

NATURVIDENSKAB OG TEKNOLOGI
DIREKTE FRA FORSKNINGSVERDENEN

AKTUEL *natur*VIDENSKAB

MIKROORGANISMER I JORDEN VENDER OP OG NED PÅ METHANREGNSKABET

Selv-gødende planter til landbruget
Hvordan opnår vi en bæredygtig plastikkultur?
Hjernen: Det mest komplekse organ i kroppen

NR. 1 - 2024 MARTS 50 KR.

Det periodiske system som spil

Hvis du er til både spil og naturvidenskab, så kan du nu få din lyst styret i et nyt kortspil bygget på det periodiske system. Det gælder om at lægge alle sine grundstoffer på de rigtige pladser, og det kan spilles på tre måder: som hurtigt kortspil, som samarbejdsspil og som konkurrence. Man behøver ikke at kende det periodiske system på forhånd for at kunne være med. Spillet er udviklet i et samarbejde mellem professor Thomas Just Sørensen fra Københavns Universitet, Videnskabsklubben og virksomheden We Love Games.



Årslegat til topforsker i fedtceller

Et velfungerende fedtvæv spiller en vigtig rolle for vores sundhed. Imidlertid ved vi ikke så meget om, hvordan fedtcellerne udvikler sig, hvordan generne er reguleret i fedtcellerne, og hvordan de forskellige celletyper



Foto: Simon Klein-Knudsen

i fedtvævet påvirker hinanden. Netop disse spørgsmål forsøger professor fra Institut for Biokemi og Molekylær Biologi på Syddansk Universitet Susanne Mandrup med sin forskningsgruppe at besvare. Og det gør hun så godt, at hun netop er blevet tildelt Villum Kann Rasmussens Årslegat på 5 millioner kroner.

Kilde: SDU

Endnu en fornem pris til stjerneforskere

Professor emeritus Jørgen Christensen-Dalsgaard fra Institut for Fysik og Astronomi ved Aarhus Universitet modtager sammen med Conny Aerts fra KU Leuven og Douglas Gough fra Cambridge University i England Crafoord-prisen i astronomi. De tre får prisen – og seks millioner svenske kroner til deling – for deres arbejde med såkaldt asteroseismologi, som gør det muligt at se ind i Solen og andre stjerner. Crafoordprisen uddeles i et samarbejde mellem Crafoordstiftelsen og Det Kongelige svenske videnskabsakademi. I 2022 modtog Jørgen Christensen-Dalsgaard Kavli-prisen, også dengang sammen med Conny Aerts.



Foto: Rasmus Rørbæk

Quizzen

Bælgplanter som ærter og kløver har en særlig egenskab, som forskere gerne vil overføre til andre afgrødeplanter. Hvilken?

1. De har i modsætning til andre planter slet ikke brug for næringsstofferne nitrogen og fosfor i deres stofskifte.
2. De kan i symbiose med bakterier skaffe nitrogen direkte fra luften.
3. De kan skaffe fosfat fra jorden via symbiose med svampe i deres rødder.

Læs svaret i artiklen om selv-gødende planter i dette nr.

Lianer vinder frem

I verdens skove konkurrerer lianer – også kaldet slyngplanter eller klatreplanter – med træer om plads og ressourcer. Og konkurrencefordelen tipper til fordel for lianerne, når skovene forstyrres af menneskelige aktiviteter i kombination med klimaændringer. Det viser en ny vurdering baseret på et datasæt, hvor forskere har analyseret 651 vegetationsprøver, der tilsammen repræsenterer flere end 26.000 lianer og 82.000 træer fra 556 lokaliteter verden over. Lianer kan derved blive en kritisk faktor, der hindrer skove i at komme sig i liangunstige klimaer. Dermed kan det også få betydning for skovenes potentiale for at lagre CO₂ fra atmosfæren.



Foto: Mark Marathoni/CC BY-SA 3.0

Kilde: Glob Change Biol. 2024;30:e17140.

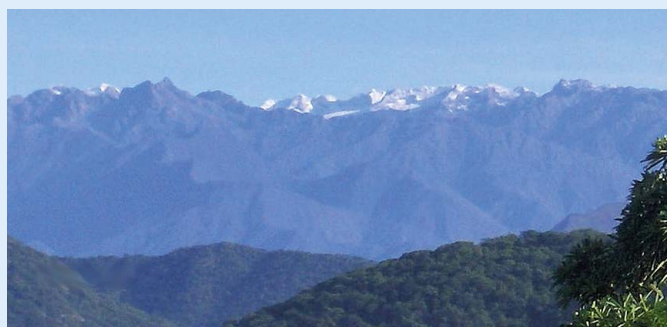


Foto: Public domain

Rodløse bjerge

De fleste høje bjergområder er opstået ved deformation af jordskorpen, hvor de tektoniske plader støder sammen. Det skaber en tyk "rod" af bjergarter under de høje bjerge. Tyngdemålinger i Sierra Nevada de Santa Marta-bjergene i Columbia, der når en højde over 5 kilometer, tyder imidlertid på, at jordskorpen her er usædvanlig tynd. Forskere fra Canada og USA har nu ved hjælp af computersimuleringer fundet, at bjergene formentlig også har haft en tyk rod engang. Men fordi bjergarterne i roden var koldere og havde en højere vægtfylde end de underliggende bjergarter i Jordens kappe, er de nærmest som en dråbe langsomt sunket ned i kappen og har efterladt de rodløse bjerge ovenover.

Kilde: JGR Solid Earth, Volume 129, Issue 1

indhold



Forskning baner vejen for selv-gødende planter til landbruget

Kun ganske få planteafgrøder behøver ikke blive gødet med næringsstoffet kvælstof. Denne unikke egenskab er forskere i færd med at kopiere ind i alt fra majs til byg, så verden kan komme af med klimabyrden fra produktionen af kunstgødning.

8



Hvordan opnår vi en bæredygtig plastikkultur?

Vi skal ændre adfærd som samfund og nedsætte vores plastikforbrug. Derudover bliver vi nødt til at tage en pragmatisk og tværfaglig synsvinkel for at finde den bedste løsning for plastikgenanvendelse.

14



Kan "blåt carbon" – økosystemer modvirke klimaændringer?

Truede økosystemer som mangrove-skove, saltmarsker og havgræsenge er af mange blevet fremhævet som en del af løsningen på klimakrisen. Det er dog usikkert, om disse systemer tilbageholder tilstrækkeligt carbon, så det kan mærkes i den globale CO₂-balance.

20



Hjernen: Det mest komplekse organ i kroppen

Hjerneforsker Leif Østergaard tager os med på en rejse fra de første opdagelser omkring hjernen til vores tilbøjelighed til at blive programmeret til at "indtage" alt fra alkohol til sociale medier.

30

FORSKNING OG NYHEDER

- 4 KORT NYT
- 7 Støj beskytter persondata
- 8 Forskning baner vejen for selv-gødende planter til landbruget
- 14 Hvordan opnår vi en bæredygtig plastikkultur?
- 20 Kan "blåt carbon" – økosystemer virkelig modvirke klimaændringer?
- 25 Kryptologi gør beskeder til banken til det rene volapyk
- 30 Hjernen: Det mest komplekse organ i kroppen
- 36 Mikroorganismer i jorden vender op og ned på methanregnskabet
- 42 Service
- 44 BAGSIDEN: Respekt til smectit

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

David Lundbek Egholm, professor, Faculty of Natural Sciences, Aarhus Universitet.

Redaktion

Redaktører Carsten Rabæk Kjaer og Jørgen Dahlgaard

Tlf.: 3036 0660 / 3036 0662 / 8715 2094

E-post: red@aktuelnaturvidenskab.dk

Hjemmeside: aktuelnaturvidenskab.dk



SPONSOR- ABONNENTER



Knust klippe kan fjerne CO₂ fra atmosfæren

Skal vi nedbringe udslippet af CO₂ til atmosfæren? Eller forsøge at fjerne CO₂ fra atmosfæren? Marinbiolog Carolin Löscher fra Syddansk universitet foreslår det sidste og har eksperimenteret med en metode, der kan netop det. Metoden går ud på at hælde knust sten i hav- eller flodvand og lade det igangsætte en kemisk proces, der trækker CO₂ fra atmosfæren og ned i havvandet, hvor det lagres. Baggrunden for ideen er, at kulstof ikke kun cirkulerer i et biologisk kredsløb, men også i et geologisk kredsløb, hvor CO₂ over tid fjernes af mineraler, som forvitrer og skylles ud i floder og have, hvor CO₂'en så enten synker eller opløses kemisk. Det geologiske kulstofkredsløb sørger for, at kulstof lagres i meget længere tid end det biologiske kulstofkredsløb – men det foregår også meget langsommere end det biologiske.

»Hvis man leger med tanken om at speede disse geologiske processer op, åbner det nogle helt nye muligheder for at imødegå den globale opvarmning. Der går faktisk ikke mere end et par dage fra man hælder knust



Foto: Valentin Rühl.

sten i havet til, at kemiske processer fører til, at der trækkes CO₂ ud af atmosfæren til binding i havvandet», forklarer Carolin Löscher.

Det afgørende er, at sten- og bjergarterne er basiske. Når man tilføjer basisk, knust sten til havvand, omdannes havvandets CO₂ til hydrogenkarbonater og karbonater, som er stabile forbindelser med en levetid på cirka 10.000 år. Ved den proces opstår et underskud af CO₂ i overfladevandet. Denne ubalance genoprettes hurtigt ved, at vandet optager CO₂ fra luften, og derved fjernes CO₂ fra atmosfæren.

Eksempler på sten- og klippearter, der kan bruges til formålet, er bjergarter rige på mineralet olivin samt kalksten og dolomit. Disse findes i rigt mål mange steder i verden, og ifølge Carolin Löscher er der mere end rigeligt til at bidrage væsentligt til fjernelse af CO₂ fra atmosfæren. Flere steder i verden pågår større og mindre forsøg for at teste ideen, og over de senere år er erfaringerne begyndt at rulle ind fra forskningsmiljøerne, blandt andet fra Carolin Löschers forskningsgruppe. De er nu blevet samlet i en "Best Practice Guide"; en guide, der løbende bliver opdateret med ny viden og nye erfaringer.

På billedet tager forskerne vandprøver ved Avernakø i det sydfynske Øhav for at studere responsen hos de naturlige samfund af mikroorganismer og phytoplankton på tilsætning af knust klippemateriale.

Birgitte Svennevig, journalist, SDU. Kilde: "Guide to Best Practices in Ocean Alkalinity Enhancement Research": <https://sp.copernicus.org/articles/2-oea2023/>

Pilehegn som alternativ til kloaker

Imange danske byer arbejdes der på massive udvidelser af kloaknettet for at håndtere de stigende mængder regn. Men den tilgang hører fortiden til mener professor i landskabsarkitektur og byplanlægning Marina Bergen Jensen fra Københavns Universitet.

Sammen med sine kolleger har hun udviklet en helt ny teknologi til lokal håndtering af regnvand, som kan være et bedre alternativ til både kloakudvidelser og den første generation af løsninger til lokal håndtering af regnvand, der alle er baseret på huller i landskabet kendt som regnbede, vejbede og faskiner.

Den lovende opfindelse er allerede sat i arbejde og håndterer regnvandet lokalt i



Foto: Københavns Universitet

en boligforening i Valby. Det drejer sig om Danmarks første "Grønne Klimaskærm" som Københavns Universitet har udviklet sammen med bl.a. Teknologisk Institut, Københavns Kommune og Boligforeningen 3B og Københavns Andelsboligforening (KAB).

Udefra ligner klimaskærmen et tre meter højt pilehegn, som udover at dæmpe

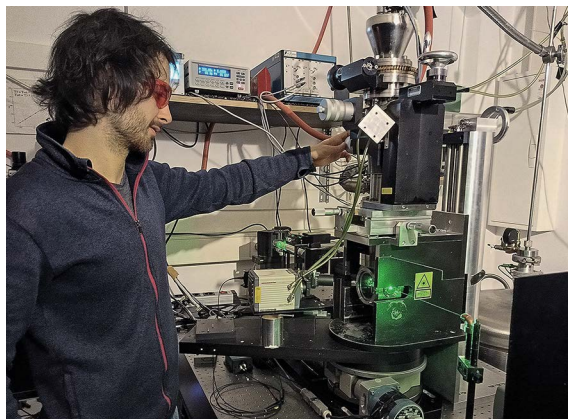
støjen fra den stærkt trafikerede Folehaven også håndterer tagvand fra en nabobygning. Ved hjælp af tyngdekraften og de forbundne kars princip føres regnvandet fra tagrenden til toppen af skærmen. Her fordeles vandet over hele skærmens længde, hvorefter det opsuges af mineraluld, der er placeret

bag pileflet-panelerne.

Fra klimaskærmen fordampes tagvandet på samme måde, som vasketøj hænges til tørre på en tøjsnor. Ved store regnskyl, en såkaldt 10-års-regnhændelse (cirka 60 mm på et døgn), sker der nedsivning under skærmen, mens de helt ekstreme 100-års-hændelser (cirka 90 mm på et døgn) kan parkeres på en græsplæne ved siden af.

Første måling af materiale-tid

Tiden kan ikke gå baglæns, det ved alle. Ellers ville nogle mennesker blive yngre med tiden, hvilket jo aldrig sker. I fysikken udtrykkes denne "irreversibilitet" ved naturloven, at entropien (som populært kan oversættes til graden af uorden) kan stige eller være konstant, men aldrig falde. I et isoleret system kan entropien dog godt falde: Når man sætter mad i køleskabet, falder dens entropi, men entropien stiger samtidig mere i omgivelserne.



Den eksperimentelle opstilling på Darmstadt TU. Foto: Till Böhmer.

Nu er det lykkedes at finde systemer, hvor tiden – i statistisk forstand – kan gå baglæns, samtidig med at entropien stiger. Forsøget, som er er udført i et samarbejde mellem Glas og Tid gruppen på RUC og Darmstadt TU, studerer hvordan materialer som glas og plastik ældes med tiden. Under velkontrollerede omstændigheder gennemlyses en meget sejt-flydende væske tæt på glasovergangen (hvor den størkner til en glas) af en kraftig laser, og det spredte lys observeres med et følsomt kamera, som tager 10 bil-

leder i sekundet. Over flere døgn giver det en enorm mængde data, som indeholder information om, hvordan materialet ældes og som kan analyseres statistisk.

Siden 1971 har man antaget, at ethvert ikke-krystallinsk materiale har sit eget "indre ur", som bestemmer, hvor hurtigt materialet ældes. Sænker man temperaturen, går

uret langsommere, fordi ældningen går langsommere. Vores opstilling har bekræftet dette og for første gang gjort det muligt at bestemme den såkaldte "materiale-tid", som definerer det indre ur. Vi undersøgte dernæst, hvordan fluktuationerne i intensiteten af det spredte lys varierer med materiale-tiden. Efter at have analyseret data på tre helt forskellige måder, konstaterede vi, at der ingen forskel er på, om materiale-tiden går fremad eller tilbage. En sådan "reversibilitet" er normalt kendetegnet for, at et system er i termisk ligevægt,

så konklusionen er, at et system, der ældes, er tættere på ligevægt, end man hidtil har troet. Det mærkelige er, at to helt anderledes systemer, som aldrig kommer i ligevægt – en kunstig ler opblandet med vand og en epoxy, der tværbinder kemisk – udviser samme reversibilitet i materiale-tid. Det er et mysterium, vi nu undersøger nærmere.

Af Jeppe Dyre, Professor ved Glas og Tid gruppen, RUC. Artikel: Böhmer, T., Gabriel, J.P., Costigliola, L. et al. *Nature Physics* (2024).

Slankestof fra giftig plante kan nu dyrkes i gær

I Kina lærer børn, at de ikke skal ved røre ved planten, som på dansk hedder tordengudsvin. På kinesisk har planten nemlig tilnavnet "syv skridt til døden", da den er så giftig, at man risikerer at drætte død om efter få skridt, hvis man spiser af den.

Men tordengudsvin (*Tripterygium wilfordii*) gemmer også på noget, der er mere fordelagtigt for os mennesker. Den producerer nemlig stoffet celastrol, som har en stærk effekt mod overvægt.

Og nu er et forskerhold fra Institut for Plante- og Miljøvidenskab på Københavns Universitet lykkedes med at fremstille stoffet bioteknologisk. Forskerne har som de første kortlagt reaktionsvejen med alle de 15 biokemiske trin, som planten gennemgår, når den danner celastrol. Disse trin er nødvendige at kende for at genskabe stoffet biosyntetisk.



Celastrol bliver dannet i roden af planten tordengudsvin (*Tripterygium wilfordii*). Foto: Nikolaj Hansen

Forskerne har derefter formået at fremstille syntetisk celastrol i en tank med ganske almindeligt gær, som de har brugt som en værtsorganisme til at producere stoffet for dem.

»Vi har fundet ud af, hvordan planten danner celastrol ved at finde alle leddene i fremstillingsprocessen. Det betyder, at vi kunne tage

de gener og enzymer, som laver stoffet, og putte dem over i en anden organisme, som ikke danner giftige stoffer. Og det er det, vi har gjort med gær,« siger Yong Zhao.

Ifølge professor Sotirios Kampranis, som også har været en del af studiet, behøver man blot at fodre celastrol-molekylet med sukker, og så får du et stof nærmest i ren form uden de giftige stoffer, som ellers følger med fra naturens side.

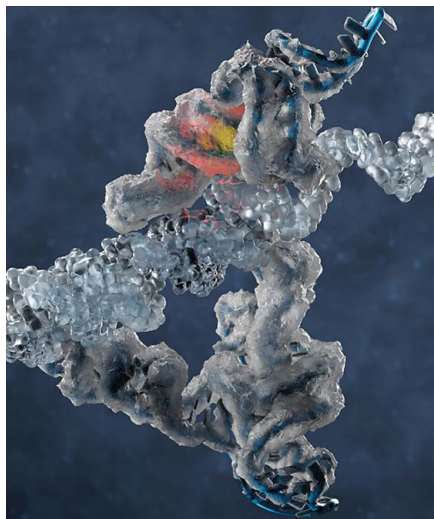
»Processen er både simpel og effektiv, og så tager den kun en uge. Og den foregår uden brug af giftige opløsningsmidler eller katalysatorer, som ellers typisk bruges i kemiske synteser. Jeg tror, der er et kæmpe potentiale her,« siger Sotirios Kampranis.

Maria Hornbek, Københavns Universitet.
Kilde: *Nature Chemistry* vol. 15, pp 1236–1246 (2023).

På sporet af livets første kopimaskine

En levende organisme skal kunne kopiere sig selv og sit DNA, hvilket sker via protein-kopimaskiner. Et afgørende punkt i livets historie var derfor, da denne evne opstod første gang. Mange forskere mener, at da livet opstod i Jordens barndom, var det i kraft af en RNA-kopimaskine. RNA er populært sagt en molekylær fætter til DNA og findes stadig i vores celler som molekylær budbringer mellem DNA og protein. Teorien om RNA-kopimaskinen er dog udfordret af, at den oprindelige kopimaskine i dag er forsvundet, sandsynligvis udkonkurreret af de mere effektive protein-kopimaskiner. For at udforske teorien om en tidlig "RNA-verden" byggede forskere ved MRC-LMB Cambridge i England derfor i 2018 en molekylær efterligning af den originale RNA-kopimaskine, som faktisk er i stand til at kopiere lange RNA-molekyler.

I et samarbejde med forskere fra Aarhus Universitet er det nu lykkedes at bestemme denne RNA-kopimaskines atomare struktur ved hjælp af såkaldt cryo-elektronmikroskopi og dermed få indsigt i, hvordan den i



Billede: Rune Kidmose.

praksis fungerer. Det viste sig overraskende nok, at strukturen har slående ligheder med moderne proteinbaserede kopimaskiner, selvom den er et produkt af kunstig evolution i laboratoriet. Den har molekylære domæner arrangeret i en form som en åben hånd, der griber om det RNA, der bliver kopieret. Det er et slående eksempel på, hvordan evolutionen

kan genanvende de samme strukturelle principper, selvom udgangsmaterialet er vidt forskelligt. Det giver håb om, at udforskning af molekylære dobbeltgænger-molekyler skabt i laboratoriet kan lære os om de oprindelige processer, der ledte til livets oprindelse.

Det lykkedes også forskerne på baggrund af deres undersøgelser af RNA-kopimaskinen og andre eksperimentelle data at bygge en model for, hvordan selve kopieringsprocessen foregår.

Billedet viser RNA-kopimaskinen (et såkaldt RNA-polymerase-ribozym), som den er blevet afsløret ved hjælp af cryo-elektronmikroskopi. RNA-kopimaskinen er vist med en kappe af is omkring sig for at symbolisere, at den fungerer bedst under iskolde forhold. Det område i RNA-molekylet, hvor kopieringen udføres – molekylets motor – er vist som gult/rødt lys, og molekylet balancerer på en gennemsigtig RNA-streng, der bliver kopieret.

CRK, Kilde: Emil L. Kristoffersen og Ebbe S. Andersen, Aarhus Universitet/PNAS Vol. 121, No. 2

Roskilde Universitet

Læs Naturvidenskabelig Bachelor

” Vi finder et problem, og så leder vi efter naturvidenskabelige metoder til at løse det.

Vi samarbejder fx med hospitaler om modeller for, hvor lang tid kroppen kan tåle behandling med strålingsterapi mod kræft.”

— Max har læst Naturvidenskabelig Bachelor



Foto: Ture Andersen

RUC



Foto: Shutterstock

Støj beskytter persondata

I det moderne sundhedsvæsen er det et helt centralt værktøj at indsamle og analysere data for en stor gruppe patienter for at finde mønstre. Hvem har gavn af en bestemt behandling? Hvem risikerer at få bivirkninger? Men datasæt med personoplysninger skal beskyttes. Dels for at værne om den enkeltes ret til privatliv, dels fordi læk vil svække borgernes tillid, så færre vil sige ja til at medvirke i undersøgelser fremover.

Derfor har forskere fra Datalogisk Institut på Københavns Universitet udviklet en smart metode til at beskytte datasæt.

»Der er mange eksempler på, at datasæt er stillet til rådighed for offentligheden i anonymiseret form, hvorefter folk har været i stand til at finde frem til deltagernes identitet. Det skyldes, at der findes så mange andre kilder til information i den moderne verden. Derfor vil det ofte være muligt at afdække folks identitet selv uden navne eller CPR-numre. Men vi har fundet en praktisk og økonomisk måde at beskytte datasæt, der anvendes til maskinlæring,« siger ph.d.-studerende Joel Daniel Andersson.

Tilfældige data

Forskernes metode består i at tilsætte tilfældige data, såkaldt støj, til de data der skal sløres. I modsætning til kryptering, hvor man

tilføjer støj for senere at fjerne den igen, vil støjen i forskernes metode blive i datasættet. Faktisk vil det være umuligt at fjerne den, for støjen kan ikke skelnes fra de rigtige data.

Ifølge Joel Daniel Andersson gælder det om at tilføje en tilpas mængde støj, så det bliver umuligt at genkende de oprindelige data, men samtidig bevare værdien af datasættet.

»Hvis der er nok støj i dataene, bliver det umuligt at udlede værdien af et enkelt datapunkt, selv hvis du kender samtlige øvrige datapunkter. Man kan sige, at vi sætter et autoværn op omkring vekselvirkningen mellem analytiker og datasæt. Da analytikerne ikke får de rå data, men kun kan stille spørgsmål til datasættet, får de aldrig viden om individer. Dermed kan analytikerne aldrig lække data hverken bevidst eller utilsigtet.«

Beskyttelse af privatlivet

Naturligvis er det surt for ejeren af et datasæt at skulle forurene output fra det med støj.

»En noget dårligere brugsværdi af datasættet er den pris, man betaler for at beskytte retten til privatliv for de deltagere, som har leveret data,« siger Joel Daniel Andersson

Der findes ikke en universelt rigtig balance mellem beskyttelse af et vilkårligt datasæt

og brugbarheden af det, forklarer Joel Daniel Andersson:

»Du skal vælge den balance, der er rigtig i det givne tilfælde. Hvis vigtigheden af beskyttelse af privatliv er meget høj – for eksempel når der er tale om medicinske data – bør du vælge en stærk beskyttelse. Der skal altså tilføjes meget støj. Det vil nogle gange betyde, at du bliver nødt til at have flere data, altså have flere personer med i undersøgelsen, for stadig at have værdi af dit datasæt. I andre situationer, hvor behovet for beskyttelse er knap så højt, kan du nøjes med at tilsætte mindre støj. På den måde bevarer du værdien af datasættet bedre, og du mindsker også dine udgifter.«

Netop økonomi er den vigtigste grund til, at forskergruppens metode har fået så stor opmærksomhed, tilføjer han:

»Kernespørgsmålet er, hvor meget støj du skal tilsætte for at opnå et givent niveau af beskyttelse. Det er her vores smidige mekanisme har et fortrin i forhold til kendte metoder. Vi kan klare os med mindre støj og med lavere forbrug af computerkraft. Kort sagt mindsker vi udgiften ved at beskytte privatlivet.«

Michael Skov Jensen, Københavns Universitet, <https://arxiv.org/pdf/2306.09666.pdf>

Forskning baner vejen for **SELV-GØDENDE PLANTER TIL LANDBRUGET**

Kun ganske få planteafgrøder behøver ikke blive gødet med næringsstoffet nitrogen (kvælstof). Denne unikke egenskab er forskere i færd med at kopiere ind i alt fra majs til byg, så verden kan komme af med klimabyrden fra produktionen af kunstgødning og skabe et mere bæredygtigt landbrug.

