NATURVIDENSKAB OG TEKNOLOGI
DIREKTE FRA FORSKNINGSVERDENEN

AKTUEL naturVIDENSKAB



HAR MENNESKET STARTET DEN SJETTE MASSEUDDØEN?

Historien om historien om celledeling

På jagt efter methan-ventilen i verdens søer

Mindre rulle-modstand på vejen – giver mindre CO_2

NR.6 - 2023 DECEMBER 50 KR.

NOTER



Elever finder nye arter af bjørnedyr

Knap 30.000 elever fra grundskoler og gymnasier i hele Danmark har deltaget i Astras Masseeksperiment 2023, som gik ud på at kortlægge mikrolivet i den danske natur i form af mos, lav og bjørnedyr. Eleverne indsamlede prøver over hele landet, der blev sendt ind til forskere på Statens Naturhistoriske Museum. De første resultater er for nylig kommet ud, og de viser, at eleverne har fundet 54 arter af mosser, 44 arter af laver, herunder en meget sjælden og spændende art samt ikke mindst 49 arter af bjørnedyr, hvoraf mindst fem arter er helt nye for videnskaben. Foreløbig har forskerne kun analyseret DNA fra fem procent af de bjørnedyr, der er fundet i prøverne, så potentielt kan der være mange flere nye arter i vente. *Kilde: ASTRA*

Hæder til giftforsker



Foto: DTU

Andreas Hougaard Laustsen-Kiel, der er professor og centerleder ved Center for Antibody Technologies på Danmarks Tekniske Universitet, har fået Videnskabernes Selskabs sølvmedalje. Laustsen-Kiel har med sin forskning i slangegifts molekylære sammensætning vist, hvordan man med den viden og bioteknologiske teknikker kan generere en ny type effektive modgifte bestående af humane antistoffer mod potentielt dødelig bid.



Foto: ESA/Euclid/Euclid Consortium/NASA, CC BY-SA 3.0 IGO

Euclids første billeder

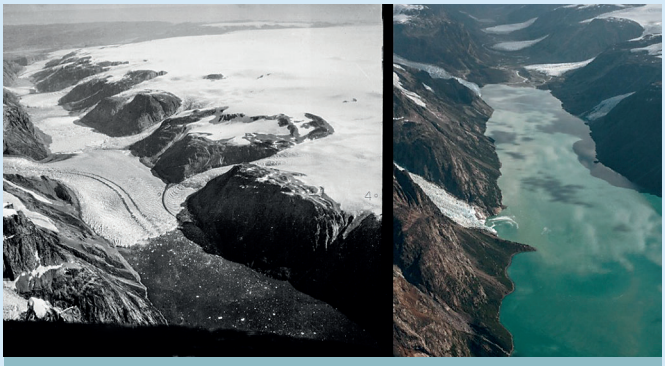
Den europæiske rumfartsorganisations mission Euclid – som er sat i verden for at udforske Universets "mørke sider" (mørkt stof og mørk energi) – har for nylig offentliggjort de første fuldfarvede billeder. Billederne viser forskellige områder af Universet i hidtil uset detaljegrad. Euclid skal skabe det hidtil mest omfattende 3D-kort over universet, som kan være med til at afsløre, hvordan mørkt stof har været med til at forme Universet. Billedet viser den såkaldte Perseus-hob, der ligger cirka 240 millioner lysår fra Jorden og som er en af de mest massive strukturer, vi kender i Universet. Der ses flere end 1000 galakser tilhørende selve Perseus-hoben og dertil flere end 100.000 andre galakser beliggende længere væk – op til 10 milliarder lysår fra Jorden. *Kilde: ESA*

Quizzen

Hvordan dannes drivhusgassen methan i ferskvandssystemer som en sø?

1. visse alger i vandsøjlen producerer det som et biprodukt af fotosyntesen.
2. bundlevende organismer som snegle og muslinger udskiller det som affaldsstof ved respiration.
3. det dannes ved at mikroorganismer omsætter organisk stof i sedimentet under iltfrie forhold.

Læs svaret i artiklen *På jagt efter methan-ventilen...* i dette nr.



Gletsjere skrumper voldsomt

På baggrund af den til dato mest omfattende overvågning af de grønlandske gletsjere dokumenterer forskere fra Københavns Universitet, at afsmeltningen af de grønlandske gletsjere er femdoblet de seneste 20 år. Sammenlignet med 1980'erne og 90'erne, hvor gletsjerne gennemsnitligt skrumpede med cirka fem meter om året, er afsmeltningen således steget til 25 meter om året i dag. På billederne ses til højre Ujaraanaq-dalen i Vestgrønland i 2013 og til venstre den samme dal fotograferet i 1936. Foto: Hans Henrik Tholstrup / Københavns Universitet og Styrelsen for Dataforsyning og Infrastruktur.

Kilde: KU/Nature Climate Change

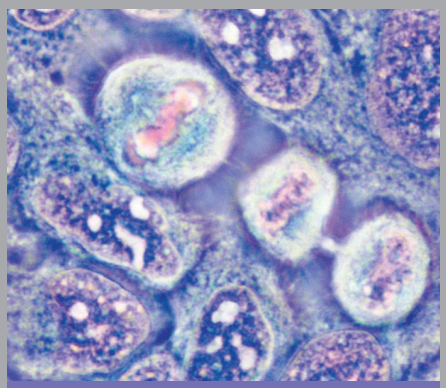


Skove som CO_2-lagre

I et nyt studium publiceret i tidsskriftet Nature har flere end 200 forskere fra hele verden nyvurderet verdens skoves potentiale for at optage og lagre CO_2 fra atmosfæren. Forskerne finder, at verdens skove ideelt set kunne absorbere 328 milliarder ton (Gt) carbon. Men da mange tidligere skovområder nu bruges til landbrug eller bebyggelse, er potentialet reduceret til 226 Gt. Af disse kan 137 Gt (61 %) opnås alene ved at beskytte nuværende skovområder, mens de resterende 87 Gt kan blive realiseret ved at forbinde tidligere fragmenterede skovområder og forvalte dem på en bæredygtig måde.

Kilde: Nature (2023). https://doi.org/10.1038/s41586-023-06723-z

indhold



Historien om historien om celledeling – og hvad der sker, når det går galt

Inden for de seneste 70 år er vi gået fra ikke at have den fjerneste idé om, hvordan cellerne i vores krop deler sig, til i dag at kunne manipulere ved så godt som alle cellefunktioner.

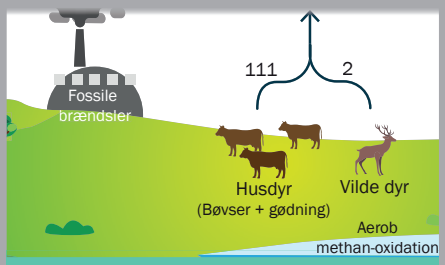
8



To gram jord sladrer om livets fortid og fremtid

Forskere kan med DNA-stumper i to gram jord analysere sig frem til, hvilke dyr der har levet i et område op til to millioner år tilbage i tiden. Viden om fortidens biodiversitet kan hjælpe os med at bevare den i fremtiden, fortæller Eske Willerslev.

14



På jagt efter methan-ventilen i verdens søer

Ferskvandssøer og vådområder er de største bidragydere til drivhusgassen methan i atmosfæren, men det er endnu uklart, hvad der egentlig styrer, hvor meget methan der sendes fra søbunden mod himlen. Det skal danske forskere nu finde ud af.

30



Oplever vi en menneskeskabt sjette masseuddøen?

Jordens geologiske lag bærer spor af mindst fem episoder af masseuddøen af arter i fortiden. Flere forskere mener, at mennesket har startet den sjette masseuddøen.

36

FORSKNING OG NYHEDER

4 KORT NYT

8 Historien om historien om celledeling – og hvad der sker, når det går galt

14 To gram jord sladrer om livets fortid og fremtid

21 Stor usikkerhed om tangskoves klimaeffekt

24 Mindre rulle-modstand på vejen – giver mindre CO_2 til atmosfæren

30 På jagt efter methan-ventilen i verdens søer

36 Oplever vi en menneskeskabt sjette masseuddøen?

44 BAGSIDEN: Mikrosøvnens mester

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

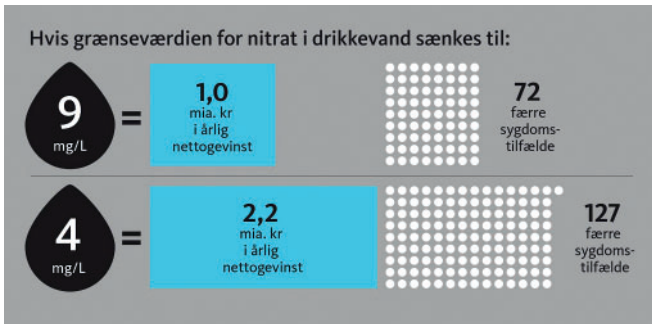
AARHUS UNIVERSITET
SDU DET NATURVIDENSKABELIGE FAKULTET
KØBENHAVNS UNIVERSITET
Roskilde Universitet

SPONSOR-ABONNENTER

GRUNDFOS
novo nordisk®

Mindre nitrat i drikkevandet sparer liv og penge

Et nyt studie lavet af forskere fra Københavns Universitet, Aarhus Universitet og De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS) viser, at vi som samfund kan opnå en gevinst på 2,2 milliarder kroner om året, hvis vi sænker koncentrationen af nitrat i vores drikkevand, fordi vi på den måde kan undgå 127 tilfælde af tarmkræft årligt.



Potentielle besparelser ved at reducere mængden af nitrat i drikkevandet. Grafik: Jacob Lind Bendtsen, GEUS.

»EU's krav om højst 50 milligram nitrat per liter vand er et minimumskrav, så vi kan sagtens fastsætte strengere krav i Danmark. Og vores forskning viser, at dette ville gavne folkesundheden og samtidig spare samfundet for rigtig mange penge,« siger Brian H. Jacobsen, seniorforsker ved Institut for Fødevare- og Ressourceøkonomi ved Københavns Universitet.

Drikkevand med høje niveauer af nitrat er et globalt problem, som er koblet til forskellige helbredseffekter som fødselsdefekter og kræft. For eksempel vokser den videnskabelige evidens for, at nitrat i drikkevandet øger risikoen for tyk- og endetarmskræft, som over 5.000 danskere rammes af hvert år.

I Danmark følger vi EU's grænse på højst 50 milligram nitrat per liter vand. Men selvom vi de fleste steder i landet ligger langt under den grænse, er nitratmængderne i drikkevandet adskillige steder i Danmark store nok til at øge risikoen for at udvikle tyk- eller endetarmskræft. Det har både en stor dansk befolkningsundersøgelse fra 2018 og adskillige internationale studier påvist.

Den danske befolkningsundersøgelse fra 2018 påviser en statistisk signifikant sammenhæng med forhøjet risiko for tyk- eller endetarmskræft, når nitratniveauet i vandet er over cirka 4 mg/L og en endnu højere risiko, når det kommer over cirka 9 mg/L.

En analyse af nitratmængderne i landets vandforsyninger viser, at cirka 10 % af det danske drikkevand har et nitratindhold over 9 mg/L, og yderligere cirka 10 % ligger over 4 mg/L som et gennemsnit for 2018-2021. De fleste vandforsyninger med nitratindhold på disse niveauer udgøres af små privatejede boringer, der forsyner færre end ni husstande. Men det gælder også for flere hundrede almene vandværker, særligt i området omkring Aalborg.

Maria Hornbek, Det Natur- og Biovidenskabelige Fakultet, Københavns Universitet

Sæler og små hvaler: giftig kost for spækhuggere

Biologerne har længe vidst, at spækhuggeren er særligt udsat for menneskeskabt forurening. Dels fordi arten er øverst i fødekæden, og fordi den har svært ved at nedbryde og udskille giftstoffer. Indtil for nylig troede forskerne, at det var en kombination mellem lokale forskelle i mængden af forurening i havet og spækhuggernes føde, der afgjorde, hvilke spækhuggere, der blev hårdest ramt af det giftige stof PCB. Et stof der er menneskeskabt og ikke forekommer naturligt. Men i en ny undersøgelse – den hidtil største af sin slags – kan forskere fra en række lande nu vise, at det primært er, hvad der er på spækhuggernes menukort, som er afgørende. Det forklarer Rune Dietz, der er professor på Institut for Ecoscience på Aarhus Universitet, og som har været med til at lave undersøgelsen.

»Vi har undersøgt vævsprøver fra 162 spækhuggere. I prøverne analyserede vi fedtsyresammensætningen, fordi den afslører,



Foto: Audun Rikardsen

hvad dyrene spiser. Og vi målte niveauet af forskellige menneskeskabte giftstoffer,« siger han og fortsætter:

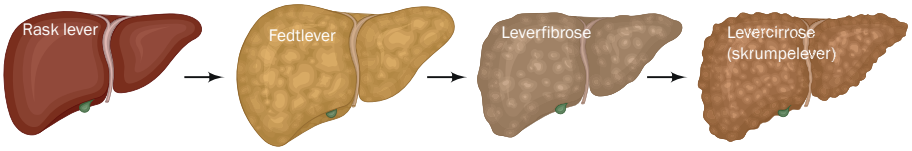
»Der var en klar sammenhæng mellem de spækhuggere, der spiste sæler og hvaler, og niveauet af PCB. De spækhuggere, hvor kosten primært bestod af fisk, havde markant mindre gift i kroppen.«

Spækhuggerne dør ikke direkte af PCB-forgiftning, men med årene ophober der sig mere og mere af giftstoffet i deres kroppe. »Jo højere koncentrationen er, desto sværere får de ved at formere sig. Desuden bliver dyrenes immunforsvar ramt af stoffet,« forklarer Rune Dietz.

»For spækhuggerne betyder det, at de hun-hvaler, der har mest PCB i kroppen, stort set ikke får unger længere. Spækhuggere fra Brasilien, det nordøstlige Stillehav og De Britiske Øer er så hårdt ramt af PCB-forgiftning, at de risikerer helt at forsvinde. I Norge, hvor spækhuggerne lever af sild og makrel, går det derimod fremad for bestandene. Når vi sejler rundt ud for Norges kyst, møder vi ofte spækhuggere med kalve, men ikke ved Grønland og Canada. Her ser vi stort set aldrig kalve længere,« siger han.

Jeppe Kyhne Knudsen, Technical Sciences, Aarhus Universitet. Artikel: Environ. Sci. Technol. 2023, 57, 42, 16109–16120

Hormoner mod leverfibrose



Leverfibrose er dannelsen af arvæv i leveren. Fibrose er den første fase i udviklingen af skrumpelever (cirrose). Skrumpelever resulterer i progressivt leversvigt, og 80-90 procent af patienterne med skrumpelever udvikler også leverkræft. Illustration: Colourbox

Hormonbehandling forbinder mange nok med overgangsalder og fertilitetsbehandling. Men nu melder et dansk/amerikansk forskerhold, at nogle bestemte tarmhormoner ser ud til at have en fremmende effekt på processerne bag dannelse af arvæv i lever (leverfibrose).

Leverfibrose kan opstå som følge af leversygdommene fedtlever (MASLD) og fedtlever med betændelse (MASH), og der findes i øjeblikket ingen medicinsk behandling, der kan kurere leverfibrose.

Oftest forsøger lægerne at fjerne de underliggende årsager til sygdommene, som kan være fedme og diabetes. Det kan over nogle år give en forbedret leverfunktion, men det kan ikke fjerne fibrosen.

De processer, der sætter gang i leverens dannelse af arvæv, altså fibrose, er cellulære. I deres nye studie, som er publiceret i *Journal of Hepatology*, beretter forskerholdet, der er ledet af lektor Kim Ravnskjær fra Institut for Biokemi og Molekylær Biologi og grundforskningscenteret ATLAS ved Syddansk Universitet, at de har fundet nogle hidtil ukendte ændringer i de celletyper, der står for fibrosedannelse. Det er leverens såkaldte stellate celler, som har fået deres navn, fordi de er stjerneformede.

»Vi har fundet en måde at inaktivere disse celler på og dermed slukke for den fibrotiske proces. Det åbner op for betydeligt bedre muligheder for at standse dannelsen af arvæv,« forklarer Kim Ravnskjær.

En måde at slukke på er at udsætte cellerne for nogle bestemte tarmhormoner.

»Vi har kigget mest på det tarmhormon, der hedder vasoaktivt intestinalt polypeptid (VIP), og som findes naturligt i tarmen og nerveceller, hvorfra det frigives, når vi spiser. Netop leverens stellate celler har et højt udtryk af særlige receptorer for VIP på deres overflade. VIP stimulerer leverens blodtilførsel, men ser altså også ud til at holde de stellate celler inaktive«.

Forskerne mener, at deres arbejde kan danne grundlag for behandling af leverfibrose.

»Det her kan resultere i nye måder at behandle patienter på. Jeg kunne for eksempel forestille mig, at man kunne udvikle nogle syntetiske hormoner, der designes til at ramme de specifikke cellers receptorer, siger Kim Ravnskjær. Han understreger dog, at eventuelle lægemidler baseret på disse opdagelser ligger år ud i fremtiden.

Arbejdet er støttet af blandt andet Danmarks Grundforskningsfond, Danish Diabetes and Endocrine Academy, der er finansieret af Novo Nordisk Fonden samt det amerikanske National Institutes of Health.

