i verden.

### AlphaFold slår alle konkurrenter af banen

Endnu værre er det, hvis man kigger på modellernes præstation i at forudsige svære proteinstrukturer. CASP-konkurrencen har forskellige kategorier af sværhedsgrad. I den lette ende kan alle være med, alle modeller gennem årene kan forudsige en proteinstruktur med 80-90 % nøjagtighed. Men i den svære ende ligger forudsigelserne helt nede på mellem 20 og 40%.

Man kunne begynde at tro, at proteinfoldningsproblemet er uløseligt. Men i 2018 sker der et kvante-

spring. Googles AI-laboratorie, DeepMind, anført af Demis Hassabis og John Jumper, melder sin ankomst i konkurrencen med en model så overlegen, at den slår ned som et lyn fra en klar himmel. To år efter, til den 14. CASP-konkurrence i 2020, gør de det igen, og denne gang er deres model så god, at proteinfoldningsproblemet erklæres for løst.

Modellen kaldes for AlphaFold2, og det er for denne præstation, at Hassabis og Jumper modtager Nobelprisen i kemi i 2024. AlphaFold2 kan forudsige gigantiske proteinstrukturer helt ned til atomar præcision og er altså i mange tilfælde konkurrencedygtig med klassiske laboratoriemetoder, såsom røntgenkrystallografi. Forskellen er, at det kan tage årevis at kortlægge et protein i laboratoriet. Med AlphaFold2 tager det kun få minutter, og det kan foretages af alle med en internetforbindelse. Det betyder, at hvis forskere kan nøjes med en god model, kan de springe det komplicerede laboratoriearbejde over. Og hvis de går i laboratoriet kan de bruge AlphaFold-modellen som hjælp i deres arbejde.

### Fra proteinsfoldningsproblem til proteindesign

AlphaFold blev den endelige sammensvejsning mellem proteiners aminosyresekvens og struktur. Men hvis man kan forudsige proteinstruktur fra sekvens, er det så også muligt at gå den anden vej – altså udtænke et protein og så generere

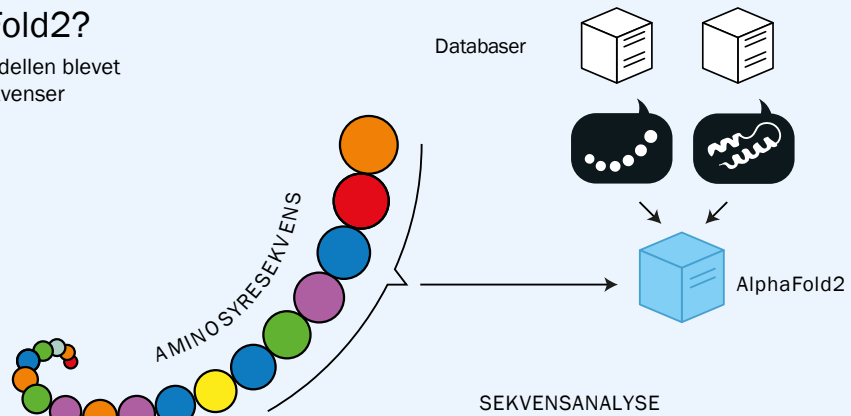


# Hvordan virker AlphaFold2?

I udviklingen af AlphaFold2 er AI-modellen blevet trænet på alle kendte aminosyresekvenser og proteinstrukturer.

## 1. DATA-INPUT OG DATABASE-SØGNINGER

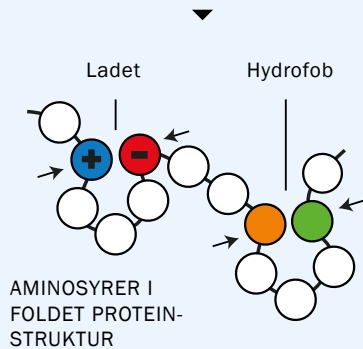
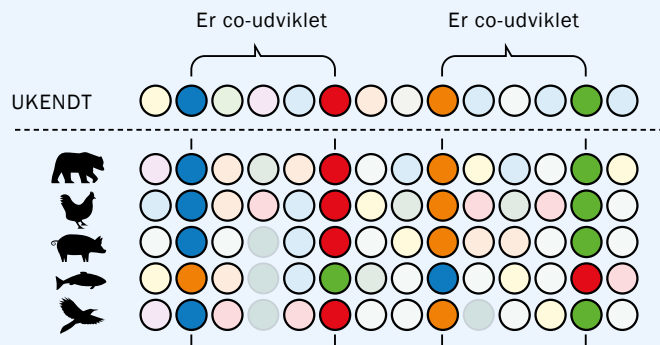
En aminosyresekvens med ukendt struktur fødes ind i AlphaFold2, som søger i databaser efter lignende aminosyresekvenser og kendte proteinstrukturer.



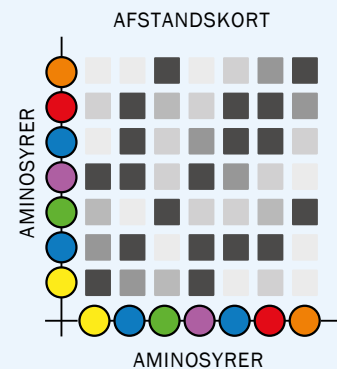
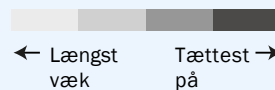
## 2. SEKVENSANALYSE

AI-modellen sammenligner de fundne aminosyresekvenser – ofte fra forskellige arter – og undersøger, hvilke dele af sekvensen der er bevaret gennem evolutionen.

I næste trin undersøger AlphaFold2, hvilke aminosyrer der kan vekselvirke med hinanden i den tredimensionelle proteinstruktur. Vekselvirkende aminosyrer co-udvikles. Hvis den ene er ladet, har den anden den modsatte ladning, så de tiltrækker hinanden. Hvis den ene udskiftes med en vandskyende (hydrofob) aminosyre, bliver den anden også hydrofobisk.



Ud fra analysen producerer AlphaFold2 et afstandskort, der estimerer hvor tæt aminosyrer er på hinanden i proteinstrukturen.

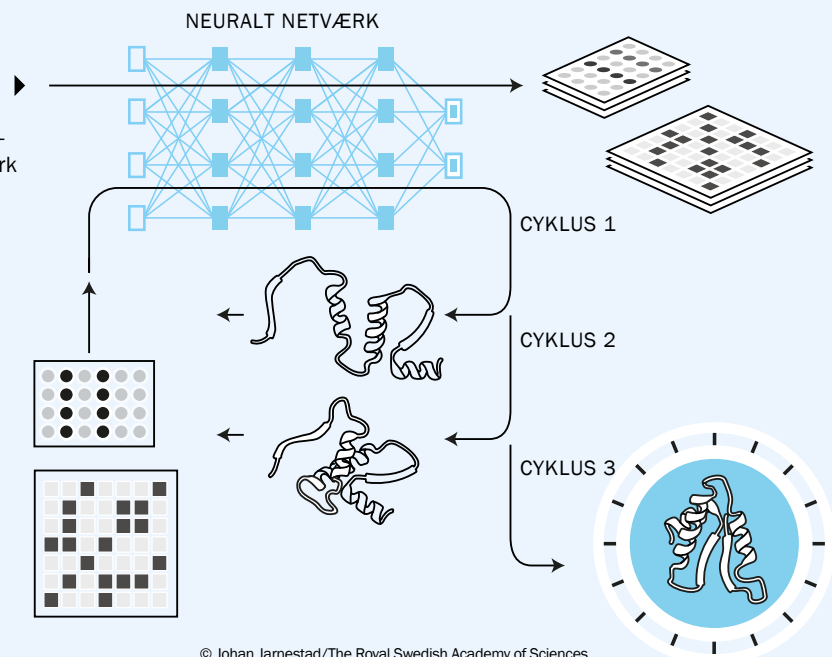


## 3. AI-ANALYSE

Ved at bruge en iterativ proces forfiner AlphaFold2 sekvensanalysen og afstandskortet. AI-modellen bruger neurale netværk kaldet transformers, som er i stand til at identificere vigtige elementer at fokusere på. Data om andre proteinstrukturer – hvis sådanne blev fundet i trin 1 – udnyttes også i den forbindelse.

## 4. HYPOTETISK STRUKTUR

AlphaFold2 sammensætter puslespillet af alle aminosyrerne og tester veje til at producere en hypotetisk proteinstruktur. Dette gentages gennem trin 3. Efter tre cyklusser når AlphaFold2 frem til en bestemt struktur. AI-modellen udregner sandsynligheden for, at forskellige dele af denne struktur svarer til virkeligheden.



© Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

## Fold selv proteiner med AlphaFold

På Aktuel Naturvidenskabs hjemmeside kan du finde en beskrivelse af, hvordan du selv kan folde proteiner med ColabFold, som er en online-version af AlphaFold. Med ColabFold kan enhver bruge AlphaFold uden at installere hele AlphaFold-programmet på egen computer. Alt, du skal bruge, er: En pc, en Google-konto og en internetforbindelse.

## Videre læsning

“New AI Tools Predict How Life’s Building Blocks Assemble” af Yasemin Saplakoglu, Quanta Magazine: [www.quantamagazine.org/new-ai-tools-predict-how-lifes-building-blocks-assemble-20240508](http://www.quantamagazine.org/new-ai-tools-predict-how-lifes-building-blocks-assemble-20240508)

“How AI Revolutionized Protein Science, but Didn’t End It” af Yasemin Saplakoglu, publiceret i Quanta Magazine: [www.quantamagazine.org/how-ai-revolutionized-protein-science-but-didnt-end-it-20240626](http://www.quantamagazine.org/how-ai-revolutionized-protein-science-but-didnt-end-it-20240626)

Nobelpriskomiteens populærvidenskabelige artikel om årets nobelpris i kemi: MLA style: Popular information. NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach AB 2024. Mon. 18 Nov.

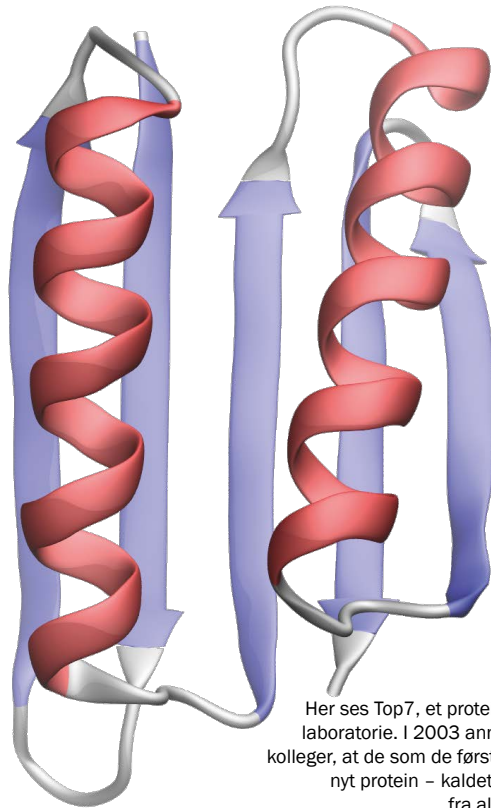
Jumper, J., Evans, R., Pritzel, A. et al. Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold. *Nature* 596, 583–589 (2021).

Watson, J.L., Juergens, D., Bennett, N.R. et al. De novo design of protein structure and function with RFdiffusion. *Nature* 620, 1089–1100 (2023).

Brian Kuhlman et al., Design of a Novel Globular Protein Fold with Atomic-Level Accuracy. *Science* 302, 1364–1368(2003).

Mirdita, M., Schütze, K., Moriwaki, Y. et al. ColabFold: making protein folding accessible to all. *Nat Methods* 19, 679–682 (2022).

Tesei, G., Trolle, A.I., Jonsson, N. et al. Conformational ensembles of the human intrinsically disordered proteome. *Nature* 626, 897–904 (2024).



Her ses Top7, et protein designet i David Bakers laboratorie. I 2003 annoncerede David Baker og kolleger, at de som de første havde frembragt et helt nyt protein – kaldet Top7 – som var forskellig fra alle andre kendte proteiner.

aminosyresekvensen, der skal til for at opnå en forudbestemt struktur?

Her kommer David Baker ind i billedet. Baker er, lige så vel som Jumper og Hassabis, en pioner indenfor proteinfoldning. Hans bidrag til løsningen af proteinfoldningsproblemet er imponerende nok, men hans pragtpræstationer finder man inden for feltet *proteindesign*. Allerede i 2003 lykkedes han med at designe, og folde, et fuldstændigt nyt protein. I 2008 præsenterer han to nye enzymer for verden, og siden er tusindvis af nye proteiner materialiseret fra Bakers laboratorie. Bakers proteiner kan mere end at folde sig sammen til en forudbestemt tredimensionel struktur: De bruges i alt fx nanomaterialer, vacciner, og lægemidler.

Baker, Hassabis og Jumper fortjener Nobelprisen. David Baker er en af proteindesignets *Grand Old Men*, og Hassabis og Jumper er centrale figurer i AlphaFolds udvikling. Dog kan Nobelprisen og dens sagnomspundne uddelingsceremoni bidrage til en opfattelse af, at videnskabelige opdagelser er produktet af få, ensomme genier. Men vi må ikke glemme, at fremskridt, i sær-

deleshed i naturvidenskab, er resultater af et verdensomspændende, vedvarende samarbejde.

Artiklen, der først beskrev AlphaFold, blev publiceret i *Nature* i 2021 og har 34 forfattere. Machine learning-modeller, såsom AlphaFold, kan ikke blive bedre end det data, de er trænet på. Det har taget tusindvis af forskere millioner af timer at oprense og karakterisere de proteiner, der danner grundlag for modellens hidtil usete nøjagtighed. Det er altså ikke spildt arbejde, og ikke blot fordi mængden af data kan bruges til at træne AI.

## Hjælp fra fysikkens love

Proteinfoldningsproblemet har i virkeligheden to facetter. Hverken AlphaFold eller David Bakers proteindesign besvarer centrale spørgsmål om, *hvordan* proteiner folder, som de gør. Mange sygdomme, herunder cystisk fibrose, opstår fra fejl i foldningsprocessen. Derfor er lyset stadig tændt i de mange laboratorier rundt omkring i verden, der forsker i biokemi.

De til stadighed åbne spørgsmål vedrører også især en gruppe proteiner, der slet ikke folder sig

sammen i et ordnet garnnøgle, men i stedet veksler mellem et utal af strukturer. Disse “uordnede proteiner” udgør cirka en tredjedel af proteinerne i menneskekroppen og er især relevante for sygdomme som Alzheimers og Parkinsons. De er besværlige at studere i laboratoriet, og det betyder, at der er mangel på data, og at AlphaFold2 derfor ikke kan forudse deres strukturer. Vi må derfor gå anderledes til værks.

På Københavns Universitet arbejder vi med at kombinere eksperimenter med computersimuleringer. I stedet for at bruge kunstig intelligens, som betinger en stor mængde træningsdata, kan man i stedet antage, at aminosyrerne i en proteinkæde følger fysikkens love og derefter lade en computer udregne, hvordan proteinet vil foldes. Med denne metode har vi for nylig sammen med vores kolleger studeret alle uordnede proteiner hos mennesker og fundet nye sammenhænge mellem struktur og funktion.

## Flere nobelpriser på højkant

De seneste 75 år har budt på enorme fremskridt indenfor både strukturel biologi og computervidenskab. Årets nobelpris i kemi afspejler, at kunstig intelligens ikke kun er til for, at ChatGPT kan lave dine lektier. Det er værd at nævne, at nobelprisen i fysik i år gik til John Hopfield og Geoffrey Hinton, der deler prisen for deres bidrag til feltet machine learning. Dette faktum, kombineret med at CASP-konkurrencen skulle afholdes i over to årtier inden et gennembrud, demonstrerer, at det altså ikke er lutter lagkage at udvikle machine-learning-modeller.