Om forfatteren
Af Kristian Sjøgren,
videnskabsjournalist.
ksjoegren@gmail.com



**DANMARKS FRIE
FORSKNINGSFOND**
INDEPENDENT RESEARCH
FUND DENMARK

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

Danmarks Frie Forskningsfond dækker alle videnskabelige hovedområder og uddeler hvert år godt 1 mia. kr. til forskningsprojekter baseret på forskernes egne ideer. Danmarks Frie Forskningsfond består af 84 anerkendte forskere udpeget på baggrund af deres høje faglige kompetence. Formand for Danmarks Frie Forskningsfond | Natur og Univers er professor ved Københavns Universitet, Henrik Grum Kjærgaard. Læs mere på www.dff.dk

For 400 millioner år siden skete der noget i verden, som indenfor de kommende år kan hjælpe Klodens klima og være med til at brødføde estimerede 10,4 milliarder mennesker på vores lille blå planet. Dengang for 400 millioner år siden var planterne kun lige begyndt at etablere sig på landjorden, der indtil da havde været gold, mørk og kun beboet af svampe og bakterier. Med planternes ankomst ændrede Jorden sig dog dramatisk. Den blev grønnere, skove opstod, og det banede alt sammen vejen for, at de første dyr nogle millioner år senere kunne leve på land og finde føde.

Det var dog ikke kun på global skala, at tingene begyndte at ændre sig i livets fjerne fortid. Det samme skete i det mikroskopiske. For 400 millioner år siden skete der noget bemærkelsesværdigt mellem landjordens oprindelige beboere (svam-

pene) og de nytilkomne (planterne) – der opstod en symbiose. Begge organismer havde noget, som den anden kunne bruge, og derfor gik de sammen i et unikt samarbejde, der har været indtil i dag og dermed eksisterer i de fleste af nutidens landplanter.

Meget simpelt går samarbejdet ud på, at planterne inviterer svampene ind i deres rødder og giver dem sukker og fedtstof for til gengæld at kunne få fat i noget af det fosfat, som svampene udvinder fra jorden. Fosfat skal planter bruge til at vokse, og med symbiosen blev det muligt for planterne at danne et udvidet rodnet og blive mere tørke-resistente.

Samarbejdet mellem planter og svampe var en kæmpe fordel for begge typer af organismer, som efterfølgende stortrivedes. For omkring 100 millioner år siden

opstod der så igen et bemærkelsesværdigt samarbejde, som gjorde nogle få plantearter i stand til at indgå endnu en symbiose. Denne gang var det med bakterier, som kan tage gassen dinitrogen, N_2 ud af luften og omdanne den til ammonium, som planterne kan udnytte som nitrogenkilde. Også disse bakterier koloniserede planternes rødder, hvor bakterierne forsynes med sukker fra fotosyntesen. Som "betaling" får planterne nitrogen fra bakterierne. Denne symbiose findes i dag hos bælgeplanter som ærter, hestebønner, lupin, kløver og sojabønner, som kan gro, uden at landmænd skal tilføre nitrogengødning, hvilket de ellers skal til alle andre afgrødeplanter.

Symbiose kan give inspiration til landbruget

Der er gået henholdsvis 400 millioner og 100 millioner år, siden planterne indgik symbioserne med

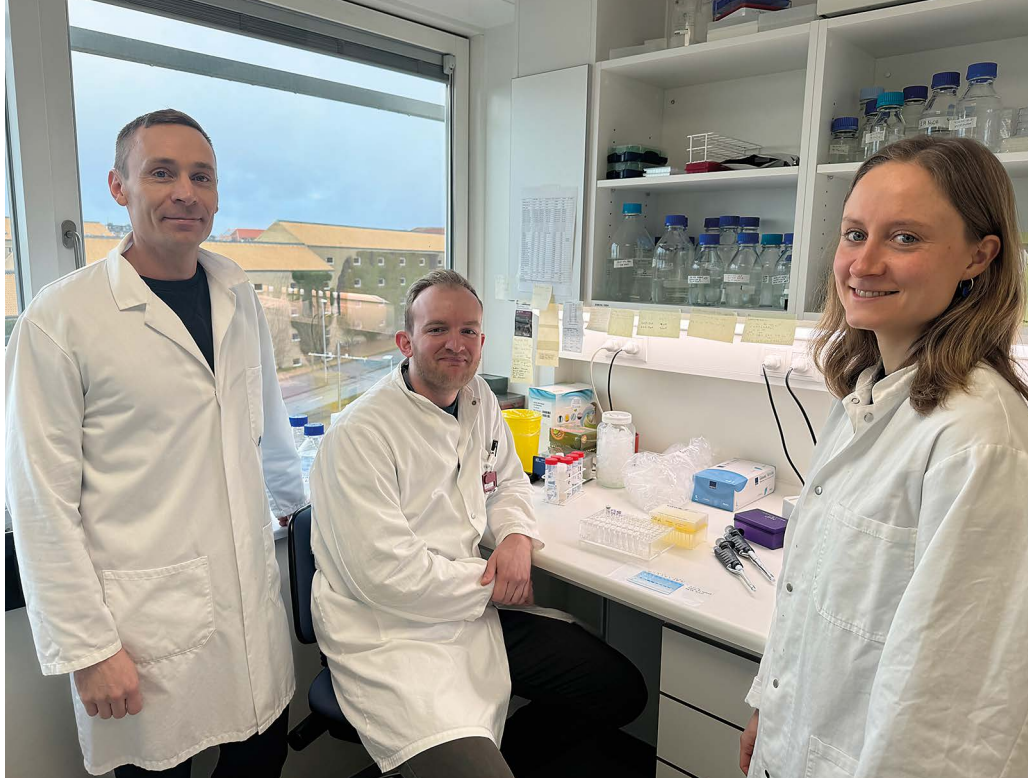
svampe og bakterier, og disse symbioser er mere relevante i dag, end de nogensinde har været før. Årsagen er den, at en voksende verdensbefolkning kræver enorme mængder mad, og for at brødføde denne stigende befolkning skal der bruges groteske mængder nitrogenforbindelser på markerne. Nitrogengødning er ikke bare dyrt for landmanden, det er også skadeligt for klimaet, da den kemiske proces, der skal til for at danne kunstgødningen, kræver høj temperatur og tryk, hvilket er energikrævende med en stor CO₂-udledning som bivirkning. Cirka to procent af verdens energi bliver brugt på alene at tage nitrogen ud af luften og lave den om til ammonium, som kan spredes på markerne.

Men måske kan en bedre forståelse af symbiosen mellem planter og bakterier gøre, at vi kan reducere behovet for at gøde markerne med nitrogen?

Danske forskere er med helt fremme, når det kommer til at forstå, hvordan man potentielt kan udnytte symbiosen mellem planter og disse såkaldte nitrogenfikserende bakterier til at skabe et mere bæredygtigt landbrug, der kan brødføde hele verden – også når vi bliver 9, 10 eller flere milliarder mennesker.

»Det kræver rigtig meget energi at lave nitrogengødning, og behovet kommer kun til at stige i fremtiden. Derfor har vi brug for nye løsninger, hvis vi vil have et grønt landbrug, og en af disse løsninger kan være at finde ud af, hvordan vi kan få vores afgrøder til at blive uafhængige af tilført nitrogen, sådan som bælgplanterne er det,« forklarer lektor Kasper Røjkær Andersen fra Institut for Molekylærbiologi og Genetik - Plantemolekylærbiologi på Aarhus Universitet.

Kasper Røjkær Andersen har for nylig modtaget tæt på tre millioner kroner fra Det Frie Forskningsråd til at bringe forskerne skridtet tættere på at forløse potentialet i et grønne landbrug.



Kasper Røjkær Andersen (tv) i laboratoriet sammen med Simon Boje Hansen og Henriette Rübsum, som begge medvirker i den forskning, som beskrives i artiklen. Foto: Marie Kolte.

Bælgplanter og bakterier indgår i unikt samarbejde

Inden vi forhastet langer ud efter landmænd, der spreder nitrogengødning på markerne, og producenterne af nitrogengødning, der futter enorme mængder energi af for at producere den, skal vi huske på, at hele denne industri har været forudsætningen for, at vi kan være otte milliarder mennesker på planeten i dag. Uden nitrogengødning ville langt flere af os sulte, end det er tilfældet i dag. Ikke desto mindre er løsningen ikke holdbar på den lange bane, og derfor er forskere også netop nu så fokuserede på at udvikle nye veje for landbruget

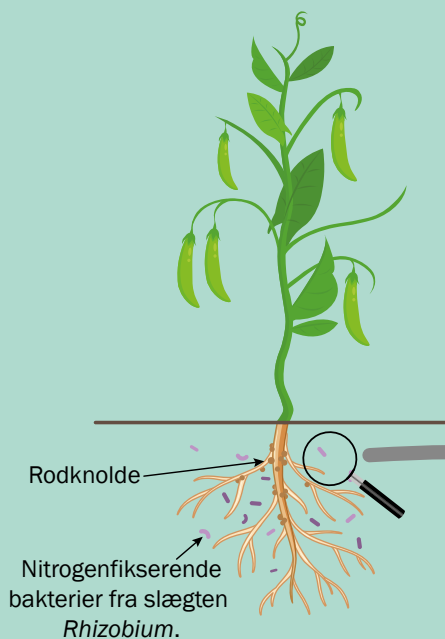
og heri skele til de løsninger, som naturen selv har udviklet. Bill og Melinda Gates Foundation har blandt andet postet flere hundrede millioner kroner i forskning i regi af ENSA-konsortiet (Enabling Nutrient Symbioses in Agriculture) med det formål at videreudvikle landbruget mod fremtiden. Kasper Røjkær Andersen er selv en del af ENSA-konsortiet.

Vender vi tilbage til den særlige symbiose, som bælgplanterne har etableret med de nitrogenfikserende bakterier, så er forskere inden for de seneste år blevet meget klogere på, hvordan samarbejdet

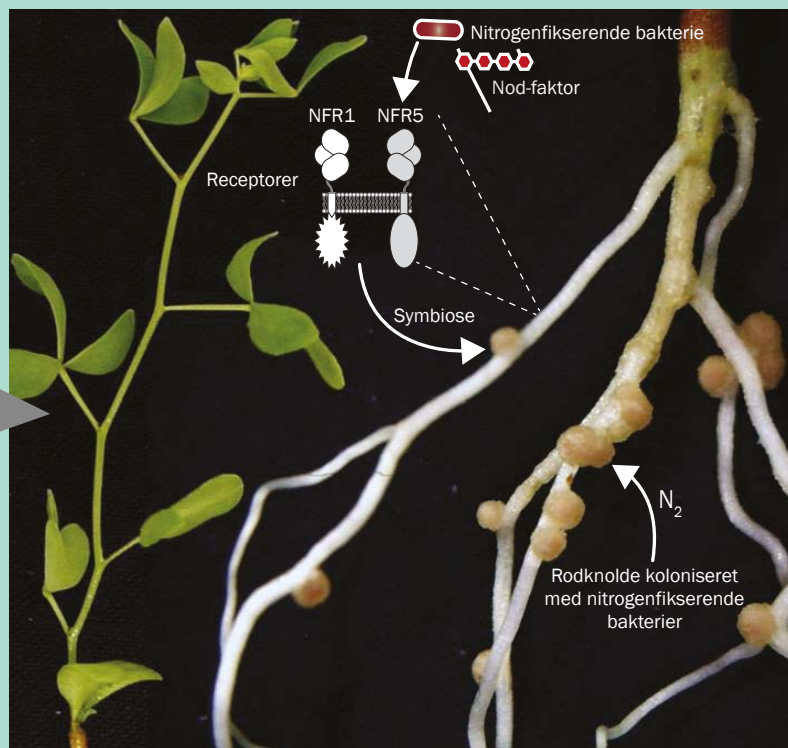
Kasper Røjkær Andersen

Kasper Røjkær Andersen skrev sin ph.d.-afhandling ved Aarhus Universitet. Derefter var han postdoc ved MIT (Massachusetts Institute of Technology) i Boston, USA, og er nu lektor ved Institut for Molekylær Biologi og Genetik ved Aarhus Universitet. Hans forskningsinteresse er centreret om at forstå, hvordan planter kommunikerer og indgår i symbiose med bakterier og svampe. Forskningen har perspektiver indenfor bæredygtig fødevarerproduktion og den grønne omstilling.





Figuren viser de vigtigste aktører i det samspil mellem planter og bakterier, der gør planter i stand til at skaffe sig næringsstoffet nitrogen direkte fra luften. Nod-faktorer er signalstoffer fra bakterierne, som genkendes af receptorerne NFR1 og NFR5, der sidder i membranen på planteceller. Når planten genkender den korrekte Nod-faktor, danner den rodknolde og inviterer bakterien ind i rødderne, hvor nitrogen-fikseringen finder sted. Figur: Kasper Røjkjær Andersen.



Baggrundsfoto: Colourbox

opstår og foregår.

Hold nu tungen lige i munden. Når planten mangler nitrogen, så tiltrækker den nitrogenfikserende bakterier ved at sende nogle signalmolekyler – kaldet flavonoider – ud i den omkringliggende jord. Signalmolekylerne tiltrækker de rigtige nitrogenfikserende bakterier og inviterer dem til at producere et modificeret kulhydrat, der kaldes for en nodulerings-faktor (Nod-faktor). Nod-faktorerne er unikke signalmolekyler for de enkelte bakterier, hvilket vil sige, at de nitrogenfikserende bakteriers Nod-faktorer er forskellige fra andre bakteriers Nod-faktorer. Derved kan planten skelne mellem nitrogenfikserende bakterier og alle de andre bakterier, hvoraf nogle kan være sygdomsfremkaldende.

Bælgplanterne har i deres rødder receptorer, der kan genkende Nod-faktorer fra nitrogenfikserende bakterier. Når bakteriens Nod-faktor genkendes af receptorerne i plantens rødder – som en nøgle i en lås – sætter det gang i en signal-

kaskade i planten, der ultimativt aktiverer processerne, som muliggør symbiose.

For det første igangsættes et cellulært program for celledeling. Dette program medfører organogenese og er med til at danne de rodknolde, som bakterierne kan leve i. En anden proces er, at planten laver nogle membranomkransede hule rør, som de nitrogenfikserende bakterier kan benytte til at trænge ind gennem plantens væv og ind i rodknoldene, som de derefter koloniserer og danner flere bakterier i.

Inde i rodknoldene stortrives bakterierne i det miljø, som bælgplanterne laver for dem. De får blandt andet rigeligt med sukker fra plantens fotosyntese, ligesom planterne skaber et iltfrit miljø, hvor det enzym, som bakterierne bruger til at omdanne dinitrogen til ammonium, fungerer optimalt.

»På den måde får planten nitrogen og kan gro uafhængigt af kemisk gødning. I naturen ser man ofte, at andre planter er afhængige af, den

nitrogen, som bælgplanter får fra nitrogenfikserende bakterier. For eksempel er der i min græsplæne en masse kløvergræs, som vokser særligt meget om efteråret, hvor det kan konkurrere med normalt græs, der ikke får nok nitrogen,« forklarer Kasper Røjkjær Andersen.

Han uddyber, at på en dyrket mark forsvinder der hvert år en masse nitrogen med høsten, hvorfor landmanden er nødt til at tilføre nyt nitrogen på sine marker. I et bæredygtigt landbrug kommer landmænd dog omkring dette problem ved at så kløver eller andre nitrogenfikserende bælgplanter på sine marker i rotation med afgrøder som hvede og majs. Derved fikses en masse nitrogen, som gør jorden næringsrig, hvilket de andre afgrøder kan nyde godt af året efter.

»Denne form for naturlig gødning af markerne har fået større interesse indenfor den seneste tid, hvor mangel på gas som energikilde i omdannelsen af dinitrogen til ammonium har gjort prisen på kunstgødning tre

til fire gange højere,« siger Kasper Røjkjær Andersen.

Revolutionerende arbejde i Science

Hele formålet med Kasper Røjkjær Andersens forskning er at forstå det molekylærbiologiske grundlag for symbiosen i bælglplanter, så det kan overføres til alle andre afgrødeplanter. I den vestlige del af verden kan det komme til at betyde, at man kan gøre noget godt for klimaet ved at fjerne en stor del af behovet for kunstgødning til hvedemarker, bygmarker, majsmarker, rapsmarker osv., mens det for lande i Afrika og Asien kan betyde, at man rent faktisk kan producere tilstrækkelig mad til selv at brødføde kontinentet – også i fremtiden.

Faktisk kom forskerne fra Danmark et stort skridt tættere på forståelsen af processerne i et forskningsarbejde, der blev publiceret i *Science*.

For nogle år siden fandt forskere ud af, at to receptorer i planter spiller en meget vigtig rolle for planternes mulighed for at indgå i symbiosen med bakterier. Disse receptorer hedder NFR1 og NFR5, og når forskere sætter disse to receptorer ud af spillet, kan planten ikke længere genkende bakteriens Nod-faktor og igangsætte symbiosen.

»Det store spørgsmål har været, hvordan de her receptorer fungerer, og hvordan de bliver aktiveret af bakteriens signalmolekyler. Det besvarede vi i studiet i *Science*,« fortæller Kasper Røjkjær Andersen.

I studiet kunne forskerne med en helt ny teknologi med små antistoffer fra lamaer (kaldet nanobodies) vise, at for at blive aktiveret skal NFR1 og NFR5 binde til hinanden. Forskerne bragte med nanobodies NFR1 og NFR5 sammen kunstigt i deres forsøg, og det var nok til at få planterne til at danne rodknolde uden tilstedeværelse af hverken bakterier eller Nod-faktorer. I naturen står Nod-faktoren fra de nitrogenfikserende bakterier for at



Foto: Shutterstock

Nanobodies – et værdifuldt værktøj fra lamaer

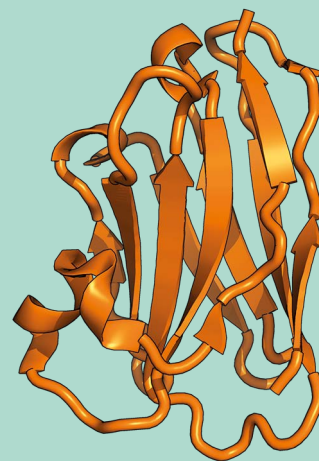
Antistoffer fra lamaer kaldes for "nanobodies" og har vist sig at være bemærkelsesværdige redskaber indenfor bioteknologi og medicinsk forskning på grund af deres unikke egenskaber og potentielle anvendelser.

Lamaer producerer naturligt disse kompakte antistoffer, som er mindre end konventionelle antistoffer hos mennesker og andre dyr. Nanobodies stammer fra de antistoffer, der findes i lamaers immunsystem. Deres kompakte størrelse og enkle struktur gør dem meget stabile og opløselige, hvilket gør dem i stand til at binde til specifikke målmolekyler med høj bindingsstyrke. Denne egenskab gør dem værdifulde redskaber i forskellige anvendelser fra diagnostiske tests til terapeutiske indgreb – eller til at binde to receptorer sammen i bælglplanter.

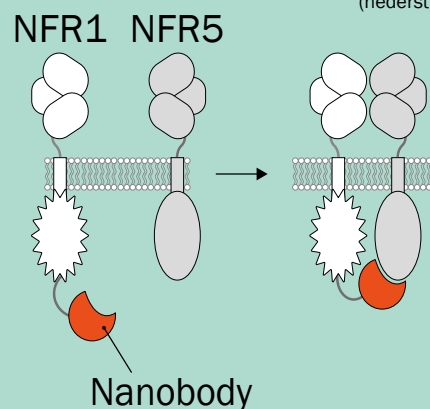
En væsentlig fordel ved nanobodies er deres evne til at få adgang til og binde sig til skjulte eller svært tilgængelige områder på målmolekyler, hvilket større antistoffer har svært ved. Dette gør nanobodies særligt nyttige til at målrette og hæmme specifikke vekselvirkninger mellem proteiner såsom dem, der er involveret i sygdomsforløb.

Derudover tåler nanobodies barske betingelser, for eksempel ekstreme temperaturer og lave pH-værdier.

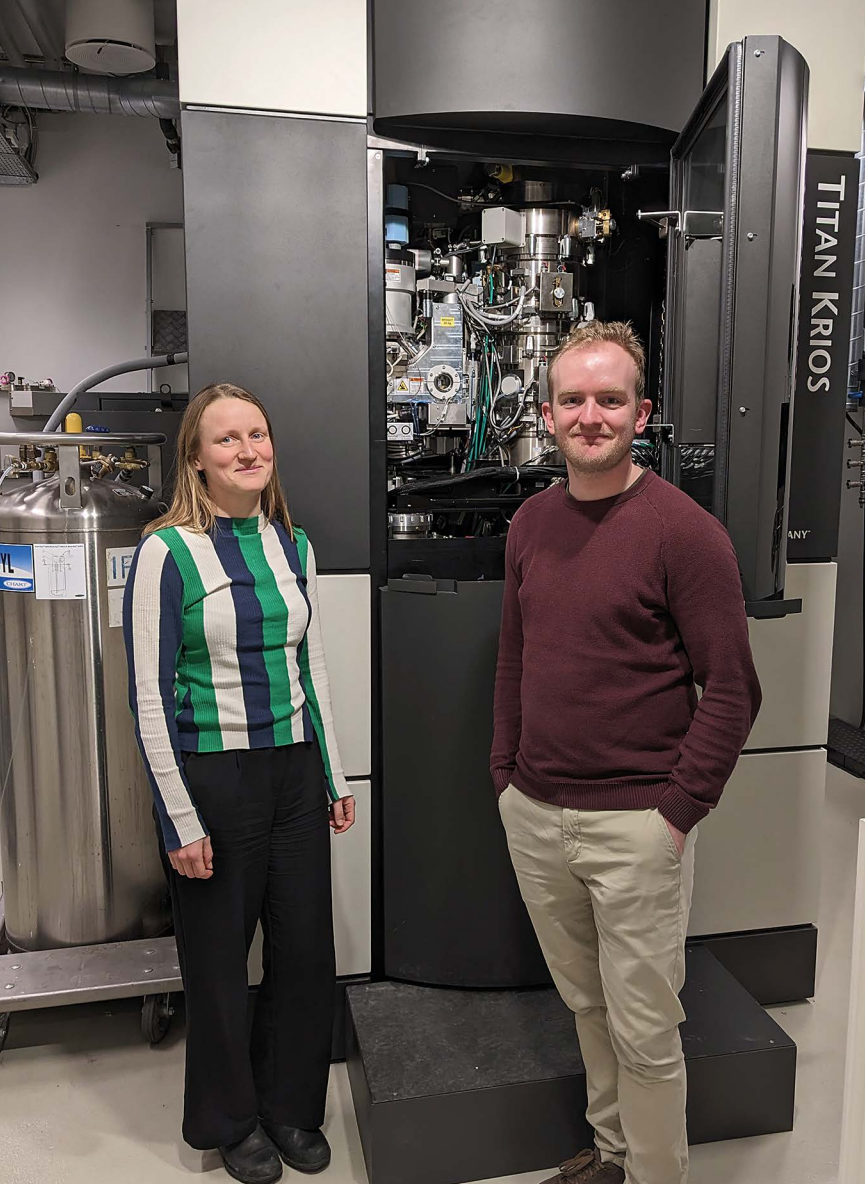
Forskere undersøger nanobodies til en bred vifte af anvendelser, herunder kræftterapi, hvor de kan designes til at neutralisere kræftceller. De viser også lovende resultater indenfor infektionssygdomsforskning, da deres evne til at målrette virale antigener er værdifuldt i forbindelse med udvikling af vacciner. Derudover anvendes nanobodies indenfor strukturbologi til at stabilisere proteiner.



Figuren viser øverst proteinstrukturen af et lama-nanobody. Forskerne har brugt sådanne nanobodies til at binde de to receptorer NFR1 og 5 sammen og aktivere dannelse af rodknolde. (nederst).



**DANMARKS FRIE
FORSKNINGSFOND**
INDEPENDENT RESEARCH
FUND DENMARK



Marie Kolte og Simon Hansen foran Titan Krios cryo-EM mikroskopet på Aarhus Universitet som er tilgængelig for forskere via den danske cryo-EM facilitet kaldet EMBION. Foto: Institut for Molekylærbiologi og Genetik

Cryo-elektronmikroskopi

Cryo-elektronmikroskopi (cryo-EM) er et vigtigt værktøj indenfor strukturbologi, som har gjort det muligt at visualisere proteiner på molekylært niveau med hidtil uset præcision. Metoden overvinder de begrænsninger, der er forbundet med konventionelle teknikker som røntgenkrystallografi og NMR-spektroskopi, og har gjort det muligt at studere proteinstrukturer i høj opløsning.