Birgitte Svennevig, SDU

Formidlingskonkurrence for gymnasieelever

Hvis du som gymnasieelev skriver SRP/SOP-opgave om et emne, hvor du kombinerer naturvidenskab/teknologi (for eksempel fysik, kemi, matematik eller bioteknologi) med humaniora/samfundsvidenskab (for eksempel dansk, historie, idehistorie eller samfundsfag), er *Willers-konkurrencen* måske noget for dig. Her kan du indsende en populærvidenskabelig artikel om din opgave og deltage i konkurrencen om førstepræmien på 2.500 kr., andenpræmien på 1.500 kr. og tredjepræmien på 1.000 kr.

Et eksempel kunne være emnet malaria. Her er det vigtigt at kende til malariaparasittens biologi og bekæmpelsesmidlernes biokemi, men også til de historiske og samfundsmæssige problemstillinger, der knytter sig til malaria.

Et andet eksempel kan være kontroversen om HPV-vaccinen, hvor biomedicinske problemstillinger hænger tæt sammen med spørgsmål vedrørende samfunds- og formidlingsforhold. Et tredje eksempel kunne være en formidlingsopgave, hvor du formidler et naturvidenskabeligt eller teknisk emne. Det vil også kunne kvalificere dig til Willers-konkurrence, hvis du husker at inkludere nogle overvejelser om selve formidlingsprocessen i din artikel.

For at deltage i konkurrencen skal du skrive en populærvidenskabelig artikel på baggrund af din SRP/SOP-opgave og sende den til Kristian H. Nielsen, bestyrelsesformand for Willers Legat willers@css.au.dk senest den 1. maj 2024. Anfør navn, skole og den oprindelige fagkombination på din SRP/SOP-opgave i mailen.

De indsendte artikler vil blive bedømt af et udvalgt dommerpanel med ekspertise i videnskabsstudier og formidling. Vinderne får direkte besked, og alle tre vinderbidrag vil efter aftale med vinderne blive offentliggjort på Center for Videnskabsstudiers hjemmeside. Din populærvidenskabelige artikel skal være skrevet i henhold til Aktuel Naturvidenskabs skrivevejledning: aktuelnaturvidenskab.dk/om-os/skriv-i-bladet/.

Willers-konkurrencen er lavet i et samarbejde mellem Willers Legat, Center for Videnskabsstudier ved Aarhus Universitet samt Institut for Naturfagenes Didaktik ved Københavns Universitet. Willers Legat er opkaldt efter stifteren Arnold Willers og har til formål at støtte undervisning og forskning ved Center for Videnskabsstudier.

Forskere sætter tal på risikoen for monsterbølger

Historier om monsterbølger er i århundreder blevet betragtet som mytiske vandrehistorier fortalt af søfolk. Men i 1995 ramte en 26 meter høj bølge den norske olieplatform Draupner, hvor man for første gang målte en monsterbølge med digitale instrumenter og fik beviset for, at de abnorme havbølger findes.



Foto: Captain Roger Wilson, Greenland, New Hampshire/CC BY 2.0 Deed

Først nu er det lykkedes forskere fra Niels Bohr Institutet på Københavns Universitet at finde en matematisk model, der giver opskriften på, hvordan – og ikke mindst hvornår – de ekstreme havbølger kan opstå.

Ved hjælp af kunstig intelligens og store mængder data kan forskerne nemlig forudsige, hvor stor sandsynligheden er for at blive ramt af en monsterbølge på havet på et givent tidspunkt.

»I bund og grund er det sort uheld, når en af de her meget store bølger rammer. For det er en kombination af mange faktorer, som det indtil nu ikke har været muligt at samle i et enkelt risikoestimat. I studiet har vi kortlagt de årsager, der skaber en monsterbølge og samlet dem i en model, som med kunstig intelligens kan udregne sandsynligheden for, at det faktisk sker,« siger Dion Häfner, tidligere ph.d.-studerende på Niels Bohr Institutet.

I modellen har forskerne brugt data fra i alt 150 bøjer, som året rundt 24 timer i døgnet indsamler bølgedata ud for den amerikanske kyst. Data, som samlet set rummer 700 års historik om en milliard bølgers højde og bevægelser.

De mange data har forskerne analyseret for at forstå, hvad der forårsager monsterbølger, der er defineret ved at være mindst dobbelt så store som gennemsnittet af bølger i området – herunder de helt store monsterbølger, der kan være over 20 meter høje. Dem har de med machine learning omsat til en algoritme, som de har anvendt på deres datasæt.

»Vores udregninger viser, at abnorme bølger opstår hele tiden. Faktisk har vi registreret 100.000 bølger i vores datasæt, som kan defineres som monsterbølger. Det svarer til, at der opstår mellem 0,1 og 1 monsterbølge hver dag på enhver tilfældig placering på havet. Disse bølger er dog ikke allesammen monsterbølger af den helt ekstreme størrelse,« forklarer Johannes Gemmrich fra University of Victoria og studiets andenforfatter.

Det nye studie bryder også med den gængse opfattelse af, hvad hovedårsagen er til at monsterbølger opstår. Indtil nu har man nemlig troet, at en bølge, der stjæler energi fra en anden bølge og kortvarigt danner én stor bølge, var den mest almindelige årsag.

Men i studiet slår forskerne fast, at den mest dominerende faktor, når kæmpebølger dannes, er det der kaldes "lineær superposition". Et fænomen, der har været kendt siden 1700-tallet, og som opstår, når to bølgesystemer krydser ind over hinanden og forstærker hinanden i kortere tid efter.

»Hvis to af disse bølgesystemer krydser hinanden på havet, øges sandsynligheden for, at der dannes høje bølgetoppe fulgt af dybe bølgedale, og så er der risiko for, at ekstremt store bølger opstår. Det er viden, der har været kendt i 400 år, som vi nu bakker op med data,« siger Dion Häfner.

Michael Skov Jensen, Det Natur- og Biovidenskabelige Fakultet, Københavns Universitet. Kilde: PNAS, doi.org/10.1073/pnas.2306275120

Papkrus til genbrug

Engangskrus af pap bliver til en stor mængde affald hvert år – alene i USA bruges der årligt næsten 50 milliarder engangskrus af pap. Kun omkring et ud af 400 engangskrus bliver genanvendt, da de er svære at recirkulere på traditionelle genbrugsanlæg. Derfor ender de typisk på lossepladser eller bliver brændt af. Samlet anslås den samlede globale udledning i CO_2-ækvivalenter fra pap-engangskrus at være 7,5 millioner tons.

Forskere ved North Carolina State University i Raleigh, USA, har nu fundet en måde at omdanne disse brugte papkrus til værdifulde materialer. Papkrus består mestendels af cellulose (> 95 vægtprocent) integreret med et tyndt plastlag af polyethylen på indersiden. Der bruges ikke klæbemidler til at binde plastmaterialet til cellulosen, så derfor er det muligt med mekaniske metoder at skille cellulosedelen fra plastdelen. I forskernes metode udtrækkes cellulosefibre først med en mekanisk metode, som gav et udbytte på over 85 % genanvendte fibre. Dernæst bruger de en kemisk proces kaldet syrehydrolyse til at nedbryde cellulosefibrene til små krystaller, der har form som riskorn – igen med et højt udbytte på 70-75%.

Forskerne fandt, at disse cellulose-nanokrystaller har gunstige egenskaber såsom en høj grad af strukturel orden og god termisk stabilitet. Ifølge forskerne vil dette materiale potentielt kunne bruges til at udvikle bionedbrydelig film til for eksempel emballage og dermed bane vejen for at engangskrus kan indgå i en mere cirkulær økonomi.

CRK, Kilde: Cell Reports Physical Science, doi.org/10.1016/j.xcrp.2023.101689

Hvilke mikrober møder den nyfødte?

Når et barn fødes, bliver det mødt af et enormt mikrobielt tryk fra verden udenfor livmoderen, som med det samme leder til en kolonisering af barnets slimhinder og hud. Mikroorganismerne, som koloniserer barnets hud og slimhinder, er typisk bakterier, svampe og vira, der kommer fra den nyfødtes nærmiljø. Det kan for eksempel være fra forældrenes hud, fra modermælken og fra overfladerne i det hjem, hvor barnet bor med sine forældre.



Foto: Shutterstock

Når et nyfødt barn indlægges på en neonatalafdeling på hospitalet, møder barnet et meget anderledes nærmiljø, end hvis de var blevet lagt i deres forælders arme lige efter fødslen og derefter bragt hjem sammen med forældrene. Det betyder, at barnet kan blive udsat for en noget anderledes population af mikroorganismer, som vil tage bolig i barnet, Og det kan lede til en øget risiko for infektion, alvorlig sygdom og i værste tilfælde død.

De væsentligste faktorer, som har indflydelse på bakteriekoloniseringen af hud og slimhinder hos nyfødte, som indlægges på hospitalet efter fødslen, er brugen af antibiotika, mindre hud-til-hud kontakt, kontakt med flere forskellige omsorgspersoner samt kontakt med udstyr og andre overflader på neonatalafdelingen.

En af de overflader, som i særlig grad er kontaktpunkt mellem spædbørnene og omverdenen, finder man på de sonder, der bruges til at give spædbørnene mad. Disse sonder føres gennem næsen og ned i maven på barnet. Sonden skiftes af forskellige personer, og de ydre dele af sonden ligger i krybben sammen med barnet, også når der ikke gives mad igennem den. Sonderne udgør derfor en risiko for kontaminering med sygdomsfremkaldende bakterier.

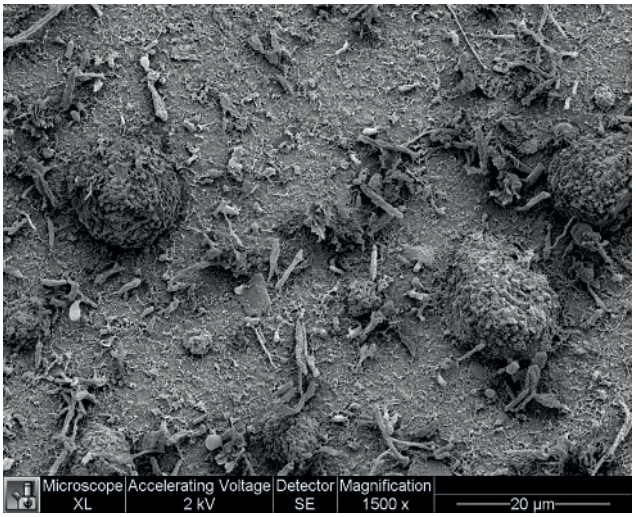
Professor Karen Angeliki Krogfelt ved Institut for Naturvidenskab og Miljø på Roskilde Universitet, har sammen med læge Sandra Meinich Juhl og forskerne Witold Kot, Dennis Sandris Nielsen og Lukasz Krych fra Københavns Universitet undersøgt de sonder, som bruges til at give de nyfødte mad på neonatalafsnittet på Rigshospitalet i København. Forskerne ønskede at finde ud af, om den bakteriekultur, der dannes i sonderne, stammer fra det enkelte spædbarn, fra omgivelserne eller er en blanding, og om den bakteriekultur, der dannes i sonderne, giver øget risiko for sygdom og død hos spædbørn, som indlægges på neonatalafdelingen.

Det viste sig, at bakterieprofilen i hver sonde var specifik for det enkelte spædbarn, uafhængigt af hvor længe sonden havde været i brug. Det tyder således på, at bakterierne kommer fra barnets eget mikrobiota i maven.

Forskerne fandt også, at de bakteriearter, der blev genfundet i sonder fra det samme barn fra forskellige tidspunkter tilhørte de samme specifikke bakteriestammer, og at flere af disse bakteriestammer fandtes i mere end ét barn i samme afdeling. Det tyder på, at disse bakteriestammer, der er fælles for flere børn, overføres ved kontaminering af sonderne udefra. Forskerne gætter på, at bakterierne kommer fra personalet på afdelingen, som håndterer sonderne eller bakteriemiljøet på afdelingen.

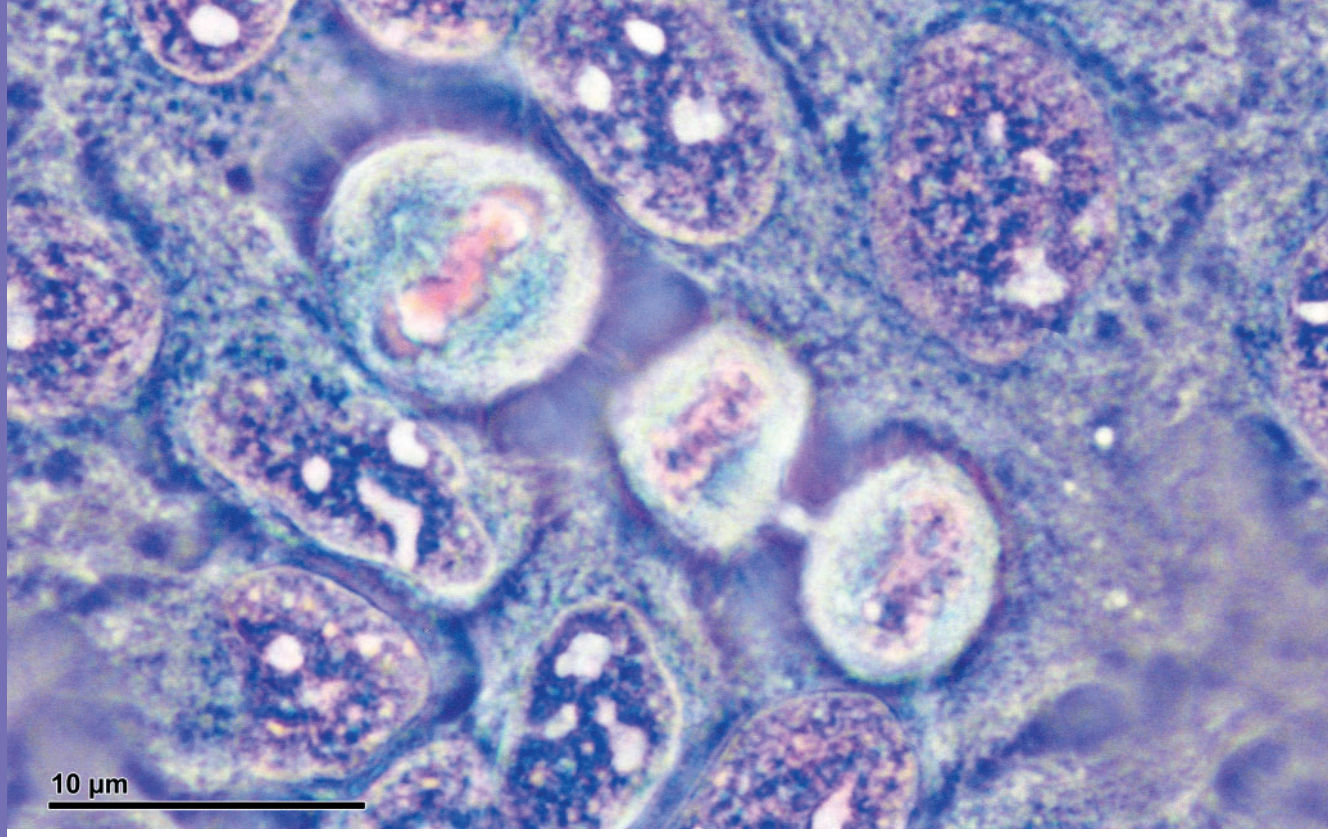
De bakterier, forskerne fandt flest af i sonderne, var bakterier tilhørende slægterne *klebsiella* og *serratia* samt staffylokokker og streptokokker. Arter af alle de nævnte bakterier findes vidt udbredt i miljøet og også på og i mennesket. Nogle af disse arter kan opføre sig virulent – dvs. give anledning til sygdom, især hos i forvejen svækkede individer.

Forskerne håber, at de gennem kortlægningen af mikroorganismerne i sonderne kan bane vejen for bedre at forstå infektionsmønstre hos nyfødte, som indlægges på hospitalet og dermed på sigt være med til at redde liv.



Indersiden af en sonde fra et spædbarn optaget med scanning elektronmikroskop ved 1500 X forstørrelse. Indersiden af sonden er helt dækket af en biofilm af celler – både humane celler og bakterieceller. Bakterierne ses som små kugler og stave, som også dækker de humane celler (de større klumper).

Af Astrid Johansen, Kommunikationsmedarbejder, RUC. Kilde: Juhl et al: Microorganisms 2023, 11, 1365.



En kultur af HeLa-celler, hvor de enkelte celler ses i forskellige stadier af celledelingsprocessen.
Foto: Doc. RNDr. Josef Reischig, CSc./Wikimedia/CC BY-SA 3.0

HISTORIEN OM HISTORIEN OM CELLEDELING

– og hvad der sker, når det går galt

Indenfor de seneste 70 år er vi gået fra ikke at have den fjerneste idé om, hvordan cellerne i vores krop deler sig, til i dag at kunne manipulere ved så godt som alle cellefunktioner. Lektor Lotte Bjergbæk tager os med på en rejse gennem nogle af de store kvantespring i vores forståelse af fundamentet under selve vores eksistens.

Forfatter
Kristan Sjøgren er videnskabsjournalist



Om forskeren
Lotte Bjergbæk er lektor ved Institut for Molekylærbiologi og Genetik, Aarhus Universitet. Hun forsker i cellens DNA, og hvordan genomisk ustabilitet kan føre til kræft.
lbj@mbg.au.dk

I forbindelse med foredragsserien Offentlige Foredrag i Naturvidenskab har Lotte Bjergbæk holdt et oplæg om netop celledeling, og hvor langt vi er kommet i forståelsen af, hvad der skal til for at skabe liv.