Næste gang du er ude at handle og ser en bøtte skyr eller en proteinbar, så lad det minde dig om, at der inde i dig foregår et dramatisk, men ordnet virvar af kemiske reaktioner mellem hundredtusindvis af molekyler. Vi forstår dem bedre nu, end vi gjorde før Baker, Hassabis og Jumper, men der er stadig nobelpriser på højkant. Og mon ikke flere af dem vil gå til forskning, der opstår i krydsfeltet mellem menneskelig og kunstig intelligens. ■



**u-days**  
uddannelser med  
muligheder

Kom og oplev din kommende  
uddannelse til u-days

**20.-22. februar 2025**

Pratik Shah i laboratoriet, hvor han betragter prøver med fluorescerende molekyler. Foto: RUC

# NY TEKNOLOGI BRUGER DNA SOM SPION I CELLEN

**Såkaldt mikro-RNA spiller en vigtig rolle i mange processer i vores celler, herunder i udviklingen af forskellige sygdomme. Med en ny teknologi, der udnytter en kombination af særlige DNA-strukturer og nanoklynger af sølv, kan man nu følge sådanne mikro-RNA-molekyler direkte i levende celler.**



## Om forfatteren

Pratik Shah er adjunkt ved Institut for Naturvidenskab og Miljø, Roskilde Universitet. Han forsker i at bruge DNA til at bygge simple værktøjer, som kan registrere og respondere på ændringer i dets omgivelser. Det overordnede mål er at skabe biosensorer, der kan bruges til mange forskellige formål. Forskningen er tværvideenskabelig og integrerer viden fra biolog, kemi og nanoteknologi.  
shah@ruc.dk

**R**NA-molekyler spiller en vigtig rolle i udviklingen af alvorlige sygdomme som kræft. Derfor kan de potentielt hjælpe os med at afsløre, om en person har kræft, og hvordan sygdommen vil udvikle sig. Så hvis vi vil vide, om en person har kræft, er det en god idé at se på RNA-molekylernes adfærd i celler.

Udfordringen er dog, at vi i dag er nødt til at isolere RNA'et fra cellen, hvis vi vil undersøge det. Men på den måde kan vi ikke afsløre, hvordan RNA'et reelt fungerer i cellen.

Et godt spørgsmål er derfor, hvordan vi kan se RNA'et på arbejde uden at isolere det?

Vores forskning viser, at svaret muligvis ligger i små klynger af sølvpartikler, der er indkapslet i DNA-sensorer. Vi har udviklet en teknologi, som gør det muligt at følge RNA'et i realtid i cellen og vise os det cellulære maskineri, der er involveret i udviklingen af alvorlige sygdomme.

Men før jeg forklarer, hvordan den nye teknologi fungerer, skal vi først have på plads, hvorfor RNA har så stor betydning.

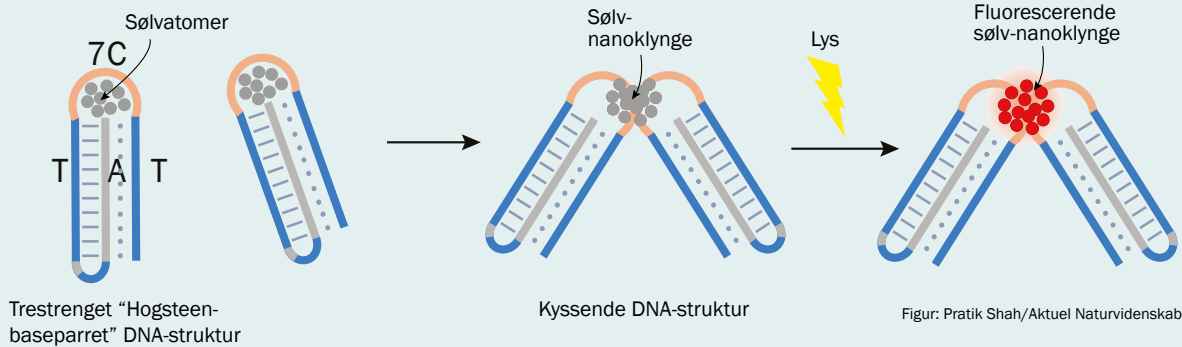
## Mikro-RNA påvirker udviklingen af sygdomme

RNA spiller en helt central rolle i cellen ved at bringe den genetiske kode for et protein, som den er lag-

ret i vores DNA, ud af cellekernen og hen til det molekylære maskineri (ribosomerne), som bygger proteinet ud fra denne opskrift. Dette messenger-RNA (som det kaldes) er typisk opbygget af tusindvis af byggesten (nukleotider). Der findes imidlertid også RNA, som kun er opbygget af 20-25 nukleotider og som har en anden funktion end messenger-RNA. Det kaldes mikro-RNA, og det spiller en vigtig rolle i reguleringen af vores gener.

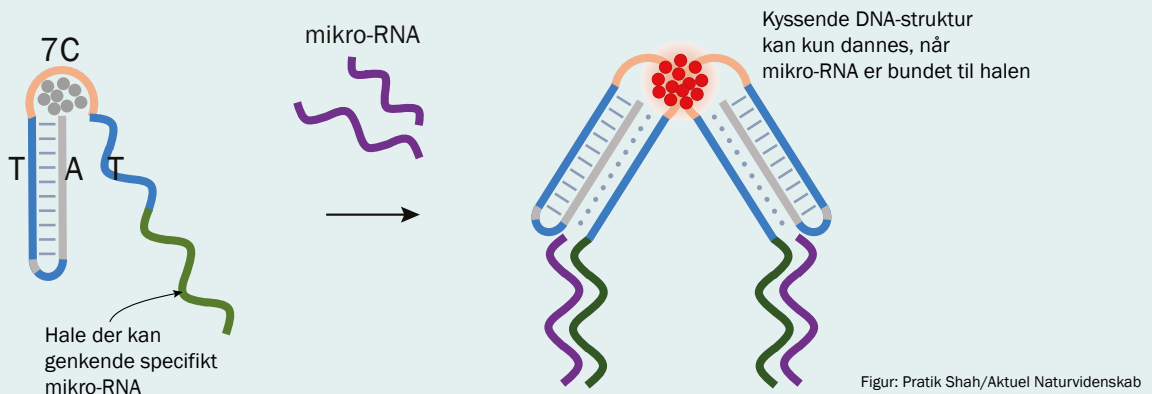
Mikro-RNA påvirker omkring to tredjedele af alle menneskets gener og spiller derfor med i mange forskellige biologiske processer i vores organisme – herunder udviklingen af sygdomme som kræft.

## Princippet i teknologien



Til venstre ses en trestrengtet DNA-struktur kaldet en Hoogsteen-baseparret trestrengtet DNA. Interaktionen mellem baserne thymin og adenin (A og T på figuren), er afgørende for, at en sådan trestrengtet struktur kan dannes. Sølvatomer kan binde sig til denne struktur via basen cytosin. Sølvatomer foretrækker at binde sig til netop denne

base, hvor sølvatomerne finder sammen med nitrogen- og oxygenatomer. I strukturen danner syv cytosin-baser tilsammen en lille lomme, som tillader sølvatomerne at finde sammen og danne sølv-nanoklynger. Når to sådanne strukturer kommer tæt på hinanden dannes en "kysende DNA-struktur" med en fluorescerende sølv-nanoklynge.



Til den trestrengtede DNA-struktur bliver der nu koblet en hale, der specifikt er designet til at genkende en bestemt type mikro-RNA. Kun når mikro-RNA har bundet sig til denne hale, kan to strukturer finde sammen og

danne en kysende DNA-struktur. Når man lyser på den kysende DNA-struktur, vil sølv-nanoklyngerne efterfølgende lyse op og afsløre, hvor i cellen strukturen – og dermed det undersøgte mikro-RNA – befinder sig.

Det er således dette mikro-RNA, vi gerne vil kunne studere, mens det udfører sin funktion i cellen.

Mikro-RNA-molekylerne bliver produceret på bestemte tidspunkter i løbet af en celledens liv, og de udfører deres funktion i bestemte dele af cellen. Og mikro-RNA'et er ikke statisk: Det bliver hele tiden dannet, bearbejdet, transporteret og nedbrudt i cellen.

Men når man isolerer RNA fra cellerne for at studere det (som vi gør i dag), går meget af informationen om dets liv i cellen tabt. Derfor er det vigtigt at kunne spore disse mikro-RNA-molekyler i cellerne uden at forstyrre selve cellen.

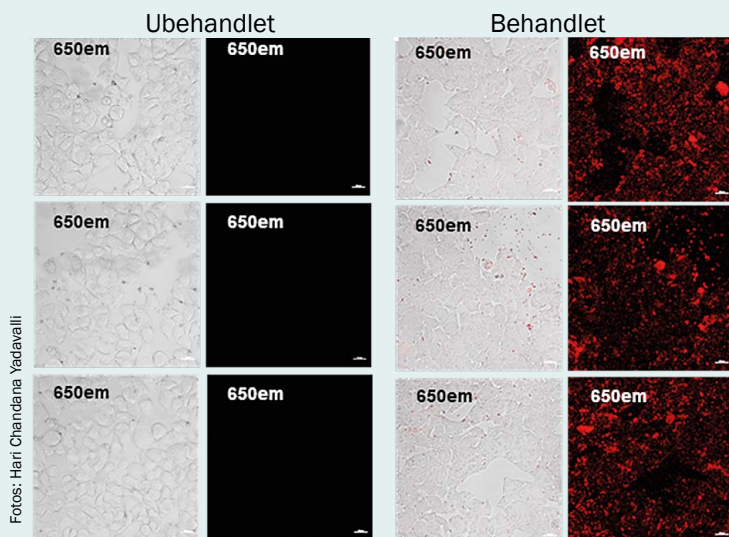
### DNA og sølv kan få RNA til at lyse op

I vores forskersteam har vi kombineret vores viden om DNA's biologi med viden om kemien bag fluorescerende nanomaterialer for at skabe en ny metode til at visualisere mikro-RNA-molekyler. Vores innovative teknologi benytter såkaldte "kysende DNA-strukturer", som er en særlig struktur, der opstår, når sølv-nanoklynger binder sig mellem DNA-molekyler.

Når nanoklynger af sølv er mindre end to nanometer, har de fluorescerende egenskaber. Det betyder, at de kan absorbere energi fra en lyskilde og udsende en del af denne energi igen som synligt lys.

Specifikt sker der det, at nogle af sølvnanoklyngernes elektroner bringes i en højere energitilstand ved belysningen, og der udsendes så lys (ved en længere bølgelængde), når elektronerne falder tilbage i deres grundtilstand. Det er en yderst nyttig egenskab, da sølvnanoklyngerne kommer til at virke som små lygter, der afslører, hvor den kysende DNA-struktur helt præcist befinder sig i cellen i realtid.

Til at lave den kysende DNA-struktur benytter vi specialdesignede DNA-strenger, der fungerer som et stillads. Når DNA-strengene kommer tæt på hinanden, danner de en stabil struktur, som sølv-nanoklynger kan binde sig til. Det sikrer, at



Billederne viser til højre celleprøver, der er behandlet med et kompleks af molekyler, der kan danne en kyskende DNA-struktur med fluorescerende sølv-nanoklynger, mens celleprøverne til venstre er ubehandlede. Alle celler blev også behandlet med lipofectamin, et stof, der hjælper med at bringe molekyler ind i cellerne, som tiltrækker et bestemt mikro-RNA (mikro-RNA-21) til den kyskende DNA-struktur. Celleprøverne er fotograferet med forskellige mikroskopiteknikker, der fremhæver henholdsvis cellerne (de grå billeder) og de fluorescerende sølvnanoklynger, som exciteres med lys med en bølgelængde på 594 nm og efterfølgende udsender rødt lys med en bølgelængde på 650 nm. Det ses, at de behandlede celler lyser rødt, hvilket viser at mikro-RNA-21 har bundet sig til halen på den kyskende DNA-struktur.

sølvnanoklyngerne ikke kan vokse sig større end to nanometer og dermed miste deres fluorescerende egenskaber.

Det er ikke første gang, at forskere har koblet DNA og sølv sammen, men det er nyt at bruge et special-designet DNA-stillads, som i vores metode, og det er netop det, der giver os mulighed for at visualisere RNA'et direkte i cellen.

Stilladset består af to DNA-strukturer kaldet "Hoogsteen baseparrede trestrengede DNA'er". Som navnet antyder består denne type DNA af tre strenge (og ikke to som normalt), og det er en struktur, der kun sjældent findes i naturen og kun i meget kort tid.

Sølvatomer kan binde sig til dette trestrengede DNA via cytosin, der er en af de fire DNA-byggesten. Når to sådanne strukturer med DNA og sølv-nanoklynger kommer tæt på hinanden, binder de sig til hinanden

i en unik "kyskende DNA-struktur", der samtidig skaber et optimalt miljø for dannelsen af de fluorescerende sølvnanoklynger. Når man lyser på disse sølvnanoklynger, udsender de rødt lys.

### Kan hjælpe os med at se mikro-RNA

Vi har i vores forskning opdaget, at vi kan forhindre dannelsen af den kyskende DNA-struktur, når vi tilføjer en hale til den trestrengede DNA-struktur. Denne hale er designet sådan, at den kan genkende mikro-RNA. Og når mikro-RNA binder sig til halen, ophæves blokeringen, så der kan dannes en kyskende DNA-struktur.

På den måde har vi skabt et værktøj, der kan bruges til at afsløre, hvor meget mikro-RNA, der er i cellen, og hvor det helt præcist findes – i realtid. Hvis vi designer halen, så den kan genkende en specifik type mikro-RNA, der er involveret i sygdom, kan vi altså afsløre, om

dette mikro-RNA er til stede i cellen.

Forskning har vist, at mikro-RNA'er blandt andet findes i mitokondrier (dvs. i de energiproducerende organeller i cellen) og muligvis spiller en rolle i hjerte-kar-sygdomme, Alzheimers sygdom og diabetes. Hvis vi skal udnytte det fulde diagnostiske potentiale ved mikro-RNA, er det derfor afgørende, at vi kan bestemme præcis, hvor det findes i cellerne.

Siden opdagelsen af mikro-RNA er der kun lavet få undersøgelser af, hvor det findes i celler, primært på grund af manglen på velegnede metoder. Det er derfor stadig uvist, om og hvordan mikro-RNA'ets tilstedeværelse i forskellige dele af cellen ændrer sig under henholdsvis normale forhold og under sygdom. Vores nye teknologi kan potentielt være en løsning på den udfordring.

### Sparer tid og penge

Der kendes i dag flere end 1000 mikro-RNA'er i menneskekroppen, og formentlig findes der langt flere. Vi mangler endnu at identificere de mest pålidelige mikro-RNA'er – eller sæt af mikro-RNA'er – der kan bruges til at diagnosticere sygdomme.

For sygdomme som kræft og sygdomme i hjernen, for eksempel Alzheimers, findes allerede mikro-RNA-biomarkører, der kan hjælpe med at opdage sygdommen tidligt, dog med den gamle metode, hvor man trækker RNA'et ud af cellen og mister meget information. Det skyldes både biologiske og teknologiske problemer.

På teknologisiden kræver de nuværende metoder til at opdage isolerede mikro-RNA'er mange trin, komplekse processer og dyre materialer. Til sammenligning er vores metode meget mere enkel og reducerer behovet for avanceret udstyr, dyre materialer og komplicerede processer betragteligt.

Mens det tager flere timer at bruge vores teknologi til at opdage mikro-RNA'er direkte i levende celler,

tager det kun 30 minutter at bruge den til at identificere isolerede mikro-RNA'er. Ved først at bruge teknologien til at følge RNA'ets liv direkte i levende celler, kan vi blive klogere på mikro-RNA'ernes biologi og hvilke af dem, der kan være pålidelige biomarkører for sygdomme. Den viden kan efterfølgende bruges på isolerede mikro-RNA'er fra menneskeligt væv og forhåbentlig dermed bidrage til at diagnosticere alvorlige sygdomme tidlige.

### En metode, der kan bruges til mange ting

Vi har i vores forskning vist, at vi kan ændre, hvordan sølvnanoklynger lyser, alt efter hvordan DNA er opbygget. Og det giver os nye muligheder for at bruge DNA til at finde andre biomarkører i celler end RNA.