Cryo-EM-processen indebærer, at man nedfryser biologiske prøver i flydende ethan. Det låser materialet i de biologiske prøver i deres naturlige tilstand og forhindrer, at strukturerne bliver ødelagt eller deformet. Efterfølgende bombarderes prøverne med elektroner, og vekselvirkningerne mellem elektronerne og prøverne omdannes til tredimensionelle strukturbilleder ved hjælp af billedbehandlingsalgoritmer. Billedbehandlingsalgoritmerne er indenfor de seneste år blevet mere avancerede, hvilket forbedrer nøjagtigheden af de rekonstruerede strukturer. På den måde kan forskere i dag studere den atomare opbygning af proteiner i bedre opløsning end nogensinde før.

En afgørende fordel ved cryo-EM er teknologiens evne til at undersøge prøver i forskellige konformationer og funktionelle tilstande. Dette giver indsigt i proteins dynamik og komplekse interaktioner på et subatomart niveau, blandt andet i interaktioner mellem receptorer og de signalmolekyler, som aktiverer receptorerne. Teknikken har også muliggjort studier af store protein-komplekser og membranproteiner, der tidligere var vanskelige at karakterisere ved konventionelle metoder.

Selvom cryo-EM-teknologien har været banebrydende, er der stadig udfordringer for teknologien. Forberedelse af prøverne er en kritisk faktor, da unøjagtigheder i prøvefrysning eller urenheder kan påvirke resultaterne. Desuden kræver dataanalysen en grundig forståelse af billedbehandlingsmetoder og strukturmodellering.

Cryo-EMs potentiale indenfor strukturbologi er dog enormt, og teknikkens anvendelse strækker sig fra at belyse biologiske mekanismer til at støtte lægemiddeldesign og udvikling. Den fortsatte udvikling af Cryo-EM kommer med al sandsynlighed til at bidrage væsentligt til en dybere forståelse af komplekse biologiske systemer i fremtiden.

bringe NFR1 og NFR5 sammen og aktivere processen.

Det andet gennembrud i studiet var, at forskerne kunne vise, at der i byg findes receptorer, som kan meget af det samme som bælgplanternes NFR1 og NFR5, uden at de dog kan starte en symbiose med nitrogenfikserende bakterier. Dette skyldes, at bælgplanter udviklede symbiosen med nitrogenfikserende

bakterier ud fra den 400 millioner år gamle symbiose med de svampe, som tilfører fosfat til planter. Langt de fleste landplanter har denne 400 millioner år gamle symbiose og derfor grundstenene til at lave symbiosen med andre mikroorganismer, herunder de nitrogenfikserende bakterier.

Forskerne lavede i deres studie en grundig undersøgelse af hele byg-

plantens genom og identificerede receptorerne RLK4 og RLK10 som de to receptorer, der mest ligner NFR1 og NFR5 fra bælgplanter. Efterfølgende satte de NFR1 og NFR5 ud af spillet i en bælgplante og indsatte i stedet RLK4 og RLK10 fra byg. Det var dog ikke alene nok til at aktivere symbiosen, men da forskerne bragte de to receptorer sammen med lama-nanobodies, sådan som de havde gjort i det

tidligere forsøg, startede hele den symbiotiske proces, og planten var igen i stand til at danne rodknolde.

»Det vil sige, at vi i byg og formentlig mange andre afgrøder har receptorer, som kan det samme som NFR1 og NFR5 i bælgplanter, uden at det symbiotiske program skal aktiveres af Nod-faktorer. Lige nu arbejder vi på at finde ud af, hvordan vi kan aktivere symbiosen i byg, majs og kassava, og hvordan vi kan omprogrammere receptorerne i disse planter til at genkende Nod-faktorer, ligesom det sker i bælgplanter,« forklarer Kasper Røjkjær Andersen.

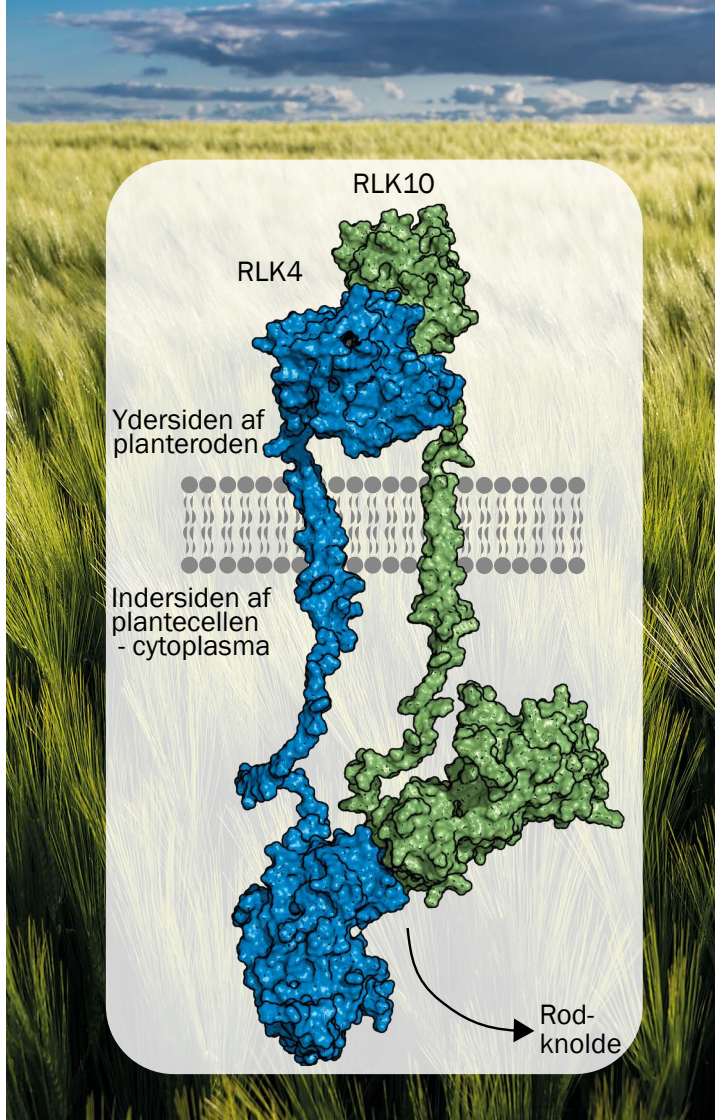
Næsten umuligt at kortlægge strukturen

Det næste skridt i Kasper Røjkjær Andersens forskning – og også det, som han har fået en bevilling fra Det Frie Forskningsråd til at løse – drejer sig om at forstå helt præcist, hvordan Nod-faktorerne binder NFR1 og NFR5 sammen. Her er det dog problemet, at receptorerne er så små, at det er svært at nærstudere dem i et omfang, som gør det muligt at kortlægge den præcise interaktion.

Normalt benytter forskere røntgenkrystallografi til at studere proteiners tredimensionelle struktur, men det er ikke altid muligt, da det kræver, at man først kan danne en krystal af det protein, man vil studere. Forskere kan også bruge den teknik, som hedder cryo-elektronmikroskopi (cryo-EM), men den kan også kun benyttes til at se på proteiner ned til en vis størrelse, som NFR1 og NFR5 stadig ligger under.

»Vi er nødt til at få kortlagt strukturen af receptorerne, der genkender Nod-faktorerne, hvis vi skal have en chance for at finde ud af, hvordan vi kan overføre denne egenskab til receptorerne i afgrødeplanter,« forklarer Kasper Røjkjær Andersen.

I undersøgelsen vil forskerne helt specifikt gøre det, at de vil sætte nanobodies direkte på de relevante receptorer og derved gøre dem



Illustrationen viser, hvordan de to receptorer RLK4 og RLK10 sidder i plantecellernes membran og på den måde danner en forbindelse mellem omgivelserne og plantecellens indre. Forskerne har i deres forsøg overført disse receptorer fra bygplanter til bælgplanter. Grafik: Kasper Røjkjær Andersen / Foto: Colourbox

større og store nok til, at de kan studeres med cryo-EM.

»Det er som at sætte legoklodser på hinanden for at bygge noget, der er større. Tanken er den, at vi skal bygge noget, der er så stort, at vi kan studere det med cryo-EM. Vi har i vores indledende forsøg allerede vist, at det er muligt,« siger Kasper Røjkjær Andersen.

Arbejder mod en bagkant

Kasper Røjkjær Andersens forskning er blot en lille brik i et enormt puslespil, som forskere i disse år forsøger at få lagt på forskellige måder. Kasper Røjkjær Andersen prøver at få andre afgrødeplanter end bælgplanter til at indgå i symbiose med nitrogenfikserende bakterier, mens andre forskere arbejder på andre metoder til at få aktiveret den relevante celledeling og dannelse af

rodknolde. Andre igen arbejder på at facilitere kolonisering med de relevante nitrogenfikserende bakterier.

Formålet med alt forskningsarbejdet er at gøre produktionen af verdens fødevarer mere grøn og mindre klimabelastende, så den kan imødekomme behovet fra en voksende verdensbefolkning. Bakterier og planters symbiose ser ud til at være en del af svaret.

»Der er et kæmpe perspektiv i denne forskning. Vi er på vej mod at blive 10,4 mia. mennesker på Jorden, og med de nuværende teknologier bliver det et problem at brødføde dem alle sammen. Der skal opfindes noget nyt, så vi arbejder med en bagkant. Men vi gør alt, hvad vi kan, for at komme i mål, og vi laver i øjeblikket store fremskridt,« siger Kasper Røjkjær Andersen. ■



DANMARKS FRIE
FORSKNINGSFOND
INDEPENDENT RESEARCH
FUND DENMARK

HVORDAN OPNÅR VI EN BÆREDYGTIG PLASTIKKULTUR?

Forfatterne



Daniel Otzen er professor ved Interdisciplinary Nanoscience Center (iNANO) ved Aarhus Universitet, og han leder Novo Nordisk Centeret EnZync for genanvendelse af hærdet plast. dao@inano.au.dk



Andreas Møllebjerg er forsker ved EnZync, Aarhus Universitet, hvor han identificerer og anvender plastiknedbrydende bakterier og enzymer.



Mogens Hinge er lektor ved Institut for Bio- og Kemiteknologi, Aarhus Universitet, hvor han leder forskningsgruppen Plastic and Polymer Engineering, som har fokus på genanvendelse af plast.



Gauri Pathak er lektor ved Afdeling for Globale Studier, hvor hun som antropolog forsker i menneskers brug af plastik.

Udfordringerne med plastikforurening kommer vi næppe til at løse med et teknologisk quickfix. Vi skal derfor også ændre adfærd som samfund og nedsætte vores plastikforbrug. Derudover bliver vi nødt til at tage en pragmatisk og tværfaglig synsvinkel for at finde den bedste løsning for plastikgenanvendelse.

Plastik er et nyttigt materiale, som anvendes til et utal af formål i det moderne samfund. Menneskeheden fremstiller årligt omkring 400 millioner ton plastik, hvoraf cirka 90 % ikke genbruges. Af disse 90 % bliver cirka 10 % brændt, mens de resterende 80 % ender som plastikaffald. En del af dette bliver deponeret på lossepladser, men meget af det bliver "bare" smidt tilfældige steder og ender derfor i naturen, både som synligt skrald og som usynligt mikroplastik eller som udvaskede nedbrydningsprodukter og tilsætningsstoffer. På den måde følges fordele ved plastik tæt med dets ulemper.

Men hvordan bør vi forskere tilgå de udfordringer, som det enorme plastikforbrug stiller os overfor? Det er et stort spørgsmål, som kan belyses fra mange forskellige discipliner. Før vi vender tilbage til vores

bud på nogle svar, vil vi først se på, hvad plastik egentlig er.

Hvad er plastik?

Grundlæggende består plastik af polymerer og additiver (tilsætningsstoffer). En polymer er et stort molekyle, der er opbygget af mange identiske enheder, og i plastik er polymeren opbygget af lange carbonrige molekyler, der enten er lineære eller forgrenede. I såkaldt termoplast ligger polymererne blot ved siden af hinanden og holdes sammen af fysiske bindinger. Derfor kan termoplast smeltes og opløses og ved opvarmning formes i en ønsket facon.

Hvis polymererne i stedet er tværbundet med hinanden i store tredimensionelle netværksstrukturer, kaldes den hærdeplast. Hærdeplast kan ikke formes til en ny facon, når den først er hærdet.

Plastik kan også opdeles i to klas-

ser på baggrund af polymerernes kemi. Polymerer i klasse 1 har hovedkæder, der består af carbon-carbon (C-C) bindinger. Eksempler på plastik i klasse 1 er polyethylen, polypropylen, polystyren og poly(vinylchlorid).

Polymererne i klasse 2 har nogle gange carbon forbundet med oxygen eller nitrogen. Eksempler på plastik i klasse 2 er polyethylen-tereftalat, PET, og polyuretan, PUR.

Polymerer i klasse 1 er helt fremmede for biologiske organismer, og derfor er de meget vanskelige at omsætte i naturen. Klasse 2-polymerer minder lidt mere om biologiske molekyler som proteiner og fedtstoffer, og de er derfor lettere at nedbryde i naturen.

Polymeren bliver som regel blandet med tilsætningsstoffer for at opnå nogle bestemte egenskaber. Det kan for eksempel være blødgørere

for at lave plastikken mere fleksibel, stoffer der beskytter mod nedbrydning på grund af UV-stråling eller farvestoffer, som får plastikken til at se pæn ud.

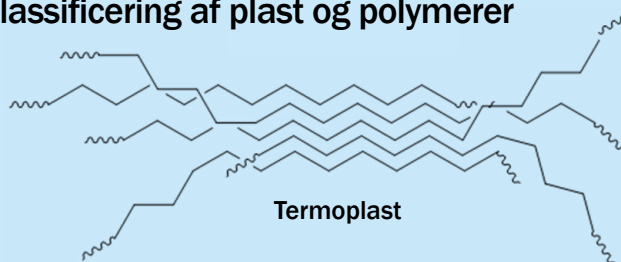
Mekanisk og kemisk genanvendelse

Plastik kan genanvendes ved at give det en ny facon i et nyt produkt eller nedbryde plastikken til mindre molekyler, som så igen kan anvendes til at lave ny plastik.

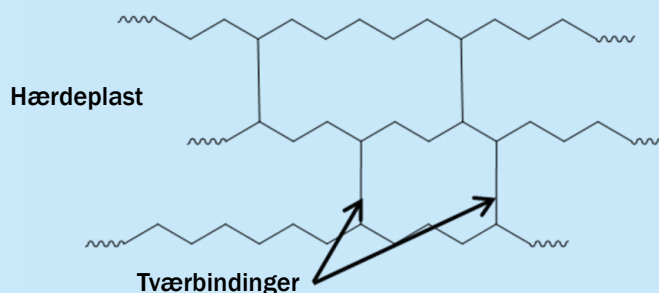
Mekanisk genanvendelse går grundlæggende ud på at finde brugte plastikprodukter og lave nye produkter ud fra den gamle plastik. Desværre får man derved en dårligere plastikkvalitet, da den resulterende plastik som regel vil være et blandingssprodukt af både polymer og tilsætningsstofferne. Ydermere skal plastikken oftest hakkes i mindre stykker, vaskes, gensmeltes mv., hvilket nedbryder polymeren lidt hver gang. Det gør polymeren kortere eller tværbinder den, så den kemisk set er lidt mere "flosset". Det betyder, at producenterne ikke har kontrol over egenskaberne som ved ny plastik. Forskere forsøger også at opløse polymeren i forskellige opløsningsmidler og så udfælde den igen, så plastikken herved bliver rensat og så god som ny. Men det kræver både organiske opløsningsmidler og varmeenergi.

Ved mekanisk genanvendelse tilstræber man altså at bevare polymeren intakt, når den genanvendes. Helt anderledes forholder det sig med *kemisk genanvendelse*. Det går ud på at nedbryde plastikken til mindre molekyler og bruge disse til at opbygge nye polymerer eller andre stoffer (for eksempel olie). Ulempen er, at det er energikrævende. For eksempel indgår pyrolyse ofte i kemisk genanvendelse, og pyrolyse indebærer en opvarmning af plastikken til 400-600 °C under iltfrie forhold. Pyrolyse er dog kun god til visse plastiktyster, da nogle typer som PVC og PET henholdsvis udvikler saltsyredampe eller bliver til sod under sådan en varmebehandling.

Klassificering af plast og polymerer



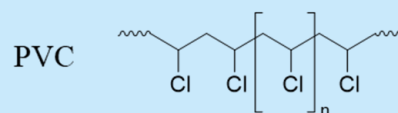
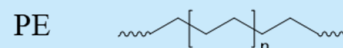
Plastik kan opdeles i to typer – termoplast og hærdeplast – afhængig af, om plastmaterialet kan smeltes om eller ej. I termoplast ligger polymererne blot ved siden af hinanden. Polymererne holdes sammen af fysiske bindinger og kan derfor smeltes og opløses. Polymererne kan både danne en velordnet, krystallinsk struktur eller ligge "hulter til bulter" (amorf) alt efter, hvordan materialet er opbygget. Illustrationen viser en polyethylen, som har en krystallinsk del (den centrale og ordnede del) og en amorf del (enderne).



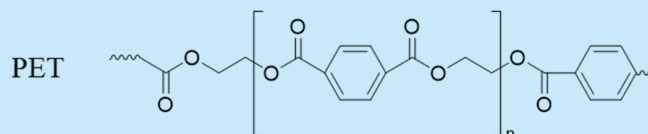
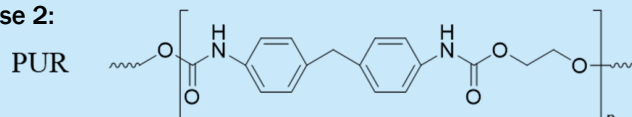
I en hærdeplast er der tværbindinger mellem polymererne, så de danner et stort netværk (for klarhed er afstand og bindingslængderne overdrevet i skitsen.) Når først polymererne er tværbundet, kan plasten ikke opløses eller smeltes.

Polymererne, der udgør hovedbestanddelen af plastik, kan inddeles i to klasser efter opbygningen af deres hovedkæde (bemærk, at på figurerne angiver den kantede parentes den kemiske struktur, der gentages i polymeren). Polymerer i klasse 1 har primært carbon-carbon-bindinger i deres hovedkæde, som tydeligt ses ved polyethylen (PE), der for eksempel bruges til fryseposer, plastikdunke, ol. Et andet eksempel er poly-vinylchlorid, PVC, som bruges til for eksempel nedløbsrør, legetøj mv. PVC har sidegrupper af chlor, og udskiftningen af hydrogen til chlor ændrer dramatisk polymerens materialeegenskaber (hårdhed, bøjelighed, slagfasthed, osv.).

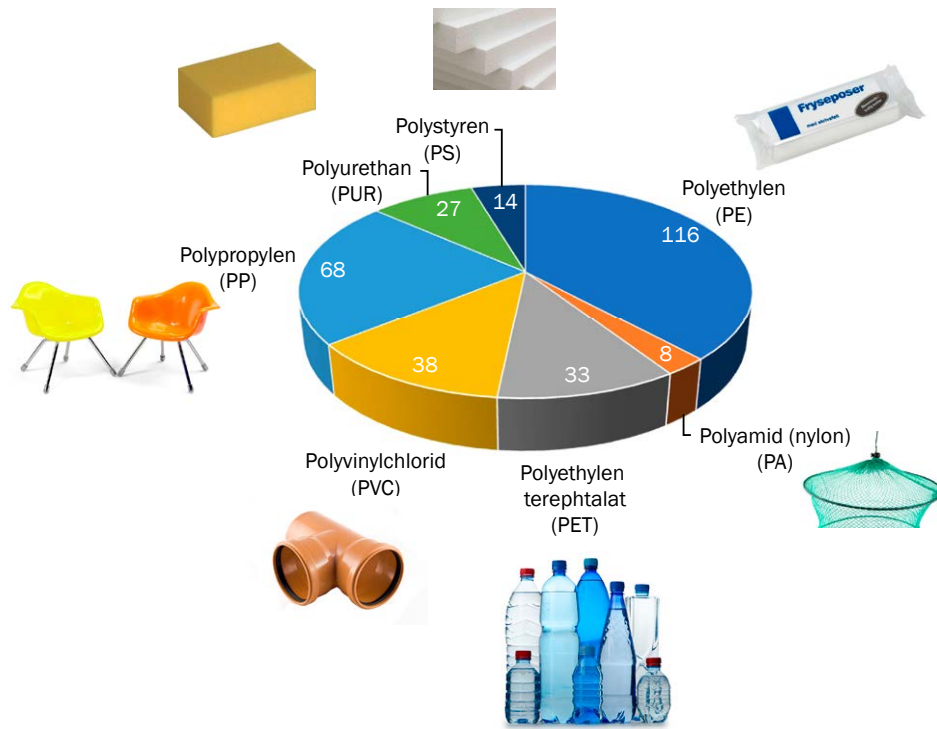
Klasse 1:



Klasse 2:



Eksempler på klasse 2-polymerer: Polyuretan (PUR) bruges i skumgummi-madrasser, skosåler mv., og den er ofte tværbundet. Polyethylentereftalat, PET, som er kendt fra sodavandsflasker, fødevarerbakker, mv. Det fremgår, at hovedkæden indeholder oxygen, i form af estergrupper, i PET, og nitrogen, i form af uretargruppen, i PUR.



Figuren viser, hvor mange millioner tons, der globalt blev produceret af de mest almindelige plasttyper i 2016. Der er også vist eksempler på typiske produkter indenfor de forskellige plasttyper. Tal efter D. Danso, J. Chow, W.R. Streit (2019).

mer og hjælpestoffer, som er svær at efterligne i en fabriksreaktor.

Forskningen er længere med biologisk nedbrydning af plastiktyper i klasse 2, særligt PET. I 2016 fandt japanske forskere ligefrem en bakterieart på en losseplads, der kunne leve udelukkende af PET (og vand). Efterfølgende har andre forskere opdaget en masse forskellige enzymer, der kan nedbryde PET (kaldet PETaser). En af disse PETaser (fundet i en kompostbunke) har vist sig så effektiv, at den efter forskellige forbedringer snart kan bruges til at nedbryde PET på industriel skala. Ved at behandle med enzymer natten over kan tonsvis af brugte plastikflasker nedbrydes til de originale byggesten, som dernæst kan sættes sammen igen til nye plastikflasker af samme kvalitet (foruden alle mulige andre produkter, der indeholder PET). Metoden er udviklet af det franske firma Carbios, mens danske Novozymes producerer enzymet.

Biologisk nedbrydning af plastik

Udover metoder til mekanisk og kemisk genanvendelse er der forhåbninger til *biologisk nedbrydning* af plastik. Ligesom kemisk genanvendelse går disse metoder også ud på at nedbryde plastik til mindre bestanddele, som så kan genanvendes til at opbygge andre stoffer (for eksempel plastik). I modsætning til kemiske og fysiske processer kan enzymer med skræddersyede egenskaber ikke designes fra bunden. Vi er nødt til at finde dem i naturen, og det bedste sted at lede er i mikroorganismer, der har været i kontakt med plastik i længere perioder. I praksis går forskningen indenfor dette felt derfor ud på at finde, videreudvikle og anvende enzymer, som kan nedbryde de polymermolekyler, plastikken består af.

Enzymer er cellens egne katalysatorer, og de kræver derfor ikke ekstreme betingelser (som højt tryk og temperatur), da de virker under betingelser, som levende organismer kan klare (selvom de godt kan udvikles til at modstå temperaturer op til 70-80 °C). Udfordringen er

at finde enzymer til de forskellige plastiktyper.

Vi har endnu ikke fundet enzymer, som er gode til at nedbryde plastiktyper tilhørende klasse 1. Det skyldes, at C-C-bindinger er meget stærke og derfor svære at nedbryde. Det er straks lettere, hvis nogle af bindingerne i polymeren er mellem carbon og oxygen (C-O). Men for at få oxygen ind i polymererne skal de reagere med oxygenmolekyler (for eksempel fra luft). Det kan opnås ved hjælp af ultraviolet lys, som kan tilføre energi nok til at gennemføre reaktionerne. Oxygenmolekylerne kan reagere mange steder på de lange C-C kæder, og derfor er en oxygenisering (iltning) af plastik en ukontrollerbar proces. Den tilfældige oxygenisering af carbonkæderne resulterer i nedbrydningsprodukter, der består af en blanding af mindre carbon-kæder med forskellige længder, og det er ikke et godt udgangspunkt for at lave nye polymerer. Vi ved, at svampe i naturen kan nedbryde carbon-rige molekyler som for eksempel lignin fra planter cellervægge, men det kræver en ret kompliceret blanding af både enzy-

Forskere har også for nylig opdaget mikroorganismer og enzymer, der giver håb om enzymatisk nedbrydning af plastiktypen polyuretan (PUR). Problemet er dog, at alle de opdagede enzymer kun kan nedbryde nogle bestemte typer PUR. Ingen mikroorganismer eller enzymer er endnu blevet opdaget, der kan nedbryde andre typer hærdet plast, som for eksempel dem man anvender til maling og forsegling og vindmøllevinger.