Den fjerde oktober 1951 døde en ung afroamerikansk kvinde på Johns Hopkins Hospital i Baltimore, USA, efter kort tids sygdom. Hun havde livmoderkræft, som havde spredt sig i den unge kvindes krop. Henrietta Lacks blev ikke mere end 31 år gammel.

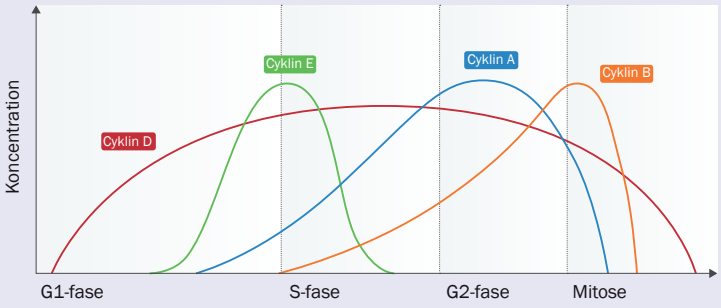
Henrietta Lacks' korte liv havde været hårdt. Som teenager havde hun delt værelse med sin fætter, der gjorde hende gravid i en alder af blot 14 år. I alt endte de to med at få fem børn sammen, hvoraf den ene var en udviklingshæmmet kvinde. Fætteren, som hun senere hen giftede sig med, havde dog mere end vanskeligt ved at holde sig fra andre kvinder, og det betød, at han flere gange hev kønssygdomme med hjem i ægtesengen, herunder gonorré og formentlig også HPV, som endte med at lede til livmoderkræft og tage livet af Henrietta Lacks.

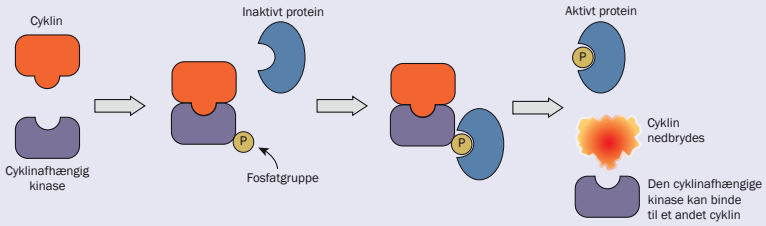
Historien om Henrietta Lacks handler dog meget lidt om, hvad der skete, mens hun var i live, men derimod om hvad der skete, efter hun døde. Den unge kvinde kunne ellers meget nemt være forsvundet ud af historiebøgerne, men sådan skulle det ikke gå. Langt fra. Efter Henrietta Lacks døde, udtog læger nemlig et stykke af den kræftramte kvindes livmoder, hvorfra de isolerede nogle celler. Disse celler viste sig at være udødelige og har de seneste 72 år været benyttet i ti-

Cykliner

Cykliner er proteiner, som kommer og går i gennem cellens cyklus. Figuren øverst viser, hvordan hver fase af cellecyklus har sine specifikke cykliner – dog er de cykliner, der på figuren kaldes Cyklin D, til stede gennem det meste af cellens cyklus.

Cyklinerne danner par med en cyklinafhængig kinase (figuren nederst), som katalyserer påhæftning af fosfatgrupper på proteiner eller enzymer i cellen. Dette kan ændre proteinets aktivitet eller eventuelt fjerne den helt. De cyklinafhængige kinaser kan *kun* sætte fosfatenheder på andre proteiner, når de samarbejder med et cyklin. Proteiner, som modificeres af cyklinafhængige kinaser, spiller alle afgørende roller for cellens gang gennem cellecyklus.





tusindvis af laboratorieforsøg som en af de mest benyttede cellelinjer i verden. På baggrund af de forsøg, der er blevet lavet med Henrietta Lacks' celler, er forskere blevet klogere på blandt andet, hvordan celler fungerer, og hvad der går galt, når vi udvikler kræft. Cellerne er også blevet benyttet i tusindvis af forsøg med medicin mod en lang række sygdomme. Henrietta Lacks blev uvidende til en af de vigtigste personer i medicinsk historie.

Et par år efter Henrietta Lacks' død blev DNA for første gang identificeret, og verden blev gjort opmærksom på, at hele livet har sit udspring i en dobbelt helix af to DNA-strenge, der snor sig om hinanden. I 1950'erne vidste man dog ingenting om cellecyklus, ud over at cellerne skal gennem en celledeling, for at én celle kan blive til to, men ellers var alt andet et mysterium.

Der skulle gå 30 år, før forskere for alvor blev klogere på, hvad der regulerer celledeling, hvordan cellen sikrer, at DNA'et bliver korrekt delt i datterceller, og hvad alt det har af betydning for vores forståelse af, hvorfor cellerne fra Henrietta Lacks er udødelige, og hvorfor smitte med HPV endte med at blive hendes død.

»Frem til Henrietta Lacks' død havde forskere i mange år forsøgt at dyrke humane celler uden for kroppen, men det var ikke lykkedes, fordi cellerne altid endte med at dø efter noget tid. Forskerne dengang tænkte velsagtens, at det heller ikke ville lykkes med disse celler, men det viste sig, at de voksede som ukrudt. Ud fra det opstod den første udødelige cellelinje, HeLa-celler, som vi stadig i dag benytter over alt i verden,« forklarer lektor Lotte Bjergbæk fra Institut for Molekylærbiologi og Genetik ved Aarhus Universitet.



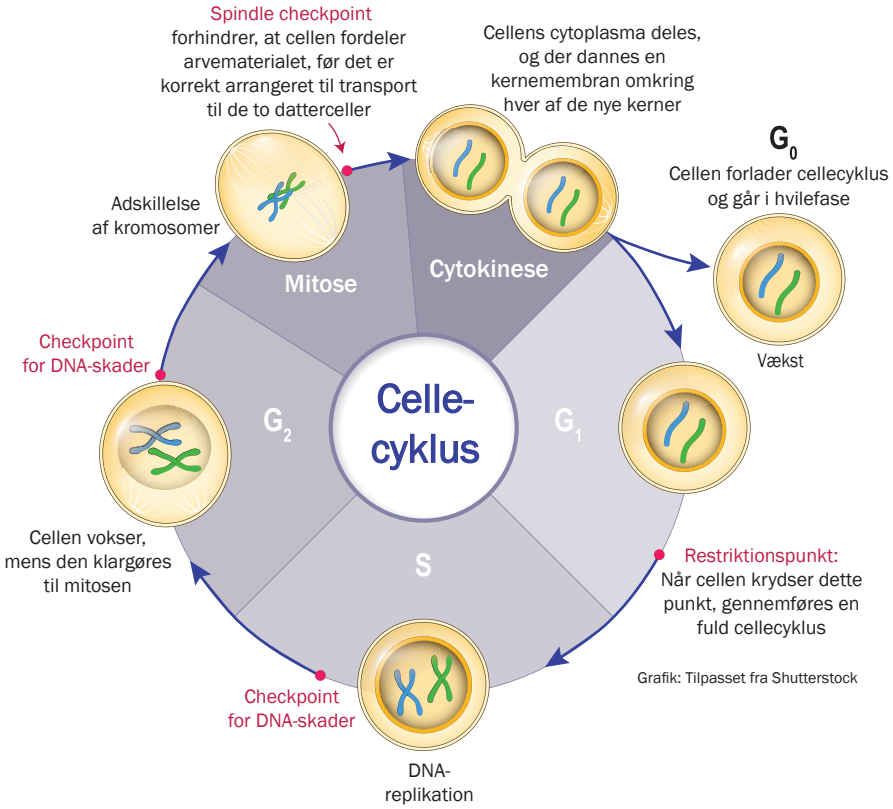
Foto: CC BY-SA 4.0

Celler fra Henrietta Lacks lever videre i laboratorier verden over den dag i dag. For at ære hendes usædvanlige bidrag til videnskaben blev denne bronzestatue af hende afsløret i oktober 2021 ved Royal Fort House, Bristol, England.

Proteiner kontrollerer cellecyklus

Det næste kvantespring i forståelsen af cellecyklus kom fra to forskere, der i 1980'erne havde hver deres tilgang til forskningsområdet. Paul Nurse studerede celledeling i gærceller, mens Tim Hunt gjorde det samme i æg fra søpindsvin. Tim Hunt var den første forsker til at opdage, at der i løbet af cellecyklus sker noget med koncentrationen af et bestemt protein inde i cellerne. I hans forsøg kom og gik proteinet med regelmæssige intervaller i løbet af cyklus, og det så ud til at være vigtigt for at styre hele processen. Opdagelsen var et vindue ind til en helt ny verden.

»Tim Hunt var den første til at opdage de proteiner, som vi i dag kender som cykliner, og som er helt nødvendige for at regulere alle de cellulære processer under cellecyklus, så cellen kan komme gennem de nødvendige faser for at blive delt i to med den korrekte mængde arvemateriale i hver. Det er en meget nøjagtig proces, der kræver stram kontrol og præ-



Grafik: Tilpasset fra Shutterstock

Når en celle deler sig foregår det i en nøje koreograferet proces med en række forskellige stadier og check-points. Når cellen har delt sig kan den forlade cellecyklus og gå i hvilefase, G_0, eller den kan gennemføre endnu en cellecyklus.

cision, og det står blandt andet cyklinerne for,« forklarer Lotte Bjergbæk.

Tim Hunt beskrev sin opdagelse og sendte den videnskabelige artikel til et tidsskrift, der, som proceduren foreskriver, sendte artiklen videre til gennemlæsning hos nogle af verdens førende eksperter på området. Derfor havnede den ikke underligt på skrivebordet hos Paul Nurse, der på daværende tidspunkt også var med helt fremme i celleforskningen. Paul Nurse har nok kløet sig i hovedbunden, for ved et rent tilfælde pegede Tim Hunts opdagelse på præcis det samme, som han kort tid forinden selv havde fundet ud af, men ikke havde publiceret endnu.

Paul Nurse havde i sin forskning i gærceller undersøgt, hvorfor nogle gærceller bliver abnormt store eller små, og han konkluderede, at det måtte skyldes en fejl i cellecyklus. I arbejdet var det på samme tid som Tim Hunts opdagelse lykkedes Paul Nurse at identificere forskellige kontrolgener for regulering af cellecyklus. Disse gener viste sig at lave en type af proteiner, som hedder cyklin-afhængige kinaser, der opererer i par med cykliner og altså er lige så vigtige som cykliner for regulering af cellecyklus.

»De erkendelser, som de to herrer kom frem til i løbet af 1980'erne, modtog de Nobelprisen for, og det er i dag lærebogsstof på alle uddannelser, som har med forståelsen af levende celler at gøre,« fortæller Lotte Bjergbæk.

Proteiner tager vare på cellerne

Tim Hunt og Paul Nurse fik dog ikke Nobelprisen for sig selv, men måtte dele den med Lee Hartwell, der dog ikke var så interesseret i at forstå cellecyklus, men derimod interesserede sig for, hvad der sker, når DNA bliver ødelagt af for eksempel stråling. Lee Hartwells idé var, at der ved alvorlige DNA-skader, som kan have betydning for levedygtigheden af dattercellerne, måtte være nogle cellulære mekanismer på plads for ikke bare at opdage skaderne, men faktisk også at bremse cellecyklus, så cellen ikke deler sig, når den er for ødelagt. Forskningen i Lee Hartwells laboratorium ledte til opdagelsen af det, som vi i dag kender som checkpoint-proteiner, der er i stand til at opdage skader og bremse cellecyklus, hvis der er for mange skader på arvematerialet. Checkpoint-proteiner spiller blandt andet en helt central rolle i at bremse celledeling, så kræft ikke udvikler sig.

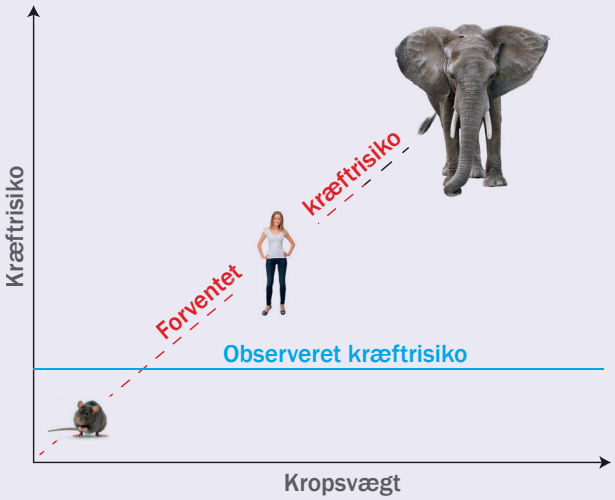
»Checkpoint-proteinerne hører til den gruppe af proteiner, som vi kalder for *caretaker*-proteiner, der sørger for, at cellen har det godt i forbindelse med celledeling ved enten at opdage skader eller reparere dem, når det er nødvendigt. Min egen forskning er i et caretaker-protein, som hos mennesker hedder Blooms-protein, og som er interessant, fordi det er med til at sikre, at cellerne ikke udvikler sig til kræftceller. Det vil også sige, at personer med mutationer i Blooms-proteinet meget ofte udvikler kræft meget tidligt i livet,« fortæller Lotte Bjergbæk.

Ofte er det sådan, at mutationer i bestemte caretaker-proteiner leder til specifikke former for kræft. Den nok mest velkendte er mutationer der medfører ændringer i BRCA-proteiner, som ofte er involveret ved udvikling af brystkræft.

Mutationer i Blooms-proteiner kan dog lede til udvikling af mange forskellige typer af kræft, fordi proteinet spiller en rolle i mange forskellige celletyper. Derudover har Lotte Bjergbæks forskning vist, at hvis man indsætter Blooms-proteinet i gærceller, kan proteinet overtage funktionen af gærcellens pendant, Blooms SGS. Det peger på, at Blooms-proteinet er universelt og har stor betydning for regulering af cellecyklus i praktisk talt alt levende på Jorden.

Petos paradoks

Store dyr som elefanter og blåhvaler har en meget lavere risiko for at udvikle kræft sammenlignet med mindre dyr som for eksempel os mennesker. Dette er en interessant biologisk observation, da kræft normalt er forbundet med celledeling og vækst, som store dyr med flere celler og en længere levetid har flere og mere af. Problemstillingen kaldes for Petos paradoks. Der findes flere mulige forklaringer på Petos paradoks, om hvorfor store dyr har mindre risiko for udvikling af kræft sammenlignet med mindre dyr:

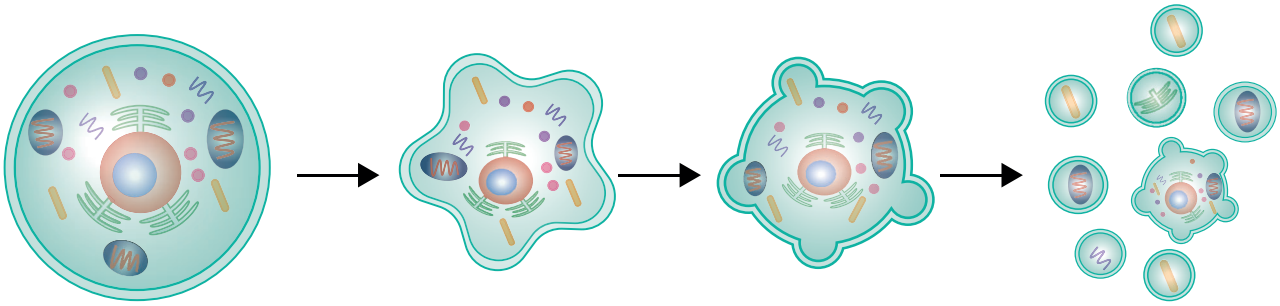


DNA-reparation: En mulig forklaring er, at store dyr har mere effektive mekanismer til at reparere DNA-skader, som kan føre til kræft. DNA-reparationssystemer kan muligvis arbejde langsommere i mindre dyr, som har kortere levetid og dermed mindre pres på deres DNA-reparationssystemer.

Antioxidanter: Store dyr har også højere niveauer af antioxidanter i kroppen, hvilket kan hjælpe med at beskytte cellerne mod skader og kræft. Antioxidanter kan også hjælpe med at reducere betændelse, som kan føre til celleskader og kræft.

Stofskifte: En anden mulig forklaring er, at store dyr har et lavere stofskifte, hvilket betyder at de har en langsommere celledeling og dermed lavere risiko for at opleve mutationer, som kan føre til kræft.

Genetisk disposition: Endelig kan genetisk disposition også spille en rolle i, hvorfor store dyr har en lavere risiko for kræft. Mange af de gener, der er involveret i at undertrykke tumorer og beskytte mod kræft, er mere almindelige i store dyr. Disse gener kan være blevet bevaret gennem evolutionen, fordi de giver en fordel for store dyr, der er mere modtagelige for kræft. Elefanter indeholder blandt andet mange p53-gener, som undertrykker udvikling af tumorer. Det gør hvaler dog ikke.



Grafik: Shutterstock.

Normal celle

Cellen skrumper

Cellemembranen begynder at danne vabelagitige udbulinger

Cellekerne og organeller i cellen kollapser, og der dannes "apoptotiske" legemer, der optages (fagocytose) og nedbrydes (lyseres) af makrofager.

Figuren viser de overordnede stadier i processen apoptose – dvs. programmeret celledød.