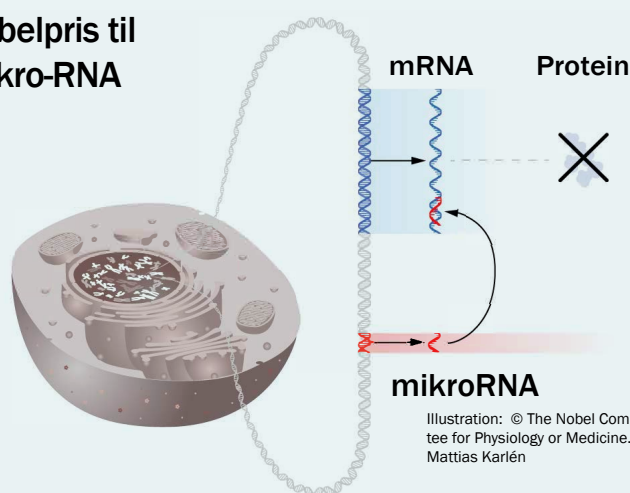
Vi har således i et andet studium brugt kombinationen af DNA og nanoklynger af sølv til at detektere reaktive oxygenforbindelser i cellerne. Reaktive oxygenforbindelser (for eksempel frie radikaler) er meget reaktive molekyler, der kan gøre betydelig skade på celler og væv.

Sådanne forbindelser er naturligt til stede i cellerne, hvor deres skadelige virkninger neutraliseres af antioxidant. Men hvis balancen forrykkes, fordi der dannes for store mængder reaktive oxygenforbindelser, kan det føre til såkaldt oxidativt stress. Og det kan være tegn på sygdomme som kræft, diabetes og neurodegenerative sygdomme som Alzheimers og Parkinsons sygdom.

Derfor er det vigtigt at kunne monitorere koncentrationen af reaktive oxygenforbindelser i cellerne. Og det er netop det, man vil kunne bruge vores teknologi til.

Alt i alt viser vores forskning, at DNA ikke bare er interessant, fordi det bærer på den arvelige genetiske information: Det kan også bruges som en biologisk kompatibel spion til at monitorere processer i vores celler. ■

## Nobelpris til mikro-RNA

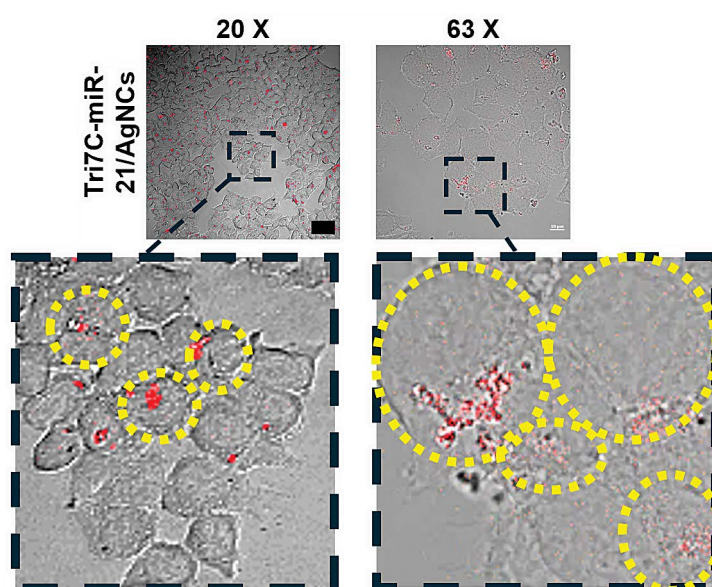


Årets Nobelpris i fysiologi eller medicin er meget relevant i forhold til den artikel, du netop nu sidder og læser. Nobelprisen blev nemlig givet til de to amerikanere Victor Ambros and Gary Ruvkun for opdagelsen af mikro-RNA og dets rolle i at regulere, hvordan generne kommer til udtryk.

Før opdagelsen af mikro-RNA var det kendt, at såkaldte transkriptionsfaktorer kunne binde sig til DNA og derved være med til at regulere, hvilke gener der bliver transkriberet (afkodet) til messenger-RNA og efterfølgende udtrykt som protein i cellen.

Opdagelsen afslørede en hel ny dimension i genreguleringen, idet mikro-RNA udøver sin funktion på et senere stadie i denne oversættelsesproces ved at binde til den komplementære sekvens på messenger-RNA. Når det sker, vil det typisk medføre, at proteinproduktionen forhindres, eller at det markerede messenger-RNA bliver nedbrudt.

Kilde: [www.nobelprize.org](http://www.nobelprize.org)



Figuren viser øverst billeder af celleprøver ved to forskellige forstørrelser, hvor man ser rød fluorescens fra kysende DNA-strukturer. Dette afslører tilstedeværelsen af specifikt mikro-RNA (mikro-RNA21). Nedenfor ses forstørrede udsnit af disse billeder, hvor de gule cirkler markerer grænserne for celler med forstærkede signaler.

Fotos: Hari Chandana Yadavalli

Artiklen er en redigeret udgave af artiklen *Ny teknologi bruger sølv til at få RNA til at lyse op i levende celler*, som oprindeligt er skrevet til Videnskab.dk

**Videre læsning**  
Forskningen omtalt i artiklen er publiceret i: H. C. Yadavalli et al: Tailed-Hoogsteen Triplex DNA Silver Nanoclusters Emit Red Fluorescence upon Target miRNA Sensing. *Small* 2024, 20, 2306793. doi.org/10.1002/smll.202306793

H. C. Yadavalli et al: Energy Transfer Between i-Motif DNA Encapsulated Silver Nanoclusters and Fluorescein Amidite Efficiently Visualizes the Redox State of Live Cells. *Small* 2024, 20, 2401629. doi.org/10.1002/smll.202401629



# HVIS DU KLØR PÅ, KAN DU MERE END DU TROR

Foto: Morten Mossin Madsen

**Isa drømte om at blive biolog, men havde kun matematik på B-niveau og var i øvrigt fuldstændigt flad efter gymnasiet. I dag har hun sit drømmejob som biologisk formidler på Kattegatcentret.**



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

**N**år Isa klipser sin mikrofon på plads og stiller sig op foran de store glasvægge for at fortælle om de mange fiske- og hajarter, der svømmer rundt bag hende, kan dagens gæster være alt lige fra en børnehave til en gymnasieklasse eller en firma-udflugt.

Hun skal kunne formidle til alle målgrupper, og det er hendes ansvar, at den information, hun giver videre, er rigtig, relevant og alderssvarende.

»Det er noget af det, jeg lærte på universitetet, som jeg bruger meget i mit job i dag: at være kildekritisk og at vide, hvordan jeg kan tilegne mig viden. Jeg skal være sikker på, at det, jeg siger, er i orden«.

Isa beskriver sit job som et drømmejob, og når hun kigger tilbage på sin studietid, er hun glad for, at hun valgte biologistudiet. Men sådan har det ikke altid været.

»Jeg tvivlede i lang tid på, om jeg havde valgt rigtigt, da jeg startede på universitetet. Det første år havde

jeg mange tanker om at droppe ud og tænkte, at hvis jeg dumpede de første eksamener, ville jeg ikke fortsætte«.

## **Matematikken er ikke en dræber**

Der var især en grund til, at Isas studiestart var tyngt af bekymring, selvom hun fra barnsben havde drømt om at blive biolog. Hun var udmattet efter gymnasiet, som hun oplevede som utroligt hårdt. Helt flad og mørbanket var hun, og ikke engang et sabbatår på højskole kunne dulme hendes bekymring for,



om universitetet ville blive meget hårdere end gymnasiet.

»Jeg var dårlig til matematik og havde kun matematik B i gymnasiet, og jeg skulle jo have matematik på A-niveau for at søge ind på biologi. Så jeg tog et seks ugers intensivt kursus, og det blev seks hårde uger. Min mor var helt bekymret for, om jeg kunne holde til det, men jeg klarede det, fik 4 og 7 og kunne starte på Biologi,« fortæller Isa. Frygten for, at matematik ville blive en dræber på universitetet, forsvandt, da hun opdagede, hvordan matematikken blev håndgribeligt anvendelig. Hun fandt også ud af, at hun kun skulle bruge den del af matematikken, som var relevant for hende som biologistuderende – for eksempel statistik.

»Jeg vil gerne sige til andre, at de skal ikke lade sig bremse af at være udfordret af matematik,« siger hun. I det hele taget blev universitetsstudiet ikke så hårdt, som Isa havde frygtet:

»Hvis man klør på, kan man mere, end man lige tror, og folk er gode til at hjælpe hinanden på studiet.«

### Fisk og formidling

I drømmejobbet på Kattegatcentret er det ikke kun de daglige besøgshold, som Isa

## Om Isa

Isa Calmar er 30 år gammel. Hun gik på Svendborg Gymnasium, hvorfra hun dimitterede som naturvidenskabelig student i 2014. Efter et sabbatår – og et lynkursus i matematik, der løftede hende fra B- til A-niveau – startede hun på biologiuddannelsen på Syddansk Universitet i 2015.

Isa skrev speciale om formidling om bæredygtig ressourceudnyttelse af tang i samarbejde med Kattegatcentret og blev kandidat i 2020.

Hun arbejder i dag på Kattegatcenteret.

ic@kattogatcentret.dk

har ansvar for at formidle korrekt viden til. Hun indgår også som biologifaglig ekspert i det udstillings-team, der står for centrets "døde udstillinger", altså de udstillinger, der ikke involverer levende dyr. Skoletjenesten sluger også en del timer, og når der er ekstra run på el-ler sygdom, skal Isa ligeledes være forberedt på at blive spurgt, om hun lige kan tage en fodring eller en rundvisning.

»Man skal være klar på lidt af hvert, hvis man arbejder her, siger hun og lader samtidig forstå, at det er på den gode måde og ikke stressende for hende.«

Jobbet er Isas drømmejob, fordi hun både kan arbejde med fisk og formidling. Hun fik sit første akvarie i julegave, da hun var 11 og blev straks bidt af det. Hun begyndte hurtigt at eksperimentere med forskellige biotoper og avancerede ret hurtigt til et 250 liters akvarium. Lige siden har fisk haft en særlig plads i hendes hjerte.

»Og det med at formidle: det er så fedt at fortælle andre om noget, som jeg selv synes, er fedt. At give begejstringen videre til andre! Det var noget, jeg også opdagede på studiet og blev optaget af.« ■

# Kom til Science Camp

## på Syddansk Universitet i Odense

Science Camp 8.-9. marts 2025 består af to dage, hvor du møder undervisere og studerende. Gennem oplæg, øvelser og forsøg kommer du tættere på dit studievalg og får indblik i, hvad det vil sige at være studerende.

### Vælg mellem fem workshops:

#### Astro- og rumfysik

For dig der er interesseret i Fysik

#### Fra idé til virkelighed

For dig der er interesseret i Farmaci, Kemi og Medicinalkemi

#### Ai og cybersikkerhed - matematikken bag kryptering

For dig der er interesseret i Datalogi, Matematik og Kunstig intelligens

#### Bidt af havet

For dig der er interesseret i Biologi

#### CRISPR-genredigering i personlig medicin

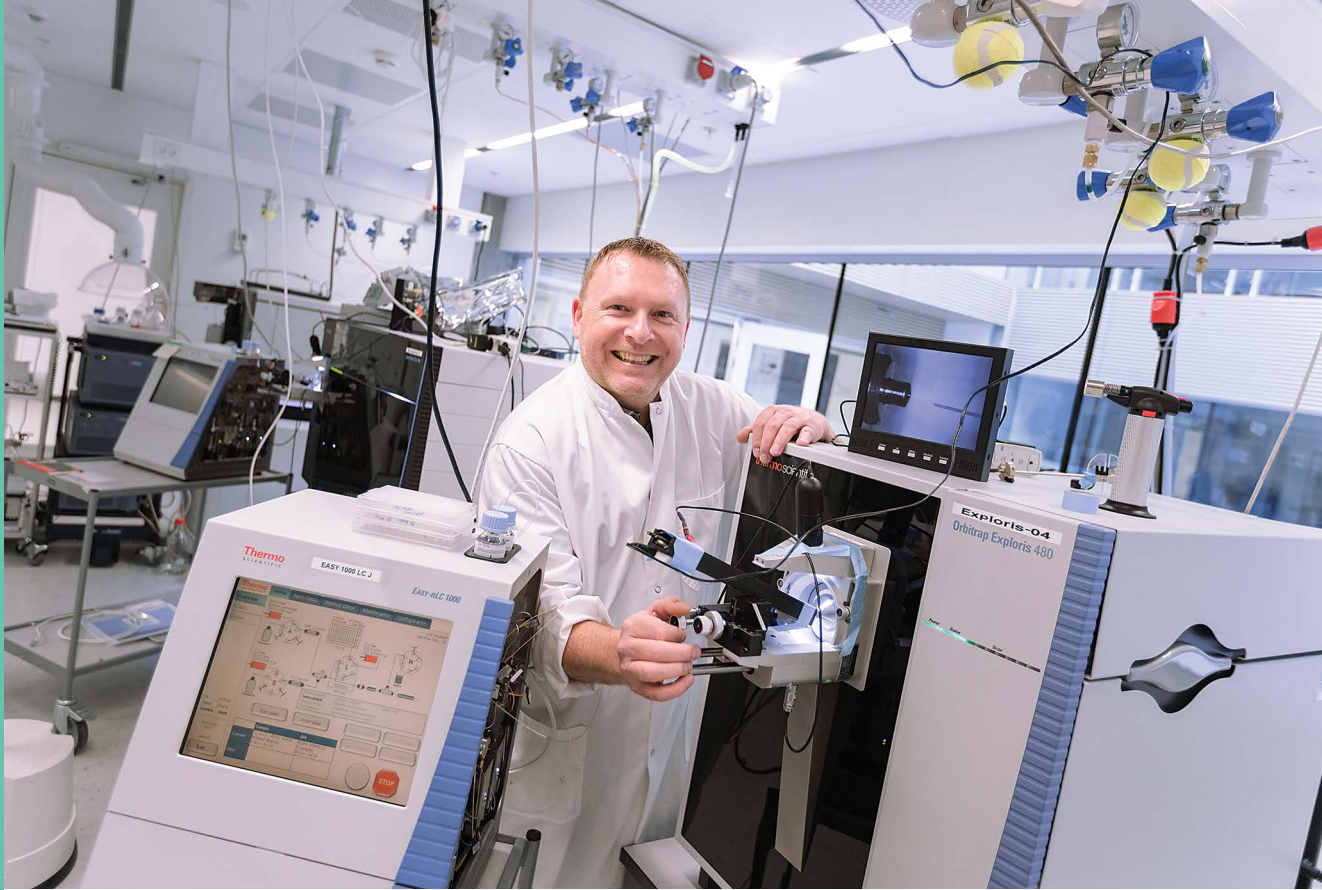
For dig der er interesseret i Biomedicin og Biokemi og molekylær biologi

Alle camps er særligt tilrettelagt for 2. og 3. gymnasieår og dig, der holder sabbatår. Se program og tilmeld dig på [sdu.dk/sciencecamp](https://sdu.dk/sciencecamp)

Vi sørger for overnatning og forplejning - og selvfølgelig hygge og sjov!

Martin Røssel Larsen  
ved et massespektro-  
meter på SDU.

Foto: Jacob Fredegaard Hansen



# MINIHJERNER I REAGENSGLAS

gør forskere klogere på  
psykiske sygdomme

Forskere har udviklet en metode til at lave stamcellebaserede “minihjerner”  
i reagensglas og studere bittesmå forandringer i enderne af nervecellerne.

Sådanne ændringer kan have betydning for udvikling af blandt andet  
skizofreni og andre psykiske sygdomme.



**DANMARKS FRIE  
FORSKNINGSFOND**  
INDEPENDENT RESEARCH  
FUND DENMARK

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

Danmarks Frie Forsknings-  
fond dækker alle viden-  
skabelige hovedområder  
og uddeler hvert år godt 1  
mia. kr. til forskningspro-  
jekter baseret på forsker-  
nes egne ideer. Danmarks  
Frie Forskningsfond består  
af 84 anerkendte forskere  
udpeget på baggrund  
af deres høje faglige  
kompetence. Formand for  
Danmarks Frie Forsknings-  
fond | Natur og Univers er  
professor ved Københavns  
Universitet, Søren Bak.  
Se mere på [www.dff.dk](http://www.dff.dk)

**D**et er veletableret, at for-  
skellige psykiske lidelser  
som for eksempel skizo-  
freni eller bipolar lidelse  
har deres udspring i en dysfunktio-  
nel hjerne. Hjernen fungerer sim-  
pelthen ikke, som den skal, og det  
skyldes blandt andet, at signaler  
ikke når korrekt frem fra den ene  
nervecelle i hjernen til den anden.  
Alt det er velkendt, men derefter be-  
gynder forskerne indenfor området

at blive lidt vage i formuleringerne.  
Det skyldes i særdeleshed, at det  
er ekstremt svært at studere signa-  
lering i hjernen, og hvad der er af  
forskell i signalering i en rask hjerne  
og en hjerne, som udvikler psykisk  
sygdom.