Affaldsproblemet skal løses lokalt

Selvom vi er godt på vej til at udvikle bedre måder at genanvende plastik, har vi lang vej endnu. Vi kan ikke forvente, at der i nær fremtid pludselig opstår nogle teknologiske gennembrud, der fixer vores plast-forureningsproblemer. Vi bliver simpelthen nødt til at blive bedre til at håndtere vores plastikaffald ud fra den viden og teknologi, vi allerede har.

Cirka to milliarder mennesker på jorden mangler i dag adgang til systematisk affaldsindsamling og -håndtering, særligt i landli-

Jagten på plastiknedbrydende enzymer

Forskningscentret En'Zync er sat i verden for at udvikle metoder til at lede efter enzymer, som kan nedbryde plastiktyster, vi endnu ikke har gode metoder til at nedbryde.

Enzymerne finder vi i bakterier, og vi screener derfor bakterier fra miljøer, der har været forurenet med plastik. Vores forventning er, at de bakterier, der er gode til at nedbryde og drage nytte af plastik, i højere grad vil findes i disse miljøer, hvor de har en konkurrencefordel i forhold til bakterier, der ikke kan nedbryde plastik. I laboratoriet lader vi de indsamlede bakterier vokse på et substrat (vækstmedium), der minder om plastik. Hvis bakterierne indeholder enzymer, der kan nedbryde plastik, afsløres dette ved, at substratet skifter farve og optages i bakterierne. Alle bakterier, der kan nedbryde vores "snyde-plastik", undersøger vi nærmere ved at fodre dem med mere og mere plastikagtige substrater, for eksempel længere og mere krydsbundne plastikmolekyler. På den måde frasorterer vi enzymer, der kun har en svag tendens til at nedbryde plastik, så vi ender med kun at have bakterier med de mest plastiknedbrydende enzymer tilbage.

De mest interessante enzymer undersøger vi nærmere, så vi kan blive klogere på, hvordan nedbrydningen af plastik foregår på det molekylære niveau, og hvordan enzymerne binder til plastikken. Det kommer til at foregå ikke bare som fysiske forsøg i laboratoriet, men også som computersimuleringer. Simuleringsdata er uhyre nyttige til at hjælpe os med at forstå processerne i de fysiske forsøg til bunds.

Samtidig planlægger vi at optimere enzymerne, så de kan blive endnu bedre til at nedbryde plastikken. Her vil vi bruge en blanding af flere forskellige strategier. Vi kan bruge rationelt design, hvor vi udnytter den viden, vi får om enzymernes mekanisme til at gøre dem endnu bedre. Derudover vil vi bruge dirigeret evolution, hvor vi forsøger at fremskynde evolutionære ændringer i en ønsket retning. Det gør vi ved at lave en masse tilfældige varianter af det plastiknedbrydende enzym ved at fremprovokere mutationer i de bagvedliggende gener og identificere de mest effektive varianter baseret på deres højere aktivitet. Ved at gentage denne proces en håndfuld gange kan vi udvikle enzymer, der er mange gange mere effektive end de oprindelige.

ge områder. Mange steder har befolkningen ikke råd til at betale for at få hentet affald, eller også forhindrer manglende koordination eller andre problemer i den lokale forvaltning en effektiv affaldsindsamling og -håndtering. I stedet bliver plastikaffald (sammen med alt muligt andet affald) brændt af, smidt i "vejkanten" eller deponeret på mere eller mindre tilfældigt indrettede lossepladser. Det kan også indgå i en "uformel økonomi", hvor affaldssamlerne ofte efterlader de billigste (og dermed uinteressante) plastiktyster på lossepladsen – eller som affald i naturen.

I højindkomstlande som Danmark sorteres affaldet heldigvis i stigende grad, men det er stadigvæk indviklet og til tider en uigennemskuelig proces at sortere plastikaffaldet, så det nemt kan genbruges. Derfor sendes store mængder ikke-genanvendeligt affald (deriblandt meget plastik) til "genanvendelse" i andre og typisk fattigere lande. Den løsning er ikke særlig god, og Kina er holdt op med at tage imod plastikaffald fra andre lande – så nu sendes det blot videre til andre

lande, typisk i Sydøstasien. Men disse lande har lige så svært ved at genanvende plastik, som vi har her i Danmark. I værste fald ender dette eksporterede plastikaffald i lav- og mellemindkomstlande blot på åbne lossepladser. Nedbrydning af biologisk materiale på sådanne lossepladser kan føre til så høje temperaturer, at affaldet selvan-tænder. Dermed bliver plastaffaldet

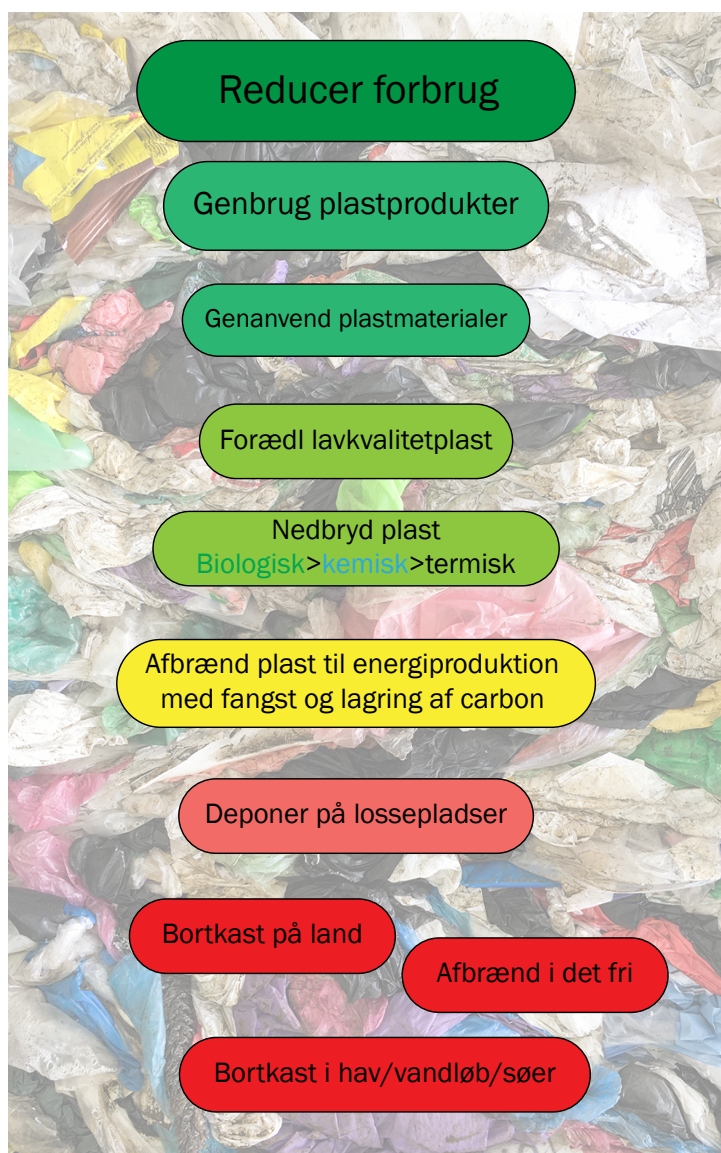
brændt af under ukontrollerede forhold, hvilket giver en større forurening, end hvis vi havde brændt det i et af vores forbrændingsanlæg. I nogle tilfælde kontrolleres disse lossepladser af kriminelle organisationer, hvilket blot gør det sværere at ændre på affaldshåndteringen.

Konklusionen er derfor, at vi ikke kan "eksportere" os ud af plastaf-

Det er en indviklet og til tider en uigennemskuelig proces at sortere plastikaffaldet, så det nemt kan genbruges. Foto: Colourbox.



Figuren viser et eksempel på et plastaffaldshierarki. Hvis vi skal have styr på problemerne med plastaffald, skal vi have flyttet vores håndtering af affaldet så højt op i hierarkiet som muligt – og allerhelst reducere forbruget af plastik. Figur efter G. Pathak, M. Hinge and D.E. Otzen (2023).



Videre læsning
G. Pathak, M. Hinge and D.E. Otzen (2023): Transdisciplinary pragmatic melioration for the plastic life cycle: Why the social, natural, and technical sciences should prioritize reducing harm. *Sci Total Environ.* Oct 15:895:165154. www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723037774

Plastics Europe, 2022. Plastics – The Facts 2021. plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2021.

D. Danso, J. Chow, W.R. Streit (2019): Plastics: environmental and biotechnological perspectives on microbial degradation. *Appl. Environ. Microbiol.*, 85 (2019), pp. e01095-19

faldsproblemet, men bliver nødt til at løse det herhjemme.

Plastikudfordringen er i høj grad tværfaglig

Hvad skal der gøres for at løse problemerne med plastikforurening? Først og fremmest er det vigtigt at indse, at vi ikke bare kan løse problemet rent teknologisk. Vi er nødt til at se problemet i en bredere sammenhæng, der tager hensyn til, hvordan mennesker forbruger og behandler plastik i hverdagen. Det betyder, at det er en opgave, der kræver viden og ekspertise fra mange forskellige fagområder.

Det er vigtigt, at den måde, der reguleres og organiseres indsamling og sortering af affald, afspejler den

måde, hvorpå plastik fremstilles, bruges og genanvendes. Det betyder blandt andet, at teknologier til genanvendelse af plastikaffald skal være fleksible, så de kan tilpasses lokale økonomiske og klimatiske forhold og ikke tænkes som en "one size fits all"-løsning.

Et centralt spørgsmål er, hvem der skal betale for denne omstilling? Er det plastikproducenten, plastikforhandleren, forbrugeren eller staten? Hvordan bruger vi den rette kombination af afgifter og tilskud? Det skal samfundsforskere hjælpe med at udvikle gode modeller til at afgøre.

En anden væsentlig opgave er oplysning og uddannelse af borgerne, så de bliver gode medspillere

i at transformere samfundet til at have et bæredygtigt plastikforbrug. Her kan antropologer, psykologer, undervisere og pædagoger spille en vigtig rolle. At udvikle en sådan "økodannelse" kræver, at man tager almindelige menneskers hverdag alvorligt, så løsningerne ikke kommer i modstrid med hverdagens vaner og aktiviteter.

Det er vigtigt at understrege, at hvis vores plastikforbrug skal være bæredygtigt, må genanvendelse af plastik ikke medføre et merforbrug – for eksempel fordi folk tænker, at "når jeg er så god til at genanvende plastik, kan jeg godt bruge mere af det". Det er desværre almindeligt at se denne opførsel, hvor en forventet besparelse ophæves af et større forbrug.

Pragmatisk meliorisme

Stillet overfor den store udfordring med at få styr på plastikforurening vil nogle måske henfalde til fortvivlelse, mens andre har blind tiltro til, at et teknologisk fix vil løse udfordringen. Ingen af disse tilgange er en god vej fremad. Derfor foreslår vi en tilgang til udfordringen, som vi kalder *pragmatisk meliorisme*. "Pragmatisk" betyder her, at vi i videst muligt omfang bør genanvende de plastiktyper, der er lettest at genanvende, på de måder, der med mindst mulig indsats har størst mulig virkning. Begrebet "meliorisme" betyder den opfattelse, at verden kan forbedres ved en menneskelig indsats. En sådan tilgang anerkender, at plastik er kommet for at blive, så derfor skal vi udvikle metoder, der styrker vores evner til at bruge, sortere og genanvende plastik på den mest forsvarlige og borgervenlige måde. Alternativt kommer vi let i en situation, hvor vi blot ender med en masse uhåndterbare regler såsom "forbud mod plastiksugerør", hvor symbolværdien måske er høj, men den praktiske betydning lille.

Vi håber, at en transdisciplinær pragmatisk meliorisme også kan være model for at løse andre miljøudfordringer ved at udvikle både tekniske, socialt og økologisk bæredygtige politikker. ■

Karriere. Mening. Fællesskab.

Mød studerende fra de naturvidenskabelige uddannelser til Åbent Hus på Københavns Universitet den 28. februar og 1. marts

studier.ku.dk/science

KAN “BLÅT CARBON” – ØKOSYSTEMER VIRKELIG MODVIRKE KLIMAÆNDRINGER?

Forfatterne



Erik Kristensen er professor i Marin Økologi ved Biologisk Institut, Syddansk Universitet. Hans forskning er fokuseret på havbundens omsætning af organisk materiale, og hvordan bundens dyr og planter påvirker mikrobielle processer.
ebk@biology.sdu.dk



Mogens R. Flindt er professor og forskningsleder ved Biologisk Institut, Syddansk Universitet. Han har i mange år arbejdet med marine presfaktorer i forhold til marin naturgenopretning og kvantificering af marine økosystemtjenester.
mrf@biology.sdu.dk



Cintia Organo Quintana er lektor ved Biologisk Institut og SDU Climate Cluster, Syddansk Universitet. Hendes forskning er centreret om marinøkologi i kystnære områder med fokus på carbonomsætning og klimaforandring.
cintia@biology.sdu.dk

Truede økosystemer som mangroveskove, saltmarsker og havgræsenge er af mange blevet fremhævet som en del af løsningen på klimakrisen. Det er dog meget usikkert, om disse økosystemer virkelig permanent tilbageholder tilstrækkeligt carbon, så det kan mærkes i den globale CO₂-balance.

De klimaændringer og konsekvenserne heraf, som vi oplever i disse år, er især forårsaget af CO₂-frigivelse i forbindelse med vores massive afbrænding af fossile brændstoffer. Disse kulbrinter (carbonhydrider) blev især dannet af døde mikroorganismer, planter og dyr i Karbontiden for cirka 290-360 millioner år siden. På den tid var Jordens landmasser dækket af frodige sumpe og omkranset af produktive have. Når organismerne døde, blev de gradvist nedbrudt til CO₂ i sumpene eller i havenes sedimenter. Efter millioner af år blev resterne af organismerne, som i mellemtiden var blevet dækket af tykke lag af sand og ler og udsat for højt tryk, omdannet til fossilt kul og olie indlejret i sedimentære klipper. De fossile brændstoffer udgør imid-

lertid kun en meget lille unedbrydelig del – oftest langt under 1 % – af det oprindelige organiske materiale.

Hvad er “blåt carbon” – økosystemer?

For at modvirke den massive afbrænding af fossile brændstoffer, har der i de senere år været fokus på at dække vores energibehov med CO₂-neutrale alternativer som vindmøller, solceller og atomkraft. Udviklingen og udbygningen af disse energiformer går desværre meget langsomt, og CO₂-indholdet i atmosfæren stiger stadigvæk. Den antropogene emission af CO₂ benævnes ofte som “brunt carbon”, mens “sort carbon” repræsenterer carbonpartikler udledt fra ufuldstændige afbrændinger. Til gengæld fjernes CO₂ fra atmosfæren, når det oplagres som “grønt

carbon” i biomassen af organismer med fotosyntese (bakterier, alger og planter). Oftest har “grønt carbon” været synonymt med plantecarbon oplagret på land i form af for eksempel levende træer og dødt organisk carbon deponeret i jorden.

I de seneste 20 år er fokus imidlertid vendt mod havet, hvor der også deponeres carbon fra fotosyntese. “Blåt carbon” kan derfor defineres som alt det biologiske carbon, der deponeres og lagres i verdenshavene. Det er velkendt, at CO₂ tilbageholdt ved fotosyntese i oceanerne, udgør mere end 55 % af den globale primærproduktion. Det er dog mere usikkert i hvor høj grad blåt carbon undslipper nedbrydning og bliver permanent lagret i sedimenter.



↑ Havgræseng i Danmark, bestående af ålegræs (*Zostera marina*). Foto: Mogens Flindt.



↑ Saltmarsk i Georgia, USA, domineret af vadegræs tilhørende arten *Spartina alterniflora*. Foto: Erik Kristensen
 ← Mangroveskov i Thailand, domineret af træer tilhørende arten *Rhizophora apiculata*. Foto: Erik Kristensen

De blå carbon-økosystemer, som oftest bliver omtalt i den videnskabelige litteratur, er mangroveskove, saltmarsker og havgræsenge. Fælles for disse økosystemer er, at de er produktive, og at primærproduktionen drives af karplanter med væv rigt på langsomt nedbrydeligt cellulose og lignin. De højproduktive mangroveskove i troperne er således et tidevandsområde bevokset med salttolerante træer, mens det tilsvarende økosystem i tempererede og subtropiske områder er saltmarsker bevokset med vadegræs (*Spartina*). Til gengæld er de fleste havgræsenge både i troperne, subtropierne, tempererede områder og arktis permanent oversvømmede og danner tætte bestande af havgræsser (for eksempel ålegræs) i kystnære områder.

Da havgræsser er så vidt udbredte, vil vi her fokusere på ålegræs (*Zostera marina*) i tempererede områder som Danmark og Skandinavien. Disse er dog omkring en tiendedel så produktive som mangroveskove og saltmarsker (se Tabel 1) på grund af lavere temperaturer og en generelt lavere lystilgængelighed

under vandet. Alle tre økosystemer understøtter dog carbonbegravelse meget bedre end tangskove og planktonalger, som ikke indeholder cellulose og lignin. På trods af, at mangroveskove, saltmarsker og havgræsenge er truede med stor arealmæssig tilbagegang de seneste 50 år og i dag kun dækker omkring 0,2 % af den globale havbund, står de ifølge den eksisterende litteratur for op til 50 % af alt det blå carbon, som begraves permanent i havet. Der hersker imidlertid stor usikkerhed omkring disse værdier og den tidsskala, de er baseret på.

Carbonakkumulering og -begravelse i moderne blå carbon- økosystemer

De fleste publicerede undersøgelser af carbonbegravelse i blå carbon-økosystemer er baseret på målinger af carbonpuljer i sedimenter – typisk ned til 1 meter. Kun ganske få studier baserer beregningerne på massebalancer ved måling af optagelse og afgivelse af carbon fra økosystemernes planter og nedbrydere. Estimer af carbonbegravelse vil, uanset metoden, være behæftet med meget store usikkerheder. Som det fremgår af Tabel 1 varierer de nuværende estimer for begravelse

Økosystem	Nettoprimærproduktion g C m ⁻² år ⁻¹	Organisk C pulje kg C m ⁻²	Organisk C akkumulering g C m ⁻² år ⁻¹
Mangrove	1344 (1080-1708)	66,3 (45,5-95,6)	166 (57-1073)
Saltmarsk	834 (740-1100)	18,6 (10,0-30,0)	208 (3-1713)
Ålegræs	119 (14-420)	7,3 (1,4-22,3)	18 (3-190)
Dansk Bøgeskov	510 (480-540)	17,4 (13-30)	97 (80-113)
Tropisk regnskov	844 (600-1080)	12,0 (9,0-19,7)	30 (10-50)

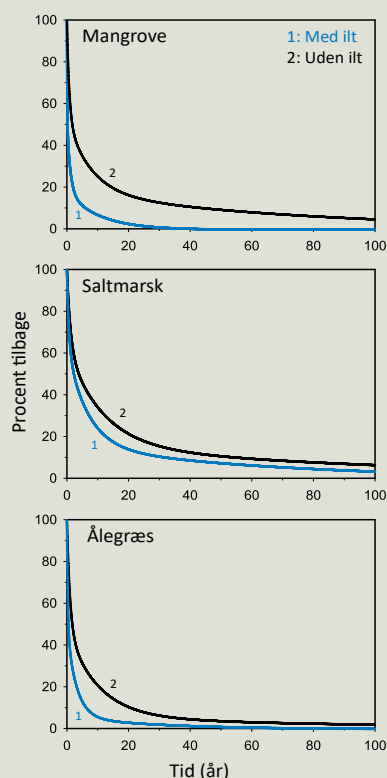
Tabel 1. Nuværende estimer for mangrove-, saltmarsk- og ålegræsøkosystemers nettoprimærproduktion, organisk carbon (C) pulje ned til 1 m dybde i sedimentet, og organisk carbonakkumulering i sedimentet. Til sammenligning er vist data for en dansk bøgeskov og en tropisk regnskov. Værdier er angivet som gennemsnit med variationen i parentes.

Mikrobiel nedbrydning

Modeller af mikrobiel nedbrydning af løv og rødder fra mangrovetræer i tropenerne, saltmarskplanten vadegræs i subtropenerne og ålegræs under tempererede forhold baseret på gennemsnit af publicerede nedbrydningshastigheder. Nedbrydningen er vist som det eksponentielle henfald over en periode på 100 år.

Modellen tager hensyn til, at løv fra planter indeholder mange forskellige organiske komponenter med hver deres tilgængelighed for mikrobielle nedbrydere. Der er en pulje af let nedbrydeligt materiale bestående af proteiner og simple kulhydrater sammen med en stor pulje af knapt så nedbrydeligt materiale som cellulose og en pulje af svært nedbrydeligt materiale som lignin. Størrelsen af disse puljer varierer fra plante til plante, hvilket skal tages i betragtning. Desuden er nedbrydningen af de forskellige puljer oftest meget hurtigere, når det foregår i luft og vand med tilstedeværelsen af ilt end i iltfrie sedimenter.

På Aktuel Naturvidenskabs hjemmeside kan du finde ekstra-materiale til artiklen, hvor det i større detalje bliver udfoldet, hvilke forudsætninger disse modeller bygger på.



af carbon således i mangroveskove fra 57 til 1073 gram carbon per kvadratmeter per år, mens den målt i samme enhed i saltmarsker varierer fra 3 til 1713 og i ålegræsenge fra 3 til 190.

Metoder baseret på måling af puljer er ganske ubrugelige, medmindre der findes pålidelige informationer om sedimentationshastigheden eller begravelseshastigheden. Det er praktisk taget umuligt at måle hastigheden, hvormed sedimentoverfladen hæver sig over tid, så andre metoder til datering af sedimentet må tages i brug. Ofte bruger man den radioaktive isotop ^{210}Pb (bly-210), som deponeres med konstant hastighed på overfladen og henfalder med konstant hastighed. Faldet i koncentrationen af ^{210}Pb med dybden i sedimentet kan således være et præcist mål for sedimentationshastigheden. Dette fungerer perfekt i områder af dybhavet med konstant sedimentation over tid og ingen forstyrrelser af sedimentet. Sådan er forholdene desværre ikke i mangroveskove, saltmarskers og ålegræsenges sedimenter. Her er der oftest massive forstyrrelser

ved blandt andet bunddyrs aktivitet og bølger, som omrører sedimentet og derved gør ^{210}Pb -dateringen fejlagtig.

Estimerer for carbonbegravelse ved massebalance kan være ret præcise, men er helt afhængig af at alle carbonkilder og -tabsprocesser inkluderes i beregningerne. Carbonkilder udgøres af mangrovetræers, saltmarskplanters og ålegræsplanternes overjordiske og underjordiske biomassetilvækst, samt indlejring af afstødt løv og døde rødder i sedimenter. Desuden vil der være et bidrag af sedimenteret organisk carbon, som tilføres udefra med vandstrømme og tidevand. Tabsprocesser indbefatter dyrs og mikroorganismers nedbrydning af organisk carbon og fjernelse af organisk carbon med vandstrømme og tidevand – ikke mindst i forbindelse med storme. På trods af ret store usikkerheder svarer mange publicerede estimater for det globale gennemsnit af organisk carbonakkumulering i mangrove-, saltmarsk- og ålegræs-sedimenter baseret på massebalance til henholdsvis 12, 25, og 15 % af nettoprimærproduktionen.

Hvor permanent er aflejringen?

For at aflejret organisk carbon i sedimenter kan klassificeres som blåt carbon skal det i princippet være permanent begravet. Fra et IPCC-klimaperspektiv og indenfor rammerne af den såkaldte "Verified Carbon Standard" (som er en international certificering af klimakompensationsprojekter) er tidshorisonten for en permanent tilbageholdelse imidlertid defineret som >100 år, på trods af at dette er mange størrelsesordener kortere end den tid, det tager at danne fossile brændstoffer. Det må derfor anses for en midlertidig oplagring, indtil den teknologiske udvikling resulterer i et ophør af antropogen CO_2 -udledning. Hvor meget af det tilførte organiske carbon i blåt carbon-økosystemer bliver så faktisk akkumuleret i sedimenterne efter 100 år? De ovennævnte globale gennemsnitsværdier for akkumuleringen på 12-25 % af nettoprimærproduktionen er jo betydeligt højere end den rest på 0-6,7 %, der er tilbage, når afstødt løv og rødder nedbrydes mikrobielt over en periode på 100 år (se faktaboks). Organisk materiale tilført udefra kan måske udligne noget af denne forskel, men

Ålegræssets lagring af carbon i danske farvande

Ålegræs har potentiale til at bidrage til blåt carbon på flere fronter. Der har i litteraturen været mest fokus på lagringen af dødt ålegræs materiale i havbunden, hvor de seneste beregninger indikerer en årligt lagring svarende til 0,7 % af Danmarks CO₂-udledninger. Denne beregning har kun gyldighed, når man kender det nuværende og fremtidige havbundsareal dækket med ålegræs. Desuden forudsættes det, at lagringen foregår med en konstant hastighed i mange år. Ingen af disse forudsætninger er imidlertid opfyldt. Vi har intet præcist kortgrundlag over hverken den historiske eller den nuværende ålegræs dækning. Vi kan derfor ikke estimere potentialet for det område, som kan genetableres, hvilket også vil give et tvivlsomt resultat, da miljøforholdene mange steder har ændret sig, så ålegræsset ikke kan genetablere sig. Og at forudsætte en fremtidig konstant lagring i de genetablerede områder er heller ikke meningsfyldt, da ny viden viser, at lagring og erosion faktisk er næsten i balance over en årrække.