Celler har behov for at kunne begå selvmord

Når de cellulære kontrolmekanismer opdager fejl i enten en celles DNA eller i cellecyklus, har de i store træk to muligheder for at gøre noget ved det. Enten kan cellerne forsøge at udbedre skaden, eller cellerne kan tage livet af sig selv i et cellulært selvmord for at undgå, at skader passerer ned gennem generationer af celler.

Cellulært selvmord kaldes for apoptose, og den mekanisme blev opdaget af postdoc Howard Horvitz, der i 1974 studerede celler i den gennemsigtige orm *Caenorhabditis elegans*. Det interessante ved *C. elegans* er, at det er muligt at tælle alle cellerne i ormen, og Howard Horvitz kunne se, at selvom der opstod 1.090 celler undervejs i ormens udvikling, indeholdt den færdigudviklede orm kun 959 celler. Nogle af cellerne måtte altså være døde af sig selv på et eller andet tidspunkt under udviklingen.

P53: Et protein med mange funktioner

P53 er et tumorsuppressor-protein, der spiller en afgørende rolle i reguleringen af cellevækst og celledød. P53 er kodet af TP53-genet og er et af de mest studerede proteiner i forbindelse med kræftforskning. P53 fungerer som en "celle-vogter", der overvåger cellens DNA og reagerer på skader og mutationer. Hvis cellen opdager skade eller mutationer i DNA'et, aktiveres p53, hvilket fører til flere forskellige responsveje, der kan regulere cellevækst og celledød.

Nogle af funktionerne af p53 inkluderer:

Celledød: P53 kan aktivere apoptose, som er en proces, hvor cellen bevidst går i stykker og dør. Dette er en måde, hvorpå kroppen kan fjerne celler, der har skader på deres DNA.

DNA-reparation: P53 kan også regulere reparationsprocesser, der reparerer skader på DNA'et, hvilket hjælper med at bevare integriteten af cellens genetiske information.

Cellecyklus: P53 kan bremse cellevækst og cellecyklus, hvilket giver cellen tid til at reparere skaderne eller i nogle tilfælde føre til celledød.

Angiogenese: P53 kan også regulere angiogenese, hvilket vil sige dannelsen af nye blodkar i kroppen, som er afgørende for vækst og spredning af tumorer.

Immunitet: P53 kan også påvirke immunsystemet og beskytte mod virusinfektioner.

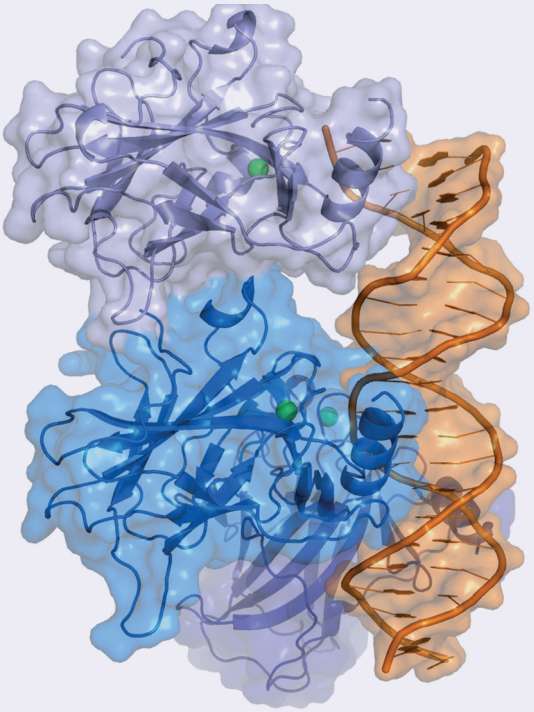


Illustration: Thomas Splettstoesser/CC by-SA 3.0

Illustration af proteinet P53 i kompleks med DNA.

Funktionen af p53 kan påvirkes af flere faktorer, herunder miljømæssige faktorer som stråling og kemikalier og genetiske faktorer som mutationer i TP53-genet. Mutationer i TP53-genet kan føre til en reduktion i p53-funktionen, hvilket kan øge risikoen for kræft og andre sygdomme. P53 er derfor en vigtig spiller i kroppens forsvar mod kræft, og der er mange aktuelle behandlingsmuligheder rettet mod at genoprette eller øge p53-funktionen i kræftceller.

Opdagelsen af apoptose var endnu et gennembrud i forståelsen af cellecyklus og celleliv. Den programmerede celledød er ikke bare relevant for små gennemsigtige orme, men også for blandt os mennesker under fosterudviklingen. Fungerer apoptosen ikke, dør cellerne mellem vores fingre og tæer nemlig ikke under fosterudviklingen, og så bliver vi født med svømmehud.

»Apoptose er også vigtigt i livet, fordi den programmerede celledød blandt andet tager sig af gamle celler, der har akkumuleret mange skader på DNA'et. Celler kan klare omkring 60 celledelinger, før de skal dø, og apoptose er en af måderne at komme af med disse gamle celler, der ellers er i risiko for at udvikle sig til kræftceller. Kemoterapi fungerer blandt andet ved at lave mange skader i kræftceller, så programmet for celledød bliver iværksat,« forklarer Lotte Bjergbæk.

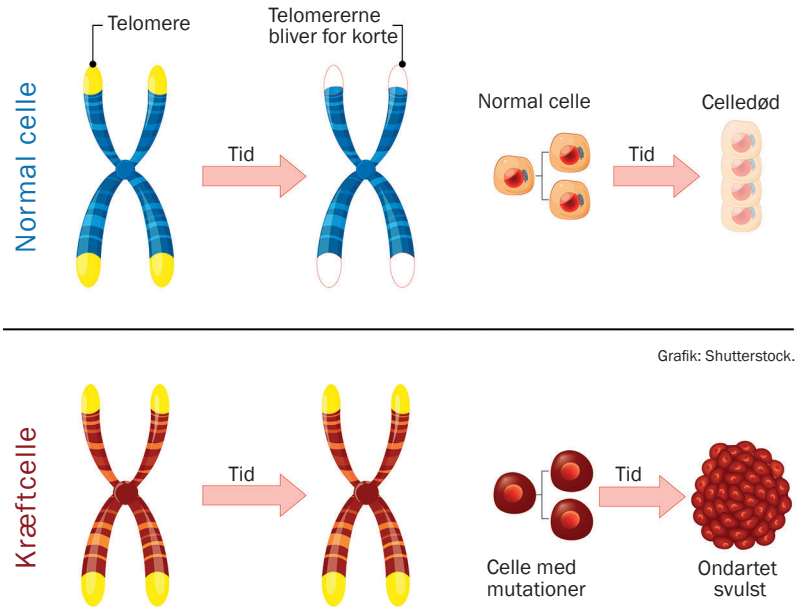
Derfor kan HeLa-celler ikke dø

Og så er vi tilbage ved Henrietta Lacks. I løbet af 1980'erne identificerede forskere det protein, som regulerer apoptosen. Proteinet hedder p53 og hører til kategorien af såkaldte tumorsuppressorgener, der modvirker udvikling af kræft. Det vil også sige, at mutationer i genet for p53 ofte er associeret med udvikling af kræft.

I undersøgelserne af Henrietta Lacks og hendes kræftceller fandt forskerne ud af, at hun havde været inficeret med HPV, og netop HPV fungerer på den måde, at virus sætter et stykke af sit eget arvemateriale ind i værtscellerne. Dette stykke arvemateriale udtrykker et protein, som nedbryder P53, hvorved cellerne får problemer med at styre cellecyklus og apoptose. Kræft er ikke sjældent udfaldet af denne manglende kontrol, hvorfor vaccinering mod HPV i dag er en del af børnevaccinationsprogrammet.

Den massive forskning i HeLa-cellerne har også belyst, hvorfor Henrietta Lacks' celler er fortsat med at leve her 70 år efter hendes død.

Normalt, når celler deler sig, bliver der fjernet et lille stykke af enden af arvematerialet, og det betyder,



Grafik: Shutterstock.

Telomerer er en slags beskyttelseshætte af arvemateriale i enderne af kromosomerne. Telomererne i en normal celle bliver kortere, hver gang cellen deler sig, og når der ikke er "flere klip på klippekortet", stopper celledelingen, og cellen dør. I kræftceller som HeLa-celler genopbygges telomererne, så cellerne kan dele sig uendeligt.

at celler kun kan dele sig et vist antal gange, før det ikke kan lade sig gøre at dele sig mere, uden at det går ud over essentielle dele af arvematerialet. Denne del af arvematerialet hedder telomerer, og under fosterudviklingen sørger proteinet telomerase for hele tiden at forlænge telomererne, så cellerne kan fortsætte med at dele sig uden bagkant. Telomerasen bliver dog slukket i cellerne efter fødslen, men i HeLa-cellerne er telomerasen igen aktiveret af mutationer, hvilket betyder, at arvematerialet bliver forlænget igen og igen, og at cellerne dermed aldrig dør på grund af aldring. Det er ikke så sært, at forskere har lagt betydeligt arbejde i at forstå telomerer og telomerase som et mål i jagten på udødelighed. Det har de også gjort i cellerne fra Henrietta Lacks.

»Der kom til at gå omkring 50 år, fra Henrietta Lacks døde, til vi med hjælp fra blandt andet hendes celler havde fået kortlagt de primære mekanismer bag celledeling, cellecykluskontrol, tumorsuppressorgener, caretaker-gener og apoptose,« siger Lotte Bjergbæk.

Hun uddyber, at rejsen ikke er slut endnu, og over alt i verden forsøger forskere nu at finde ud af, hvad der sker i celler under fysiologiske forhold inden i kroppen.

»Når vi traditionelt har studeret disse processer, har vi gjort det ved at udsætte celler for en masse kemikalier eller stråling og så set, hvordan cellerne forsøger at reparere på sig selv eller begå selvmord. Det er klart, at hvis man giver celler en masse skader, vil de forsøge at reparere på sig selv, men det er ikke under naturlige forhold. I dag er fokus mere rettet mod at forstå, hvad cellerne gør, når de ikke bliver udsat for så ekstreme ting, men at de bare skal klare sig gennem dagen og livet i en menneskekrop,« siger Lotte Bjergbæk.

Har betydning for behandling af kræft

Opdagelserne de seneste år og i fremtiden handler ikke bare om at forstå, hvordan cellecyklus bliver reguleret, eller hvordan kræft opstår, men også hvad man kan gøre, når tingene går galt.

Som eksempel står det nu klart, at hvis en kvinde mangler funktionelle BRCA-proteiner, har hun øget risiko for brystkræft. Derfor forsøger forskere at lave lægemidler, der beskadiger celler på en måde, så kun BRCA -proteiner kan reparere dem.



Lotte Bjergbæk i laboratoriet. Foto: Anni H. Andersen.

Det vil sige, at raske celler med funktionelle BRCA-proteiner bliver repareret, mens kræftceller uden BRCA bliver beskadiget i et omfang, der får cellerne til at gå i apoptose.

»Vi er dog også blevet mere opmærksomme på, at kroppen og cellerne har mange sikkerhedssystemer indbygget, så det er ikke altid, at cellerne opfører sig, som vi tror. Nogle gange kan de få tingene til at virke på en anden måde, hvis en primær signalvej bliver sat ud af kraft. Det er vi også nødt til at have i betragtning, når vi vil udvikle lægemidler til behandling af sygdomme, som udspringer fra fejl i cellecyklus og cellekontrol,« siger Lotte Bjergbæk. ■

Læs mere om celler og Lotte Bjergbæks forskning i denne bog: Lotte Bjergbæk (2022): *Celler deler os* i bogserien *ScienceFaction* fra Aarhus Universitetsforlag.



Forfatter
Kristan Sjøgren er videnskabsjournalist



Om Eske Willerslev
Eske Willerslev er professor ved Københavns Universitet, hvor han leder Center for Geogenetik under Statens Naturhistoriske Museum. Han er også Prince Philip Professor på University of Cambridge.

Den 26/9-2023 holdt han foredrag om eDNA, og hvordan viden om fortidens biodiversitet kan hjælpe os med at beskytte diversiteten under de nuværende og fremtidens klimaforandringer i serien Offentlige foredrag i Naturvidenskab. Artiklen her bygger på dette foredrag.

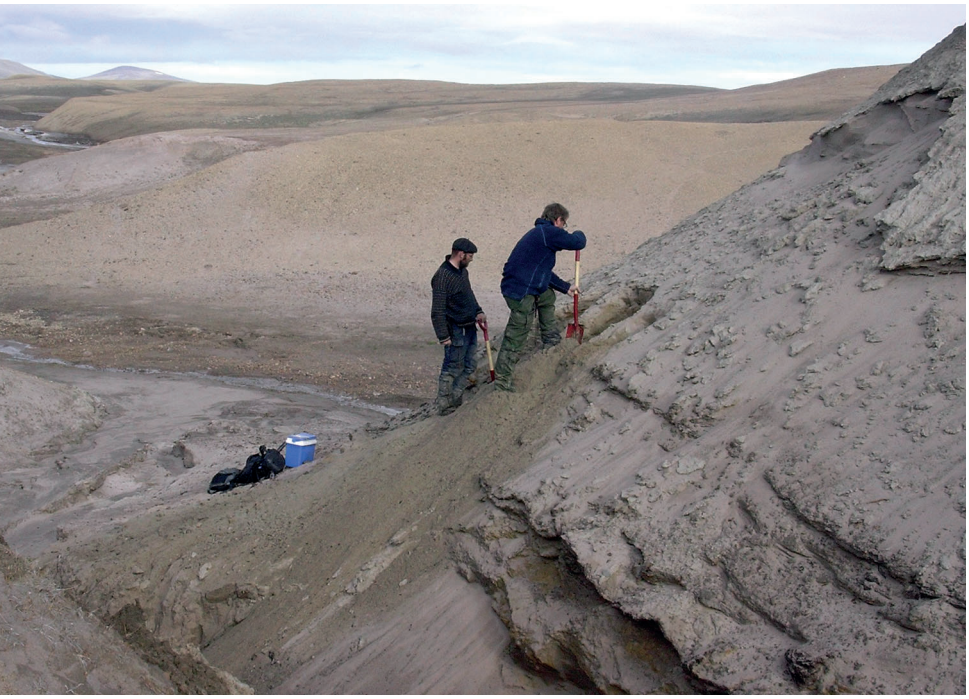
TO GRAM JORD SLADRER OM LIVETS FORTID OG FREMTID

Forskere kan med DNA-stumper i to gram jord analysere sig frem til, hvilke dyr der har levet i et område op til to millioner år tilbage i tiden. Viden om fortidens biodiversitet kan hjælpe os med at bevare den i fremtiden, fortæller Eske Willerslev.

For 20 år siden, da den nu verdensberømte danske professor Eske Willerslev stadig var en ung mand, gjorde han en opdagelse, der var så opsigtsvækkende, at det stadig i dag kan være svært at forstå. Opdagelsen skete i forbindelse med hans ph.d.-afhandling, hvor han undersøgte, om det ud fra DNA-stumper i en lille prøve jord på sølle to gram var muligt at sige noget om biologien der, hvor jordprøven var taget fra. Dyr og planter har det nemlig med at kaste DNA af sig hele tiden. Det sker, når dyr (og mennesker) smider døde hudceller, tisser eller laver afføring. Det sker også for træerne, når blade falder til jorden, eller når pollen bliver spredt for vinden.

Eske Willerslev var overbevist om, at han med de rette teknikker og metoder til at ekstrahere DNA kunne sige noget om, hvad der havde levet på det sted, hvor prøverne var taget fra. Netop de prøver, som han for 20 år siden arbejdede med, stammede fra Sibirien og permafrosten, så det var med andre ord opgaven at finde ud af, hvad der havde levet på det sted i Sibirien for mange tusinder af år siden.

»Vi kæmpede længe med at få metoden på plads, for dengang var det alt andet end simpelt at ekstrahere og analysere på gammelt DNA i en jordprøve. Det tog tid både at få DNA ud af prøven og bruge bakterier til at opkoncentrere de



Nordgrønland i dag fremstår øde med et sparsomt dyre- og planteliv. To forskere er her ved at tage prøver.

Men for to millioner år siden var det en helt anden sag, som rekonstruktionen til venstre viser. Eske Willerslev og kollegers forskning har vist, at Nordgrønland dengang havde et unikt miljø, der var en blanding af en arktisk og tempereret flora og fauna, man ikke finder tilsvarende noget sted i dag.
Illustration: Beth Zaiken.

fundne DNA-stumper og søge efter match i store biologiske databaser over gener fra alverdens dyr,« forklarer Eske Willerslev om de dage omkring juletid 2003, hvor det hele begyndte.

Selvom det var jul, og alle andre var gået hjem fra laboratoriet, blev Eske Willerslev ved med at forsøge at få tingene til at lykkes. På juledag skete det så, og endelig kunne computeren spytte navnene ud på de arter, som DNA-stumperne i jordprøven fra Sibirien matchede. Der var tale om uldhårede mammutter, uldhårede næsehorn, bisonerne, lemminger samt hundredvis af andre dyre- og plantearter, hvoraf mange ikke findes i dag. For Eske Willerslev var det en tidlig julegave.