Den problemstilling arbejder for-  
skere fra Syddansk Universitet,  
Københavns Universitet og MRC i  
Cambridge på at finde løsninger på.

Ved hjælp af “minihjerner” fra både  
raske og personer med psykisk syg-  
dom samt en metode til at studere  
kommunikationen mellem nervecel-  
ler på en helt ny måde kommer de  
nu flere skridt tættere på at forstå  
hjernen. Opdagelserne bringer dem  
blandt andet tættere på at kunne  
udvikle lægemidler, der retter op på  
problemerne i signaleringen mellem  
nerveceller i en dysfunktionel hjerne,  
ligesom de også skal til at studere,

hvad der skete med hjernen for otte millioner år siden, da vores slægtslinje blev adskilt fra chimpansernes. Blandt andet udviklede chimpansernes hjerter sig i en retning, så de ikke kan rammes af mange af de vira, som mennesker kan. Det kan have betydning for udvikling af neurologiske sygdomme som Parkinsons sygdom.

»Vi har udviklet forskellige metoder til at studere hjernen på helt nye måder, og det åbner op for et nyt forskningsområde, hvor vi kan blive klogere på hjernen som organ, og hvad der sker, når den ikke fungerer, som den burde. Blandt andet tyder noget på, at chimpanser ikke kan få Parkinsons, hvilket kan hænge sammen med, at nogle modifikationer af proteiner i deres hjerneceller gør det umuligt for virus at trænge ind i cellerne. Vi er de eneste i verden, der har udviklet en metode til at kunne studere denne hypotese,« fortæller en af forskerne bag det interessante danske forskningsarbejde, professor Martin Røssel Larsen fra Institut for Biokemi og Molekylær Biologi ved Syddansk Universitet.

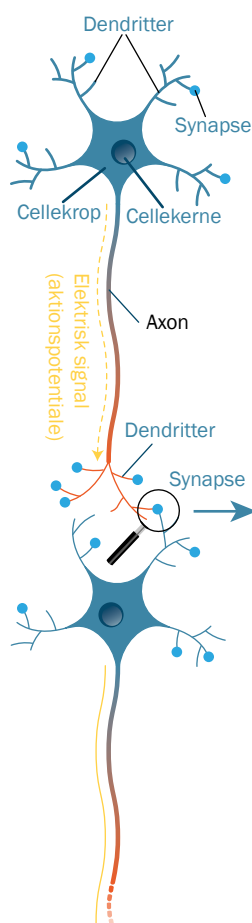
### Når et nervesignal starter

Inden vi kommer frem til de helt store perspektiver i de danskudviklede metoder, skal vi lige tre skridt tilbage for at kunne forstå, hvad det hele drejer sig om. Når det kommer til signalering i hjernen mellem nerveceller (neuroner), sker det i celleenderne, hvor en nerveimpuls blive afsendt fra den ene celle til den anden. Selve nerveimpulsen kaldes et aktionspotentiale, og det starter med en såkaldt depolarisering, der er en ændring i positiv retning af den elektriske spændingsforskel over cellemembranen.

Signalet til denne depolarisering sker ikke igennem udtryk af proteiner, men i stedet gennem det, som hedder posttranslationelle modifikationer af proteiner. Cellerne laver med andre ord ikke de signalrelevante proteiner fra bunden ved at aflæse et gen, men ændrer i stedet i allerede producerede proteiner, så de på meget kort tid kan aktiveres og derved sætte gang i den signalkaskade, som ultimativt leder til en impuls sendt afsted fra den præsynaptiske neuron. Disse posttranslatio-

## Om Martin Røssel Larsen

Han er professor i biomedicinsk massespektrometri og systembiologi ved Institut for Biokemi og Molekylær Biologi ved Syddansk Universitet (SDU). Han er oprindeligt uddannet fra SDU og skrev sin ph.d.-afhandling under Professor Peter Roepstorff, som var en af pionererne indenfor biologisk massespektrometri. Derefter blev han ansat som først postdoc ved Australian Proteome Analysis Facility i Sydney, Australien, inden han kom tilbage til SDU som lektor. I 2011 blev han professor ved Institut for Biokemi og Molekylær Biologi på SDU. Martin Røssel Larsens primære forskningsinteresser er anvendelsen af biomedicinsk massespektrometri til at studere posttranslationelle modifikationer indflydelse på signalering i nerver og andre hjerneceller i normale og sygdomsmæssige tilstande.



Figuren viser det overordnede princip i signalering mellem to neuroner (nerveceller). Ændringer af proteiner – såkaldte posttranslationelle modifikationer – spiller en vigtig rolle i at starte denne signalering.

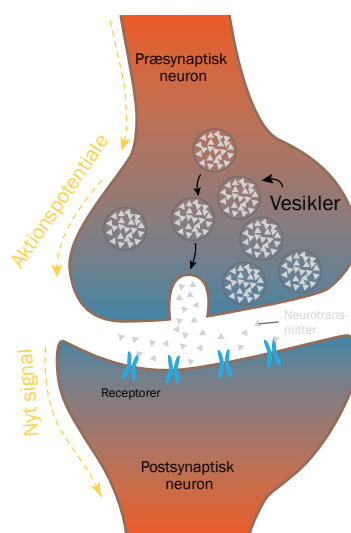


Illustration: Aktuell Naturvidenskab/Colourbox.

nelle modifikationer er der hundredvis af, men lad os for eksemplets skyld kigge på fosforylering. Ved en posttranslatonel fosforylering bliver der på et protein påsat en fosfatgruppe. Dette arbejde udføres af en gruppe enzymer, der hedder kinaser, som derved er i stand til at ændre strukturen eller funktionen af proteinet. Drejer det sig om et protein med relevans for cellulær signalering, kan dette protein blandt andet have indflydelse på frigivelse af neurotransmittere fra såkaldte

vesikler, der er små kugler opbygget af rester af cellemembran og som indeholder transmittermolekyler.

Når en nervecelle skal sende et signal til en anden nervecelle, skal man derfor forestille sig, at der først sker en posttranslatonel modifikation af et eller flere proteiner, hvilket leder til en proces, der fører vesikler ud til nerveendens overflade, hvorfra de frigiver neurotransmittere. Mange af de frigivne neurotransmittere når frem til en modtagende

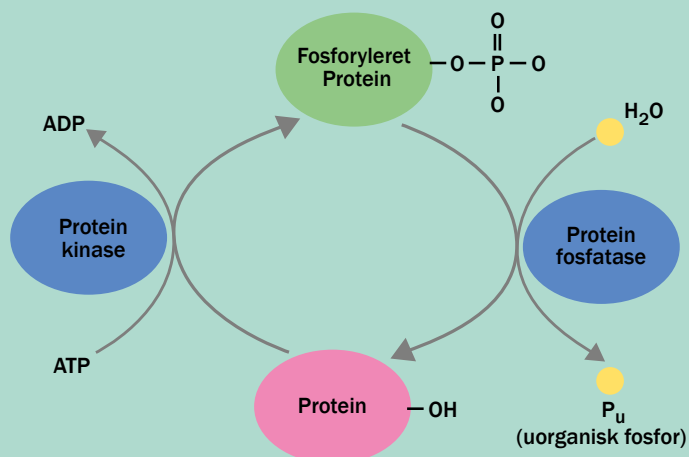
## Om posttranslationelle modifikationer

Posttranslationelle modifikationer er kemiske ændringer på proteiner efter deres syntese (translation) i ribosomerne. Den kemiske modifikation består typisk i at tilføje en særlig kemisk gruppe til bestemte aminosyrer i proteinet. Sådanne modifikationer spiller afgørende roller i reguleringen af proteiners funktion, stabilitet, lokalisering og interaktioner med andre biomolekyler. Posttranslationelle modifikationer kan være reversible eller irreversible og udføres af specifikke enzymer. Nogle af de mest almindelige posttranslationelle modifikationer er:

**Fosforylering:** Tilføjelse af en fosfatgruppe ( $\text{PO}_4^{3-}$ ). Det ændrer ofte proteinets aktivitet ved enten at aktivere eller deaktivere det.

**Glykosylering:** Tilføjelse af kulhydratgrupper. Dette er vigtigt for proteinfoldning, stabilitet og celle-celle-interaktioner.

**Methylering:** Tilføjelse af methylgrupper ( $\text{CH}_3$ ). Dette kan ændre, hvordan gener udtrykkes.



Figuren viser princippet i fosforylering: En fosfatgruppe, der stammer fra molekylet ATP, sættes på et protein ved hjælp af et enzym (kinase). Herved kan proteinet aktiveres, eller fosfatgruppen kan udgøre en overflade, som andre proteiner kan binde til. Ved hjælp af enzymer kaldet fosfataser kan fosfatgruppen fjernes fra proteinet igen.

**Acetylering:** Tilføjelse af en acetylgruppe ( $-\text{COCH}_3$ ). Dette påvirker for eksempel, hvordan gener udtrykkes.

**Ubiquitinerings:** Tilføjelse af det lille protein ubiquitin. Dette er ofte et signal til proteinets nedbrydning, for eksempel nedbrydning af cykliner i cellecyklus.

Posttranslationelle modifikationer er essentielle for den dynamiske regulering af cellulære processer og muliggør et hurtigt respons på ændringer i cellens miljø.

De er involveret i næsten alle aspekter af cellens funktion fra signalering og genudtryk til cellecyklus og programmeret celledød.

nervecelle, der processerer signalet og omdanner det til aktion, for eksempel bevægelse af en finger. Alt det sker indenfor en brøkdel af et sekund og er grundlaget for al signalering mellem celler i hjernen.

### Kigger proteinerne i kortene

Når de posttranslationelle modifikationer ikke helt sker, som de burde, kan der ske små fejl i justeringen af signalet mellem hjernens celler. Det er klart, at hvis de posttranslationelle modifikationer er helt i skoven, er resultatet en komplet dysfunktionel hjerne, hvilket ikke er foreneligt med liv. Men ved små problemer i fintuningen af signaleringen mellem hjernens celler kan det blandt andet lede til udvikling af psykiske tilstande som skizofreni og andre lidelser.

De danske forskere har udviklet en metode til netop at studere posttranslationelle modifikationer i

hjernens nerveender.

»Metoden benytter massespektrometri, som måler massen på proteiner eller fragmenter af proteiner kaldet peptider. Derved kan vi se, hvad der er blevet påsat eller fjernet af posttranslationelle modifikationer. Vi kan også sige, hvor på proteinet for eksempel en fosfatgruppe er sat på eller fjernet. Ved at oprense nerveender og stimulere dem kan vi efterligne en depolarisering i nerveenderne fra hjerneceller og se, hvad det skaber af posttranslationelle modifikationer, ligesom vi kan se, hvad der er af forskelle i de posttranslationelle modifikationer mellem raske og syge hjerneceller,« forklarer Martin Røssel Larsen.

Han uddyber, at forskerne med metoden også kan se, hvor stor betydning bestemte posttranslationelle modifikationer har for et givent

proteins funktion. Blicher der som eksempel påsat voldsomt mange fosfatgrupper på en given aminosyre i et protein, når neuronet bliver depolariseret, må netop fosforyleringen af denne aminosyre have stor betydning for den cellulære signalering, som proteinet er involveret i.

### Laver minihjerner i reagensglas

Med en anden del af den udviklede metode er forskerne kommet omkring det problem, at man ikke bare kan udtage frisk hjernevæv fra levende mennesker for at studere nervesignalering i laboratoriet. Hjernevæv fra døde mennesker er heller ikke så let at få fingrene i og virker ikke til at studere dynamiske ændringer i hjernen.

Problemet med at bruge mus og rotter til at studere posttranslationelle modifikationer er desuden, at ligesom chimpansenhjernen er for-

## Om udvikling af minihjerner

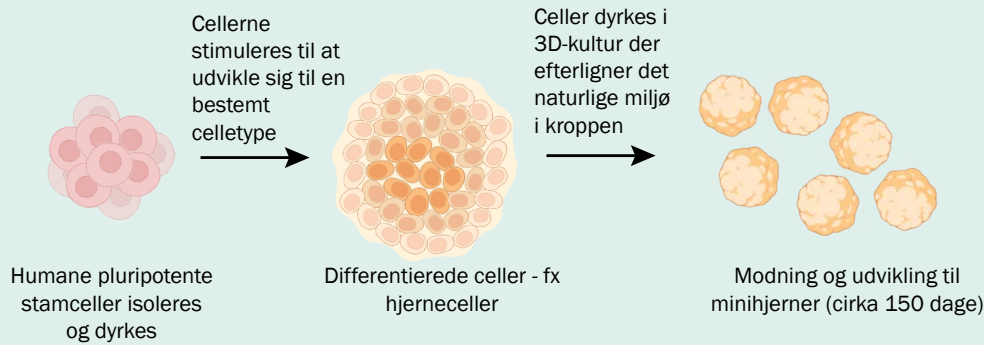


Illustration: BioRender/Maria Kyung-Ah Petersen, Mattias Adonis Jul Ryding & Martin Røssel Larsen.

Udviklingsprocessen for organoider.

Organoider er tredimensionelle cellekulturer, der er afledt fra pluripotente stamceller, og som efterligner strukturen og funktionen af rigtige organer. Disse miniatureorganer udvikles gennem en proces, der omfatter specifikke signaler og vækstfaktorer, som styrer cellernes differentiering og organisering. Organoider repræsenterer en banebrydende metode til at studere menneskelig udvikling, sygdomsmodeller og lægemiddelforprøvelse.

Pluripotente stamceller har evnen til at differentiere til enhver celletype i kroppen. Der findes to hovedtyper af stamceller; embryonale stamceller og inducerede pluripotente stamceller. Embryonale stamceller stammer fra tidlige embryoner, mens inducerede pluripotente stamceller er voksne celler, der er genetisk omprogrammeret til en pluripotent tilstand. Det er sidstnævnte, som forskerne har benyttet i deres forskning til at lave minihjerner.

Forskere kan benytte organoider til flere former for studier:

**Sygdomsmodeller:** Efterligner sygdomme som kræft, neurodegenerative lidelser eller infektionssygdomme.

**Lægemiddelforprøvelse:** Test af lægemiddelvirksomhed og toksicitet på humane celler i organlignende systemer.

**Studie af udviklingsbiologi:** Forståelse af fosterudvikling og, hvordan organerne bliver dannet.

**Regenerativ medicin:** Potentiale for at reparere eller erstatte beskadiget væv.

Udviklingen af organoider fra pluripotente stamceller repræsenterer en revolution indenfor biomedicinsk forskning, da de tilbyder en mere realistisk model for humane organer end traditionelle cellekulturer. De giver også forskere adgang til at studere organer, der kan være svære at få humane celler fra, herunder hjernen.

skellig fra menneskers, er musenes og rotternes hjerner det i den grad også. Det er med andre ord ikke til at vide, om posttranslationelle modifikationer i nerveceller fra muse eller rottehjerner overhovedet er relevante i studier af sygdom hos mennesker.

Dette problem har forskerne dog løst på en genial måde, hvor de i laboratoriet kan skabe "minihjerner", der i struktur og funktion ligner det, som sidder inde bag øjnene hos os alle sammen. Det geniale ved metoden er dog ikke kun, at det er minihjerner, som kan studeres i laboratoriet, men også at hjernerne er skabt ud fra celler fra en blodprøve. Forskerne skal altså slet ikke rode rundt i hjernen hos folk for at kunne studere eventuelle problemer i de posttranslationelle modifikationer i deres nerveender. I stedet benytter forskerne en meto-

de, hvor de tvinger blodceller til at gå tilbage i udvikling, så de går fra at være differentierede blodceller til at blive til såkaldte pluripotente stamceller, der kan udvikle sig til at blive til en lang række celler, herunder nerveceller. Forskerne benytter derefter forskellige signalstoffer til at få de pluripotente stamceller til at udvikle sig til netop nerveceller, som samlet set skaber en lille tredimensionel minihjerne i et reagensglas. Den minihjerne kan forskerne eksperimentere på i uendelighed.