Når miljøforholdene forbedres (reduceret næringsstofbelastning), kan man forvente en spredning af ålegræs til nogle af de barbundsområder, som tidligere havde tætte ålegræsenge. Derved vil den stående levende biomasse blive større, og der vil bindes tilsvarende CO₂. Vi har beregnet denne økosystemtjeneste samt perspektiveret størrelsesordenen i forhold til Danmarks årlige CO₂-emission. Hvis ålegræsset i de næste 10-30 år spredes og dækker 1100 km² mere end i dag, vil det skabe en opbygning af ny levende biomasse på 130.000 tons carbon i det nye areal. Eller en bindings-



Udplantning af ålegræs.
Foto: Troels Lange

rate på 4.300-13.000 ton carbon per år. Dette svarer til 0,03-0,1% af Danmark årlige udledning på 46 millioner tons CO₂- eller til 12,5 millioner tons carbon. Det skal pointeres, at dette bidrag er begrænset til den periode, hvor ålegræs-biomassen opbygges. Så vi må derfor konstatere, at ålegræsset ikke kan anses som et betydende klimavirkemiddel.

Det skal dog pointeres, at ålegræs skaber mange gode økosystemtjenester, som forbedrer natur- og miljøtilstanden i kystnære områder, og der i forskningskredse er konsensus om, at denne unikke plante er helt essentiel for at opnå og fastholde en god miljøtilstand. Blandt disse økosystemtjenester kan nævnes en øget biodiversitet af hvirvelløse dyr (orme, snegle, muslinger og krebsdyr) og fisk, som styrker fødekædernes stabilitet.

dette materiale vil jo blive tilbageholdt, uanset hvor det havner, og indgår reelt i andre økosystemers carbonbalance. Desuden standser nedbrydningsprocesserne jo ikke efter 100 år, men vil fortsætte lang tid efter – endda over geologisk tid. Faktisk har studier i dybhavet vist, at bakterier fortsat nedbryder tusinder til millioner år gammelt organisk carbon flere hundrede meter nede i sedimenterne.

Blåt carbon-økosystemer tilbageholder også CO₂, når de øger deres arealudbredelse og indlejrer carbon i ny levende biomasse. Alle tre typer af økosystemer har dog i de seneste 50 år været udsat for massiv tilbagegang. Således er mangroveskove i stor stil blevet fældet for at gøre plads til rejefarme, landbrug, havne

og andre kystfaciliteter. Saltmarsker er blevet presset på grund af behovet for kystnære områder til havne, industri og boliger. Endelig er udbredelsen af ålegræs mindsket meget som følge af stress fra den tiltagende eutrofiering langs vore kyster. Det er derfor indlysende, at disse økosystemer kun kan tilbageholde carbon i deres levende biomasse, hvis deres arealudbredelse øges. Dette sker desværre kun langsomt naturligt, og en massiv indsats med genplantning er derfor nødvendig. Denne indsats bør dog ikke udelukkende ske af hensyn til blåt carbon, da biomasseopbygningen slet ikke kan måle sig med de fortsatte CO₂-udledninger ved afbrænding af fossile brændstoffer. For eksempel vil biomassetilvæksten i et nyt ålegræsareal på 1100 km² i danske farvande på

et år kun tilbageholde 0,03-0,1 % af Danmarks årlige CO₂-udledning (se faktaboks). Genplantning af kystnære blåt carbon-økosystemer bør i stedet udføres for at fremme biodiversiteten af ellers tabt flora og fauna, så de kystnære økosystemers naturlige funktion genskabes til gavn for os alle. At der så også er en lille medfølgende klimagevinst, er selvfølgelig positivt.

Carbonbudgetter og drivhusgasbalance

De globale gennemsnit af carbonakkumulering og begravelse i mangroveskove, saltmarskers og ålegræsenges sedimenter svarer ifølge de usikre estimater i litteraturen til en CO₂-tilbageholdelse på henholdsvis 609, 763 og 66 gram CO₂ per kvadratmeter om året.

Kilder og videre læsning
18 havforskere i opråb: Ålegræs er afgørende for et rigt liv i havet, men det redder ikke vores klima. Altinget 12. januar 2024.

Johannessen, S.C., 2022. How can blue carbon burial in seagrass meadows increase long-term, net sequestration of carbon? A critical review. Environ. Res. Lett. 17. doi: 10.1088/1748-9326/ac8ab4

Kristensen, E., Quintana, C.O., Petersen, S.G.G., 2022. The role of biogenic structures for greenhouse gas balance in vegetated intertidal wetlands. In: X. Ouyang, S.Y Lee, Y.F.D. Lai & C. Marchand (eds). Carbon Mineralization in Coastal Wetlands: From Litter Decomposition to Greenhouse Gas Dynamics. Elsevier.

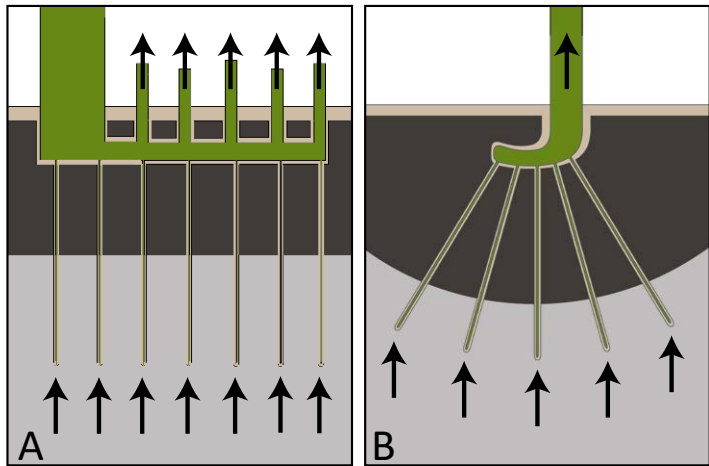
Leiva-Dueñas, C. et al, 2023. Capturing of organic carbon and nitrogen in eelgrass sediments of southern Scandinavia. Limnol. Oceanogr. 68: 631–648. doi: 10.1002/lno.12299

Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C.M., Valdés, L., DeYoung, C., Fonseca, L., Grimsditch, G. (Eds). 2009. Blue Carbon. A Rapid Response Assessment. United Nations Environment Programme, GRID-Arendal, www.grida.no.

Williamson, P., Gattuso, J.-P., 2022. Carbon removal using coastal blue carbon ecosystems is uncertain and unreliable, with questionable climatic cost-effectiveness. Front. Clim. 4: doi:10.3389/fclim.2022.853666.

g CO ₂ m ⁻² år ⁻¹	Mangroveskov		Saltmarsk		Ålegræseng	
	Begrav.	Nedbr.	Begrav.	Nedbr.	Begrav.	Nedbr.
C-tilbageholdelse	609	231	763	158	66	5
CH ₄ -emission	-436	-436	-486	-486	-0,5	-0,5
N ₂ O-emission	-213	-213	-80	-80	~0	~0
Balance	-40	-418	197	-408	80,5	4,5

Tabel 2. Gennemsnit af drivhusgasbalance i mangroveskove, saltmarsker og ålegræsenge. Balancen mellem carbontilbageholdelse og CH₄ + N₂O-emission er angivet som CO₂-ækvivalenter. Positive værdier viser fjernelse af CO₂-ækvivalenter fra atmosfæren. Carbontilbageholdelsen for hvert økosystem er i venstre kolonne baseret på begravelsesestimater (Tabel 1), og i højre kolonne baseret på beregninger af nedbrydningsrest efter 100 år fra planterne, som vokser i de forskellige økosystemer (faktaboks).



Skematisk tegning af A. Mangrovetræ med stamme, ånderødder og rødder. B. Vadegræs og ålegræs med stængel og rødder. Rødderne af begge planter strækker sig med luftvæv (grønt) ned i zonen med methandannelse (grå zone) og fører methan opad og til atmosfæren (pile).

Ifølge modellerne vist i faktaboksen over nedbrydningen af afstødt løv og rødder, vil der efter 100 år kun være en rest tilbage, som svarer til henholdsvis 231, 158 og 5 gram CO₂ per kvadratmeter årligt i de tre økosystemer (se tabel 2).

Tilbageholdelse, akkumulering og begravelse af carbon i sedimenter giver imidlertid ikke det fuldkomne billede af blåt carbon-økosystemers reelle bidrag til drivhusgasbalancen. Mange studier har vist, at mikrobielle processer i disse økosystemer danner de mere potente drivhusgasser methan (CH₄) og lattergas (N₂O). Disse har "Global Warming Potential" (GWP) over 100 år på henholdsvis 28 og 298 i forhold til CO₂. I mangroveskoves tidevandsområder vil luftrødder og krabbegange lave dybe kanaler ned i sedimentet til dybe zoner, hvor methandannelse forekommer. Her ved føres methan let op og udledes til atmosfæren (se figur). Tilsvarende føres methan via vadegræssets

rødder og skuds luftvæv hurtigt op fra methandannende zoner i sedimentet og til atmosfæren i saltmarskers tidevandsområder.

I permanent oversvømmede ålegræsenge er disse transportprocesser mere begrænsede, og kun en mindre del methan bliver frigjort til atmosfæren. Med hensyn til lattergas-frigivelsen er det mere tilgængeligheden af uorganisk kvælstof i form af ammonium (NH₄⁺) og nitrat (NO₃⁻), som er afgørende. Disse forbindelser vil blive omdannet ved processerne nitrifikation og denitrifikation i zoner, hvor iltholdigt og iltfrit sediment mødes, og lattergas frigives som biprodukt herved. Planternes rolle er her, at deres rødder øger arealet af disse zoner meget, når der føres ilt ned gennem planternes luftvæv.

Mængden af frigivet methan og lattergas fra blåt carbon-økosystemer varierer meget fra lokalitet til lokalitet, og de globale gennemsnit

er meget usikre. Estimerne viser dog, at drivhuseffekten af disse gasser i mangroveskove er af samme størrelsesorden som den estimerede tilbageholdelse af carbon beregnet ved massebalancer, mens saltmarsker og ålegræsenge stadigvæk har en nettotilbageholdelse (Tabel 2).

Hvis kun nedbrydningsresten fra planterne i de forskellige økosystemer efter 100 år tages i betragtning, vil mangroveskove og saltmarsker have en relativt stor nettofrigivelse af drivhusgasser, mens ålegræsbede er nogenlunde klimaneutrale. Der ved klinger termen blåt carbon-økosystem lidt hult, og det er nok ikke her vi skal satse for at afhjælpe klimaproblemerne.

Blåt carbon-økosystemer handler mere om biodiversitet end klima

De eksisterende estimater i litteraturen for globale carbonbudgetter og drivhusgasbalancer i blåt carbon-økosystemer er meget usikre, og emnet bør undersøges nøjere ved at udføre mere pålidelige målinger. Da beregningsmetoder og holdninger blandt forskere er forskellige, fremkommer der ofte ret divergerende resultater. Vi skal ikke for alt i verden "opfinde" økosystemer med stort potentiale til at modvirke klimaproblemerne, men i stedet lave objektive og korrekte videnskabeligt undersøgelser, som tager alle forhold i betragtning med hensyn til permanent begravelse af carbon og frigivelse af drivhusgasser.

Når vi forsøger at øge arealudbredelsen af de truede såkaldte blåt carbon-økosystemer, bør det derfor være for at fremme biodiversiteten og ikke fordi, vi tror det afhjælper klimaproblemerne – om end der nok er en lille gevinst.

KRYPTOLOGI GØR BESKEDER TIL BANKEN TIL DET RENE VOLAPYK

Den moderne, digitale verden ville bryde sammen, hvis det ikke var muligt at sende beskeder til for eksempel banken, advokaten eller bare hinanden, uden at andre kan læse med. Heldigvis sikrer kryptologi, at vi kan kommunikere sikkert på nettet, og bag kryptologien står forholdsvis simpel matematik.

Det er svært at forestille sig et internet uden kryptering. For der kan være rigtig mange gode grunde til, at man ikke har lyst til, at alle kan følge med i, hvad man skriver i fortrolige korrespondancer på nettet. Derfor er det rigtig godt, at matematikere allerede tilbage i 1976 udviklede en matematisk model til at kryptere digitale beskeder. Denne model bliver stadig i dag benyttet overalt på internettet, og derfor kan vi også være ret sikre på, at de beskeder, som kun lægen, banken eller vores nærmeste venner bør læse, ikke bliver læst af andre.

Da internettet så dagens lys tilbage i 1989, havde ingen en idé om, hvor meget denne opfindelse ville omkalfatre hele verdenssamfundet, og hvilke behov det ville stille til blandt andet muligheden for at holde information hemmeligt for andre end dem, som den er tiltænkt. Her skal vi alle være glade for kryptologien, som vi kalder det fagområde,

der handler om netop kunsten at kryptere. En af de danske forskere, som har beskæftiget sig mest med kryptologi, er professor Ivan Damgård fra Institut for Datalogi ved Aarhus Universitet.

»Vores verden kunne meget simpelt ikke eksistere, som vi kender den, hvis ikke vi havde mulighed for at kryptere vores beskeder på internettet. Det ville ikke bare betyde, at vi ikke kunne sende beskeder i fortrolighed, men også at alle mine brugernavne og adgangskoder lå frit tilgængelige for alle på nettet. Man er nødt til at have en teknologi, der kan regulere, hvem der kan se hvad, og det er netop det, som kryptologi kan,« forklarer Ivan Damgård.

Alle kan læse dine beskeder

At vi overhovedet har brug for kryptologien skyldes, at computere ikke sender beskeder direkte til hinanden eller til de servere, som de skal kommunikere med. Når du sender en besked til din bankrådgiver, går der med andre ord ikke en

lige digital linje fra din computer til din bankrådgivers. I stedet skal din besked forbi alt fra et par til mange hundrede computere, før den når frem. Nettet er nemlig opbygget, så information skal forbi en masse mellemstationer. Det gør internettet robust, fordi det betyder, at hvis du skal sende en besked til din bank, er du ikke afhængig af, at en forudbestemt sekvens af servere er tændt og fungerer. Din besked finder selv vej via de servere, som er tændt. Omvendt opstår netop det problem, at det er muligt at opsnappe din besked mange forskellige steder, og da internettet er globalt, kan din besked potentielt set bliver opsnappet i både Måløv og Moskva, Kastrup eller Kabul.

»Hvis vi ikke havde kryptologien, ville det at sende en besked til sin netbank være som at sende et postkort, der skulle forbi en hel masse postkontorer rundt om i verden, inden det kom frem til banken. Undervejs ville det være muligt for både postarbejdere og alle mulige

Om forfatteren
Af Kristian Sjøgren,
videnskabsjournalist.
ksjoegren@gmail.com

Om forskeren



Ivan Damgaard er professor ved Institut for Datalogi ved Aarhus Universitet. Han har i en lang årrække forsket i kryptologi.
ivan@cs.au.dk

I forbindelse med foredragsserien Offentlige Foredrag i Naturvidenskab holdt han i efteråret 2023 sammen med kollegaen professor Jesper Buus Nielsen foredrag om netop kryptologi, og hvordan verden ville have set ud, hvis vi ikke havde muligheden for at have korrespondancer i fortrolighed.

Sådan krypterer man en besked

Vi ønsker at kryptere bogstavet "m". I en computer er alt tal, så bogstavet m repræsenteres af fx tallet 13.

Først vælger vi to primtal, fx 5 og 11, som ganges med hinanden = 55.

Vi krypterer nu beskeden "13" (dvs. "m") ved at gange tallet 13 med sig selv 3 gange og dividere det med 55. Da 55 ikke går op i 2197 et helt antal gange, får vi en rest, som er 52. Denne rest er nu den krypterede besked. Den matematiske funktion *modulo* udtrykker netop den rest, man får, når man dividerer et tal med et andet (for eksempel er $11 \bmod 4 = 3$).

Formelt kan regnestykket altså skrives:

$$13^3 \bmod 55 = 2197 \bmod 55 = 52.$$

Hvis man kender de to primtal 5 og 11, kan man nemt køre denne proces baglæns og finde frem til beskeden "m".

At køre processen "baglæns" betyder dog ikke, at man bare kan regne sig tilbage i ovenstående regnestykke. I praksis beregner man en hemmelig nøgle, som er et tal x, der opfylder ligningen:

$$3x \bmod (5-1)(11-1) = 1$$

Her er løsningen $x = 27$.

Derefter dekrypterer man ved at beregne 52 opløftet til 27 modulo 55, hvilket netop giver 13.

Pointen er, at hvis man ikke kender primtallene (her 5 og 11), kan man slet ikke komme i gang med at løse ligningen med x, fordi man ikke kender tallet $(5-1)(11-1)$.

Primtal er hjørnestenen i kryptologi

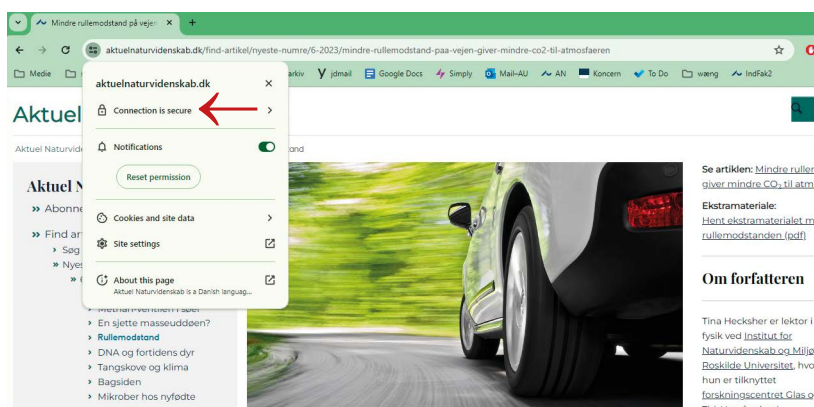
Og så skal vi snakke om matematik... Kernen i kryptologien er nemlig forholdsvis simpel matematik, som dog er noget nær umulig at bryde.

For at kryptere en besked og læse den igen, skal man bruge to ting. For det første skal man bruge to primtal, hvilket vil sige tal, som ikke kan fremkomme ved at gange to andre tal med hinanden end tallet selv og 1. Primtallene er 1, 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23 osv. osv.

De to primtal ganger man med hinanden, og resultatet er hængelåsen. Det vil sige, at hvis man vil åbne hængelåsen, skal man regne sig frem til, hvad de to primtal, som man ganget med hinanden, har været. Er tallet som eksempel 91, kan du efter lidt forsøg på lommeregneren nok komme frem til, at de to primtal er 7 og 13. Er tallet 391, tager det nok lidt længere tid at finde svaret 17 og 23. De "hængelåse", som bliver benyttet til at kryptere beskeder på internettet, er på omkring 4000 cifre og er produktet af to primtal på hver omkring 2.000 cifre. Det tager i omegnen af otte millisekunder at gange de to tal sammen. Men det vil omvendt tage millioner af år for selv en supercomputer at regne den anden vej rundt for at finde ud af, hvad de to oprindelige primtal har været.

I praksis foregår det på den måde, at banken fortæller dens kunder, ja faktisk hele verden, at hvis man vil sende en besked til banken, skal den krypteres med det 4.000-cifre store tal. Så er der sat en hængelås på, og så er det kun banken, der ved, hvilke to primtal der skal til for at låse beskeden op igen.

»Bankens hængelås er tilgængelig i offentlige databaser som certifikater, en slags digitalt ID-kort, så man ved, hvordan man kan sende fortrolige beskeder til banken, så kun de kan åbne dem. På en pc kan man se det som et hængelås-ikon i browseren. Det viser, at nu er korrespondance krypteret, og for alle andre end banken vil beskeden være det rene nonsens,



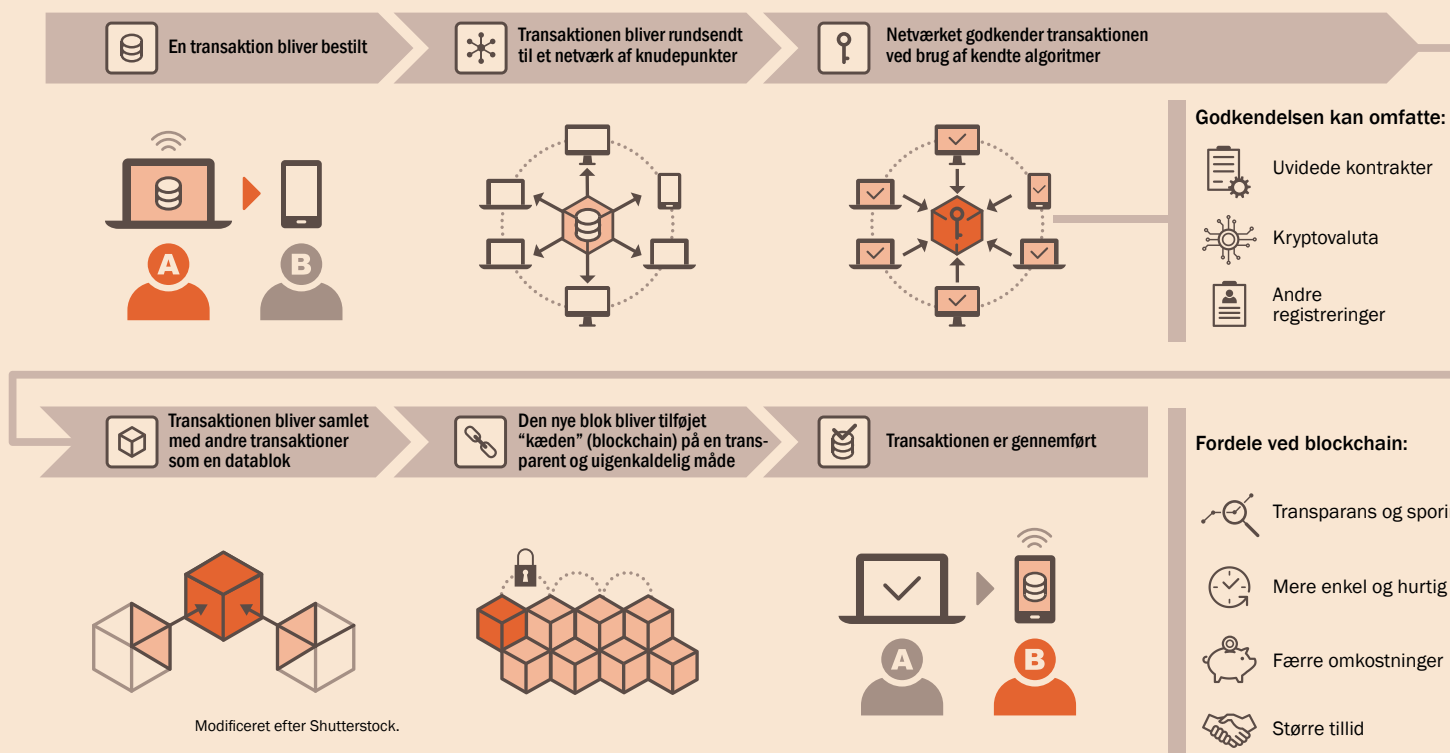
Med hængelåssymbolet og "The connection is secure", fortæller din browser dig i praksis, at den har fået fat i den hængelås, der hører til computeren, i den anden ende. Alt, hvad du taster bliver krypteret, inden det bliver sendt og kan derfor ikke ses af andre, end den rigtige modtager.

andre at læse, hvad du skriver til din bankrådgiver, medmindre beskeden selvfølgelig er af en sådan natur, at kun din bankrådgiver forstår, hvad der står i den,« forklarer Ivan Damgård.

Netop det, at kun din bankrådgiver kan forstå beskeden, er kernen i kryptologi. I overført betydning bruger man kryptologien til at forsyne

beskeden med hængelås, som kun en helt specifik nøgle kan låse op, så beskeden kan læses. Det vil sige, at når du sender en besked til din bankrådgiver, sender du en besked afsted med en hængelås, som kun din bankrådgiver har nøglen til. Alle kan stadig tilgå din personfølsomme besked, men hvis de åbner den, står alt skrevet som det rene volapyk.

Blockchain er ikke bare Bitcoins



Meget af det, vi foretager os på internettet i dag, er isoleret til digitale "siloer", der ikke nødvendigvis kommunikerer med hinanden. Skal man som eksempel købe et hus, er banken én silo, og Det Digitale Tingslysningssystem er en anden silo. De to siloer er ikke forbundet, så hvis du køber et hus, skal banken først indhente information fra Det Digitale Tingslysningssystem om, at skødet på et hus er overdraget, før banken overfører pengene fra køber til sælger, og ejerskabet over et hus kan overgå fra én person til en anden. Derudover skal også forsikringen ind over, og det skal RKI og en hel masse andre systemer også. Det tager tid og er alt andet mere besværligt, end det måske burde være.