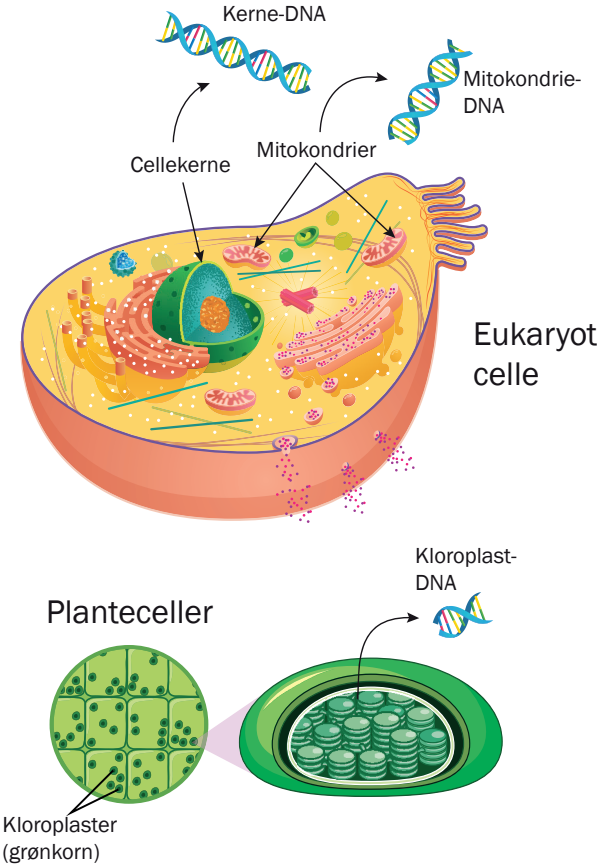
»Det var en åbenbaring, at det var muligt på denne måde at identificere, hvad der havde levet i et område i fortiden ved blot at analysere DNA fra gamle jordprøver. Bagefter gjorde vi det på en jordprøve fra en hule i New Zealand, og her fandt vi DNA fra moafugle. Vi var de første til at opdage det, som andre siden-hen har navngivet miljøDNA (eDNA, red.),« fortæller han.

Grønland summede af liv

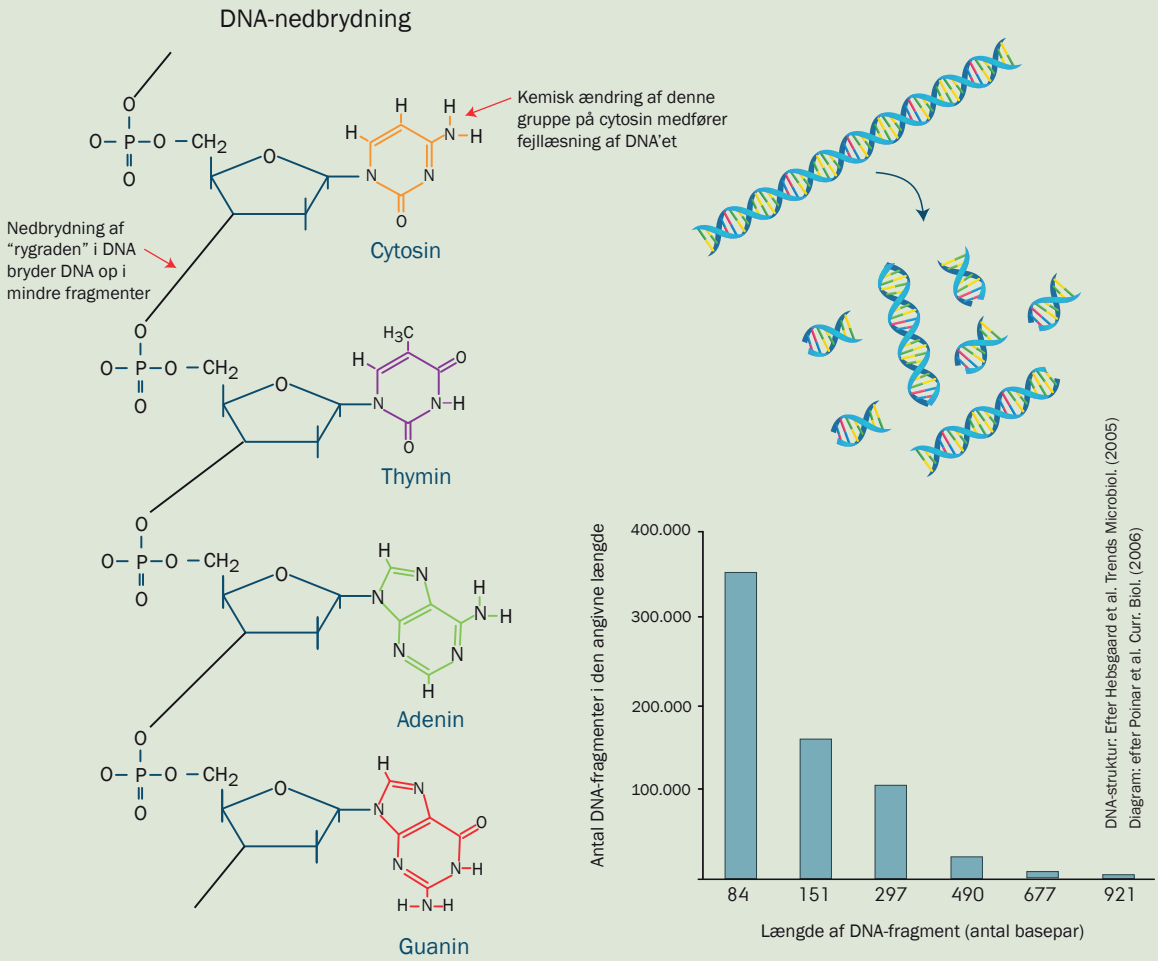
I ti år arbejdede Eske Willerslev næsten som den eneste i verden med eDNA som en kilde til viden om fortiden. Årsagen var meget simpelt den, at mange andre ikke troede på de resultater, som kom ud af hans laboratorium. Selv de postdocs, som blev ansat på universitetet, var nødt til først at lave analyserne selv, før de ikke længere var i tvivl om, at den altså var god nok, og at det var muligt at se alt det, som Eske Willerslev fandt i prøver fra nær og fjern.

»Problemet var, at alle troede, at det var muligt at finde DNA fra levende bakterier i jord, men at det ikke burde være muligt at finde DNA fra højere organismer, simpelthen fordi det burde blive brudt ned over tid,« forklarer han.

Netop det med tiden skulle vise sig ikke at være så stor en hindring, som mange ellers troede. I løbet af en årrække skubbede Eske Willerslev med sine kollegaer til den tid, som det var muligt for dem at kigge tilbage i forhistorien. Hele denne rejse kulminerede forrige år, hvor forskerne for første gang kunne rekonstruere det fulde økosystem i Grønland,



I den eukaryote celle findes DNA i cellekernen, men også i cellens energikraftværker, mitokondrierne, findes der DNA. Mens kerne-DNA nedarves ligeligt fra mor og far, nedarves mitokondrie-DNA kun fra moren. Selvom kerne-DNA indeholder mere information end mitokondrie-DNA, har man traditionelt brugt mitokondrie-DNA til at bestemme dyrearter ved såkaldt barcoding, fordi der er meget mere mitokondrie-DNA i en celle end kerne-DNA. Tilsvarende har man bestemt planter ud fra DNA i særlige celleorganeller kaldet kloroplaster (grønkorn).



Figuren viser til venstre den kemiske struktur af en DNA-streng med de fire DNA-baser markeret med forskellige farver. Der er angivet de to vigtigste nedbrydningsmekanismer. Udfordringen for forskerne i miljø-DNA har længe været, at metoder, der skulle aflæse sekvensen (altså baserækkefølgen) på DNA-fragmenter krævede, at disse var mindst 100 baser lange. Og som det fremgår af diagrammet, findes der langt flere fragmenter under denne målegrænse i miljøet. De nyeste sekventerings-teknikker er dog mere fintfølende, og derfor rykker grænserne for, hvor små stykker DNA-forskerne kan bestemme, sig hele tiden.

sådan som det så ud for to millioner år siden. Jordprøverne var taget fra en arktisk ørken, hvor der i dag kun er is, sne og helt forfærdeligt koldt, men sådan så det ikke ud i fortiden, viste analysen. I stedet var denne del af Grønland hjemsted for en bred vifte af store dyr og kæmpemæssige skove, der strakte sig, så langt øje rakte. Mastodonter og forfædrene til nutidens rensdyr levede side om side med gæs og harer i skove af poppeltræer og birketræer. I havet levede der endda hesteskokrabber, som man i dag næsten udelukkende finder i tropiske egne.

Derudover var rekonstruktionen af det gamle økosystem en ny rekord, der slog den tidligere rekord med omkring én million år.

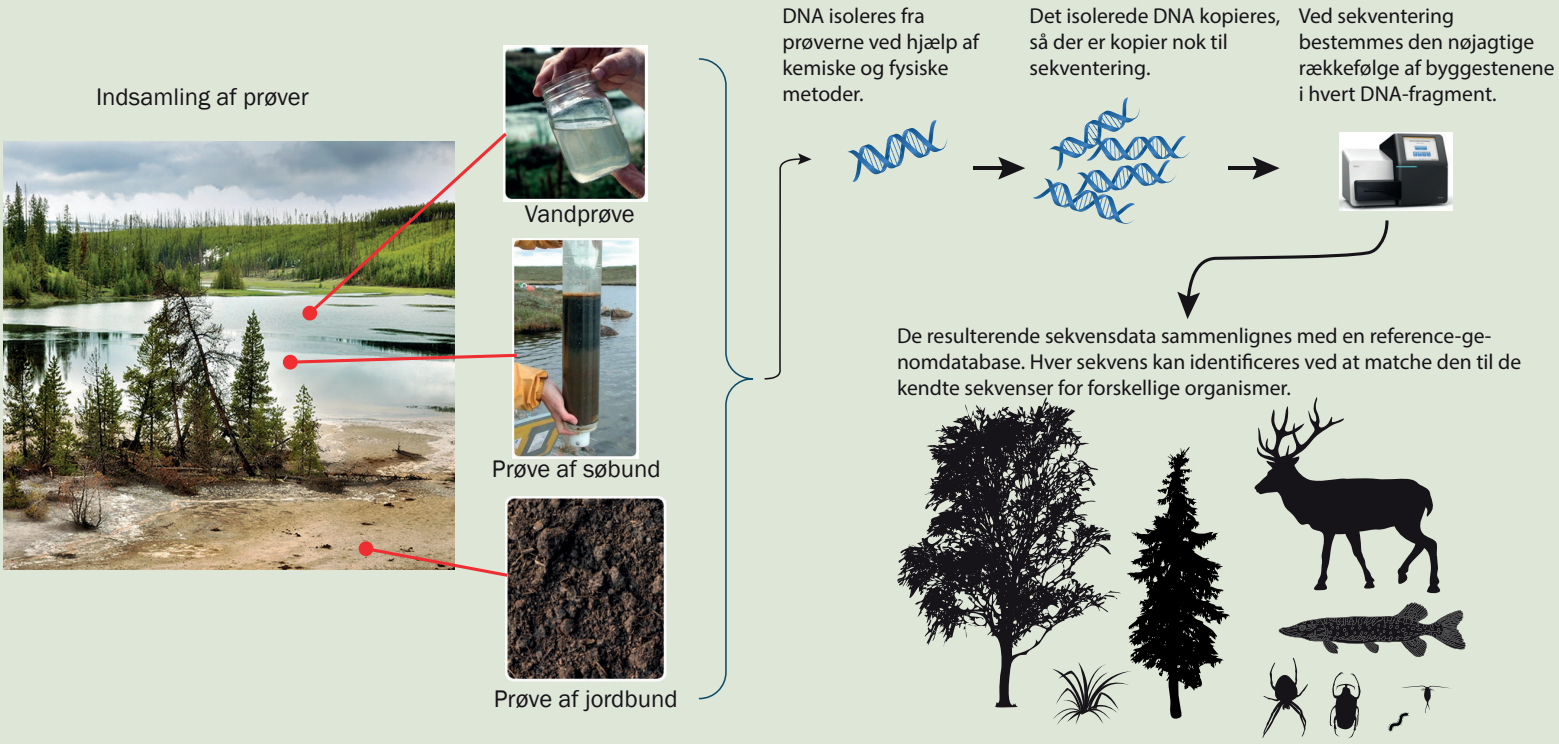
»Det er svært at sige, hvor lang tid vi egentlige kan kigge tilbage i tiden, men indtil videre har vi ikke fundet grænsen. Vi har efterhånden vist, at DNA holder meget længere, end nogen havde troet muligt, og det gælder ikke bare, når det er nedfrosset. Vi har lige lavet nogle analyser på prøver fra middelhavsområdet, og selvom de er en halv million år gamle, kan vi stadig rekonstruere økosystemet ud fra DNA i dem,« siger Eske Willerslev.

Kan etablere slægtskaber mellem fortidens og nutidens arter

Siden Eske Willerslev lavede sine første analyser for 20 år siden, er der sket meget inden for den teknologi, som forskerne benytter sig af. Først begyndte forskere at benytte såkaldt *metabarcoding*, som gjorde processen endnu hurtigere. Derefter kom *metagenomics* (shotgun sekventering), der gjorde processen endnu mere fintfølende, og i tillæg er bioinformatikere blevet mange gange bedre til at analysere på de data, som kommer ud af analyserne. I dag kan forskerne på den måde bearbejde den samme mængde data på 48 timer, som det ville have taget forskerne 16.000 år at gøre med den første metode, som Eske Willerslev pionerede. Han har sådan set været med til at pionere dem alle sammen.

Fra at være i stand til at kunne identificere arter ud fra DNA-stumper kan forskere i dag rekonstruere hele genomer og derved ikke bare

eDNA: En tidsmaskine til fortidens økosystemer



Undersøgelser af miljø-DNA (eDNA) har åbnet en fascinerende dør til fortidens økosystemer. Figuren viser den principielle arbejdsgang i arbejdet med miljø-DNA. En af de nyeste teknikker, der anvendes i disse studier, kaldes "shotgun sekventering". Der er i lighed med metabarcoding en molekylærbiologisk metode, der bruges til at bestemme, hvilke organismer der er til stede i en given miljøprøve uden forudgående kendskab til, hvilke organismers DNA, der er til stede i prøven. Men hvor metabarcoding udelukkende bruger mitokondrie-DNA og kloroplast-DNA, fanger shotgun sekventering alle slags DNA i en prøve – også DNA fra cellekernen – og metoden kan derfor give meget mere genetisk information. Grafikker brugt i illustrationen: Colourbox.

sige noget om, hvilke arter der har levet i et givent område, men også hvordan disse arter relaterer til andre af fortidens arter eller nutidens arter. Som eksempel har Eske Willerslev med sine kollegaer analyseret en jordprøve fra en hule i det nordlige Mexico, og her fandt de DNA fra to arter af bjørne. Den ene var den kortansigtede bjørn, verdens største bjørn, og den anden var en lille mexicansk sortbjørn. Begge arter er i dag uddøde, og Eske Willerslev fortæller, at fordi der er tale om to arter af bjørne, der har mere end 98 procent genetisk ensartethed, er det i sagens natur svært at finde ud af, hvilket DNA der tilhørte den ene bjørn, og hvilket DNA der tilhørte den anden bjørn.

Ikke desto mindre lykkedes det forskerne at kortlægge store dele af arvemassen for de to bjørnearter, og de kunne derved også se på slægtskabet mellem dem og med andre både uddøde og nulevende bjørnearter. Resultatet af denne øvelse viste som eksempel, at sortbjørnene højst overraskende havde slægtskab med nogle bjørne, der i dag lever i det østlige USA og ikke i det vestlige USA, hvor USA og Mexico ellers har grænse.

»Det viser, at der på et tidspunkt i fortiden har været en stor omstrukturering af bestanden af sortbjørne. Med disse resultater viste vi også, at noget, som mange ikke troede kunne lade sig gøre, nemlig at lave *genomics* på eDNA, rent faktisk godt kan lade sig gøre alligevel. Det gør også eDNA ekstremt brugbart, når man på denne måde kan lave meget præcis kortlægning af de arter, som har levet et sted, og hvordan de genetisk er beslægtet med både uddøde og nulevende arter. Desuden kan vi fra samme prøve gøre det på dyr, planter, svampe og bakterier,« forklarer Eske Willeslev.

Kortlagde mammutternes uddøen

De værktøjer, som Eske Willerslev har været med til at udvikle over de seneste to årtier, har gennem tiden kastet mange fascinerende resultater af sig. Men værktøjerne kan også benyttes til at besvare nogle helt fundamentale spørgsmål angående for eksempel, hvordan arter





↑ På billedet ses forskere på vej ind i Chiquihuite-hulen i det nordlige Mexico, hvor Willerslev og kolleger blandt andet fandt DNA fra to arter af bjørne.

← Rekonstruktion af verdens største Bjørn, *Arctodus Simus*, som var en af de to bjørnearter Eske Willerslev og kolleger i en hule. Denne bjørn kunne formentlig veje op til knap et ton.

Illustration via Vikimedia Commons/CC BY-SA 3.0

Foto: Devlin A. Gandy

genetisk har tilpasset sig fortidens klimaforandringer, eller hvorfor nogle arter er uddøde, mens andre ikke er.

Forskere har i efterhånden et par hundrede år blandt andet diskuteret, hvorfor mammutterne uddøde. Nogle mener, at det skyldtes klimaforandringerne ved udgangen af den seneste istid, mens andre mener, at de blev jagtet ihjel af mennesker. Eske Willeslevs forskning viser, at det første formentlige er det korrekte svar, i hvert fald i de nordlige dele af verden.