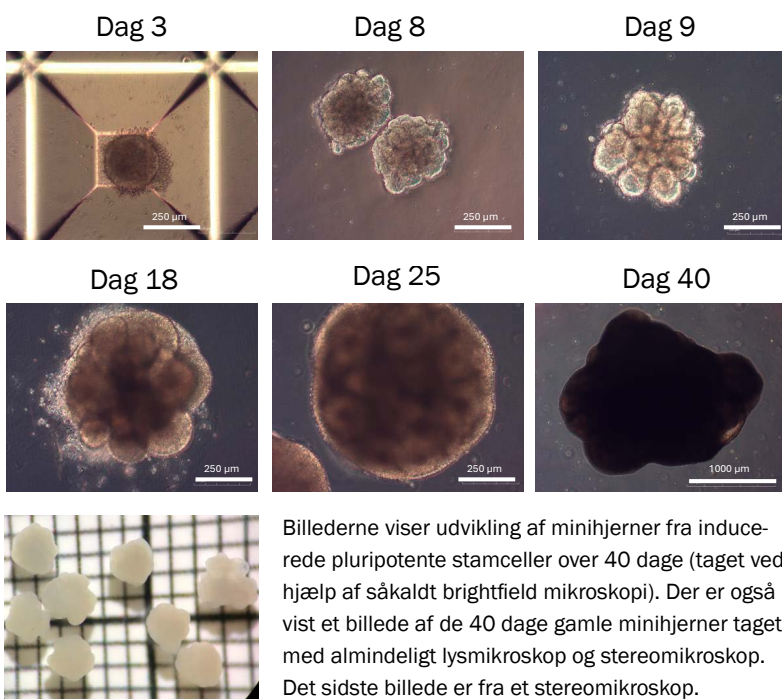
Det smarte ved at bruge minihjerner i reagensglas er også, at forskerne kan skabe minihjernerne ud fra den enkelte person og blandt andet skabe minihjerner fra personer med psykiske sygdomme eller personer uden disse lidelser. Det er med andre ord muligt for forskerne at studere forskelle i posttranslationelle modifikationer mellem minihjer-

ner fra psykisk syge personer og i den sammenhæng raske kontroller. Martin Røssel Larsen forklarer, at hans samarbejdspartnere udtager blodceller fra patienter, som efterfølgende bliver omprogrammeret til stamceller og derefter bliver brugt til at lave minihjerner.

»Det betyder, at vi ikke længere behøver at få hjerneceller fra afdøde, men at vi alligevel kan studere nedarvet risiko for forskellige sygdomme i hjernen, fordi det genetiske udtryk, som leder til udvikling af for eksempel skizofreni, også vil blive udtrykt i blodcellerne og derfor også i de minihjerner, som vi studerer,« siger han.

### 450 forskellige typer modifikationer

Netop når vi taler om det genetiske udtryk, har de nyudviklede metoder nogle klare fordele fremfor blot at studere genetisk disposition



Billederne viser udvikling af minihjerner fra inducerede pluripotente stamceller over 40 dage (taget ved hjælp af såkaldt brightfield mikroskopi). Der er også vist et billede af de 40 dage gamle minihjerner taget med almindeligt lysmikroskop og stereomikroskop. Det sidste billede er fra et stereomikroskop.

for udvikling af psykisk sygdom. Forskere har i mange år forsøgt at blive klogere på arveligheden i psykiske sygdomme, og det har de blandt andet gjort ved at studere små genetiske forskelle mellem mennesker. De studier har peget på hundredvis af gener, hvor givne mutationer er mere hyppige hos personer med for eksempel skizofreni sammenlignet med i den brede befolkning. Problemet med disse studier har dog været, at det er meget svært at komme fra identifikationen af en mutation til rent faktisk at forstå, hvorfor netop denne genetiske variant er associeret til øget risiko for udvikling af skizofreni.

En stor del af problemet skyldes, at det for det første ofte ikke er til at sige, om et gen overhovedet bliver udtrykt som et protein. Det kan lige så vel være, at genet bliver holdt nede og slet ikke har nogen effekt på noget som helst. For det andet sker der rigtig mange posttranslationelle modifikationer af proteiner, efter de er blevet oversat fra gener. Alene når det gælder fosforylering af proteiner, er 500 forskellige kinaser med til at sætte fosfatgrupper på forskellige steder på proteinet, ligesom over 200 forskellige fosfataser er med til at tage dem af

igen. Fosforylering er desuden blot én af forskellige mulige posttranslationelle modifikationer. Der findes over 450 forskellige typer af posttranslationelle modifikationer, som alle sammen er med til at styre et proteins aktivitet, interaktioner og funktioner. Martin Røssel Larsen har med sine kollegaer blandt andet identificeret, at der på nogle proteiner i nerveenderne på mus findes 150 steder, hvor proteinet kan modificeres med en fosfatgruppe. Alt sammen bare for at sige, at der kan ske rigtig meget fra det genetiske niveau til effekt af protein. Derfor vil Martin Røssel Larsen med sine kollegaer også hellere studere proteinerne i sig selv i stedet for genetikken, der potentielt ligger bag,

»Der er identificeret hele 200 risikogener for skizofreni, men blot under én procent af dem, der udvikler skizofreni, er i genetisk højrisiko. De resterende er det ikke. Det peger på, at hvis vi kun kigger på genetik og ikke på proteinerne, kommer vi ikke til at forstå, hvad der går galt i hjernen hos personer, der udvikler skizofreni. I den sammenhæng har ingen før os kigget på de posttranslationelle modifikationer,« forklarer Martin Røssel Larsen.

## Studerer forskelle mellem hjerter hos raske og syge

Med metoderne på plads kan forskerne nu for første gang komme et spadestik dybere i forståelsen af, hvad der sker i hjernen hos personer, der udvikler skizofreni eller andre psykiske sygdomme.

Forskerne er allerede i gang med blandt andet at lave minihjerner ud fra blodprøver taget fra personer med skizofreni. Indtil videre har forskerne lavet flere minihjerner for skizofreni og kontroller. De indledende undersøgelser efter forskelle mellem hjerneerne har blandt andet afsløret, at der er mange forskelle mellem raske og syge hjerter, men også indbyrdes mellem minihjerner fra personer med skizofreni.

»Formålet med at studere disse minihjerner er også, at vi kan bruge dem som modelsystemer til afprøvning af eventuelle behandlinger. Er nogle posttranslationelle modifikationer associeret med udvikling af skizofreni, kan vi forsøge at behandle med stoffer, der hæmmer for eksempel de kinaser eller fosfataser, som er skyld i fejlene. Denne type lægemidler kender vi allerede til fra kræftbehandling, og det kan være, at de også vil virke ved skizofreni,« siger Martin Røssel Larsen.

Han uddyber, at skizofreni bare er det første skridt på vejen. Forskerne har også på tapetet at udvikle minihjerner ud fra blodprøver taget fra personer med bipolar lidelse og autisme.

»Det drejer sig også om at forstå forskelle og ligheder mellem disse sygdomme. Meget ved de forskellige psykiske lidelser minder om hinanden, og det er da et håb, at sygdommene ligner hinanden så meget i deres udtryk, at man måske kan behandle dem alle sammen med samme behandling,« siger Martin Røssel Larsen.

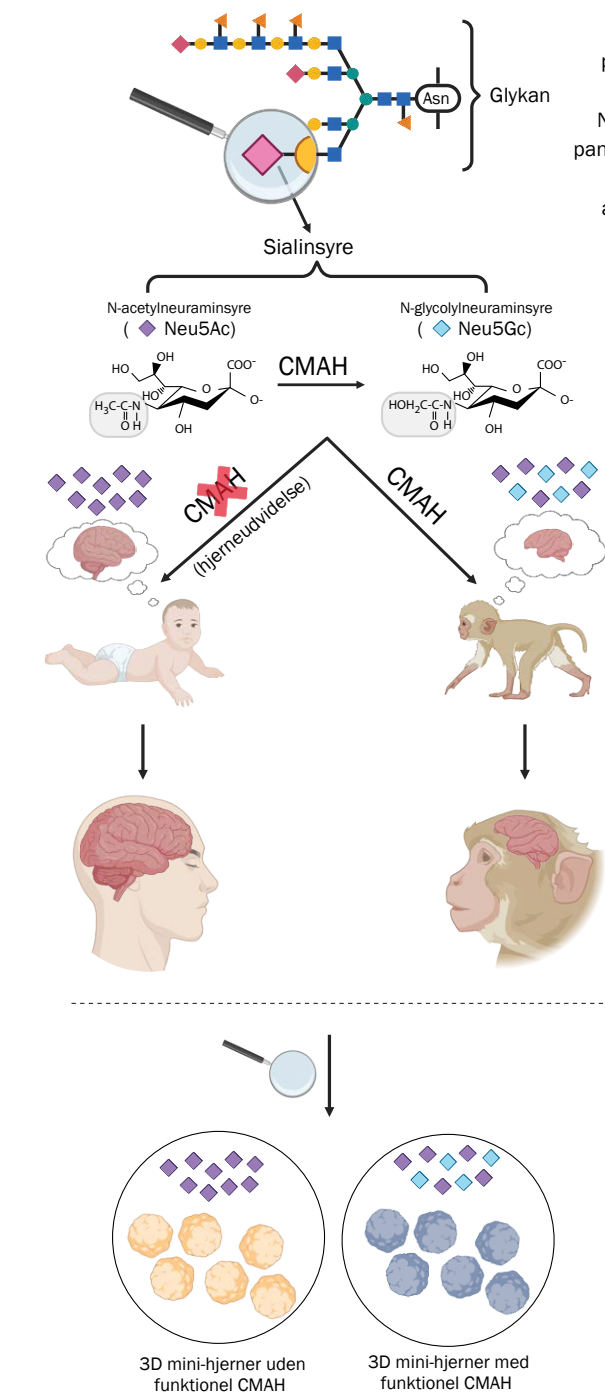
Han tilføjer, at forskerne indtil videre har fokuseret på undersøgelser af forskelle i posttranslationelle fosforyleringer, men at forskerne fremadrettet vil rette blikket mod nogle af de andre 450 forskellige former for posttranslationelle modifikationer.

## Chimpanser og Parkinsons

Og så er vi fremme ved chimpanserne. Forskningen kan nemlig ikke kun bruges til at studere forskelle mellem raske og syge menneskehjerner, men også gøre forskere klogere på, hvad der skete for otte millioner år siden, da mennesker og chimpanser gik hver deres evolutionære vej. Kigger man på forskelle mellem os og vores chimpanseslæggtninge, er vi genetisk set kun 1,5 procent forskellige, men lige efter det evolutionære split mellem de to arter gennemgik vi mennesker en enorm hjerneekspansion, som sendte os til Månen med mobiltelefoner, mens chimpanserne forblev i skoven.

En af de nævneværdige forskelle mellem vores hjerner er evnen til at lave posttranslationelle modifikationer med kulhydratet sialinsyre, der sættes på glykaner på proteiner i celler. Her har chimpanser muligheden for at påsætte to slags sialinsyre på glykaner på proteiner, mens vi faktisk kun kan påsætte én slags sialinsyre. De proteiner, der er modificeret med disse glykanstrukturer, sætter sig blandt andet på overfladen af nervecellerne, hvor sialinsyren normalt stikker ud. I den cellulære signalering har denne modifikation betydning for, hvad der kan binde til cellers overflader, samt på den cellulære signalering. Derfor er forskelle i sialinsyre-biologien mellem mennesker og chimpanser også på otte procent, selvom den genetiske forskel kun er 1,5 procent. Sialinsyre er forskellen.

Martin Røssel Larsen har med sine kollegaer modtaget en bevilling til at studere denne forskel mellem mennesker og chimpanser og blandt andet undersøge, hvad der sker med menneskets hjerneudvikling, hvis vores hjerneceller bliver modificeret til at kunne producere begge former for sialinsyre. Forskerne skal også undersøge det omvendte i chimpanser. Et andet interessant perspektiv ved sialinsyre er, at det kan blive påsat forskellige kulstoffer på kulhydratstrukturen på humane proteiner og proteiner fra chimpanser, hvilket har stor betydning for virale infektioner. Når sialinsyre blive sat på humane membranproteiner i en såkaldt 2,6-binding, kan vira som influenza-virus benytte sialinsyre til at trænge ind i cellerne. Da 2,6-bindingen er meget lidt til stede i chimpanser, kan



chimpanser ikke blive smittet med influenza fra mennesker.

Når det kommer til Parkinsons sygdom, mener mange forskere faktisk, at sygdommen er resultatet af en reaktivering af virus i hjernen. Netop det kan være forskellen på, hvorfor mennesker kan få Parkinsons sygdom, mens chimpanser ikke kan. Det kan simpelthen være, at nogle posttranslationelle modifikationer skaber forskelle mellem dem og os, så influenza og andre virus kan trænge ind i vores hjerner

og skabe et væld af problemer der, men ikke hos chimpanserne.

»Det er et andet projekt, som vi har fået en bevilling til. Vi er de eneste i verden, der har udviklet en metode til specifikt at studere posttranslationelle modifikationer med sialinsyre. Det åbner op for en masse forskning i både forskelle mellem mennesker og chimpanser, ligesom vi måske kan blive klogere på, hvorfor mennesker udvikler Parkinsons sygdom, og hvad vi kan gøre ved det,« siger Martin Røssel Larsen.

Figuren viser øverst glykanstrukturer på proteiner, som indeholder sialinsyre. Der findes to primære slags sialinsyrer: Neu5Ac, som både mennesket og chimpanser har, og så Neu5Gc, som kun findes hos chimpanser. Forskellen bunder i, at chimpanser har et funktionelt enzym CMAH, mens menneskets CMAH-gen er muteret under evolutionen, så dette

enzym ikke er aktivt i menneskeceller. Martin Røssel Larsen og kolleger vil nu undersøge, hvilken betydning denne forskel har for tidlig hjerneudvikling og associerede biologiske processer ved at studere minihjerner med og uden funktionel CMAH.

Illustration: BioRender/Maria Kyung-Ah Petersen, Maitas Adonis Jui Ryding & Martin Røssel Larsen.

# VANDLØB OG KLIMAÆNDRINGER

En snoet (mæandre-  
rende) strækning af  
Skjern Å.

Foto: Colourbox.

**Et vandløbs tværsnit og strømhastighed kan beskrives som matematiske funktioner af den mængde vand, der strømmer i det. Det kan man udnytte til at forudsige, hvor meget formen på et vandløb og sedimenttransporten i det vil ændre sig som følge af klimaændringer.**

## Forfatterne



Bent Hasholt er lektor emeritus, Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet.



Sebastian H. Mernild, ph.d. & dr. scient, er professor i klimaforandringer og leder af SDU Climate Cluster, Syddansk Universitet. Lead Author ved FN's Klimapanel (IPCC), AR6.

**K**limaet er under forandring. Danmark er over tid blevet varmere og ikke mindst vådere. Siden 1880'erne er årsmiddeltemperaturen i gennemsnit blevet 1,5 grader højere og samtidig ses en stigning af årsnedbøren på omkring 140 millimeter. Stigende nedbør medfører ændringer i det hydrologiske kredsløb og dermed ændringer i vandføringen i vandløbene og i transporten af sedimenter og næringsstoffer til havet.

De ændrede hydrologiske forhold formodes også at medføre ændringer i selve formen af vandløbene. Vandløbenes dimensioner er nemlig et resultat af vandets kredsløb, hvor vandet på sin vej nedbryder terrænoverfladen og transporterer løsnede partikler og opløste stoffer til oceanerne. Vandløbssystemet består af nedskæringer og afgrænsede fordybninger med næsten parallelle sider i terrænet, hvori van-

det bevæger sig, såkaldte strømrender. Set fra luften kan man iagttage strømrenderne som et forgrenet mønster, hvor mindre strømrender løber sammen til større og vokser til floder på vej mod havet.