Man kan sige, at blockchain er et opgør med de digitale siloer. Tanken bag blockchain er, at vi alle sammen "skriver på hver vores digitale opslagstavle", og at vi er enige om, at det, som står på opslagstavlerne, er rigtigt. Det vil sige, at hvis jeg, banken eller Det Digitale Tingslysningssystem skriver noget på hver vores opslagstavle, kan det ikke tages tilbage igen. Det er blevet en del af den fælles sandhed.

Står der for eksempel på opslagstavlerne, at du ejer et givent hus, vil det ikke være muligt at tage ejerskabet fra dig ved at manipulere med data ét sted i systemet, idet dit ejerskab over huset vil fremgå af alle de andre opslagstavler. Man kan med andre ord se, at nogen har forsøgt at manipulere med tingene. Hvis man endelig forestiller sig, at man vil franarre dig ejerskabet over huset, skal man rette ejerskabet på alle opslagstavlerne samtidig, og det vil kræve, at man

ændrer på ejerskabet ved ikke bare at bryde ind i Det Digitale Tingslysningssystem, men at man ændrer i ejerskabsinformationen på tusindvis eller endda millioner af opslagstavler.

Fordelen ved at have et blockchain-system ind over alt det, som vi foretager os på nettet er, at man på opslagstavlerne også kan skrive programmer. Og man kan bestemme, at når visse betingelser er opfyldt, så vil de instruktioner, der står i programmerne, blive udført. Det vil sige, at man som eksempel kan skrive, at så snart jeg har modtaget nøglerne til dit hus, overfører jeg købesummen til dig. Det forpligter jeg mig til, og jeg kan ikke løbe fra den forpligtelse, fordi den er skrevet ud på et hav af digitale opslagstavler, som jeg ikke kan ændre på igen. I stedet for at det ene system skal spørge det andet system, og vi skal vente tre arbejdsdage og en kommunal frokost på, at der sker noget, kan ejerskabet af huset skifte hænder med det samme, fordi alle systemerne blot kan konsultere den fælles sandhed.

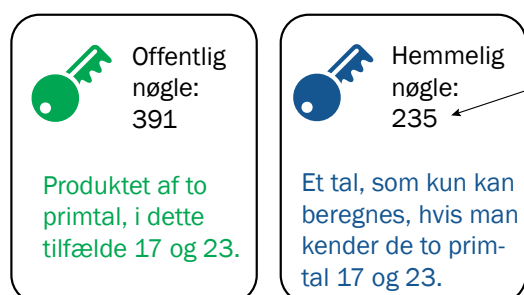
Blockchain vil på den måde gøre det muligt at automatisere en hel masse processer, uden at det er muligt at manipulere ved systemet eller lægge det ned.

Blockchain er også den teknologi, som ligger bag Bitcoins som digital valuta. Også her er der digital konsensus om, hvem der ejer de forskellige bitcoins, og det er som sådan ikke muligt for en kriminel at gå ind og stjæle dem ved at overføre ejerskabet over en håndfuld bitcoins til sig selv. Det vil stadig stå på alle de andre opslagstavler, hvem der rigtig ejer de digitale mønter.

Hvordan fungerer digital signatur?



Princippet: Jeg har en hemmelig nøgle, ingen andre har. Så jeg kan gøre noget ved beskeden, som ingen andre kan gøre. Men hvordan kan andre verificere, at det netop er min hemmelige nøgle, der er brugt i processen?



Når man ved, at den eksponent, man bruger til at checke underskrift er 391, beregnes den hemmelige nøgle som et tal x , som opfylder ligningen:

$$391x \text{ modulo } (17-1)(23-1) = 1$$

End ikke kvantecomputere kan løse krypteringen

Hvis man skal finde ud af, hvilken primtal, der ganget sammen, giver bankens hængelås, går det ikke bare at prøve sig frem. Det ville tage meget længere tid end at prøve samtlige atomer i universet ét for ét.

»Det gør det svært at forestille sig, at det kan lade sig gøre. Der findes dog smartere metoder, så man kan komme lidt tættere på at finde tallene, men selv med de bedste metoder, vi kender til, vil det stadig tage millioner af år at bryde krypteringen,« forklarer Ivan Damgård.

Og selvom et eller andet matematikgeni engang skulle finde på en endnu smartere måde at pille tal fra hinanden i primfaktorer, bryder verden ikke sammen af den grund. Kryptering med primtal er nemlig blot én af flere metoder til at kryptere beskeder, så vi kan altid skifte til noget andet, hvis det skulle blive nødvendigt.

Lad os også slå fast, at selvom der har været talt om, at kvantecomputere skulle kunne knække alle mulige krypteringskoder, er der heller ikke her grund til bekymring. Det er godt nok rigtigt, at kvantecomputere – i teorien – kan bryde mange af de krypteringsmetoder, vi bruger på nettet i dag. Men for det første findes der i dag ingen kvantecomputere, som er store nok til at være en trussel i praksis. Det er heller ikke til at sige, om tilstrækkeligt store kvantecomputere kommer til at eksistere inden for de næste 20 eller 50 år – eller nogensinde.

Vi ønsker digitalt at underskrive beskeden "13":

$$\text{Underskrift} = 13^{235} \text{ modulo } 391 = 225$$

For at verificere beskeden skal man udregne $225^3 \text{ modulo } 391$ og se, om det giver 13.

for ingen andre end banken keder de to primtal,« siger Ivan Damgård.

Computere tænker kun i tal – ikke i bogstaver

Skal vi et spadestik dybere i krypteringen (og matematikken), så krypterer din computer faktisk ikke tekst i dine beskeder til banken, men derimod tal. For en computer findes der nemlig kun tal og ikke bogstaver, så selvom du skriver et "M" i din besked til din bankrådgiver Morten, ser computeren blot tallet 13.

Når beskeden skal krypteres, foregår det typisk på den måde, at tallet, altså 13 for M, bliver ganget med sig selv et antal gange, typisk 3. Derefter dividerer man bankens hængelåstal med

tallet, hvilket efterlader en rest. Denne rest er den krypterede besked, som absolut ingen mening giver for nogen som helst. For at få beskeden til at give mening igen, skal man lave hele regnestykket den anden vej, og det kan bare ikke lade sig gøre, medmindre man har adgang til bankens to primtal.

Kommunikationen mellem dig og banken involverer desuden etableringen af en krypteret tunnel mellem din computer og bankens computer, så du ved, at du snakker med banken, fordi du har krypteret din besked med bankens hængelås, og din bankrådgiver ved, at han eller hun snakker med dig, fordi du har brugt et password for at logge på banken.

»Men skulle det komme så vidt, så findes der allerede standardiserede nye krypteringsmetoder, som kvantecomputere ikke kan bryde – såkaldt "postquantum secure"-kryptering,« forklarer Ivan Damgård.

Sådan fungerer MitID

Når det gælder vores færden på internettet, har vi også i andre sammenhænge brug for kryptering. Det kan dreje sig om, at vi skal overføre 65.000 kr. til en mand i Thy for en handel vedrørende en gammel campervan, som var sat til salg på Den Blå Avis. For 20 år siden gik vi i banken og skrev under på overførslen, og så var vores underskrift beviset på, at vi havde sagt god for overførslen. I dag har de færreste af os vores daglige gang i banken, og vi klarer det hele digitalt med blandt andet MitID *Swipe*.

MitID fungerer også efter nogle af de samme principper for kryptering som ved kryptering af beskeder. Her gælder det bare, at når banken skal have bekræftet, at den skal overføre 65.000 kr. til Hans Hansen for køb af en gammel camper-

van, skal den lige sikre sig, at det rent faktisk er dig, som bestiller overførselen.

Ved en digital signatur har vi alle sammen en personlig nøgle, som ingen andre har, og det betyder, at kun vi hver især kan gøre noget ved en besked, for at banken kan forstå den eller agere på den. Denne personlige og hemmelige nøgle er igen baseret på relativt simpel matematik, hvor vi tager beskeden, der igen kun består af tal, og ganger tallene med det tal, som er den personlige nøgle. Det kan som eksempel være, at man opløfter beskeden i 14. potens (det reelle tal er meget, meget, meget højere), og kun derved kan banken bekræfte, at beskeden er behandlet digitalt på en måde, som kun personen med den nødvendige nøgle kan have gjort.

»Det gør det muligt at skrive under på ting digitalt og godkende overførsler af penge. MitID er et system, hvor vi alle har en hemmelig signaturnøgle, som opbevares på en central server. MitID er adgangskontrol til de hemmelige digitale nøgler,

så det kun er mig, som gennem mit MitID, min brugerprofil og mit password eller ansigtsgenkendelse kan bruge min digitale nøgle til at underskrive et dokument. Vi bruger også MitID til at logge på hos Skat, så når jeg logger på Skat, bliver der lavet et lille digitalt dokument, hvor der står, at Ivan i dag på dette og dette tidspunkt forsøgte at logge ind på Skats hjemmeside. Da det er underskrevet med min personlige nøgle, kan Skats hjemmeside tjekke, at det er rigtigt, at det er Ivan, som vil ind, og de kan så lukke mig ind. Det er den måde, som det fungerer på,« siger Ivan Damgård.

Uden matematikken bag kryptering ville det være helt umuligt at forestille sig, at hverken Ivan, dig eller mig kunne sende en besked til banken vedrørende en overførsel af penge, eller at banken overhovedet kunne verificere, hvem der bestilte overførslen.

»Så ville verden bryde sammen og holde op med at eksistere, som vi kender den i dag,« siger Ivan Damgård. ■

Ny bachelor på SDU

Kunstig intelligens

Er du nysgerrig på optimering, logik, maskinlæring, programmering, etik, algoritmer og matematik?

Med en bachelor i Kunstig intelligens fra Syddansk Universitet får du kompetencer, som allerede nu er efterspurgt i virksomheder og organisationer i Danmark og udlandet.

Du behøver ikke at kunne programmere, når du starter på uddannelsen. Du skal bare have interesse i at lære det, ligesom du skal have flair for at tænke logisk og matematisk.

Læs mere om uddannelsen på sdu.dk/kunstig-intelligens



HJERNEN: DET MEST KOMPLEKSE ORGAN I KROPPEN

Om forfatteren
Af Kristian Sjøgren,
videnskabsjournalist.
ksjoegren@gmail.com

Om forskeren



Leif Østergaard er uddannet læge og astronom. Han arbejder både som professor og centerleder for Center for Funktionelt Integrativt Neurovidenskab (CFIN) ved Institut for Klinisk Medicin, Aarhus Universitet, og som overlæge ved Neuroradiologisk Afsnit, Røntgen og Skanning, Aarhus Universitetshospital.

Han forsker i årsagerne til alvorlige hjerne-sygdomme, og hans forskningsresultater har medvirket til at forbedre diagnostik og behandling af blandt andet blodpropper i hjernen samt til en ny forståelse af demens.

I efteråret 2023 holdt han foredrag om hjernen i forbindelse med foredragsserien Offentlige Foredrag i Naturvidenskab. Denne artikel er lavet i den anledning.

Hjernen er det mest komplekse organ i kroppen og udgangspunktet for alt det, som vi mennesker kan, vil og foretager os. Klinisk professor og hjerneforsker Leif Østergaard tager os med på en rejse fra de første opdagelser omkring hjernen til vores tilbøjelighed til at blive programmeret til at "indtage" alt fra alkohol til sociale medier.

Den 13. september 1848 var en ung mand på blot 25 år i færd med at udføre et farligt stykke arbejde i staten Vermont i USA. Phineas Gage, som han hed, arbejdede for et jernbaneselskab og var ved at sprænge klipper, så der kunne lægges togskiner til det, som senere fik navnet *Rutland & Burlington Railroad*. Det var en flot septemberdag, og mens Phineas Gage arbejdede sig gennem dagen, havde han ingen idé om, at det, som skulle ske lige inden fyraften, ville komme til at få betydning for hjerneforskning de næste 150 år.

Omkring klokken 16:30, da Phineas Gage masede krudt godt ned i et hul i en klippe med en medbragt jernstand, gik tingene galt. Hans

opmærksomhed blev tiltrukket af de mænd, som arbejdede bag ham, og han opdagede slet ikke, at han med jernstangen fik lavet en gnist, der antændte krudtet. Phineas Gage skulle til at råbe noget til mændene, men nåede det ikke, før jernstangen fløj ud af hans hænder, fortsatte ind gennem hans kind, ind bag det ene øje og ud på den anden side af kraniet. Den seks kilo tunge jernstang landede 30 meter væk, og Phineas Gage faldt om på Jorden.

Det særlige ved sagen om Phineas Gage er ikke, at han døde af at få en jernstang gennem hovedet. Det særlige er, at han på trods af et hul gennem kraniet og hjernen rent faktisk overlevede. Efter få minutter fik han med hjælp rejst sig op og kunne sidde oprejst i en vogn

under kørslen ind til den nærmeste by. Gennem hullet i kraniet kunne man se hjernen pulser.

Phineas Gage, der levede i noget nær bedste velgående i 12 år efter ulykken, var allerede dengang en interessant sag, et *medicinsk vidunder*, som man sagde, men fortsatte også med at være det i mange år derefter. Årsagen var den, at hans hjerneskada gav en hidtil ukendt indsigt i, hvilke dele af hjernen der fungerer hvordan, og hvad der sker, når de ikke gør. Med hjerneskadens ændrede Phineas Gage nemlig personlighed, hvilket skyldtes, at meget af den venstre frontallap var blevet ødelagt, da jernstangen passerede igennem kraniet og kom ud på den anden side. Han begyndte blandt andet at bande, kom med dumme bemærk-

ninger og blev hurtigt stresset. Fra at være en vellidt mand og en leder blandt sine kollegaer, blev han det stik modsatte.

»I hjerneforskningens tidligste dage lærte man det, som vi i dag ved om hjernen og dens funktion, ud fra sager som den med Phineas Gage, hvor vi pludselig kunne se, hvad der skete med folk, når bestemte dele af hjernen blev beskadiget. Så kunne man se, hvilke symptomer skaderne bragte med sig i form af både ændret personlighed, men også tab af syn, hørelse, smagssans, motoriske funktioner, hukommelse med videre. Alt det var ikke muligt at studere hos raske mennesker, hvor hjernen som bekendt er gemt godt af vejen inde i kraniet, men det kunne man studere i disse særlige tilfælde,« fortæller klinisk professor Leif Østergaard fra Institut for Klinisk Medicin ved Aarhus Universitet.

Hjernen fungerer gennem forbindelser mellem hjerneceller

Siden Phineas Gage kom ud for sin ulykke, har forskere gennem årtier bygget lag på lag på deres viden om, hvad hjernen er for en størrelse, og hvordan den fungerer – og vi er blevet meget klogere. For 120 år siden troede de fleste forskere blandt andet, at der blev dannet flere hjerneceller, når vi lærte noget nyt. En af disse forskere var Camillo Golgi, som opfandt en metode, så man for første gang kunne studere hjernens opbygning under et mikroskop. Metoden banede vejen for, at kollegaen Santiago Ramón y Cajal opdagede hjernecellerne og deres forbindelser i form af synapser. Han gættede også, at det ikke er selve nervecellerne, men disses synapser, der lagrer information. Disse opdagelser fik de to herrer i 1906 den første Nobelpris indenfor hjerneforskning for at opdagde.

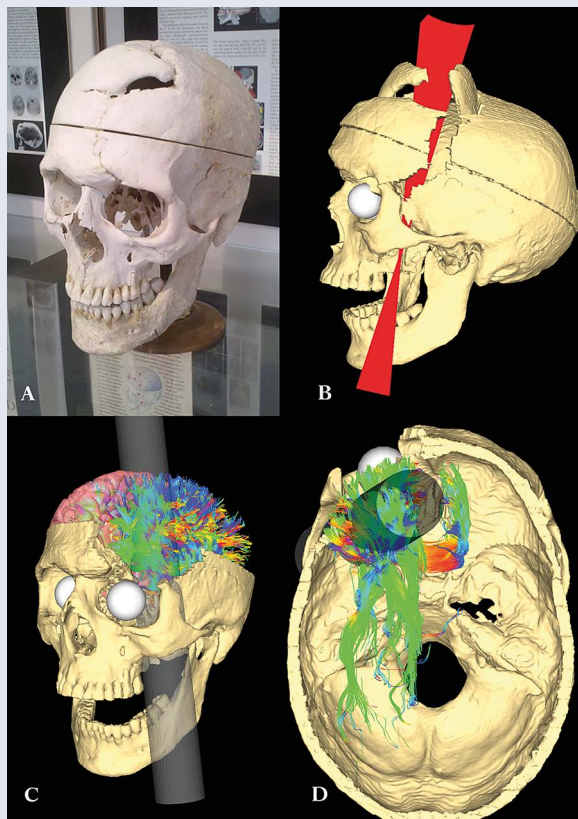
Synapser er helt centrale i hjernens funktion og i hjernecellernes kommunikation. Alle hjernens nerveceller taler til hinanden hele tiden. Nervecellerne taler

til hinanden via kemisk kontakt, og jo flere gange hjernens celler taler til hinanden, des stærkere bliver signalbåndet mellem dem. Det betyder, at hvis man som menneske gør det samme igen og igen – for eksempel som nærvæ-

rende journalist, der slår løs på sit tastatur hver eneste dag – bliver bevægelserne lagret i hjernen, så man ikke længere skal tænke over bevægelserne, men at de sker helt automatisk. Man plejer at sige, at "så ligger det på ryggraden", men



Phineas Gage med den jernstang, som røg tværs gennem hans hjerne, dog uden at slå ham ihjel. Foto: Jack and Beverly Wilgus/CC BY-SA 3.0



Phineas Gages kranium findes i dag på Warren Anatomical Museum ved Harvard Medical School. De øvrige illustrationer viser computersimuleringer af jernstangens bane og de deraf følgende ødelæggelser af hjernen.

Fra Van Horn JD, et al (2012), PLoS ONE 7(5): e37454. doi:10.1371/journal.pone.0037454/CC BY-SA 2.0

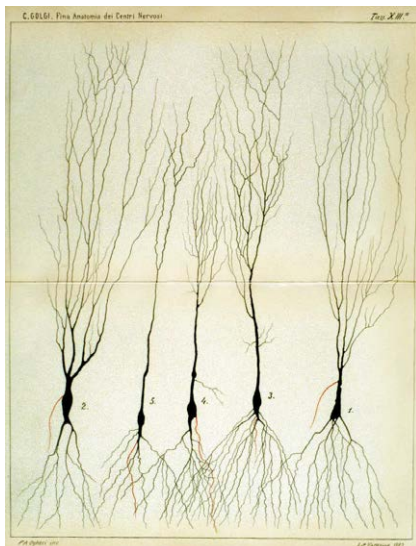
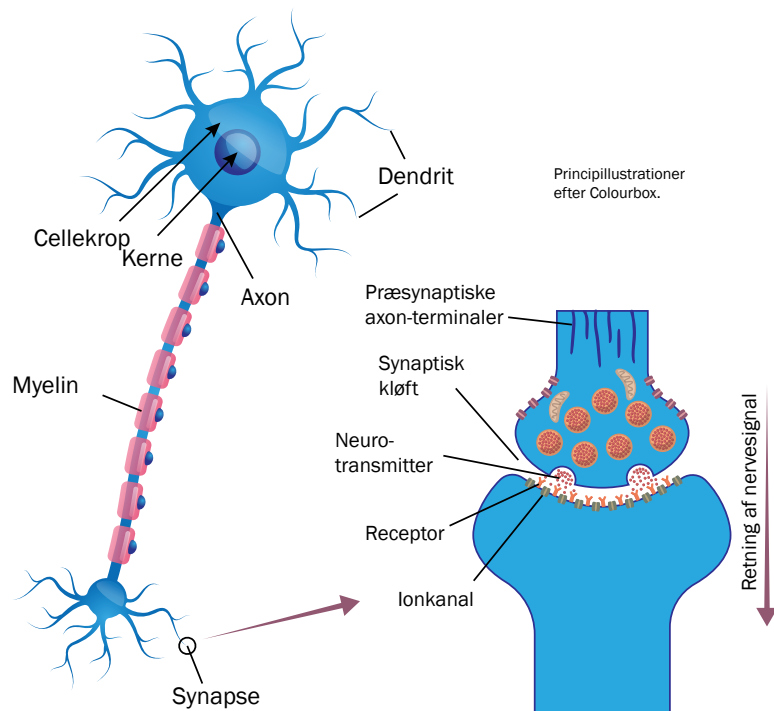


Illustration af nerveceller af Camillo Golgi (1843-1926).



Figuren viser den principielle opbygning af en hjerne-celle (neuron) – her en såkaldt multipolær neuron, der har forbindelser til mange andre neuroner. Der er desuden zoomet ind på kontakten mellem to neuroner kaldet synapsen. Signaler i et neuron sker gennem et elektrisk signal, der udbreder sig gennem axonet, og i selve synapsen som et kemisk signal via signalstoffer (neurotransmittere), der formidler signalet til den næste nerve-celle.

det er faktisk noget sludder, for det har intet med ryggraden – men derimod med hjernen – at gøre. Forbindelserne mellem hjernens celler, der udfører en given opgave, bliver stærkere og stærkere, indtil vi kan skrive, køre bil, læse, spille musik, tale forskellige sprog osv. helt ubevidst.

Alt sammen drejer sig om at lære noget nyt, og når man som menneske skal lære noget nyt, bruger vi indledningsvist den forreste del af hjernen, som er god til at afkode nye ting, som for eksempel nye bevægelser. Den forreste del af hjernen er da også på overarbejde, når man skal lære at spille klaver eller lære et nyt sprog. Efterhånden som tingene bliver gentaget og gentaget, bliver bevægelsen eller den nye viden dog cementeret i forbindelser mellem hjerne-celler forskellige steder i hjernen. Derfor skal Messi ikke tænke over det, når han dribler forbi en modstander. Du skal heller ikke tænke over, at du læser denne tekst, og at den er på dansk. Det falder dig formentlig helt naturligt, og det skyldes, at du først har lært det

og siden lagret det i forbindelser mellem din hjernes celler.

Gode og dårlige vaner

»Det er enormt smart, at hjernen på den måde automatiserer tingene, så man kan udføre en hel masse, uden at skulle tænke over det først. Når vi først har fået tingene automatiseret, bliver det en vane, men det gælder altså både for gode og for dårlige vaner, og ligesom det er meget brugbart at tillægge sig gode vaner, kan de dårlige vaner være meget svære at komme af med igen, hvis de først er blevet etableret som forbindelser mellem hjernens celler,« forklarer Leif Østergaard.

Han uddyber, at hjernen også bruger vores erfaringer og automatiseringen til at forudsige, hvad der sker omkring os – og at det også gør hjernen nem at snyde. Mange har måske set en video, hvor forsøgspersoner skal tælle afleveringer mellem basketballspillere, som løber rundt mellem hinanden på en basketballbane, og helt overser, at en gorilla undervejs løber rundt mellem spillerne. Det skyldes, at

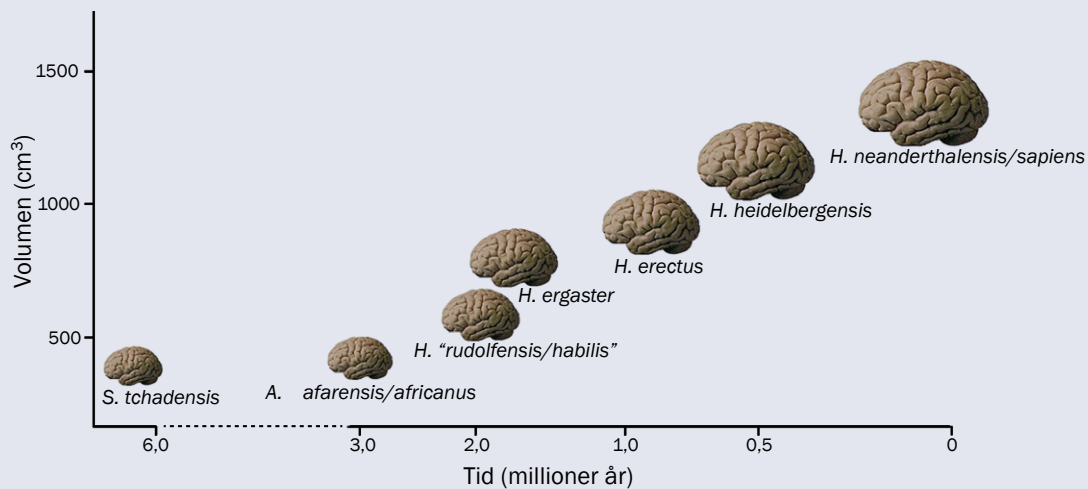
vores synssans bruger vores erfaringer og forventninger, når den afkoder dét, som øjnene ser, og dermed undertrykker detaljer, som ikke normalt forbindes med basketball – herunder gorillaer. Samtidig er vores opmærksomhed fokuseret på at tælle – så vi helt overser noget, som tilbage i naturen ville være helt afgørende at opdage. Hvis det omvendt var første gang, at forsøgspartagerne skulle tælle, havde de nok opdaget gorillaen, fordi automatiseringen ikke ville have været på plads til at snyde hjernen.