I et stort studie analyserede Eske Willerslev med sine kollegaer 500 jordprøver fra den nordlige halvkugle. Prøverne stammede fra de seneste 50.000 år. Ved at studere eDNA i de mange prøver kunne forskerne meget præcist fastslå, hvornår der blandt andet levede mammutter i Nordamerika, Nordeuropa og i det nordøstlige Sibirien og nordlige Centralsibirien. De kunne også se, hvornår der ikke levede mammutter mere.

»Fordelen ved eDNA er, at vi ikke har brug for at finde en knogle fra den sidste levende mammut i et område. Den skal bare være gået forbi, og så har den smidt DNA af sig, som vi kan finde her mange tusinder af år senere,« siger Eske Willerslev.

Den omfattende analyse af mammuttens uddøen viste, at der faktisk levede mammutter på den russiske ø Taymyr frem til for 4.000 år siden. Det er meget længere fremme i historien, end nogen havde forestillet sig. Derudover kunne forskerne også vise, at mammutterne forsvandt fra Nordamerika og Nordeuropa engang efter for 20.000 år siden og fra det nordøstlige Sibirien for cirka 10.000 år siden. I prøverne kunne de også se, hvordan vegetationen ændrede sig, i takt med at istidslandskabet gjorde det samme.

»Vores prøver viser, at det i langt højere grad var vegetationen og ikke tilstedeværelsen af mennesker, som dikterede, hvorvidt mammutterne forsvandt fra et område. Vi har sammenholdt vores analyser af eDNA med alle mulige andre datakilder, og her kan vi se, at det, som bedst følger mammutternes uddøen, er ændringer i vegetation, og at ændringer i vegetation fulgte ændringer i nedbør. Det peger på, at klimaforandringer ledte til ændringer i nedbør, der ledte til ændringer i vegetation, som ledte til mammutternes endeligt,« forklarer Eske Willerslev.

Indvandring til Amerika

Samme fremgangsmåde har forskerne også benyttet til at blive klogere på, hvordan vi mennesker har spredt sig fra Afrika til i dag at dominere hele kloden. Fra vi mennesker udvandrede fra Afrika, fordelte vi os gennem årtusinderne over en større og større del af Jorden. For 23-14.000 år siden kom vi til Amerika via et tilfrosset stræde mellem Rusland og Alaska, og den mest almindelige teori har hidtil været, at mennesker derefter vandrede gennem en isfri korridor i Alaska, Canada og det nordlige USA mod syd. Den teori har Eske Willerslevs forskningsgruppe sat et meget stort spørgsmålstegn ved.

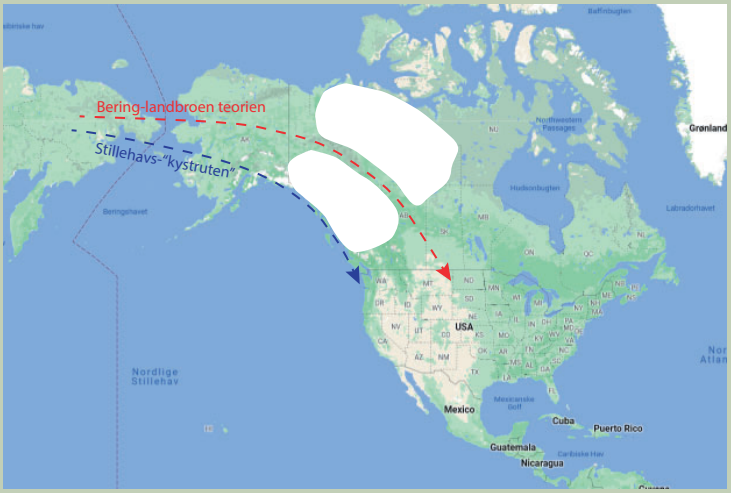
I et studie undersøgte forskerne, om det virkeligt var muligt for vores forfædre at vandre gennem en isfri korridor flere tusinde kilometer gennem Nordamerika. Der er ingen tvivl om, at der formentlig har været en isfri korridor, men spørgsmålet er, om den har set mennesker.

Ved at analysere på en masse prøver fra perioden sandsynliggjorde de danske forskere, at mennesker nok valgte en anden rute, da de befolkede Amerika. Sagen er meget simpelt den, at selvom forskerne i deres prøver kan se, hvornår der i den isfrie passage kom Mammutter, elge, kronhjorte, den ene type skov, den anden type skov samt ørne og andre fugle, står det også klart, at intet af det var der, da mennesker ifølge teorien gik fra nord mod syd.

»Der var meget simpelt ikke noget at leve af i den periode, hvor mennesker efter sigende rejste ned gennem en isfri korridor i Alaska. Det betyder, at mennesker formentlig har rejst langs kysten i stedet for. Måske kan de have brugt korridoren senere, da der var noget at spise og leve af, men ikke på tidspunktet for befolkningen af Amerika,« siger Eske Willeslev.

Værktøjer til at håndtere klimaforandringerne

Selvom eDNA indtil videre fortrinsvis er brugt til at kigge tilbage i tiden, kan det faktisk også benyttes til at kigge fremad. Blandt andet kan forskere studere økosystemer på et tidspunkt, hvor klimaet var anderledes end i dag, og hvor det



Kortet illustrerer to teorier om, hvordan de første mennesker indvandrede til det nordamerikanske kontinent fra Sibirien over det tilfrosne Beringstræde for et sted mellem 23.000 og 14.000 år siden, hvor store dele af Nordamerika stadig var dækket af is. Ifølge den mest udbredte teori er dette foregået gennem en isfri korridor over land, men Eske Willerslevs forskning har vist, at det er mere sandsynligt, at de er sejlet langs Stillehavskysten.

Istidens slutning ændrede verden

Afslutningen på den seneste istid, også kendt som det seneste istidsmaksimum, var en bemærkelsesværdig begivenhed i jordens klimahistorie. Denne periode kulminerede for omkring 20.000 år siden og markerede overgangen fra en kold istidsperiode til den varmere interglaciale periode, som vi befinder os i i dag. Under istiden var store dele af den nordlige halvkugle dækket af massive iskapper og gletsjere. Nordamerika, Europa, og Asien var alle påvirket af ismasserne, der nogle steder var flere kilometer tykke. Dette isdække indeholdt desuden en betydelig mængde af Jordens vand og bidrog til lavere havniveauer.

Afslutningen på den seneste istid blev udløst af et komplekst samspil mellem astronomiske, atmosfæriske og oceanografiske faktorer. En af de afgørende begivenheder var ændringer i Jordens bane om solen, kendt som Milankovitch-cyklusser. Disse ændringer påvirkede indstrålingen af sollys på jordens overflade og spillede en afgørende rolle i smeltningen af isen. En anden vigtig faktor var stigningen i atmosfærens koncentration af drivhusgasser som CO_2. Dette førte til en forøgelse af den gennemsnitlige temperatur på Jorden, hvilket medførte yderligere isafsmeltning.

Isafsmeltningen førte gradvist til stigende havniveauer, hvilket ændrede kystlinjer og skabte nye levesteder for mennesker og dyreliv. Mennesker og dyr, der havde tilpasset sig de barske forhold i istiden, måtte nu finde nye måder at overleve og trives på. Nogle klarede det, mens andre ikke gjorde og i dag kun findes som knoglestumper og DNA-fragmenter i jordprøver og iskerner. Det gjaldt blandt andet mammutterne og de uldhårede næsehorn, der ellers havde gjort de nordlige breddegrader til deres hjem i tusinder af år.

Afslutningen på den seneste istid havde dybtgående konsekvenser for både jordens økologi og menneskets udvikling. Den skabte det moderne landskab og banede vejen for civilisationens fremkomst. Det er også en vigtig påmindelse om jordens naturlige klimavariabilitet og dens evne til at tilpasse sig og ændre sig over tid.



Her ses Eske Willerslev sammen med lederen af Carlsberg Laboratorium Birgitte Skadhauge. Willerslev modtog i 2018 19 millioner kr. fra Carlsbergfondet til et projekt, der gik ud på at kortlægge arvemassen i fortidens ris med henblik på at finde gener, der kan anvendes til at gøre nutidens ris stærkere og mere overlevelsesdygtige.

mere lignede det, som vi kan forvente i fremtiden. For eksempel viser analyserne af økosystemerne i det nordlige Grønland for to millioner år siden, at mange dyr og planter, der overhovedet ikke sameksisterer i dag, levede side om siden dengang. Det vil sige, at da temperaturen var omkring 15 grader varmere i Grønland, eksisterede der et økosystem, som ikke har en pendant i dag.

»Det fortæller, at sammensætningen af arter kan være mere anderledes, end vi går og forestiller os. Der har været mange klimaforandringer gennem tiden, og vores økosystemer har reageret på dem. De her studier af eDNA fortæller os noget om naturens kapacitet, og det kan blandt andet bruges til at fintune de modeller, som vi bruger til at fremskrive, hvordan tingene kommer til at se ud i fremtiden,« forklarer Eske Willerslev.

Han uddyber, at man i fortidens DNA kan se, hvordan planter og dyr har tilpasset sig at leve i et anderledes klima, der var varmere end i dag. Det vil sige, at man også kan finde ud af, hvilke genetiske tilpasninger der er nødvendige at reintroducere i organismer, for at de kan modstå det, som kommer. Nuvel, Eske Willerslev taler ikke om at genetisk modificere hele verdens biologi, men nogle arter kan selektivt forædles til at kunne trives i fremtiden. Det drejer sig i særdeleshed om afgrøder.

»Kan vi læse eDNA ordentligt, kan vi også se, hvad vi er nødt til at introducere i afgrøder, for ikke at klimaforandringerne skal lede til en fødevarekatastrofe. Det kan være, at nogle afgrøder skal have reintroduceret nogle genetiske varianter, der gør det lettere for dem at udnytte det blå lys, som er mere sparsomt længere mod nord, eller at de skal kunne modstå mere nedbør. Når klimaet ændrer sig, kan det være nødvendigt at dyrke afgrøder på andre breddegrader, men det er nutidens afgrøder ikke designet til,« siger Eske Willerslev.

Han uddyber, at det måske kan lyde voldsomt at reintroducere genetiske varianter fra fortiden i planter, så de kan modstå de menneskeskabte klimaforandringer, men rent faktisk handler det blot om at reintroducere noget, som naturen allerede har skabt.

»Alle de her genetiske varianter, der skal til for at kunne klare klimaforandringerne, findes i organismerne i dag. Problemet er bare, at klimaforandringerne sker så hurtigt lige nu, at de genetiske tilpasninger ikke kan følge med. Men en ekstrem situation gør, at vi må tænke ud af boksen og se, hvordan naturen har løst problemerne tidligere. Så må vi hjælpe naturen på vej for at genskabe det, som var,« siger Eske Willerslev. ■

Tag på Science Camp

på Syddansk Universitet i Odense

sdu.dk @sduscience

En camp består af to dage, hvor du møder undervisere og studerende. Gennem oplæg, øvelser og forsøg kommer du tættere på dit studievalg og får indblik i, hvad det vil sige at være studerende på Syddansk Universitet.

Fysik Camp
3. - 4. februar 2024 | sdu.dk/fysikcamp

Kemi Camp
3. - 4. februar 2024 | sdu.dk/kemicamp

Matematik Camp
3. - 4. februar 2024 | sdu.dk/matematikcamp

Datalogi Camp
3. - 4. februar 2024 | sdu.dk/datalogicamp

Kunstig intelligens Camp
3. - 4. februar 2024 | sdu.dk/kunstigintelligenscamp

Biotek Camp
3. - 4. februar 2024 | sdu.dk/biotekcamp

Biologi Camp
3. - 4. februar 2024 | sdu.dk/biologicamp

IT Camp for piger
2. - 3. marts 2024 | sdu.dk/itcampforpiger

Alle camps er særligt tilrettelagt for 2. og 3. gymnasieår og dig, der holder sabbatår.
Se program og tilmeld dig under den enkelte camp. Det er gratis at deltage,
og vi sørger for overnatning og forplejning - og selvfølgelig hygge og sjov!

SDU

STOR USIKKERHED OM TANGSKOVES KLIMAEFFEKT

Områder med vildtvoksende tang forsvinder hvert år fra verdenshavene, når vi i stedet burde beskytte det. Tangskove er vigtige for havets biodiversitet og bidrager også til at binde CO_2. Hvor stor en klimaeffekt der vil være ved at beskytte, genetablere og dyrke tangskove, er det dog svært at opgøre, understreger ny forskning.

Ålegræs. Foto: Shutterstock

Ligesom oppe på land er der en mangfoldighed af landskaber i havet. Hvor lyset når havbunden, kan der vokse enge med havgræs og skove af tang. Tang er en fællesbetegnelse for brunalger, rødalger og grønalger, og store brunalger som sukkertang og palmetang kan danne tangskove på flere meters højde. Skovene styrker biodiversiteten. Og ligesom på landjorden bidrager undervandsskovene også til at binde og begrave CO_2 fra atmosfæren. Desværre går det den forkerte vej.

Forskningen estimerer, at der hvert år forsvinder 1,8 procent af verdens tangskove. Det går ud over biodiversiteten og betyder også, at skovene bidrager mindre til at begrave carbon i havet, forklarer professor Dorte Krause-Jensen fra Institut for Ecoscience på Aarhus Universitet.

Sammen med en række kolleger fra udlandet, står hun bag en ny forskningsartikel, der sammenstiller den eksisterende viden om, hvordan bæredygtig forvaltning af vild og dyrket tang udover at styrke biodiversiteten kan levere sideeffekter i form af øget carbonbinding. Studiet sammenfatter også de tilknyttede udfordringer.

»Tangskove er super-produktive og derfor effektive til at optage CO_2 og bygge det ind i deres biomasse. Desuden bliver noget af den bundne CO_2 begravet i havet. Beskyttelse og genetablering af tangskove kan derfor potentielt give positive sideeffekter på klimaet«, siger hun.

Svært at måle på tangskovenes CO_2-effekt

Forskerne har i nogle år diskuteret, hvor effektivt tang er til at binde og lagre CO_2. Og de har diskuteret, hvor meget det egentlig hjælper at genoprette de tabte tangskove.

»Det er nemlig ikke enkelt at opgøre, hvor stor en rolle undervandsskovene spiller«, forklarer Dorte Krause-Jensen.

»For havgræsser og anden kystnær marin vegetation, der vokser på sandbund, er det lettere at måle. Havgræsser opbygger nemlig et depot af carbon i havbunden under engen, når blade falder af og bundfælder. Ved at grave ned i havbunden under ålegræsset, datere lagene og analysere carbonindholdet, kan vi måle, hvor meget CO_2, der er lagret og hvor hurtigt, det er sket.«

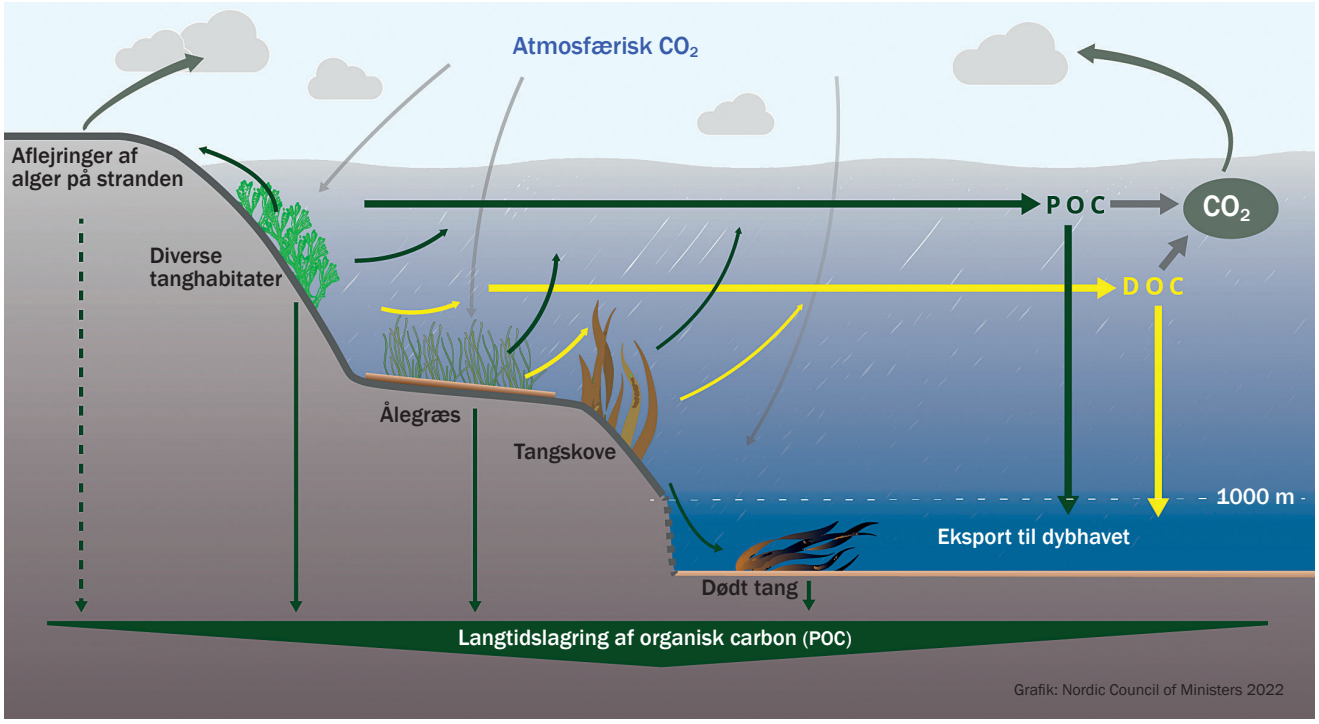
Tang vokser i modsætning til ålegræs på en stenbund. Det betyder, at der ikke bygges carbondepoter op under skoven. I stedet lagres CO_2 alle mulige andre steder, og udfordringen er at finde de steder og opgøre, hvor stor en del af carbonlagrene, der stammer fra tang.