Naturlige vandløbssystemer består af vandløb, hvis strømlejer ikke er ændret som følge af menneskelige indgreb. Tilbage i 1953 kunne Leopold og Maddock vise, at de tre vandløbsparametre bredde, dybde og strømhastighed (tilsammen kaldet vandløbets hydrauliske geometri) kan beskrives som potensfunktioner af vandføringen i naturlige vandløb. De påviste, at vandløbene var i dynamisk ligevægt, og de beholdt forholdet mellem dimensionerne, selvom der løbende foregik erosion og sedimenttransport i dem. Leopold og Maddock påviste også, at strømlejernes form og nedskæring i terrænet var i ligevægt med de omgivende bredders niveau, således at oversvømmelses-

hyppigheden var ret konstant – dvs. en oversvømmelse af bredderne sker med et gentagelsesinterval på 1 til 1½ år.

I denne artikel vil vi beskrive resultatet af målinger af den hydrauliske geometri i naturlige danske vandløb og undersøge, om de fundne potensfunktioner kan anvendes til at vurdere effekten af klimaændringer i danske vandløb.

## Vandløbssystemets historie i Danmark

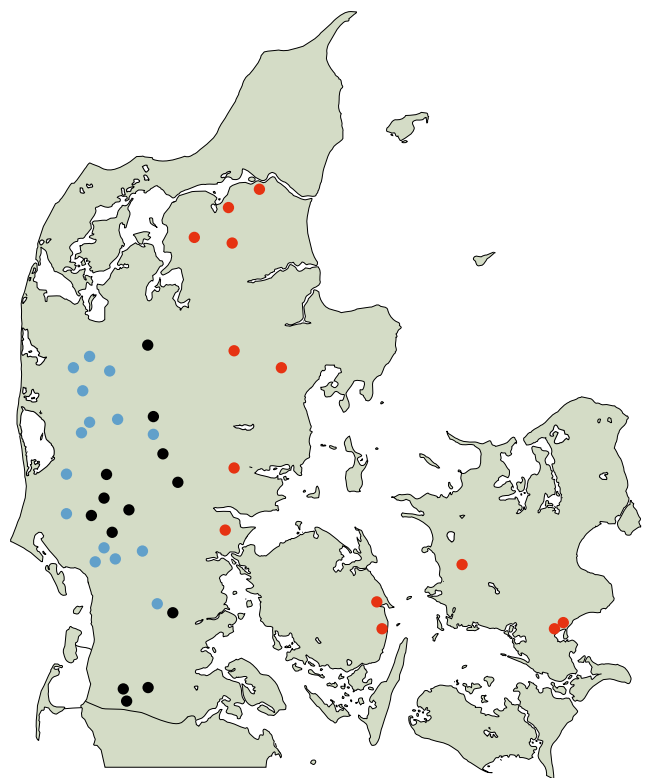
I modsætning til de fleste andre lande består terrænoverfladen i Danmark, bortset fra Bornholm, af løse sedimenter transporteret og afsat under isen eller transporteret af smeltevand og aflejret foran isen. Vandløbssystemet i Danmark har ændret sig markant gennem tiden. Under de seneste istider, Saale- og Weichel-istiderne, var vandmængden meget større og fordelt anderledes på grund af tilførslen af



smeltevand. Sedimenttransporten i vandløbene var også meget større på grund af isens erosion i jordoverfladen. Vandløbssystemerne bestod af strømrønder, som adskiltes og løb sammen igen, såkaldte braiderende løb, efter det engelske ord "braid", som betyder fletning. Sådanne vandløbssystemer kan ses både i Island og Grønland i dag. Efter istiderne blev Danmark skovklædt, og vandløbssystemet mistede tilførslen af smeltevand og sedimenttransport betinget af isens erosion. Resultatet var udviklingen af et anderledes vandløbssystem med regelmæssige slyngninger, som vi kalder mæandrerende opkaldt efter floden Mæandros i Tyrkiet.

Med menneskets indvandring blev vandløbssystemet udnyttet til fiskeri og transport. Fra omkring 1100-tallet begyndte mennesker at bygge vandmøller, som betød, at der blev lavet opstemninger af vandet for at opnå en passende faldhøjde. Med udviklingen af landbruget blev skoven ryddet, og jorden pløjet og tilplantet med afgrøder. Det medførte en øget sedimenttransport i vandløbssystemet, som kan aflæses i for eksempel borekerner fra bunden af søer. En vis afledning af vandet fandt sted gennem grøfter, som blev gravet til formålet.

I slutningen af 1800-tallet tog udviklingen fart med udvidet grøftegravning både på mark og i skov for at øge land- og skovbrugsproduktionen. Senere i perioden begyndte man også at anvende nedgravede teglrør til afvanding. Ved afvanding og dræning opnåede man en udvidelse af det brugbare dyrkningsareal, som samtidig gav gunstigere vækstforhold for nytteplanterne og for jordbearbejdningen. Det var et politisk mål som kompensation for tabet af Sønderjylland efter 1864. Nogle steder blev især mindre vandløb lagt i underjordiske rør for blandt andet at forbedre trafikforhold og jordbearbejdning. Også byudviklingen medførte behov for afvanding i form af kloakering for at lede vand væk fra kældre og gader.



● Vandløb i bakkeølandskabet ● Vandløb i hedeslettelandskabet ● Vandløb i morænelandskabet

Placeringen af de undersøgte naturlige strækninger i danske vandløb i et udvalg af landskabstyper. Strækningerne var fordelt på tre forskellige landskabstyper: Bakkeølandskabet, som er morænelandskaber fra Saale-istiden; Morænelandskabet fra Weichsel-istiden og Hedesletter fra Weichsel-istiden.

Opfattelsen var, at vandløbssystemets primære funktion var at aflede vand fra dyrkningsområder og spildevand fra byer og industriområder. Funktionen var sikret i lovgivningen, og vandløbene blev regulerede og rettet ud, ofte med statsstøtte. Det største afvandsingsprojekt i Skjern Å blev iværksat så sent som i 1962.

I dag nedlægger man tidligere afvandsingsprojekter og gensnor regulerede (udrettede) vandløb. Kort sagt har man over tid ændret både anvendelsen og brugen af det åbne land og selve vandløbets form – begge dele med konsekvenser for vandets kredsløb.

### Undersøgelser af de naturlige vandløb

I 1984 undersøgte vandløbsforskeren Andrew Brookes med basis hos Ferskvandslaboratoriet i Silkeborg Danmarks vandløbssystem ud fra kort med målestoksforhold 1:20.000. Han fandt, at der dengang var cirka 880 kilometer vandløb tilbage i naturlig mæandrerende tilstand ud af en samlet vandløb-

slængde på cirka 64.000 kilometer. Det vakte bekymring for tabet af landskabsmæssige værdier og for vandløbenes biologiske tilstand.

Siden er der foretaget en række tiltag for at forbedre tilstanden: Vandløb er blevet "gensnoet" dvs. i muligt omfang lagt tilbage i deres gamle, mæandrerende forløb. Det er foregået med maskiner, da det har vist sig, at det tager lang tid for et vandløb at genskabe sine naturlige snoninger. Grødeskæring foregår skånsomt for at sikre levesteder for dyr og planter. Og for at fremme fiskebestanden udlægges der gydegrus på bunden i en række vandløb, og der bygges fisketrapper eller omløb, hvor dæmninger eller opstemninger forhindrer fiskenes vandring. Selvom mange vandløb på den måde fremstår mere naturlige i dag, er deres form dog stadig i høj grad menneskeskabt.

For cirka 25 år siden undersøgte vi den hydrauliske geometri i 43 naturlige strækninger i danske vandløb i et repræsentativt udvalg

## Hydraulisk geometri

Tværsnitsarealet af et vandløb varierer. Når arealet er lille, må vandet løbe hurtigere, hvis der skal den samme mængde vand igennem på den samme tid, og omvendt, hvis arealet er stort. Vandføringen kaldes  $Q$  og er en funktion af tværsnitsarealet og strømhastigheden. Og enheden er normalt ( $m^3/s$ ).

På baggrund af opmålinger i mange forskellige floder verden rundt, er det påvist, at vandløbsparametrene bredde (m), dybde (m) og strømhastighed (m/s) kan beskrives som steds-specifikke potensfunktioner af vandføringen  $Q$  ( $m^3/s$ ). Funktionerne kaldes *hydraulisk geometri*:

$$w \text{ (bredde)} = a \cdot Q^b$$

$$d \text{ (dybde)} = c \cdot Q^f$$

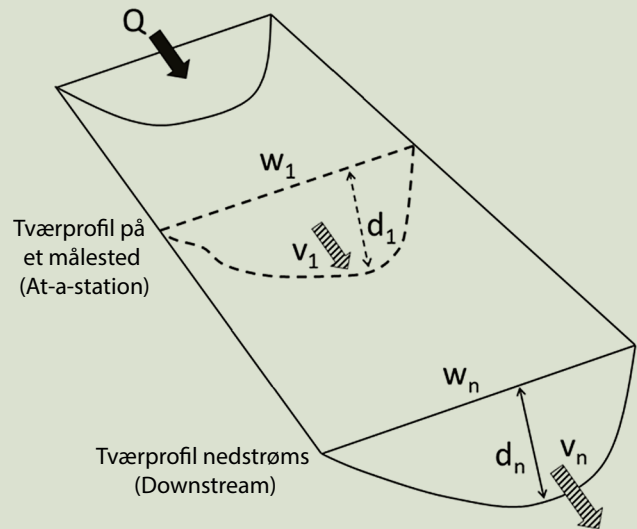
$$v \text{ (strømhastighed)} = k \cdot Q^m$$

hvor  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $f$ ,  $k$  og  $m$  er konstanter.

Da vandføringen  $Q$  er lig med  $w \cdot d \cdot v$  betyder regnereglerne, at  $b + f + m = 1$  og  $a \cdot c \cdot k = 1$ .

Formlerne gælder både for tværsnit (at-a-station) og nedstrøms i vandløbet (downstream).

I tabellen er angivet værdier for  $b$ ,  $f$  og  $m$  fundet ud fra målinger af naturligt mæandreende vandløb i Danmark.



Landskabstyper	At-a-station	Downstream
<b>Saale-landskab</b>	$b=0,23$	$b=0,61$
Gennemsnit af 15 vandløb i Vestjylland	$f=0,46$ $m=0,31$	$f=0,47$ $m=-0,08$
<b>Weichsel-landskab (moræne)</b>	$b=0,25$	$b=0,57$
Gennemsnit af 15 vandløb fra Østjylland, Fyn og Sjælland.	$f=0,45$ $m=0,30$	$f=0,53$ $m=-0,11$
<b>Weichsel-landskab (hedesletter)</b>	$b=0,20$	$b=0,50$
Gennemsnit af 13 vandløb i Vestjylland.	$f=0,48$ $m=0,32$	$f=0,39$ $m=0,12$
<b>USA, Great Plains</b>	$b=0,26$	$b=0,50$
Gennemsnit af tal fra Leopold og maddock (1953)	$f=0,40$ $m=0,34$	$f=0,40$ $m=0,10$

af landskabstyper. Strækningerne var fordelt på tre forskellige landskabstyper, nemlig 15 i bakkeølandskaber, som er morænelandskaber fra Saale-istiden, 15 i morænelandskab fra Weichsel-istiden og 13 i hedesletter fra Weichsel-istiden (se kort).

Vi fandt, at den hydrauliske geometri (udtrykt ved potensværdierne) er ens – dvs. ikke statistisk signifikant forskellig – for de to morænelandskaber fra henholdsvis Saale og Weichsel trods en aldersforskel i landskabsdannelsen på cirka 100.000 år. Det tyder på, at et vandløbssystem dannet i morænelandskaber fra Weichsel-istiden opnår samme hydrauliske geometri som vandløbssystemer dannet i morænelandskaber fra Saale-istiden. Og det antyder, at den hydrauliske geometri dannet efter Weichsel-istiden er stabil over en periode på mindst 100.000 år.

Vi ved dog ikke, hvor hurtigt denne stabile tilstand er opstået.

En tilsvarende sammenligning af vandløb fra hedeslette-landskaber fra de to istider, kunne vi ikke lave, da vi ikke kunne finde naturlige vandløb, der kunne bruges til sammenligning med vandløb i hedesletterne dannet under Weichsel-istiden. Men det viste sig, at potensværdierne for vandløbene i det danske hedeslette-landskab var magen til potensværdierne for amerikanske vandløb, der løber gennem landskaber uden istids-aflejringer. Det bekræfter, at de naturlige danske hedeslette-vandløb over tid også opnår ligevægt.

Den eneste forskel, vi i øvrigt fandt på potensværdierne for vandløb i de danske morænelandskaber og hedeslette-landskaberne, knyttede sig til strømhastigheden. Den aftager nedstrøms i morænelandska-

berne, hvilket vi tolker som resultat af, at sten fra morænen udvaskes og aflejres på bunden af vandløbene, hvor de bidrager til at gøre bunden mere ru.

### Mere nedbør giver mere erosion

Vores undersøgelser viste, at også naturlige danske vandløb har en hydraulisk geometri, der følger potensformler. Formler, der er specifikke for naturlige vandløb i forskellige danske landskabstyper og som er stabile over meget lang tid.

Disse formler kan derfor bruges til at beregne, hvordan vandløbets tværprofiler vil ændre sig, når vandføringen i vandløbene øges på grund af de forventede større mængder nedbør i fremtiden. De nye tværprofiler vil blive større end de gamle. Og denne tilpasning vil betyde, at der per meter vandløbslængde vil blive eroderet i bund og



bredder, som øger den samlede sedimenttransport i vandløbet. Øget sedimenttransport i vandløbene er dermed en konkret effekt af klimaændringer. Det kan være et problem, da det øger transporten af næringsstoffer til havet, hvor det fx kan bidrage til algeopblomstringer og iltsvind.

Det sediment, der transporteres i vandløbene, stammer primært fra erosion af terrænoverflader i oplandet til vandløbet. I et klima med mere nedbør og dermed større vandføring i vandløbene, vil der komme mere sediment til vandløbene fra denne overfladeerosion, men altså også fra øget erosion fra selve vandløbets bund og bredder.

Thodsen og kolleger undersøgte i 2008, hvordan klimaændringer vil påvirke sedimenttransporten i danske vandløb i forbindelse med forskningsprojektet CONVOY. De nå-

ede frem til, at de forventede klimaændringer ville betyde en forøgelse af middel års-vandføringen på 11 til 14 % fra perioden 1961-1990 til 2071-2100, men også en stigende sedimenttransport på mellem 9 til 36 %. Deres undersøgelse var baseret på målte sammenhænge mellem sedimentkoncentrationen i vandløbene og nedbør og vandføring.

Man kan ikke med simple målinger af sedimentkoncentrationen i et vandløb afgøre, om sedimentet stammer fra overfladeerosion eller fra vandløbets bredder og bund. Og klimaændringer vil ikke nødvendigvis medføre den samme forholdsvis stigning i mængden fra de to kilder. For mens mængden af sediment fra erosion fra vandløbets bredder og bund udelukkende vil være betinget af den klimabetingede forøgelse af vandføringen, vil mængden af sediment fra

overfladeerosion kunne påvirkes af ændringer i vegetationen i oplandet – for eksempel hvilke afgrøder der dyrkes på en mark. Derfor blev transporten af erosionsmateriale for vandløbenes opland i CONVOY-projektet da også beregnet ud fra modeller, der blandt andet inddrog anvendte afgrøder og dyrkningsmetoder.

I denne forbindelse kan regimeformlerne komme os til hjælp. Vi kan nemlig bruge dem til at beregne, hvor meget vandløbenes tværsnit vil ændre sig alene på grund af den klimabetingede øgede vandføring, og dermed hvor meget sediment der potentielt vil blive fjernet fra vandløbenes bund og sider.

### **Herredsbækken som eksempel**

Vi har som et eksempel anvendt metoden på en af de vandløbsstrækninger, vi opmålte for 25 år siden, nemlig Herredsbækken nær

Mange har sikkert oplevet oversvømmede veje i vinterhalvåret 2023 til 2024 pga. en rekordstor nedbørmængde, som satte vandløbene under pres – især i Jylland.  
Foto: Shutterstock



Herredsbækken.  
Foto: Lis Hasholt

#### Kilder samt forslag til videre læsning:

Brookes, A. (1984): Recommendations Bearing on the Sinuosity of Danish Stream Channels. National Agency of Environmental Protection, Freshwater Laboratory, Silkeborg, Denmark. ISBN 87-503-5327-6

Leopold, L. B. & Maddock, T. (1953): The Hydraulic Geometry of Stream Channels and some Physiographic implications. US Geol. Survey Prof. Paper 252.