Dopamin giver mennesker motivation

Skal man lære noget nyt, er motivation altid et godt sted at starte, for det kan være meget svært at lære at spille for eksempel klaver, hvis man meget hellere vil sparke til en fodbold eller omvendt. Nogle ting er omvendt helt essentielle at være motiveret for. Det gælder blandt andet det at spise og dyrke sex, som begge er vigtige for, at vi som mennesker og art overhovedet kan overleve.

Heldigvis skal vi ikke motivere

Om hjernen



Efter: Bolhuis et al. PLoS biology. 12. e1001934, 10.1371/journal.pbio.1001934.
Image credit: Gisselle Garcia (brain images)

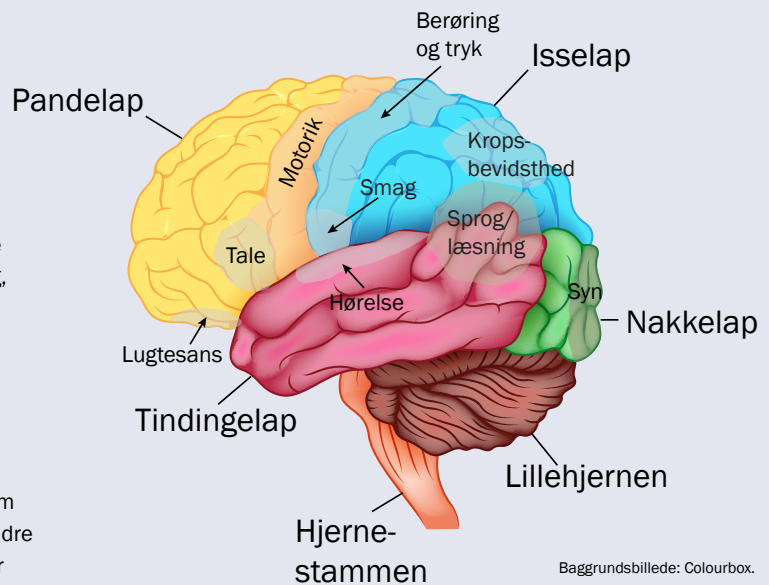
Skitse af, hvordan hjernestørrelsen hos arter på menneskelinjen har udviklet sig over de seneste 6 millioner år.

Menneskets hjerne er et ekstremt energi-krævende organ, at holde kørende. Den står for hele 20 % af kroppens energistofskifte og dermed iltforbrug. Evolutionært har der derfor været et stort pres på betydningen af hjernen for vores overlevelse. Det skal give en klar overlevelsesfordel at være klog, kunne tale sprog, planlægge, huske og tænke abstrakt fremfor bare at være stærk og hurtig, hvis det skal kunne betale sig at bruge så mange af vores ressourcer på netop dette ene organ.

Behovet for en velfungerende hjerne for det at være et velfungerende menneske er også årsagen til, at menneskebabyer er så godt som hjælpeløse i de første år af livet, mens alle andre dyreunger kan klare sig selv efter få uger eller måneder.

Forskning har mange gange peget på sammenhænge mellem vores hjerner udvikling og vores rejse frem mod at blive den dominerende art på Jorden. Faktisk lå det ikke i kortene, at vi mennesker skulle overtage planeten. For lidt under en million år siden var vi ikke flere end omkring 1.300 individer på Jorden. Jovist, disse forfædre var klogere end alle andre dyr på planeten, men vi var ikke de hurtigste, de største eller dem med de skarpeste tænder. Vi lavede heller ikke hund-redvis af unger, som kunne sikre overlevelsen. Alt, vi havde, var vores hjerner.

Gennem tusinder af år viste det sig dog, at vores hjerner gav os en fordel i det evolutionære kapløb med de andre dyr på Jorden. I takt med, at vi blev klogere, kunne vi også bruge vores hjerner til at skaffe den ekstra energi, som organet



Baggrundsbillede: Colourbox.

Overfladen af hjernen kan anatomisk inddeles i forskellige overordnede sektioner. Der er angivet den omtrentlige placering af, hvor en række forskellige vigtige hjernefunktioner varetages i hjernen.

krævede, så hjernen ikke længere var en ulempe, men en fordel. Udvikling af redskaber til at jage store byttedyr gav os en ekstra kilde til føde, og det samme gjorde ilden, der gjorde det muligt at spise og få energi fra flere fødekilder.

Selvom vi i dag er meget klogere end vores forfædre for 200.000 år siden, var vores hjerner allerede dengang så godt som fuldt udviklede. Spørgsmålet er, om der i fremtiden er mere at komme efter, og om vores efterkommere kan få en endnu større overlevelsesfordel af at have endnu større og om muligt endnu mere avancerede hjerner.

Alzheimers og hjerneforskning

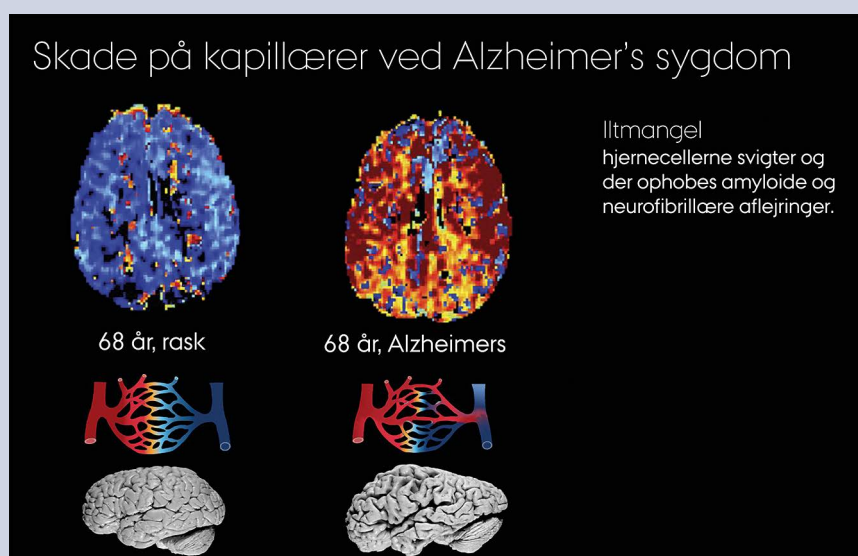
Et af de områder indenfor hjerneforskningen, som Leif Østergaard har beskæftiget sig med, er baggrunden for udviklingen af demenssygdomme, særligt Alzheimers sygdom.

Alzheimers er kendetegnet ved, at der ophobes klumper af forkert foldet protein, såkaldt beta-amyloid, i hjernen, og at der også dannes "totter" af snoede proteintråde kaldet neurofibrillære aflejringer inde i selve nervecellerne. Disse ophobninger har i sagens natur været i søgelyset for at være årsagen til, at hjerneceller ødelægges og går til grunde og de deraf følgende invaliderende symptomer, som også kendetegner Alzheimers. Forskningen har dog ikke med sikkerhed kunnet fastslå, om disse proteinophobninger i sig selv er årsagen til degenerering af hjernen ved Alzheimers.

For relativt nylig er det lykkedes at udvikle lægemidler, der er i stand til at reducere mængden af beta-amyloid i hjernen. Det ser dog umiddelbart ikke ud til, at det udgør nogen mirakelkur mod Alzheimers sygdom.

Leif Østergaard har sammen med kolleger fra Aarhus Universitet undersøgt en anden teori, nemlig om iltmangel i hjernen kan være den primære årsag til Alzheimers sygdom. I første omgang blev denne hypotese dog ikke støttet af undersøgelser af blodgennemstrømningen i hjernen, der viste, at blodforsyningen til hjernen ikke er kritisk lav ved demenssygdom-

me selv til hverken at spise eller dyrke sex, på samme måde som teenageforældre ofte kæmper med at motivere deres børn til overhovedet at stå ud af sengen om morgenen. Hjernen er nemlig udstyret med et genialt system, så motivationen kommer helt af sig selv. Centralt i hjernens system til motivation finder vi stoffet dopamin, som hjernen har udviklet til at



me. Men efterhånden som bedre teknikker har gjort det muligt at kortlægge blodgennemstrømningen helt ud i de fineste blodkar, de såkaldte kapillærer, tegner der sig et andet billede.

Kapillærerne danner et stort netværk, hvor blodet kan komme ud til hele hjernevævet. Her sørger kapillærerne både for at tilføre ilt til hjernen, og at fjerne de affaldsstoffer, der dannes inde i vævet. Velfungerende kapillærer sikrer, at blodet flyder nogenlunde lige hurtigt gennem hele netværket, så tilførslen af ilt og fjernelsen af affaldstoffer er så god som mulig.

Leif Østergaard og kolleger har kunnet vise, at sammenlignet med raske personer af tilsvarende alder er kapillærerne hos patienter med Alzheimers ikke i stand til at fordele

blodet tilstrækkeligt. Blodet vil derfor flyde hurtigt nogle steder og langsomt andre steder. Samlet set giver dette en dårligere udnyttelse af ilt i blodet samt en forringet evne til at fjerne hjernens affaldsstoffer. Hjernevævet kan derfor opleve, at det ikke får ilt nok, til trods for at der, overordnet set, er tilstrækkeligt ilt i blodet. Desuden kan hjernens affaldsstoffer såsom beta-amyloid ophobe sig inde i hjernen. Dette vil på sigt betyde, at hjernecellerne svigter og dør.

Et godt råd til at holde sine kapillærer i bedst mulig form gennem livet er at give hjernen udfordringer og at dyrke motion og spise grøntsager, der er med til at "skylle kapillærerne igennem" blandt andet gennem virkningen af molekylet nitrogenoxid (NO), der stimulerer åbning af kapillærerne.

give os tendens til at gøre det, som er vigtigt for vores overlevelse, og som også kan motivere os i mange andre henseender. Det er dog vigtigt, at man her holder tungen lige i munden.

»Oftentimes kalder folk dopamin for et belønningsstof, men det er faktisk forkert. Dopamin er et motivationsstof, der får os til at have lyst til at

gøre ting. Når vi så for eksempel spiser, dyrker sex eller andet, der er motiveret af dopamin, bliver der i hjernen frigivet belønningsstoffer som for eksempel endorfiner eller endocannabinoider, der giver os en god følelse i kroppen,« forklarer Leif Østergaard.

Han uddyber, at motivationssignalet og tilfredshedssignalet er helt

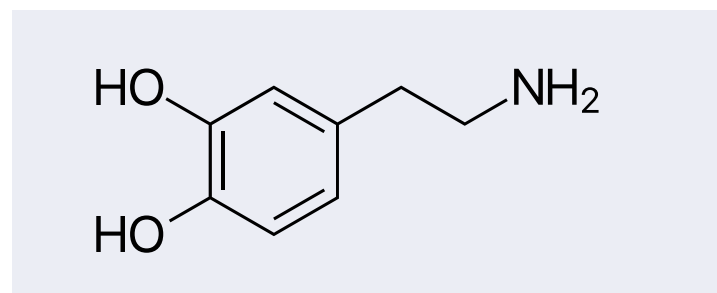
uafhængige i kroppen, så man sagtens kan have det ene signal uden også at have det andet. Alkoholikere kan som eksempel være enormt motiverede til at drikke alkohol, selvom de ikke længere nyder alkoholen. I den henseende er kun dopamin og lysten til alkohol i spil, uden at det giver en tilfredshedsfølelse.

»I samfundet er det vigtigt, at vi forstår, at for eksempel alkoholisme ikke skyldes, at personer ingen vilje har, men at det faktisk skyldes, at deres hjerner er blevet programmeret til hele tiden at indtage alkohol. Hjernen er sårbar over for den slags programmering af dopaminsignalet, fordi det til sidst gør det svært at lade være med at drikke,« forklarer Leif Østergaard.

Når dopamin kontrollerer vores liv

Kodning af hjernen er et af de forskningsområder, der modtager mest interesse indenfor hjerneforskningen, fordi det spiller ind så mange steder i vores liv. Nogle gange er det positivt, når det får os til at huske og lære nyt, mens det andre gange er negativt. For eksempel sker der en uhensigtsmæssig neural kodning i hjernen hos personer med posttraumatisk stresssyndrom (PTSD). Det gør, at forskellige centre i hjernen er stærkt forbundet, så lyde eller billeder kan tænde områder af hjernen, som de helst ikke skal tænde. Mange med PTSD efter krigsoplevelser er som eksempel meget følsomme over for høje pludselige lyde, hvilket kan aktivere et meget stærkt fysisk og emotionelt respons, simpelthen fordi de forskellige områder i hjernen er samkodet, og den høje lyd tænder et helt netværk af hjerneceller.

Indenfor behandling af personer med både PTSD og alkoholisme er der da også en drøm om, at man medicinsk eller med andre terapiformer kan styre hjernen, så den ikke aktiverer områder af hjernen med uhensigtsmæssige effekter på vores liv. Det kunne være en



Den kemiske struktur af signalstoffet dopamin, som spiller en vigtig rolle i forhold til at motivere os for at gøre ting.

behandling, der afkobler den høje lyd fra at aktivere centre i hjernen med betydning for stress og angst. Det kan også være en metode til at slette et bestemt minde eller trængen til at drikke 20 guldøl.

»Der bliver forsket meget i det, men det er enormt svært, fordi hjernen er så kompleks, og man skal være sikker på, at man ikke kommer til at slå andre dele af hjernen fra,« siger Leif Østergaard.

Hjerneforskere laver mange undersøgelser af, hvordan man kan aktivere og bibeholde motivationen, for eksempel for at hjælpe børn med indlæringsproblemer. Det gør udviklerne af algoritmerne bag sociale medier og medier som TikTok også – men her er det, fordi børn og unges tid på medierne kan oversættes til sorte tal på bundlinjen. Det skal retfærdigvis også nævnes, at flere softwareudviklere også forsøger at bruge spil og sociale mediers tillokkende designs til at udvikle nye læringsformer. I Kina findes TikTok for eksempel i en undervisningsversion – mens myndighederne begrænser børns adgang til traditionelle sociale medier og online spil.

Den unge hjerne er mere sårbar

Leif Østergaard fortæller, at netop unges hjerner ser ud til at være særligt sårbare over for den påvirkning, som sociale medier har på deres motivationsrespons i hjernen. Årsagen kan være, at børn og unge mennesker endnu er i gang med at udvikle forbindelser mellem den dybe del af hjernen,

hvor pludselige impulser opstår, og den forreste del af hjernen, som efterhånden lærer at undertrykke impulser til at gøre ting, som er uhensigtsmæssige. Disse forbindelser bliver tilsyneladende først færdigudviklede midt i tyverne, og nogle forskere mener, at det er årsagen til, at unge nemmere kan kaste sig ud i adfærd, som kan være farlig. Samtidig kan det også gøre det sværere for børn og unge at modstå sociale mediers algoritmer – selvom de ved, at det påvirker dem negativt.

»Når hjernen er fuldt udviklet, kan det blive lettere for den forreste del af hjernen at undertrykke impulser, der ikke er hensigtsmæssige. Men det er vigtigt at vide, at dopamin påvirker vores handlinger, uden vi selv er klar over det – derfor er voksne også sårbare over for den kraftige indvirkning, som omgivelserne kan have på ens dopamin-niveauer,« siger Leif Østergaard.

Han understreger samtidig, at vi alle sammen er forskellige, og at det samme gælder dopaminsignalerne i hjernen. Nogle mennesker bliver stimuleret af at prøve nye og vildere ting. Dopamin trækker dem i den retning, og de skal hele tiden rejse, opleve noget nyt og køre 200 kilometer i timen på motorvejen. Onkel Peter og Tante Kisser bliver måske ikke i samme grad drevet rundt af dopaminsignalerne i hjernen, og i stedet tager de hvert år til det samme sted ved Gardasøen, fordi det er et rart sted at være, og de kender både ejeren af campingpladsen og hende bag kassen i købmandsbutikken på hjørnet. ■

Videre læsning
Leif Østergaard (2016):
Hjernen. Tænkpause
fra Aarhus Universitets-
forlag. Bogen udkom på
engelsk i 2023.

Målinger i felten er også lavet i forsøgsområder, hvor vi som her eksperimenterer med en varmere sommer ved hjælp af små drivhuse. Vi ser, at optaget af methan stiger som forventet, når det er varmere. Det er overraskende, at det også er tilfældet i selv meget tørre jorder som her på billedet.

Foto: Bo Elberling

Forfatterne



Bo Elberling er professor ved Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet. Han forsker i processer i jordmiljøet og spillet mellem planter og mikroorganismer.

be@ign.ku.dk



Ludovica D'Imperio er forsker og centerkoordinator ved Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet. Hun arbejder nu primært med drivhusgasser og skovrejsning.

ldi@ign.ku.dk



Jesper Riis Christiansen er lektor ved Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet. Han forsker i processer i jorden koblet til ændringer i arealanvendelsen.

jrc@ign.ku.dk

MIKRO-ORGANISMER I JORDEN VENDER OP OG NED PÅ METHANREGNSKABET

Feltmålinger i Grønland kombineret med laboratorieforsøg og modelstudier viser, at de udbredte tørre egne af Grønland optager mere methan, end der frigives fra vådområder. Dette optag vil formentlig blot stige under fremtidige klimaændringer.

Målinger i felten er afgørende for at bestemme optaget af methan i jorden. Udviklingen af nye metoder til automatiske målinger af methan i felten har de seneste 15 år bidraget til mere detaljerede målinger på både frigivelse og optag af methan i jorden. Målingerne foregår ved, at der først presses en cylinder ned i jorden. Når der måles, lægges et låg på cylinderen. Et instrument, der kan måle methan, er koblet til låget, og i de følgende op til 20 minutter bestemmes ændringer i koncentrationen af methan i cylinderens top, der stikker op af jorden. Stiger koncentrationen i toppen under målingerne betyder det, at der

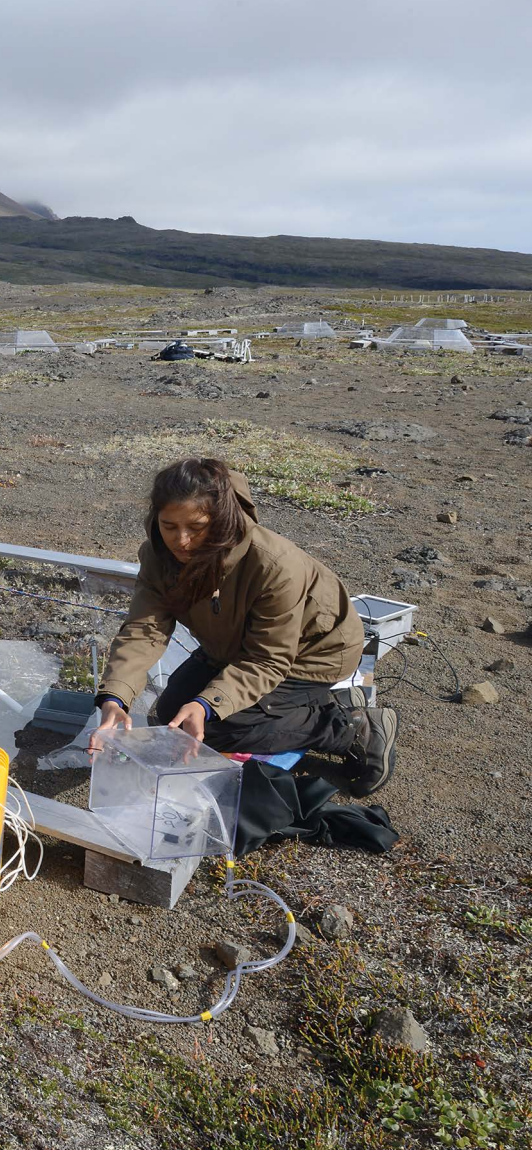
frigives methan fra jorden. Omvendt så falder koncentrationen, når jorden optager methan.

Det lyder enkelt, men gode målinger forudsætter, at man kan måle på svært tilgængelige steder, at man kan måle præcist ved lave koncentrationer, og at systemet er helt tæt. Dertil kommer, at der skal måles på mange forskellige jordtyper og på alle tider af året. Arktis og herunder Grønland er i fokus, fordi man på de breddegrader har konstateret de mest markante ændringer i klimaet og samtidig er bekymret for en øget frigivelse af methan i takt med, at permafrosten tør. Nye detaljerede data for methanopta-

get er nu tilgængelig fra både Syd-, Nord-, Øst- og Vestgrønland. Feltmålingerne er efterfølgende brugt i et større modelarbejde for at beregne et samlet regnskab for methan for den isfrie del af Grønland.

Feltmålinger koblet til forsøg i laboratoriet

Det er ikke ny viden, at jorder kan optage methan fra atmosfæren. Det nye er, at optaget for Grønland er så stort i forhold til frigivelsen af methan og en ny erkendelse af, hvilke miljøforhold der er styrende for methanoptaget. Det er svært at få et samlet regnskab for methan for et helt år, og det er selvsagt særligt udfordrende i Arktisk. Målinger fra

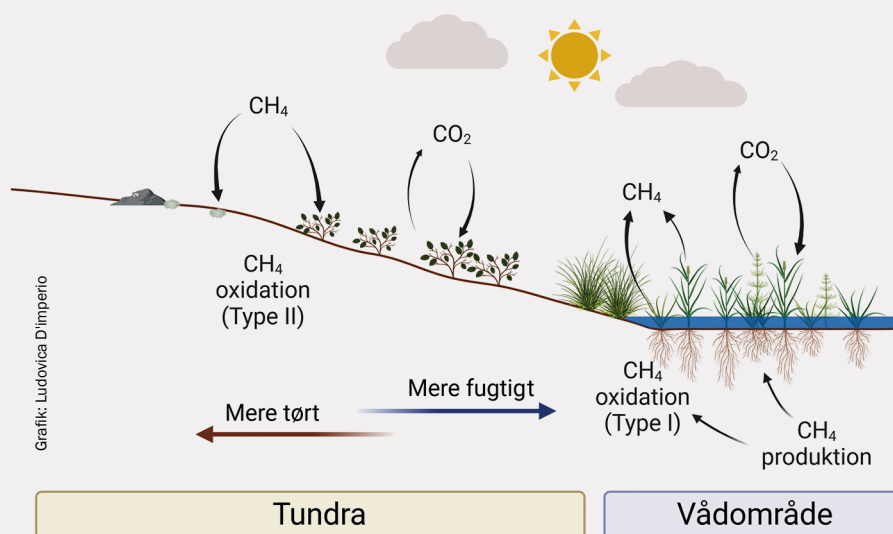


forskellige årstider viser, at særligt temperaturen og jordens fugtighed er afgørende for variationer i optaget af methan over året.

Mikroorganismernes aktivitet afhænger af temperaturen, og aktiviteten kan mere end fordobles ved en temperaturstigning på 10 grader. Det ved vi fra detaljerede laboratorieforsøg, hvor alt andet end temperaturen er holdt konstant.

Laboratorieforsøg viser også, at jordens fugtighed er afgørende. Ud over temperaturen er både oxygen og methan en forudsætning for den mikrobielle omdannelse af methan. Når det regner, stiger

Methan som drivhusgas



Methan (CH_4) er som carbondioxid (CO_2) og vanddamp vigtige drivhusgasser i atmosfæren. Methan er dog en langt mere effektiv drivhusgas end CO_2 , fordi gassen absorberer relativt mere varmestråling fra jorden: På tyve år er den opvarmende effekt af methan 84 gange så høj som CO_2 ifølge FN's klimapanel IPCC, men reduceres med tiden på grund af fjernelse fra atmosfæren. Over en 100-årig periode vil den opvarmende effekt af en given mængde methan "kun" være 34 gange større end drivhuseffekten af en tilsvarende mængde CO_2 .

Når man laver et methan-budget, regnes atmosfæren oftest som et reservoir af methan, som modtager methan fra våde jorde, prutter og bøvser fra husdyr, fra lossepladser og mange andre kilder. Hvis man derimod tager udgangspunkt i jordbunden, er historien en anden. Der findes to grupper af mikroorganismer, der kan nedbryde methan i jorden, og i begge tilfælde oxideres CH_4 til CO_2 ved tilstedeværelsen af oxygen, når mikroorganismerne udnytter processen til at få energi og carbon.

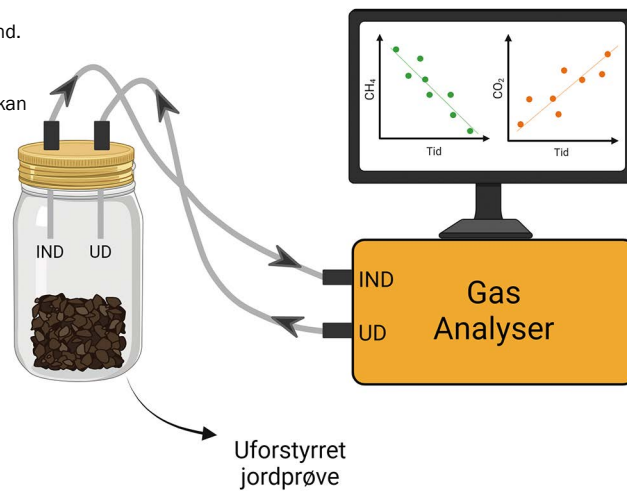
En gruppe af mikroorganismer (type I) kan nedbryde methan ved høje koncentrationer af methan, og de er den primære årsag til nedbrydning af methan, som produceres i våde jorde. Det nedsætter på afgørende vis den mængde af methan, som kan frigives i vådområder, bare der er lidt oxygen i jordens øverste lag (se tegning). Undersøgelser peger på, at mere end 90 % af det methan, der produceres i vådområder, nedbrydes af mikroorganismer, før det kan undslippe til atmosfæren.