»Når tang bygger carbondepoter op i havet, sker det ved, at stykker af tangen bliver fanget af havstrøm-

Forfatter:
Jeppe Kyhne Knudsen
Journalist og videnskabsformidler hos Technical Sciences, Aarhus Universitet
jkk@au.dk



Forsker:
Dorte Krause-Jensen
Professor ved Institut for Ecoscience - Sø-økologi
dkj@ecos.au.dk



Simpel oversigt over optag og indbygning af CO_2 i tang og havgræsser gennem fotosyntese (NPP) og eksport af tang-carbon som partikulært organisk carbon (POC) og opløst organisk carbon (DOC) væk fra habitaterne. Carbon ender i depoter i havbunden og i dybhavet (under 1.000 meter), hvor det kan lagres gennem lang tid. Undervejs bliver det meste af tangen spist af smådyr eller på anden vis nedbrudt til CO_2, mens kun en mindre del begraves.

Derfor forsvinder tangskovene

Gennem det seneste århundrede er mange tangskove forsvundet i Danmark - og i store dele af verden. Det er der flere forklaringer på.

I Danmark ved vi, at anlægning af blandt andet kystsikring og havnemoler har betydet, at mange af de sten, som tangen tidligere voksede på, er blevet hentet op af vandet og brugt som byggematerialer.

Desuden ødelægger fiskeri med trawl tangskovene, når nettene slæber hen ad havbunden. Overfiskning er desuden med til at forstyrre fødekæden, så blandt andet bestanden af søpindsvin, der holder tangen nede, vokser.

Sidst, men ikke mindst, får udledningen af næringsstoffer fra land økosystemet til at tippe, så tangskovene ikke længere trives.

»Især i fjorde og kystnære havområder har vi store problemer med, at der er alt for mange næringsstoffer i vandet. Det fører til opblomstring af mikroalger og iltsvind – til skade for både planter og dyr«, siger Dorte Krause-Jensen

»Hvis vi skal genoprette nogle af tangskovene, skal vi derfor først og fremmest sikre god vandkvalitet, gode bundforhold og sunde fødekæder«.

me og ført væk som partikler eller i opløst form til carbonlagre i havbunden eller i dybhavet (se figur). Undervejs bliver det meste af tangen spist af smådyr eller på anden vis nedbrudt, mens kun en lille del begraves«, siger hun og fortsætter:

»Fordi havbundens carbonlagre stammer fra flere kilder, er det svært at måle, hvad der kommer fra tangskovene og hvilke tangskove, der bidrager. Det kræver modellering af transportveje fra tangskov til carbonlager og brug af særlige tang-markører, for eksempel miljø DNA (eDNA), der kan dokumentere tangDNA i havbunden. Men selv med de teknikker, er det en udfordring at sætte tal på tangens bidrag, og hvor meget større carbonlageret bliver, når man genopretter tangskove«.

En anden udfordring er at kortlægge tangskovene – og hvordan de ændrer sig over tid. Det er svært, fordi skovene er skjult under havets overflade og er dynamiske. Vores bedste skøn er at tangskovene har en global udbredelse på 6-7 millioner km^2.

Tangskoves bidrag til carbonbegravelse

Selvom det altså er svært at gøre op, hvor meget CO_2 tangskovene begraver, har forskerne forsøgt at lave et groft overslag. På globalt plan regner de med, at vilde tangskove, årligt bidrager med

godt 600 millioner tons CO_2-ækvivalenter til havets carbonlagre, forklarer Dorte Krause-Jensen.

»Det er et første overslag, som vi allerede beregnede i 2016. Siden er der forsket i at forstå processerne bedre og underbygge overslaget, men vi har endnu ikke et bedre tal«, siger hun og fortsætter:

»Selvom globale tangskove leverer et stort bidrag til havets carbonlager, har det ingen nettoeffekt på klimaet, hvis bidraget er stabilt over tid. Kun hvis vi skruer op og genetablerer tangskove, forhindrer tab af truede tangskove og tilknyttede carbonlagre i havet eller dyrker tang, kan det have positive sideeffekter for klimaet«.

Genetablering af tabte tangskove kræver først og fremmest, at man fjerner årsagerne til, at skovene forsvinder (se boks), så de har mulighed for at sprede sig på ny. Derudover kan der være behov for aktiv genopretning, som dog indtil videre kun er dokumenteret på lille skala. Der kan også være behov for at beskytte havbundens carbondepoter ved at begrænse trawling.

Hvor stor en klimaeffekt, der vil være ved at beskytte og genetablere tangskove, er det dog endnu urealistisk at sætte tal på givet de mange udfordringer ved at kvantificere tangens bidrag til carbonlagrene.

Bæredygtige tang-farme kan være en god idé

Tangdyrkning foregår på farme på havet, hvor tangen hænger ned fra lange tov, der flyder nær vandoverfladen.

Langs store dele af den østasiatiske kyst ligger der allerede i dag den ene tang-farm efter den anden. I Kina og andre østasiatiske lande har der i hundredvis af år været tradition for at dyrke tang. Først og fremmest til fødevareproduktion. Tangdyrkning udgør faktisk hele 51 % af den globale akvakulturproduktion.



Brunalger.
Foto: Shutterstock

I Europa er vi derimod langt bagud, når det kommer til tangdyrkning. Der er derfor et stort potentiale her, vurderer Dorte Krause-Jensen, men understreger, at det er vigtigt at sikre, at det sker på en bæredygtig måde og i begrænset omfang, som ikke skader naturlige økosystemer. Der er behov for standarder og protokoller for bæredygtig tangdyrkning.

»Bæredygtig tangdyrkning kræver hverken dyrkbar jord, vanding eller gødning og kan have flere positive effekter. Klimaeffekten kan eksempelvis ligge i de produkter, der kan laves af tang«, siger hun og fortsætter:

»Tang kan blandt andet bruges til fødevarer, fodertilskud, gødning og bioplastik. Og i en lang række produkter kan tang i et vist omfang erstatte materiale med et højere klimaaftryk. Derudover vil en lille del af tangproduktionen typisk løsrives inden høsten og bidrage til carbonlagring i havbunden under farmen. Det skal dog understreges, at det kræver livscyklusanalyser at opgøre en tangfarms samlede klimaeffekt«.

En kontroversiel løsning

De seneste års fokus i forskningen på, hvor meget tang bidrager til havets carbonlagre, har fået nogle til at foreslå at dyrke store mængder tang, som sænkes ned i dybhavet for dermed at lagre en masse CO_2.

Den løsning er Dorte Krause-Jensen og hendes kolleger bag studiet dog store modstandere af.

»Det har ukendte økologiske konsekvenser, hvis vi gør det. Desuden er det etisk uforsvarligt at dumpe et værdifuldt produkt på havbunden«, siger hun og afslutter:

»Selvom vores forskning beskriver, hvordan tang kan have sidegevinster for klimaet, er det ikke en mirakelløsning. Emissioner af klimagasser skal reduceres ved kilden. Men da tangskove er vigtige for biodiversiteten og vandkvaliteten, er det i sig selv en vældig god grund til at styrke deres udbredelse«. ■

Videre læsning

Finnley W.R. Ross et al. Potential role of seaweeds in climate change mitigation, Science of The Total Environment, Vol. 885, 2023, 163699.

Duarte, C. M., Gattuso, J. P., Hancke, K., Gundersen, H., Filbee-Dexter, K., Pedersen, M. F., ... & Krause-Jensen, D. (2022). Global estimates of the extent and production of macroalgal forests. Global Ecology and Biogeography, 31(7), 1422-1439.

Krumhansl, K. A. et al (2016). Global patterns of kelp forest change over the past half-century. Proceedings of the National Academy of Sciences, 113(48), 13785-13790.)

Helene Frigstad et al, *Blue Carbon – climate adaptation, CO_2 uptake and sequestration of carbon in Nordic blue forests.* Nordic Council of Ministers 2020. ISBN 978-92-893-6860-5. dx.doi.org/10.6027/temanord2020-541.

Verdens tangskove modvirker global opvarmning, Aktuel Naturvidenskab, 2-2019.

Foto: Shutterstock.



MINDRE RULLE-MODSTAND PÅ VEJEN

– giver mindre CO_2 til atmosfæren

Energitabet ved den interne friktion i et bildæk, når det deformeres ved kørsel – den såkaldte rullemodstand – står for 20-30 % af energiforbruget, når vi kører i vores biler. En bedre forståelse af dækmaterialernes mekaniske egenskaber kan hjælpe med at reducere rullemodstanden og dermed sænke energiforbruget.



Forfatteren
Tina Hecksher er lektor i fysik ved Institut for Naturvidenskab og Miljø, Roskilde Universitet, hvor hun er tilknyttet forskningscentret Glas og Tid. Hun forsker i sammenhængen mellem mikroskopiske og makroskopiske egenskaber af ikke-krystallinske stoffer, herunder særlig underafkølede væsker og glasser.
tihe@ruc.dk

Når vi tramper i pedalerne for at cykle med en nogenlunde konstant hastighed, hvad går al den energi så til? Det korte svar er, at energien går til overvinde forskellige former for modstand. Den mest velkendte er nok luftmodstanden. Vi mærker den tydeligt, når vi cykler, og de fleste har erfaret, at jo hurtigere, man bevæger sig, des større er luftmodstanden – selv hvis det ikke blæser. Luftmodstand er også den primære årsag til, at bilers benzin- (eller mere generelt: energi-) forbrug stiger, når der køres hurtigt. De fleste kender også til gnidningsmodstand: Det er lettere at trække noget tungt over en glat end en ru overflade. Men måske har du aldrig hørt om rullemodstand? Rullemodstand opstår, når noget – for eksempel en kugle, en cylinder eller en ring – ruller på en overflade.

Alle de nævnte typer modstand har en konkret indflydelse på vores landtransport og dermed på vores udledning af CO_2: Jo større modstanden er, des mere benzin/energi skal der bruges for at opretholde en konstant hastighed. Rullemodstand alene står for mellem 20 og 30% af energiforbruget.

I denne artikel vil jeg se nærmere på fænomenet rullemodstand og undersøge spørgsmålet, hvordan vi kan gøre vores køretøjers rullemodstand mindre. Det er nemlig et spørgsmål, vi har beskæftiget os med i flere projekter ved RUC i samarbejde med blandt andre Vejdirektoratet, entreprenørfirmaet NCC og dækfirmaet Continental.

Rullemodstand

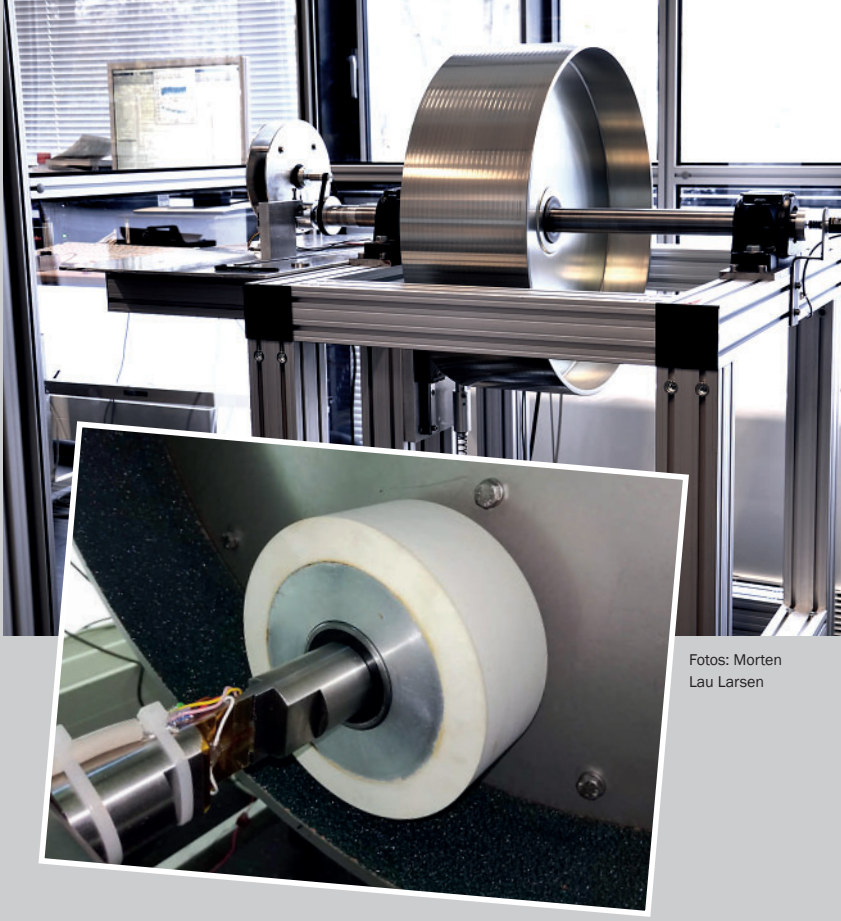
Rullemodstand kommer fra det energitab, der opstår ved deformation under rulning, altså den interne friktion (eller gnidning) i materialet. Både underlaget og det rullende objekt kan deformere, og derfor kan der være energitab – altså det vi registrerer som modstand – i begge. En vejingeniør ser naturligvis mest på vejens egenskaber og den del af rullemodstanden, der kommer fra vejen. Det kaldes ofte strukturel rullemodstand for at skelne det fra dækkets rullemodstand. En dækfabrikant er interesseret i at minimere det tab, der sker i dækkene, fordi det er en konkurrenceparameter. I vores forskning har vi arbejdet med begge aspekter.

Rullemodstand kvantiseres ved en rullemodstandskoefficient (forkortet

Rullelab

For at undersøge rullemodstandens afhængighed af forskellige parametre såsom belastning, hastighed, temperatur og overfladetekstur, har vi på RUC bygget et rullemodstandslaboratorium. Princippet er en roterende tromle, som driver et hjul placeret på indersiden (se billede).

En motor driver rotationen af tromlen, så omdrejningstallet er konstant: Det vil sige, at motoren leverer et kraftmoment, som er præcis nok til at balancere modstanden. Det er dette kraftmoment, vi måler, og dermed har vi et mål for modstanden, som kommer fra forskellige kilder: gnidning i kuglelejer, luftmodstand og rullemodstand i hjulet. For at kunne isolere hjulets rullemodstand laves en såkaldt "skim test". Det er en måling, hvor hjulet akkurat bringes i kontakt med tromlen, således at det roterer, når tromlen roterer, men uden belastning og dermed uden deformation af hjulet. I denne måling kommer alle bidrag til tabet på nær rullemodstanden med, og dette bidrag kan så fratrækkes resultater med belastning. Se også ekstra-materialet på web, hvor der regnes på kræfterne.



Fotos: Morten Lau Larsen

μ_{RR}), som er forholdet mellem rullemodstandskraften og belastningen af det rullende objekt – helt analogt til en friktionskoefficient. Altså et tal, der udtrykker hvor stor rullemodstand for eksempel et dæk har. Det er smart i forhold til for eksempel at kunne sammenligne forskellige dæk. Men det giver et forsimplet indtryk af, hvad rullemodstand er. I virkeligheden er rullemodstand et kompliceret samspil mellem vægt, stivhed og deformationshastighed af både dæk og vej. Og faktisk også af vejens overfladetekstur (se faktaboks om rullemodstand). I de fleste tilfælde ligger rullemodstandskoefficienten dog ifølge standardtests et sted mellem 5 og 20 promille for dæk og cirka en faktor ti mindre for veje.

Hvis vi vil nedbringe trafikkens energiforbrug (og dermed CO_2-udledning), er rullemodstand en parameter, som vi kan forsøge at minimere. Danmark er det første land til at stille krav til vejoverfladens rullemodstand, og i øjeblikket rulles den såkaldte KVS-asfalt (KVS = klimavenlig slidlag), udviklet i et RUC-ledet Innovationsfonds-projekt, ud på motorvejsnettet. Dette er en asfaltblanding, der har mindre rullemodstand end det almindelige toplag af asfalt, man normalt har brugt. Forskellen på den gamle og den nye asfalt er overfladestrukturen, der genererer punktdeformationer i dækket. Det vil faktisk sige, at det er tabet i dækkene, der reduceres, selv om det er vejen, der modificeres.

Målinger af rullemodstand

Der findes en række forskellige metoder til at måle rullemodstand, hvor der kan skelnes mellem såkaldte in-situ målinger og laboratoriemålinger. In-situ målinger forgår ude på vejene med specialiserede køretøjer. Disse metoder kommer meget tæt på de "rigtige" forhold i trafikken. Men det er også meget svært at lave kontrollerede og reproducerbare målinger, idet der er mange forhold som fx vind og temperatur, som vi ikke kan styre. Denne type målinger er derfor ikke specielt velegnet til forskning, hvor man prøver at forstå, hvordan hver enkelt variabel ændrer målingen. Her er en anden metode – tromlemetoden – mere egnet til systematiske undersøgelser. Og i øvrigt også den metode, der bruges til mærkning af dæk ifølge ISO-standarder, så man kan sammenligne på tværs af mærker.