Mernild, S. H. & Hasholt, B. (2001): Vandløbsdimensioner og regimeformler. Vand og Jord nr.3.

Mernild, S. H. & Hasholt, B. (2004): Naturlig vandløbsudvikling i tre geomorfologiske landskabstyper. Vand og Jord nr. 4.

Thodsen, H., Hasholt, B. and Kjærsgaard, J.H. (2008): The influence of climate change on suspended sediment transport in Danish rivers. Hydrol. Process. 22, 764-774.

Præstø på Sjælland, som ligger i et morænelandskab fra Weichsel-istiden. I beregningerne antager vi, at vandløbet har opnået stabil tilstand og beregner ved hjælp af potensformlerne, hvordan vandløbets strømleje vil ændres som følge af en klimabetinget forøgelse af vandføringen på 13 %.

Resultaterne viser, at strømlejets tværsnitsareal bliver 11 % større. Udvidelsen vil medføre, at der per kilometer vandløbslængde vil blive fjernet 70 m<sup>3</sup> sediment fra bund og sider som svarer til 105 tons (se også ekstramaterialet på web). Dette sediment vil blive transporteret nedstrøms og ende i havet. Her vil det bidrage til næringsstoffertilførslen og dermed til eutrofiering af havområderne. Hvor meget dette bidrag udgør af den samlede årlige tilførsel afhænger af, hvor lang tid vandløbet vil være om at tilpasse sig til den nye klimatilstand.

Det vil vi kunne få en ide om ved at genopmåle de samme strækninger i Herredsbækken, som vi målte for 25 år siden. Det vil kunne hjælpe

med at afgøre, om vandløbets dimensioner allerede efter 25 år har tilpasset sig de klimaændringer, der faktisk er observeret i perioden, eller hvor langt vi i modsat fald er fra en ligevægtstilstand. Vi planlægger derfor som et pilotprojekt at gentage målingerne i Herredsbækken.

#### Et værktøj til valg af fremtidens arealudnyttelse

Vores resultater er principielt kun gyldige for de 880 kilometer naturlige vandløb, som udgør en meget lille del af det samlede vandløbssystem i Danmark. Men de samme grundlæggende tilpasningsprocesser vil også virke i alle de menneskepåvirkede vandløb. Målinger af den hydrauliske geometri i alle typer af vandløb vil derfor kunne sammenlignes med de naturlige og indikere, om den pågældende strækning er i ligevægt eller udsat for store ændringer.

For planlægningen af den fremtidige arealudnyttelse (for eksempel i forbindelse med udmøntningen af den nyligt indgåede "treparts-aftale") vil det være vigtigt at kende

vandløbenes tilstand og forventede reaktion på klimaændringer. Vores undersøgelser har overordnet vist, at klimaændringer vil påvirke vandløbenes form og sedimenttransport, og at man kan anvende de fundne potensfunktioner til at kvantificere denne påvirkning i de naturlige vandløb.

De hyppige og ekstreme oversvømmelser, vi for eksempel oplevede i vinteren 2023/2024, kan være et symptom på, at vores vandløbssystemer endnu ikke har tilpasset sig de øgede nedbørsmængder og efterfølgende vandføringer, der kommer af klimaforandringerne. Sådanne begivenheder medfører typisk krav om mere regulering af allerede regulerede vandløb for at sikre mod oversvømmelser. I den proces kan man anvende vores studier af de naturlige vandløb til et bedre design af de nødvendige ændringer af vandløbssystemerne, så det sker på den mest skånsomme måde. Det gælder også i situationer, hvor man i forbindelse med naturgenopretning vil lægge regulerede vandløb om i nye løb. ■

# FOSSIL LORT

## FORTÆLLER OM DINOSAURERNES UDVIKLING

**E**t rigtigt lortestudie! Sådan kan man helt uden at overdrive kalde en ny afhandling, som palæontologen Martin Qvarnström fra Uppsala Universitet og kolleger for nylig har publiceret i *Nature*. I denne afhandling rapporterer forskerne resultaterne af deres undersøgelse af over 500 såkaldte bromalitter – en samlebetegnelse for fossile rester af afføring, opkast og indhold af fordøjelsessystemet – fra dinosaurer og andre organismer, der levede for mellem cirka 231 og 199 millioner år siden i et område i det centrale Europa kaldet det polske bassin. Disse data sammenholdt forskerne med andre fund fra området i form af knogler, plantefossiler, bidmærker og fodspor.

Studiet sætter spot på de første 30 millioner år af dinosaurernes æra i den sene Trias-tid. Indenfor dette tidsrum dukkede de første dinosaurer op og udviklede sig i en mangfoldighed af arter samtidig med, at de voksede til de imponerende størrelser, vi forbinder dem med i dag. Denne tidlige spredning af dinosaurerne er en evolutionær begivenhed, der ikke er særlig godt belyst. Efterfølgende dominerede dinosaurerne på Jorden helt frem til kridttidens slutning for 66 millioner år siden. Fordelen ved at kigge på netop bromalitter er, at det giver et meget direkte fingerpeg om, hvem der spiste hvem på daværende tidspunkt.



En fossil lort (en såkaldt koprolit) fra den knogleknusende dinosaur Smok, der ses som rekonstruktion i baggrunden. Illustration: Grzegorz Niedzwiedzki.

I det nye studium har forskerne undersøgt de fossile lorte ved hjælp af synkrotronstråling for at afsløre, hvad der gemte sig i deres indre. Ved at identificere ufordøjede føde-rester af både planter og dyr kunne de rekonstruere strukturen af fødenettet på forskellige tidspunkter i den udvikling, hvor dinosaurerne gik fra at være meget sjældne til at dominere økosystemerne. Lortene indeholdt rester af fisk, insekter, større dyr og planter såvel som knogler gennemygget af rovdinosaurer, der ligesom nutidens hyæner knuste knogler for at få salt og knoglemarv. Afføringen fra de første store planteædende dinosaurer – de langhalsede sauropo-

der – indeholdt til forskernes overraskelse store mængder træbregner, men også andre plantetyper samt trækul. Bregner kan være giftige for planteædere, så forskerne formoder, at dinosaurerne kan have indtaget trækul for at afgifte maveindholdet.

Overordnet udmøntede studiet sig i en femtrins-model for dinosaurernes udvikling. Det første trin i denne proces var en udskiftning af andre typer reptiler med små altædende dinosaur-forløbere, hvorefter der i trin to dukkede små insekt- og fiskespisende rov-dinosaurer (teropoder) op sammen med andre små altædende dinosaurer. Klimaaendringer i den seneste del af Trias-tiden medførte en markant ændring i plantesamfundene, hvilket banede vejen for større og mere diverse

planteædende dinosaurer i trin 3 og 4, heriblandt de store sauropoder. Det gav så igen ophav til en hurtig udvikling af rovdinosaurer i trin fem, der også udvikles i kæmpestore former som respons på de store byttedyr.

Forskerne mener, at den udvikling, der kan spores i disse data fra det polske bassin, kan forklare det globale mønster i dinosaurernes udvikling. Tilsvarende studier fra andre egne i verden vil i fremtiden kunne be- eller afkræfte dette.

CRK, Kilder: Uppsala Universitet. *Nature* (2024). doi.org/10.1038/s41586-024-08265-4

Bakkegøgeurt,  
*Neotinea ustulata*,  
fra Øland.

Foto: Kjeld Hansen

#### Om forfatteren



Kjeld Hansen er journalist fra Danmarks Journalisthøjskole. Han er en flittig debattør i naturdebatten og har udgivet en lang række bøger om natur og miljø – blandt andet *Det tabte land* fra 2008, som afdækker kampen om den danske natur og dens dramatiske forarmelse gennem de seneste 250 år og han modtog Dansk Forfatterforenings fagbogspris i 2008.

I 2017 udgav han bogen *Det store svigt*, der giver en minutøs gennemgang af den danske naturs udvikling og afvikling gennem de 100 år, hvor den skulle have været beskyttet af naturfredningsloven.

Senest har han oversat og bearbejdet Dave Goulsons bestseller *Den Tavse Klode*, der udkom maj 2023. Bogen giver en formidabel indsigt i insekternes forunderlige liv og betydning for alt andet liv på Jorden.

kjeld@baeredygtighed.dk



# NATUR ER KULTUR

**Det svundne er ingen drøm, men kan tjene som skabelonen for en strålende fremtid. Fortidens natur er ganske vist tabt for evigt, men vi kan genskabe en helt ny natur i fremtiden, hvis bare vi accepterer menneskets medvirken. Under bygmarken danser brushønsene stadig, men uden menneskets hjælp kommer der aldrig fest igen på dansepladserne.**

**H**avørnens genkomst og genopretningen af den uregulerede Skjern Å demonstrerer med en vældig styrke, at alt kan tænkes i det yndige land, når selv det, ingen havde turde drømme om, allerede ER sket. Og der er kun tale om to af de velkendte eksempler.

Med lige så stor rimelighed kunne man vælge at fremhæve odde-rens fremgang i Jylland, tranens spektakulære comeback overalt og det utroligt rige fugle- og dyreliv, der er genopstået i Filsø nord for Varde, efter at den tørlagte sø kom i naturkyndige hænder i 2012. Eller de mere end 100 mindre og større

genetableringer af tørlagte søer og våde områder, som myndigheder og private har bekostet siden 1984. Og i Øresund springer makrelfamiliens ukronede konge atter – tunfisken er vendt tilbage til danske farvande.

Det store arbejde for at redde den lille irgrønne løvfrø kunne også

fortjene omtale; det er lykkedes så godt, at løvfrøen ikke længere behøver støtte fra en placering på Rødlisten!

Som modvægt til den dominerende forarmelse og ødelæggelse, der desværre er hovedtendensen i sagaen om den overgødskede og gennemsprøjtede danske natur, kan der lykkeligvis peges på en række vellykkede projekter, hvor naturen er genskabt. Derfor er det vigtigt at fremhæve, understrege og forstå, at den natur, vi betragter og beskriver i dag, ikke er NATUREN. Natur i dag er kultur, og kultur skabes af mennesket, på godt og på ondt. Deri ligger mulighederne – og nødvendigheden.

Professor Peder Agger, overvismanden fra Naturrådet, der nægtede at nedlægge sig selv under den store politiske massakre på råd og nævn i 2001, formulerede denne nødvendighed allerede i slutningen af forrige århundrede. I bogen *Dyrenes Danmark* fra 1989 skriver han:

*»Men dybest set hænger natur og kultur for os uløseligt sammen. Kulturen og dens frembringelser kan betragtes som bearbejdet natur, hvad enten der er tale om tonerne fra en violin, eller fiskene der vender bugen i vejret i Kattegat. Når dette sidste sker, er det ikke bare naturen, men også os, altså samfundet, der er i krise. Det er et symptom på, at noget kører skævt, i den helhed vi er en del af.«*

Det svundne er derfor ingen drøm, men skabelonen for en strålende fremtid. Under bygmarken danser brushønsene stadig, men uden menneskets hjælp kommer der aldrig fest på dansepladserne.

### **Glem aldrig, hvad der var engang, men se fremad**

Den største fare er, at vi vænner os til, at naturen er det, vi netop ser i dag. At vi accepterer, at den natur, der er tilbage, forringes, uden at vi skulle kunne gøre noget ved det. Eller kører trætte i de deprimerende meldinger om iltsvind, fedtemøg og

politiske trepartsffilier, der vælter ud fra mediefabrikkerne. Er der ingen længere, der søger at holde fast i de svundne værdier, mister vi den nødvendige målestok for at vurdere skidt fra kanel. Den ødelagte natur bliver så at sige det normale. Denne risiko beskrives således af professor Kaj Sand-Jensen i bogen *Den sidste naturhistoriker* fra 2003:

*»Er alle dyrene i et område allerede døde, er der jo ingen risiko for, at der kan ske noget alvorligt, som påkalder sig mediernes opmærksomhed. Når alle bunddyr er udryddet af iltsvind i farvandene omkring Fyn, vil alarmerne efterhånden stoppe, fordi vi dels vænner os til de årligt tilbagevendende iltsvindkatastrofer, og dels ikke oplever så mange døde dyr mere.«*

Derfor er det overmåde vigtigt at fastholde erindringen om, hvad der var engang. Både i form af tørre tal og faktuel viden, men også i kunstnernes maleriske beskrivelser og fotografernes dokumentation. På fundamentet af deres skitser og fotos og videnskabens tabeller bygger vi jo fremtidens natur – eller genopfinder den, om man vil.

Og indsatsen er nødvendig. Beretningen om Danmarks naturhistorie har tragediens triste moltone, og på de store linjer gennemspilles det samme motiv om og om igen: Urfluglen gik tabt, eghjorten forsvandt, storken uddøde, orkideerne blev kvalt, og snart er der også bud efter brushønen, sortterneren og svalen, engblommen, klokkeblomsten og guldsmeden – ja, selv haren er så hårdt ramt af "udviklingen", at den har fået plads på den officielle liste over sårbare dyrearter.

### **Fedtemøg og solcelleparker breder sig i naturen**

I den sidste tid er det blevet åbenbart for alle, hvad marinbiologerne forgæves havde advaret om i årtier – fjordene og havet omkring Danmark er døende. Bunddyr er borte, og flere og flere fiskearter flygter, mens fedtemøgets stinkende, sortbrune algebunker skyller

op langs mange danske kyster. Årsagen er det stadig mere udbredte iltsvind, og skurken kender vi alle: Landbruget.

Og på land hænger en næsten lige så tragisk afvikling af den natur, der trods alt har overlevet indtil nu. På grund af det skandaløse fravær af en fornuftig landsplanlægning smadres egn efter egn af de vanvittigt pladskrævende solcelleparker. I stedet for at beordre disse klimaanlæg lagt op på tagene af produktionsbygninger i landbrug og industri – sådan som de fornuftige tyskere ude i Friesland og andre egne af Schleswig-Holstein har gjort det i årtier – så allokeres nogle af landets bedste dyrkningsjorde – og naturområder – til disse tekniske anlæg. Som i et anfald af panisk angst for klimaforandringer, der uigenkaldeligt allerede er en realitet, og som Danmark bidrager uendeligt lidt til, skal altså også de sidste vådområder ofres. Til byggegrunde for vindmøller og solceller.

Samtidig med at vi genskaber nogle spektakulære naturmonumenter, bliver der stadig mindre almindelig natur. Prisen for de store projekter er høj, hvis landet uden for nationalparker og reservater lægges øde. Rent naturhistorisk kommer flere og flere mennesker til at gennemleve et helt dagligliv i en ørken af ingenting. Naturen bliver samlet i udflugtsmål, som vi kører til på en fridag; den er ikke længere en selvfølge omkring os til hverdag.

Ganske vist grønnes vores byer, vil nogle nok hævde. Åh, joh – ræven lusker rundt om natten i villakvartererne og er nu nået helt ind i hjertet af København, hvor tårnfalken bygger sin rede i byens rådhusårn, og hvilken natteravn af ornitologisk observans har ikke stået stille et kort sekund, fortryllet af husrødstjertens radiosender-støjsang i storbyens hjerte – men er det virkelig den natur, vi vil nøjes med?

Åh ja - evigt ejes kun det tabte.



Langt hovedparten af de danske skove er skabt af mennesker.

Foto: Irina Iriser, Unsplash

### Lad nu naturen selv – eller hvad?

Drømmen om at vende tilbage til dengang naturen lå hen uberørt og kysk er kun en drøm. Og når naturgenopretning forsøges gennemført under kampråbet “Naturen ved udmærket, hvordan den skal passe på sig selv. Så hold fingrene væk”, forvandler drømmen sig nemt til et mareridt.

Velmenende biologer forfægter den ide, at bare menneskene og alt deres postyr fjernes fra landskabet, vil naturen af sig selv genskabe fordums glans og fylde arterne ind. Måske lige bortset fra tilsætning af nogle store “græssere”, som kan være alt fra Maren Malkeko over halvforvildede ponyer, vildsvin, kronstyr, elge og sågar elefanter.