Den anden gruppe af mikroorganismer (type II), som vi primært har arbejdet med, findes i tørre jorde, hvor der ikke forekommer produktion af methan. Denne gruppe mikroorganismer, som kan nedbryde methan ved lave koncentrationer, optager methan direkte fra atmosfæren. Denne proces er ansvarlig for 5-10 % af fjernelsen af methan fra atmosfæren globalt set.

I Grønland udgør vådområder mindre end 5 % af det isfrie areal. Nye målinger og modelstudier viser, at frigivelsen af methan fra områderne samlet set er mindre end optaget af methan fra mere eller mindre tørre dele af landskabet. Et groft CO_2 -regnskab for Grønland viser, at den isfrie del af Grønland er tæt på at være i balance – dog med et mindre nettooptag af carbon i vådområderne.

I laboratoriet måles på intakte prøver fra Grønland. En konstant luftstrøm sendes mellem glas med prøve og et apparat, der kan analysere koncentrationen af methan og carbondioxid (CO₂). Her måles udviklingen af gaskoncentrationerne over tid, som kan omregnes til dels en produktion af carbondioxid (CO₂) og dels et optag af methan (CH₄) i prøven.

Illustration:
Ludovica D'imperio



vandindholdet i jorden, og transporten af både oxygen og methan ned i jorden formindskes, og dette reducerer den mikrobielle omdannelse (oxidation) af methan. En tør jord med et vandindhold på kun 5-10% er optimal for methanoptaget. Hvis det bliver for tørt, stopper processen; det skyldes, at mikroorganismerne skal bruge vand for at være aktive.

Samlet set betyder det, at optaget af methan alt andet lige stiger markant om sommeren i den tørre og varmere jord og falder hurtigt igen til nær nul først på vinteren.

Når methan omdannes, er slutproduktet CO₂, som også er en drivhusgas (se faktaboks). Det er interessant, at de methan-oxiderende mikroorganismer får hovedparten af deres carbon til celleopbygning fra methanen og ikke fra jordens pulje af organisk stof eller CO₂ fra atmosfæren. Det betyder, at et plantedække ikke er afgørende for optaget af methan, og i Grønland ses et stort optag af methan på netop de tørre og vegetationsfattige områder.

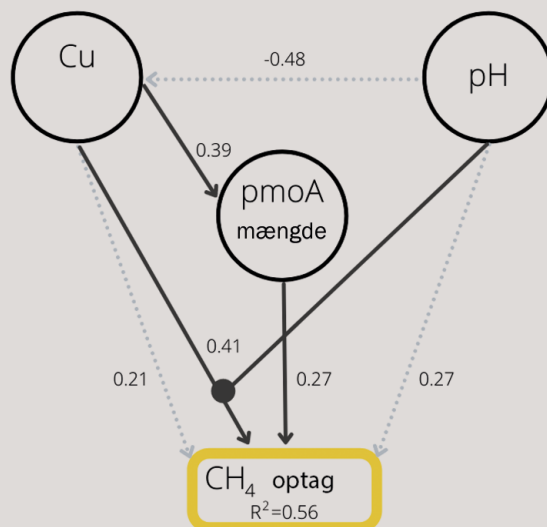
Variationer i methan-optaget betinget af geologien

Vi har også målt optaget af methan i laboratoriet ved samme temperatur og ensartet indhold af jordvand på en lang række jordtyper på tværs af hele Grønland siden 2012. Disse jorder varierer betydeligt i hydrologi, surhedsgrad og næringsstofindhold. Vores målinger giver derfor et robust bud på en variation i methanoptaget i forhold til variationer i landskabet. Denne viden kan bruges til at beregne et samlet methanoptag fra større områder, for eksempel Grønland.

Når variationer i optaget af methan måles på prøver indsamlet på tværs af Grønland, kan vi relatere det til en lang række målinger af geokemiske og geologiske forskelle i jordbunden. Ved hjælp af en statistisk model har vi derefter undersøgt, hvilke parametre der bedst forklarer de observerede forskelle

Analyse af strukturelle sammenhænge

Når man vil analysere strukturelle sammenhænge mellem flere forskellige variable på én gang, kan man bruge en analyseteknik kaldet Structural equation modeling (SEM). Teknikken er en kombination af såkaldt faktoranalyse og multipel regressionsanalyse, og i vores tilfælde har vi brugt teknikken til at analysere det strukturelle forhold mellem en række målte variable og optaget af methan. Figuren viser resultatet af en SEM-model på baggrund af målinger af methanoptaget fra jordprøver, der efterfølgende er målt for en lang række parametre.



Parameteren *pmoA* (particulate methane monooxygenase) er et udtryk for mængden af et funktionelt gen, som er karakteristisk for den gruppe af mikroorganismer, der nedbryder methan. Cu (kobber) er den biologisk tilgængelige mængde målt i jorden, og pH er jordens surhedsgrad. For CH₄-optag angiver R²-værdien, hvor godt optaget af methan er forklaret ved en kombination af målte værdier af Cu, *pmoA* og pH. Hvor 0 er ingen forklaringsgrad og 1 er 100 % forklaringsgrad.

De strukturelle sammenhænge mellem modellens faktorer er indikeret ved pile. Ved hver pil står et nummer, som er en standardiseret regressionskoefficient, som repræsenterer den relative betydning af strukturen mellem to variable, for eksempel kobberindholdet og methanoxidationen. Som det ses, er den kombinerede struktur af kobber og pH stærkest i forhold til at forklare variationen i målt methanoptag. Så kobber og pH er vigtig, men andre parametre, som ikke indgår i modellen, er også vigtige. Fuldt optrukne pile viser en signifikant sammenhæng, hvilket betyder at der er mere end 95 % chance for, at der er en sammenhæng (P<0,05), mens en stipletpil viser en tendens med en sandsynlighed på mere end 90 %.



Målinger af methanoptaget for Grønland er også målt på svært tilgængelige steder – for eksempel i prøver indsamlet fra den nordligste spids af Grønland (Kap Morris Jesup) og fra nunatakker (bjergtoppe, der rager op over Indlandsisen). Billederne viser indsamling af prøver fra Westfal-Larsen Nunatak på den Grønlandske Østkyst. Også i disse ekstreme miljøer er der målt methanoptag i samme størrelsesorden som andre steder i Grønland.

Fotos: Elise Biersma / Bo Elberling (th).

i methanoptaget på tværs af Grønland. Vi har benyttet en såkaldt SEM-model (se faktaboks), som giver os en mulighed for at kvantificere både direkte og indirekte effekter af de mange parametre på methanoptaget. Vi ser, at særligt to jordbundskemiske forhold skiller sig ud og bidrager til højere methanoptag, når effekten af jordens vandindhold og temperatur ikke inkluderes. Det er jordens surhedsgrad (pH) og tilgængeligheden af kobber. Begge parametre har en direkte effekt, men sammen er de helt afgørende. Jo mere sur jorden er (lavt pH), jo mere er kobber

biologisk tilgængelig for mikroorganismerne. Kobber er et velkendt mikronæringsstof, som er særlig vigtigt i processen for at nedbryde methan, da kobber er den aktive del af det mikrobielle enzym, der reagerer med methan i jorden.

Et nyt methan-regnskab for Arktis

Når de vigtigste forudsætninger for produktion og optag af methan er bestemt, kan der opstilles et methan-regnskab. Balancen mellem produktion og optag er vigtig, fordi de klimaændringer, vi er vidne til i Arktis i dag, kan påvirke balancen

på flere måder. Dels ved at permafrosten tør, og nye carbonpuljer under vand kan frigive yderligere methan. Dels ved at nye områder bliver vådere og dermed bliver mere fattige på oxygen end hidtil. En fremskrivning af disse to ændringer tyder på, at methanproduktionen fra Arktisk vil øges.

Omvendt forventes, at vækstsæsonen mange steder i Arktis kan blive både mere tør og i særdeleshed varmere. Desuden viser undersøgelser fra Sverige, at når permafrosten tør, kan det medføre øget dræning, udtørring og øget

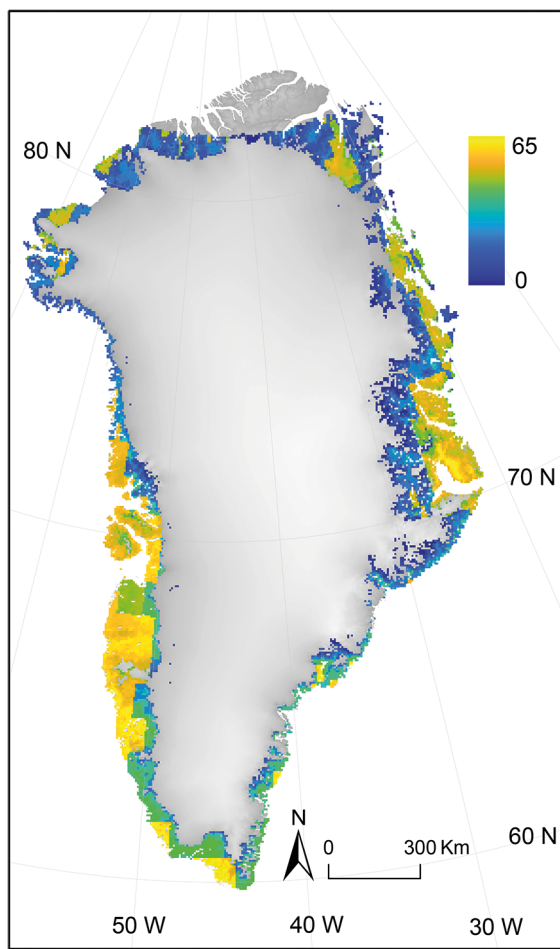
Videre læsning

D'Imperio, L., Nielsen, C.S., Westergaard-Nielsen, A., Michelsen, A. & Elberling, B. (2016) Methane oxidation in contrasting soil types: responses to experimental warming with implication for landscape-integrated CH₄ budget. *Global Change Biology* 23, 966–976.

Jørgensen, C.J., Johansen K.M.L., Westergaard-Nielsen, A. & Elberling, B. (2015) Net regional methane sink in High Arctic soils. *Nature Geoscience* 8, 20–23.

Oh, Y., Zhuang, Q., Liu, L., Welp, L.R., Lau, M.C.Y., Onstott, T.C., Medvigy, D., Bruhwiler, L., Dlugokencky, E.J., Hugelius, G., D'Imperio, L. & Elberling, B. (2020) Reduced net methane emissions due to microbial methane oxidation in a warmer Arctic. *Nature Climate Change* 10, 317–321.

Ny forskningsartikel: D'Imperio, L., Li, B., Wang, P., Christiansen, J.R., Rojas, S.K., Westergaard-Nielsen, A., Holm, P.E., Oh, Y., Ambus, P., Brandt, K.K., Tiedje, T. & Elberling, B. (2023) Spatial controls of methane uptake in Arctic upland soils across climatic and geological regions. *Nature Communications Earth & Environment* 4, 461.



Kortet over Grønland viser med farver det gennemsnitlige methanoptag for den isfrie del af Grønland for perioden 2000-2016 med enheden mg CH₄ per m² per måned. Modellen inkluderer ikke den nordligste del af Grønland (nord for den 82. grader nordlige breddegrad), fordi der her mangler en klassifikation af overfladen.

forhold til kendte kilder af methan både i Arktis og på globalt plan. Men vores forskning øger forståelsen af de komplekse processer, der er afgørende for det globale regnskab af methan og som skal bruges nu og i fremtiden til at udvikle modeller, der giver et mere retvisende billede af betydningen af optaget af methan.

Der er naturligvis en række usikkerheder, når man beregner ét samlet methan-regnskab for Grønland. En af de vigtigste usikkerheder er en mulig ekstra frigivelse af methan fra Indlandsisen, idet der stedvis er blevet påvist methan, som slipper ud omkring fronten af Indlandsisen. Så methan-regnskabet for Grønland kan og skal fortsat forfines.

methanoptag fra atmosfæren. Det betyder, at tørre jorder formentlig kommer til at spille en større rolle i fremtiden, og at methan fra atmosfæren vil kunne nå længere ned i jorden og endelig, at de mikroorganismer, der optager methan, kan øge deres kapacitet. Det gode spørgsmål er, hvad alle disse nye forhold betyder for balancen mellem produktion og optag på tværs af landskabet.

Et nyt modelstudie inkluderer alle disse elementer i et nutidigt og fremtidigt methan-regnskab for hele Arktis. Her har vi med udgangspunkt i feltobservationer, laboratorieforsøg og matematiske modeller forsøgt at integrere den eksisterende viden i et revideret bud på et methan-regnskab for Arktis. Resultaterne er overraskende, fordi det modellerede optag af atmosfærisk methan i de halvtørre til nærmest ørkenagtige landskaber i Arktis er større end hidtil antaget.

Modellen er siden blevet optimeret med høj detaljeringsgrad for Grønland med hensyn til både variationer i klima, vegetation og jordbundstyper med en detaljeringsgrad på 5 x 5 km fra syd til nord (se kort).

Methanoptaget i Grønland og andre steder i Verden

Konklusionen på vores arbejde viser, at Grønland på årsbasis optager mere end 65.000 ton methan fra atmosfæren i de tørre landskaber i Grønland og tilsvarende, at de våde områder frigiver 9.000 ton methan. Regnskabet viser altså, at Grønland bidrager med et lille netto-optag af methan under nutidige forhold, som højst sandsynligt vil øges i et fremtidigt varmere Grønland. Konklusionen er ikke, at Grønland kommer til at påvirke det globale indhold af methan i atmosfæren eller være en afgørende del af det Arktiske methan-regnskab. Optaget af methan i Grønland er simpelthen for lille i

Grønland er et relativt ungt landskab, som kun har været isfrit siden isen fra seneste istid smeltede for cirka 14.000 år siden. Det betyder, at de konklusioner, vi præsenterer her, ikke nødvendigvis gælder for andre større landområder – og formentlig slet ikke Sibirien med en hel anden og længere historik. Store dele af Sibirien var ikke dækket af is under den seneste istid. Landskaberne er derfor ældre og har ophobet mere carbon i jorden og udviser stedvis en betydelig større frigivelse af methan end Grønland. Det forrykker methan-balancen, og fremtidige målinger er vigtige for at kunne udtale sig mere præcist om methan-regnskabet her.

Vi har også været involveret i tilsvarende målinger og modelarbejde for eksempelvis Tibet og det nordlige Canada, og her er konklusionen den samme som for Grønland: Optaget af methan er overraskende stort og overstiger methanfrigivelsen fra vådområder. ■

TIP DINE ELEVER OM STUDERENDE FOR EN DAG

‘Studerende for en dag’ giver dine elever en unik mulighed for at blive klogere på hverdagen som studerende på Aarhus Universitets **naturvidenskabelige uddannelser** og **ingeniøruddannelser**.

De kan **opleve studielivet**, **komme med til undervisning** og **stille spørgsmål** direkte til den universitetsstuderende, de følges med.



Fotografer: Anders Trærup og Lars Kruse, AU Foto

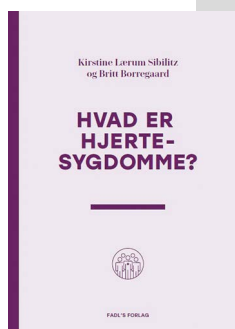
Læs mere og se tilmeldingen på

[NAT.AU.DK/STUDERENDEFORENDAG](https://nat.au.dk/studerendeforendag)

[TECH.AU.DK/STUDERENDEFORENDAG](https://tech.au.dk/studerendeforendag)

F A K T A

Kirstine Lærum
Sibilitz og Britt
Borregaard:
*Hvad er hjer-
tesygdomme?*
FADL's forlag
2023. 224 sider,
299,95 kr.

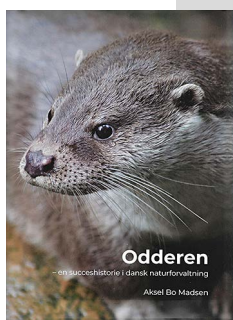


Hvad er hjertesygdomme?

Gennem de seneste 30 år har antallet af personer med hjertesygdom været stigende, mens behandlingsmulighederne er forbedret markant. Denne bog gennemgår i 18 kapitler alt fra en anatomisk og fysiologisk beskrivelse af hjertet til konkrete hjertesygdomme, rehabilitering og at leve med hjertesygdom – både som patient og pårørende. Og alt derimellem.

F A K T A

Bogdata: Aksel
Bo Madsen:
*Odderen – en
succeshistorie i
dansk naturfor-
valtning. Natur-
forlaget 2023. 80
sider 199, kr.*



Odderen

Fra at være på randen af udryddelse i begyndelsen af 1980'erne er odderbestanden nu igen udbredt i det meste af landet takket være et formidabelt samarbejde mellem private organisationer, forskningsinstitutioner og offentlige myndigheder. Denne succeshistorie op rulles i denne bog for alle, der er interesseret i naturen eller ønsker inspiration til, hvordan et naturbevaringsprojekt kan gribes an.

F A K T A

Lauritz Holm-Nielsen:
*Afhængig
af verden.*
Gads forlag
2023. 264
sider, 299,95
kr.



Afhængig af verden

I sine erindringer om et liv i brødrene Humboldts fodspor sætter botanikeren Lauritz Holm-Nielsen fokus på flere af tidens største udfordringer: accelererende klimaforandringer, overforbrug af naturens ressourcer og forringelse af klodens biodiversitet.

F A K T A

Bo Holm Jacob-
sen: *Jorden.*
Tænkepause
fra Aarhus
Universitets-
forlag 2023.
60 sider, 59,95
kr. (39,95 som
e-bog).



Jorden

I serien tænkepauser fra Aarhus Universitetsforlag har geolog Bo Holm Jacobsen skrevet om Jorden. Han afdækker planetens gigantiske historie om kontinenters dans og vulkaners ild, grundstoffers skær og dyrearters død. Hvis vi mennesker lægger øret til Jorden og stopper med at udpine den, kan vi få 100 millioner år mere. Selv om også vi en dag som dino-saurerne forsvinder fra dens overflade.

F A K T A

Offentlige Foredrag
i Naturvidenskab,
Se ofn.au.dk



Offentlige Foredrag i Naturvidenskab

Foredragsserien Offentlige Foredrag i Naturvidenskab byder i forårssæsonen 2024 på disse foredrag:

20. februar: *Er parasitter og mikrober vores fjender?* Ved evolutionsbiolog Tom Gilbert og parasitforsker Peter Lindberg Nejsum.

27. februar: *Jagten på den perfekte vejruddigt.* Ved meteorolog Jesper Eriksen og klimaforsker Eigil Kaas

12. marts: *Hvor længe kan vi og vores celler leve?* Ved aldringsforskerne Tinna V. Stevnsner og Kaare Christensen.

19. marts: *Bomben.* Ved kernefysiker Hans Fynbo og videnskabshistoriker Kristian Hvidtfeldt Nielsen.

9. april: *Ig Nobel prize.* By Marc Abrahams and three prize winners.

16. april: *Menneskedyret Homo sapiens.* Ved sansefysiolog Peter Teglberg Madsen.

Se mere på ofn.au.dk.



Undervisningsmaterialer

Du kan finde ekstramateriale på aktuelnaturvidenskab.dk, som er beregnet på undervisningen i gymnasieskolen.

Evolution og eDNA

Nyt arbejdsark til artiklen *To gram jord sladrer om livets fortid og fremtid*, der handler om Eske Willerslevs forskning i miljøDNA.

Artiklen kan indgå i et forløb om evolution, og der kan perspektiveres til anvendelse af biologiske databaser. Artiklen kræver kendskab til de grundlæggende begreber, der knytter sig til den moderne evolutions-teori dvs. mutationer, genetisk variation, selektion samt det biologiske artsbegreb. Desuden kræves kendskab til DNA's opbygning og funktion.
Fag: Biologi A/B, Bioteknologi A

Hundens oprindelse

Arbejdsark til artiklen *Jagten på hundens oprindelse*. Artiklen kan indgå i et forløb om evolution på alle niveauer, og i Biologi A og B kan artsdannelsesmekanismer indgå. På disse niveauer kan der også perspektiveres til anvendelse af biologiske databaser og big data som værktøjer til informationer om slægtskab, og til konstruktion af stamtræer.
Fag: Biologi A/B/C

klimaforandringer og søers økologi/kemi.

Dette arbejdsark har udgangspunkt i artiklen *På jagt efter methan-ventilen i verdens søer*. Artiklen kan indgå i et forløb om drivhusgasser og klimaforandringer eller i et forløb om søers økologi og kemi. Artiklen kræver kendskab til bakterier og arkæer samt økologiske stofkredsløb. Til kemidelen kræves kendskab til redoxprocesser.
Fag: Biologi A/Kemi B, Bioteknologi A

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

Quizzer i ny indpakning

Vi har flyttet alle Aktuel Naturvidenskabs quizzer over i et nyt system, Riddle. Her kan du prøve kræfter med 86 forskellige quizzer – blandt andet de helt nye om methan-ventilen i verdens søer, om hundens oprindelse og om RNA-teknologi mod sygdom.

Materialerne er udarbejdet i forbindelse med projektet *Brobygning på første række* finansieret af Novo Nordisk Fonden.

ABONNEMENTS-SERVICE

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

Kontakt os på telefon:

3036 0662 / 8715 2094

E-mail: abo@aktuelnaturvidenskab.dk

Abonnement kan også bestilles via hjemmesiden: aktuelnaturvidenskab.dk

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
- David Lundbek Egholm, professor, 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: 4.300

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

Hjemmeside: aktuelnaturvidenskab.dk

Postadresse:

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

Omslagsfoto:

Målinger i felten i Grønland. Foto: Bo Elberling



ID-nr. 46144

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



Foto: Carsten Medom Madsen/Colourbox.

Det plastiske ler i Danmark – som her ved Fredericia – er meget rig på smectit. Og derfor er det ikke til at styre.

Respekt til smectit

Af Carsten R. Kjaer, Aktuel Naturvidenskab

Det er god stil en gang imellem at fremhæve nogle af de aktører, der spiller en vigtig rolle i showet, men som sjældent bliver nævnt i overskrifterne. Så lad os på denne bagside snakke om smectit. Hvis du ikke som jeg har en baggrund som geolog, ved du nok ikke, at smectit er et såkaldt lermineral. Men det er skam et yderst interessant mineral – ja, rettelig er det en gruppe af lermineraller, men lad det nu ligge. Jeg har noteret mig, at smectit optræder i to vidt forskellige nylige historier med principielt stor betydning – både på den lokale og globale skala.

Den ene historie er det famøse jordskred nær Ølst ved Randers, som en overgang truede med at begrave en landsby med tonsvis af mere eller mindre forurenede jord, der var deponeret i en gammel lergrav. Som de fleste nok har fanget i mediestormen, er en af udfordringerne, at undergrunden ved Ølst er præget af plastisk ler. Plastisk ler kan nemlig indeholde meget store mængder vand, hvilket gør det meget deformerbart (deraf navnet). Det kan i mange sammenhænge være en rigtig fin egenskab – men ikke lige, når man vil lægge en bygning eller måske en enorm jordbunke oven på det. Og for at vende tilbage til smectit, er det netop dette lermineral, der giver det plastiske ler sin evne til at optage så meget vand. Smectit er opbygget i lag med skiftevis aluminiumrige og silicium-

rige lag. Disse lag er kun svagt bundet sammen, og denne "løse" struktur gør det meget let for smectit at indbygge andre ioner – og vand – imellem sine lag.

Det bringer os hen til den anden historie. Og den handler om, at geologer fra Massachusetts Institute of Technology i USA har kædet lermineraller sammen med store nedkølinger i klimaet i Jordens geologiske historie. Sagen er nemlig den, at smectit også er vældig god til at binde organisk carbon. Så når der er meget smectit på havbunden, virker det som et dræn på atmosfærens indhold af CO₂, og det gør klimaet koldere. Det viser sig, at udbredelsen af smectit-rige lerbjergarter korrelerer med de fire store episoder med nedkøling af klimaet i Jordens historie. Og forskerne har kædet dette sammen med pladetektoniske processer. Disse sørger nemlig for at transportere fragmenter af oceanisk jordskorpe, kaldet ofiolitter, op til jordoverfladen, hvor de nedbrydes til netop smectit, der skyller ud i havet.

Ikke bare kan smectit altså være skyld i, at menneskeskabte konstruktioner slår revner – det er også med til at styre klimaet! Så der er god grund til at vise smectit lidt respekt. ■

CRK, Kilde: Nature Geoscience vol. 17, pp 8–9 (2024)