Velmenende, ja – men skræmmende vildledende. Måske nok gælder naturens selvskabende evne for fuglene og andre letbevægelige artsgrupper, dog med den helt nødvendige forudsætning at vi ikke længere jager dem til død og udryddelse. Helt anderledes forholder det sig derimod med fundamentet for det hele: Plantelivet. Hvad der fremvokser af plantearter på arealer, der overlades i naturens vold, er i høj grad de trivielle ukrudtsarter,

som har magten på overgødskede og sprøjtede jorder. De vil myldre ind med deres mange frø, hvis ikke der gøres noget. For den, der vil se sandheden i øjnene, er evidensen at hente på de naturgenoprettede lavbundslande.

Man kunne hævde, at “Lad nu naturen selv”-bevægelsen, eller hvad vi skal kalde den, i virkeligheden vil betyde, at man lader de stærkeste vinde, selvom det betyder, at de små og svagere smadres. Selve argumentet, at vi ikke må forstyrre plantearternes “naturlige” udbredelse, kan ganske vist lyde sympatisk, men det er altså ganske virkelighedsfjernt. Den aktuelle udbredelse af de fleste plantearter er allerede fundamentalt forandret og under konstant kulturpåvirkning – på godt og på ondt.

I dag finder du for eksempel ikke én eneste dueblå Tvepibet Lobelie på Øerne, og sådan vil det fortsætte med at være, selvom vi får udlagt store uforstyrrede naturreservater og ændret den kulturforringede vandkvalitet, så de kemisk-fysiske forhold atter skaber levedygtige forhold for arten. Uden menneskets hjælp har lobelien ingen chancer for atter at nå frem til de gamle voksesteder på Øerne.

Eller tag den yndige Bakkegøgeurt. Engang blomstrede den lille sarte “krudtbrænder” i juni-juli på mindst 50 steder overalt i det ganske land, men i dag er den en yderst sjælden blomst på nogle få overdrev i Himmerland. Om nogen skal den hjælpes med høslæt og afbrænding og en smule afgræsning, og hvad ved jeg, hvis fremtidens børn skal kunne glædes over den. Hvis naturen selv får lov at bestemme, kommer den aldrig igen. Så gror det hele til i krat og skov.

### Hvem skal bestemme udviklingen?

Accepterer man, at det hele er kultur, så indser man også straks, at ude i virkeligheden er miljøkampen for længst afløst af en kulturkamp. Hvilken kultur ønsker vi, og hvem skal bestemme, hvordan landskabet formes i fremtiden? Eller hvor ringe en livskvalitet er vi parat til at leve med? Ønsker vi svinenes tomme landskab med den grønne monoton af endeløse hvedemarker og de nyslåede baroners imiterede herregårde – eller vil vi fremelske det bedste af naturens brogede mangfoldighed i et dynamisk kulturlandskab med respekt for arven efter forfædrene og med nye fremtidsmål?

Sagt mere direkte: Skal de stadig færre jordejere fortsat have lov til



at forfølge deres private økonomiske interesser, eller skal de mange jordløse være med til at bestemme udviklingen?

Diskussionen er ikke ny, men konflikten mellem de to radikalt forskellige kultursyn stod næppe nogensinde skarpere end i dag, hvor der er så lidt land tilbage at strides om. Allerede for 95 år siden blev linjerne trukket markant op af den kulturradikale redaktør og alt-mulig-kritiker, Poul Henningsen. I en kronik den 2. juli 1928 i Politiken præsenterede han sit moderne nyttesyn på naturen:

*»En Ko er Natur for et moderne By-menneske, og det er ikke, fordi Han er mere banal og overfladisk i sin Naturopfattelse end Naturforskeren, der jubler over at finde fyrretyve Sneglearter i en Skovl Mose-mudder (...) Med Beklagelse ser vi Storkene uddø, men Betingelserne for deres Liv i Danmark, de udrændede Marker, hverken kan eller vil vi skaffe dem (...) Ingen vil om tyve Aar være fattigere og derfor sukke over de tusind Insektarter, som forsvandt (...) Men sandt er det jo, at*

*det smerter os, hver gang Antallet af Dyre- og Plantearter forsvinder. Det er en naturlig Konservatisme over for Udviklingen, men hvor mange tønder Land af det overbefolkede Europa bør vi ofre for at bevare de sidste Lammegribbe (...) Er det ikke rimeligt, at med Menneskets bevidste Herredømme behøver jorden færre Arter.«*

### Ja, en kornmark er natur

I dag er den store kritiker fortid, og han bør selvfølgelig ikke dømmes med nutidens målestok, selvom han tog så grueligt fejl. Overraskende er det alligevel, at Poul Henningsen ikke kunne se, hvor lidt datidens naturfredningsforkæmpere egentlig bad om: Man ønskede blot at bevare en restbrøkdæl af den tidligere så vidt udbredte jyske hede. Som i dag handlede naturfredning dengang slet ikke om at stoppe udviklingen, men Poul Henningsen var blind for alle proportioner, når det gjaldt naturfredning. Han valgte at fremføre sin kritik i fundamentalistens alt-eller-intet sprog.

Provokerende, men også præget af Henningsens manglende indsigt i

naturens nødvendighed. Den undskyldning har ingen gyldighed i dag, hvor selv børnehavebørn har en fin fornemmelse for bæredygtighed og biodiversitet. Derfor udløste det også et fuldt berettiget ramaskrig, da landets mest udygtige miljøministre nogensinde udtalte – knap to måneder efter sin tiltræden i foråret 2016 – til citat i en TV-debat: *»Ja, en kornmark er natur for mig.«* Hvilket straks fik Enhedslistens daværende miljøordfører Maria Remert Gjerding til at reagere: *»Det er simpelthen et absurd udsagn, at en kornmark eller en majsmark skulle være natur. Det er en biologisk ørken.«*

Absurd udtalelse, ja – men forkert? Næppe. Teologen Esben Lunde Larsen var landmandssøn fra Vestjylland, så for ham var natur lig landbrugskultur. På samme måde som en flæskestegssandwich med friturestegte pommes frites også er mad for nogle, mens den servering næppe kan kaldes et gourmetmåltid for os andre.

Natur er kultur – ja, men der er forskel på skidt og kanel. ■

**Videre læsning:**  
Dave Goulson: Den tavse klode – Sådan forhindrer vi insekternes undergang. Oversat af: Kjeld Hansen, 2023. Gads Forlag.

Kaj Sand-Jensen & Jens Christian Schou: Fra bakterier til blomsterflor – Plantelivets opståen og udvikling fra urtid til nutid. 2024. Gads Forlag.

Kaj Sand-Jensen & Jens Christian Schou: Danmarks biodiversitet - Før, nu og i morgen. 2022. Gads Forlag.

Kjeld Hansen: Det store svigt. Beretningen om hundrede års naturfredning i Danmark. 2017. Gads Forlag.

**Podcast:**  
Lad naturen passe sig selv. ScienceStories [www.sciencestories.dk/da/artikler/rerun-lad-naturen-passe-sig-selv](http://www.sciencestories.dk/da/artikler/rerun-lad-naturen-passe-sig-selv)

# Læs Naturvidenskabelig Bachelor

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

**RUC**  
Roskilde Universitet

Arbejd på tværs af naturvidenskabelige felter.

Arbejd med topforskere i moderne laboratorier.

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

Læs mere her:



**F A K T A**

*Ole Frøbert: Sund som en bjørn. I serien Science-Faction fra Aarhus Universitetsforlag. 96 sider, 149,95 kr. (inkl. e-bog).*



**Sund som en bjørn**

Hvad laver en hjertelæge dybt inde i de svenske skove på jagt efter brunbjørne? Ole Frøbert og hans team søger efter svaret på, hvorfor bjørne kan gå i hi halvdelen af året og ligge fuldstændig stille for at rejse sig i fuld vigør i foråret. Samme inaktive livsstil ville forårsage alt fra blodpropper til diabetes og knogleskørhed hos mennesker.

Bjørnene er vilde forsøgsdyr, men måske kan de føre os på sporet af ny og bedre medicin mod blodpropper eller lære os at gå i dvale frem for kunstig koma.

**F A K T A**

*Ole Eggers Bjælde: Rummet. I serien*

*Tænkepauser, Aarhus Universitetsforlag 2024. 60 sider, 59,95 kr.*



**Er der liv derude?**

Hvordan opstod universet? Er der liv på andre planeter? Hvad sker der med Jorden i fremtiden? Når vi undersøger rummet, er det de helt store spørgsmål, vi kan stille – samtidig med at de konkrete undersøgelser er fyldt med små finurlige historier om alt fra ænder i Frankrig og bakterier på Månen til istapper på Den Internationale Rumstation. Det fortæller Ole Eggers Bjælde om i denne nye *Tænkepause* fra Aarhus Universitetsforlag.

**F A K T A**

*Niels Arbøl: Skabelsens vidunder. De mest berømte kristne biologer i historien. Queenswood Media Productions 2024. 480 sider, 298,- kr.*



**Skabelsens vidunder**

Mange mennesker har tilsyneladende den opfattelse, at biologisk videnskab og evolution står i modsætning til den kristne tro. Denne bog viser noget andet. Den portrætterer 20 af de mest berømte kristne biologer gennem historien – blandt andet Carl von Linné, Gregor Mendel, Louis Pasteur, Alexander Fleming, Jane Goodall og Simon Conway Morris – og kaster derved lys over forholdet mellem biologi og kristendom. Forfatteren Niels Arbøl er biolog, cand. scient. et art. i biologi og religion og har udgivet adskillige bøger om biologi, religion og samfund



**F A K T A**

*Se de nominerede billeder og stem på din favorit på Statens Naturhistoriske Museums hjemmeside: [snm.dk](http://snm.dk).*



Foto: © Francisco Negroni, Wildlife Photographer of the Year.

**Vær med til kåre årets naturbillede**

Frem til den 7. september 2025 kan du se fotoudstillingen *Wildlife Photographer of the Year* på Statens Naturhistoriske Museum i København.

Ud over de udstillede billeder valgt af en professionel jury, udpeger Natural History Museum i London yderligere 25 billeder til en global offentlig afstemning om den eftertragtede publikumspris People's Choice Award.



## Nye undervisningsmaterialer

### Arbejdsark om plastisk ler

Arbejdsark til artiklen Danmarks lumske ler fra *Aktuel Naturvidenskab* nr. nr. 6, 2017. Artiklen belyser dannelsen og egenskaberne ved plastisk ler. Den er et glimrende eksempel på, hvordan geologi og kemi arbejder sammen om at belyse forhold, der er af stor betydning for vores udnyttelse af jordens ressourcer. Samt om hvordan de geologiske forhold har betydning for sikkerhed i forhold til anlæggelse af bebyggelse, jernbaner mv. og ikke mindst i forhold til at forstå problemstillingerne ved jordskredet ved Ølst, der kulminerede i vinteren 23-24.

Arbejdsarket passer til Naturgeografi B/C og Kemi C

Se [aktuelnaturvidenskab.dk](http://aktuelnaturvidenskab.dk)

### Arbejdsark om gøpler og iltsvind

Arbejdsarket tager udgangspunkt i artiklen *Iltsvind er godt - for gøpler* fra *Aktuel Naturvidenskab* nr. 4, 2024

Artiklen handler primært om invasive arter, iltsvind og marine økosystemers funktion. Dette arbejdsark og i det hele taget denne problemstilling er relevant, når man arbejder med for eksempel fjordenes økologi, biodiversitetskrisen og den grønne trepart.

Arbejdsarket passer til Biologi A/B/C og Bioteknologi A.

Begge arbejdsark er udarbejdet af Signe Hansen og Kim Bruun, begge fra Viborg Gymnasium.

## ABONNEMENTS-SERVICE

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

Kontakt os på telefon:

3036 0662 / 3715 2094

E-mail: [abo@aktuelnaturvidenskab.dk](mailto:abo@aktuelnaturvidenskab.dk)

Abonnement kan også bestilles via hjemmesiden: [aktuelnaturvidenskab.dk](http://aktuelnaturvidenskab.dk)

Husk at melde flytning til ny adresse.

Vi modtager desværre ikke automatisk besked om din nye adresse.

### Til nye abonnenter:

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

## OM AKTUEL NATURVIDENSKAB

### Styregruppe

- **Astrid C. Johansen**, kommunikationskonsulent Roskilde Universitet
- **Birgitte Lyhne Broksø**, kommunikationschef, Det Natur- og Biovidenskabelige Fakultet, Københavns Universitet
- **Mikkel Linnemann Johansson**, teamleder, Det Naturvidenskabelige Fakultet, Syddansk Universitet
- **Poul Nissen**, prodekan, Faculty of Natural Sciences, Aarhus Universitet

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

Layout: Jørgen Dahlggaard

Tryk: Jørn Thomsen Elbo A/S

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

Oplag: 4.200

### Redaktionsgruppe

- **Astrid C. Johansen**, Roskilde Universitet
- **Birgitte Svennevig**, Det Naturvidenskabelige Fakultet, Syddansk Universitet
- **Carsten Rabæk Kjær**, Aktuel Naturvidenskab
- **Jørgen Dahlggaard**, Aktuel Naturvidenskab
- **Michael Skov Jensen**, Københavns Universitet

### Redaktion:

Telefon: 3036 0660 (Carsten) / 3036 0662 (Jørgen)

E-mail: [red@aktuelnaturvidenskab.dk](mailto:red@aktuelnaturvidenskab.dk)

Hjemmeside: [aktuelnaturvidenskab.dk](http://aktuelnaturvidenskab.dk)

### Postadresse:

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

### Omslagsfoto:

Martin Røssel Larsen ved et massespektrometer på SDU. Foto: Jacob Fredegaard Hansen.



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



Fotos: Colourbox og Alison R. Taylor/CC by 2,5

## Algen på tavlen

Af Carsten R. Kjaer, Aktuel Naturvidenskab

Som den opmærksomme læser måske vil erindre, har vi på de sidste to bagsider fortalt om tavlekridtets fortræffeligheder – eller mangel på samme. Som geolog synes jeg, at vi for en ordens skyld bør runde denne kridtfortælling af med at se på den geologiske side af sagen. For tavlekridtets historie starter oprindeligt i undergrunden, og det er en fascinerende historie i sig selv.

Når vi geologer siger kridt, tænker vi som regel ikke på læringssituationer, men på den kalkbjergart, vi kalder kridt og som er dannet i – ja, kridttiden. Og hvad kridt angår, er vi godt hjulpet her i Danmark, for det findes overalt i vores undergrund. Vi kalder det meget pædagogisk for skrivekridt, så der ikke er tvivl om, hvad det kan bruges til. Det danske skrivekridt er dannet i den sene del af kridttiden for mellem 100 og 66 millioner år siden. Nogle steder træder det frem i lyset som ved Møns og Stevns Klinter samt i kalkgrave, hvor det brydes til for eksempel cementproduktion.

Faktisk kan man blive helt svimmel over tanken om alt det skrivekridt, der findes i undergrunden. Ikke mindst, når man tager i betragtning, at kridt grundlæggende består af kalkskallerne fra mikroskopiske alger, der over årmillionerne dryssede ned på havbun-

Møns Klint består af skrivekridt, som igen består af coccolitter. Indsat ses en hel, nutidig coccosfære.

den. En enkelt alge har et kalkskelet, der består af flere kalkplader klistret sammen i en lille kugle kaldet en coccosfære. De enkelte kalkplader kaldes coccolitter, og det er dem man ser i kridtet, da coccosfæren som regel falder fra hinanden, når algen er død.

Kridtet i den danske undergrund er overalt flere hundrede meter tykt, men sine steder er det helt op til 2000 meter. Da en enkelt coccolit har en størrelse på cirka 5 mikrometer, skal der helt enormt mange af dem til for at lave så tykke lag. Hvis vi som eksempel siger, at kridtet et sted er 1000 meter tykt, ligger der altså her i ethvert coccolit-stort areal cirka 200 millioner coccolitter oven på hinanden. Og hvis vi antager, at de er aflejret over en tidsperiode på 34 millioner år, svarer det i runde tal til, at der er drysset en ny coccolit ned på havbunden lige netop her hver anden måned. Det er en illustration af, at det er svært at forholde sig til geologisk tid andet end som regneøvelser.

Når læreren i dag tegner en streg med et stykke tavlekridt (lavet af rigtigt kridt!), tværer hun altså i virkeligheden resterne af en masse for længst døde alger ud på tavlen. Og synes man, at timen med kridt og tavle føles lang, så tænk lige over, hvor lang tid naturen har været om at skabe fundamentet for de kridtstreger. ■