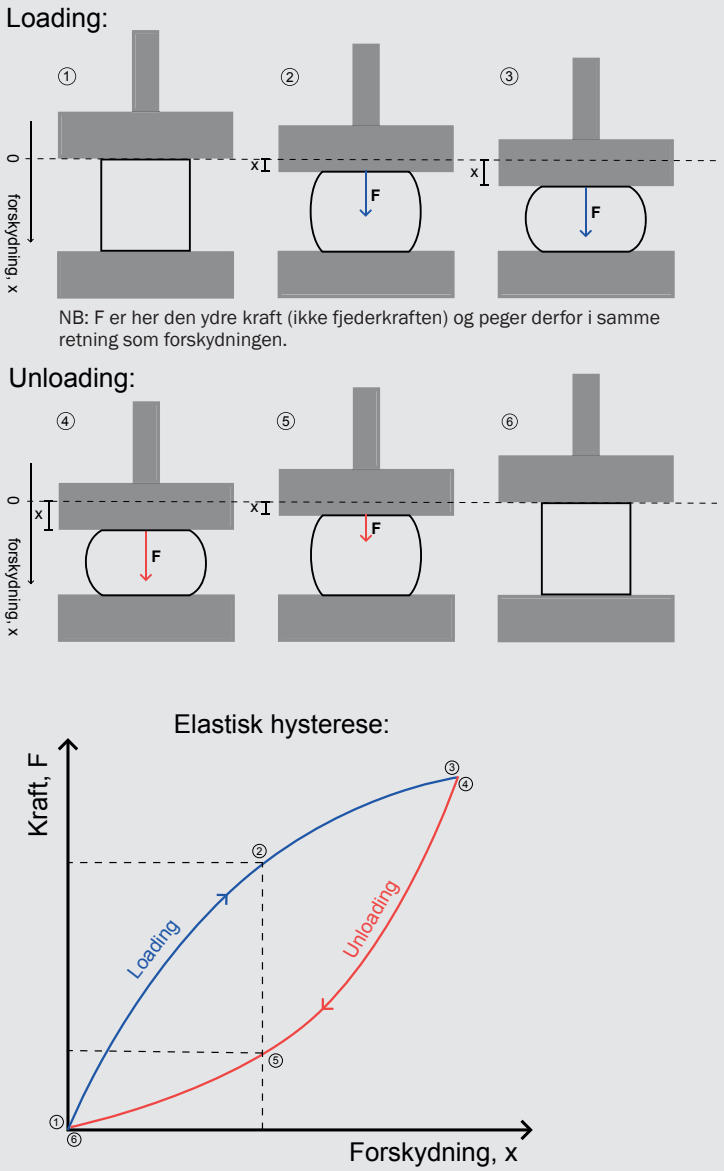
Tromlemetoden går ud på at lade dækket køre på en roterende tromle. Det vil sige, at dækket kommer til at rotere på stedet, drevet af tromlen, der på denne måde agerer en "uendelig" vej. Denne opstilling er ikke pladskrævende og kan udføres i et lukket rum, hvor alle parametre kan kontrolleres. I standard-måleopstillinger bruges en glat ståltromle. Det fungerer fint som standard, men er ikke en særlig realistisk repræsentation af en vej.

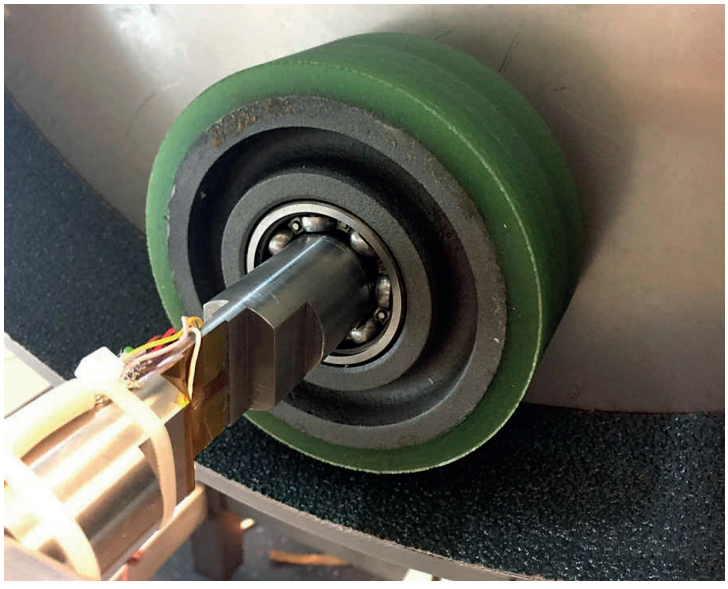
En vejbelægning består i det store hele af sten blandet med bitumen (et restprodukt fra raffinering af råolie), og derfor opstår der naturligt en struktur i overfladen af vejen. Denne struktur er ikke kun til besvær: Den har en også funktion, idet den sikrer, at biler kan bremse på vejen, og den hjælper også med til at lede vand væk fra vejen. En helt glat vej har mindre rullemodstand, men man kan ikke bremse på den!

Mekaniske egenskaber og visko-elasticitet

Når man taler om et materiales mekaniske egenskaber, handler det om, hvordan materialer reagerer på at blive udsat for forskellige typer af deformationer. En fjeder er en model for et elastisk materiale: Fjederen trykkes sammen eller strækkes, når man påtrykker en kraft. Når kraften fjernes, returnerer fjederen til sin oprindelige form. Det kan illustreres med en graf, der viser kraften som funktion af forskydningen. Hvis der er tale om en ideel fj-eder, er der en lineær sammenhæng mellem kraft og forskydning, som vi kalder Hookes lov: $\boldsymbol{F} = -\mathbf{k}\boldsymbol{x}$. $\boldsymbol{F}$ er her fjederkraften.

Gummi-materialer er fjeder-agtige, men ikke som en ideel fjeder. I stedet ser man såkaldt hysterese i forskydning/kraft-grafen, altså at man ikke måler samme kraft ved samme forskydning under påtrykning, som når forskydningen fjernes. Dette skyldes, at der er en "flyde"-komponent, der giver en forsinkelse i materialets reaktion på, at kraften fjernes. Dette er illustreret på den øverste figur. Her ses, hvordan en klods af et materiale deformeres under "loading" (når det påtrykkes en kraft) og under "unloading" (når kraften gradvis fjernes igen). Kraften, der trykkes med, er vist som en kraftvektor – jo længere vektoren er, jo større er kraften. Forskydningen, x, fra ligevægtspositionen er vist til venstre for stemplet. Når materialet først trykkes sammen og dernæst udvides igen, kan man finde en sammenhæng mellem kraft og forskydning. Som det er illustreret på den midterste kolonne er kraften under loading større end kraften under unloading ved den samme forskydning. Dette kaldes med et fint ord hysterese. På den nederste figur ses kurverene for loading og unloading, hvor kraften er plottet som funktion af forskydningen. Tabet af energi ved denne procedure er lig arealet mellem den blå og den røde kurve. Det er fordi det udførte arbejde ved loading er integralet under den blå kurve (arbejdet er "kraft gange vej": $W = \int F dx$), mens den energi, man får igen ved unloading, er arealet under den røde kurve.





Her er et grønt hjul af PUR (polyurethan) monteret som testhjul i rullelab. Hjulet er faktisk et kommercielt palleløfterhjul.
Foto: Morten Lau Larsen

Rullelaboratoriet på RUC

På RUC har vi bygget en nedskaleret tromleopstilling for at undersøge specifikt, hvordan rullemodstanden afhænger af overfladestrukturen (se faktaboks om rullelab). I denne opstilling bruger vi små modelhjul med forskellig gummibelægning i en mindre tromle. Hjulene kører på indersiden af tromlen, hvilket gør det nemmere at montere en belægning, som hjulet kan køre på. Denne opstilling er lidt mindre naturlig i forhold til et rigtigt dæk på en vej, men til gengæld giver den os stor fleksibilitet i forhold til at teste forskellige modeller for,

Rullemodstand

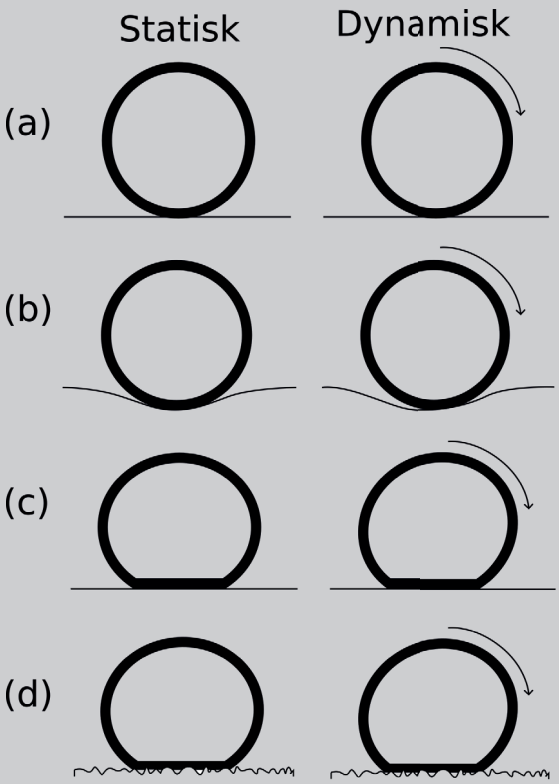
Rullemodstanden er et samspil mellem belastning/vægt, stivhed og deformationshastighed af både dæk og vej (eller mere generelt: rullende objekt og underlag). I figuren ses fire eksempler på kombinationer af disse størrelser. Der er vist både det statiske tilfælde (objektet ligger stille) og det dynamiske tilfælde (når objektet ruller).

(a) Både objekt og underlag er meget stive, og der ses næsten ingen deformation, hverken i det statiske eller dynamiske tilfælde. Et eksempel på dette er toghjul på togskinner.

(b) Objektet er stivere end underlaget (og meget tungt), og objektet synker derfor ned i underlaget. I det statiske tilfælde er "bassinet" under objektet symmetrisk. I det dynamiske tilfælde bliver bassinet asymmetrisk (på grund af underlagets visko-elasticitet, se faktaboks om "Mekaniske egenskaber"), og objektet kører på den måde en anelse "op ad bakke". Denne type vejdeformation ses typisk ved tung trafik.

(c) Underlaget er stivere end objektet, som flader ud i kontaktområdet. I det statiske tilfælde ses igen en symmetrisk deformation, men i det dynamiske bliver deformation asymmetrisk, denne gang på grund af objektets viskoelastiske egenskaber. Denne asymmetri resulterer i et kraftmoment omkring omdrejningspunktet, der virker modsat omdrejningen. Dette er det typiske ved let trafik, fx. personbiler, som ikke er tunge nok til at deformere vejen, men tunge nok til at dækkene deformeres.

(d) Samme situation som (c) men med den ekstra komplikation, at underlaget har en overfladestruktur.



Overfladestrukturen giver større punktvise deformationer på objektet, hvilket typisk giver større tab. Alle veje har en vis overfladestruktur – dels fordi det er svært at undgå, dels fordi overfladestrukturen også sikrer, at man kan bremse på vejen.

I alle tilfælde gælder det, at deformationer typisk afhænger af kørehastigheden. Kørehastigheden bestemmer, hvor hurtigt deformationen sker og ved en hurtig deformation reagerer et viskoelastisk materiale mere stift.

hvilken rullemodstand en givet overfladestruktur resulterer i.

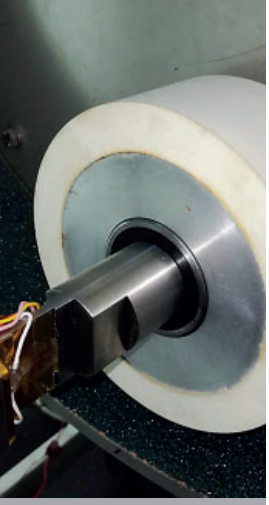
Med vores opstilling har vi undersøgt forskellige overflader systematisk og vist, at de gængse mål for overfladestruktur ikke korrelerer særlig godt med rullemodstanden. Vi har i stedet opstillet en simpel model for sammenhængen mellem overfladestruktur og rullemodstand baseret på fysiske principper. Ideen i modellen er, at når dækket ruller på en ujævn overflade, så er det kun en del af dækkets overflade, der bærer vægten, i stedet for, at vægten er fordelt over en større kontaktflade. Denne simple model forudsiger, at rullemodstanden er omvendt proportional med det overfladeareal, som bærer vægten. Vi har testet modellen for en række idealiserede overflader, hvor netop dette mål er nemt at bestemme og vist, at vores model korrelerer bedre med rullemodstanden end de gængse modeller.

Materialeegenskaber bestemmer energitabet

Hvis vi skal et spadestik dybere i forhold til, hvor rullemodstanden egentlig kommer fra, skal vi se på materialeegenskaber, mere specifikt på materialers mekaniske egenskaber.

Som sagt opstår rullemodstanden ved deformationer under rulning. De mekaniske egenskaber af et materiale bestemmer, hvordan det reagerer på deformationer, dvs. at blive presset sammen eller vredet.

Når der sker et energitab ved deformation af et materiale, skyldes det, at ingen materialer – heller ikke en vej eller et dæk – er helt elastiske. I fysiksammenhæng betyder elastisk noget i retning af "tabsfri" eller "fjeder-agtig", dvs. at al den energi, man putter ind (lagrer) i et materiale ved en deformation, får man igen, når man slipper. Ligesom man kan lagre energi i en



Se ekstra-materialet på web, hvor der regnes på kræfterne i Rullelab. Find det på siden: aktuelnaturvidenskab.dk/find-artikel/nyeste-numre/5-2023/mindre-rullemodstand-på-vejen

fjeder ved at trykke den sammen og udløse energien igen – og for eksempel bruge den til at skubbe en anden genstand – når fjederen udløses. Et princip, der udnyttes i mange typer legetøj.

Et materiale som gummi (eller asfalt) kan man tænke på som bestående af en masse små forbundne fjedre. Hvis man for eksempel lader en hoppebold falde fra en vis højde, hopper den, når den rammer gulvet: Først presses fjedrene sammen ved stødet, og så rettes de ud igen og "sætter af" på gulvet. Hoppebolden når imidlertid aldrig den samme højde, som den startede fra. Det skyldes netop, at en del af dens oprindelige potentielle energi omdannes til varme, når bolden deformerer ved sammenstødet med gulvet. Eller sagt på en anden måde: Den ideelle fjeder findes ikke, og man får aldrig 100 % af energien tilbage.

En dæmper gør modellen bedre

En lidt bedre model for et materiales mekaniske egenskaber inkluderer en dæmper. En dæmper visualiseres ofte ved et stempel i væske, som reagerer ved at flytte sig (flyde) ved en påtrykt kraft. Når kraften fjernes, stopper stemplet. Det vil sige, at den energi, der er puttet ind i stemplet, er "forsvundet" (dissiperet) som varme. Kombinationen af en fjeder og en dæmper er en model, som både er elastisk og flydende (viskøs) og som derfor både kan lagre og dissipere energi.

Denne simple model indfanger tilmed, at hastigheden af deformationen betyder noget: En hurtig deformation fører til et mere elastisk respons. Hvis vi vil minimere rullemodstanden i et dæk, skal de mekaniske egenskaber af dækket optimeres, således at tabet er mindst muligt ved den typiske kørehastighed.

Fjeder-dæmper modellen er en klassisk model for visko-elastiske materialer kendt som Maxwell-modellen (fra 1867). Modellen beskriver kvalitativt, hvordan visko-elastiske materialer såsom gummi og asfalt opfører sig. Virkeligheden er selvfølgelig mere kompliceret, og det er derfor nødvendigt at kunne måle disse egenskaber præcist for forskellige materialer for at vide, hvordan de faktisk opfører sig ved forskellige hastigheder og temperaturer.

Når dækfirmaer optimerer deres produkter, udnyttes viden om sammenhængen mellem de mekaniske egenskaber af gummimaterialet og det færdige dæks egenskaber. Det er langt nemmere og hurtigere at måle et materiales mekaniske egenskaber, end det er at bygge et helt dæk for at teste det. Derfor er præcise målinger af mekaniske egenskaber en vigtig faktor i udviklingen og optimering af dæk.

Mere præcise målinger af materialegenskaber

Sådanne målinger udføres oftest med et såkaldt rheometer, som er et instrument, der kan trykke eller vride et materiale klemt sammen mellem to skiver. Som nævnt er et visko-elastisk materiales egenskaber afhængig af, hvilken tidsskala man betragter: Hurtige deformationer giver en elastisk opførsel, mens langsommere deformationer leder til en mere viskøs opførsel.

For at kortlægge et materiales viskoelastiske egenskaber er det nødvendigt at måle et spektrum, dvs. måle ved mange forskellige frekvenser (hvor frekvensen er antallet af gange, materialet deformeres per sekund) så det kobles til deformationshastighed (hvor frekvensen er antallet af gange, materialet deformeres per sekund, og dermed hvor hurtigt materialet deformeres). Problemet med den gængse metode er, at den øvre frekvensgrænse er omkring 100 Hz (dvs. 100 deformationer per sekund). Dette er noget mindre, end de relevante frekvenser, som ligger mellem 1.000 Hz og 100.000 Hz.

Traditionelt har man brugt disse rheometer-målinger ved lavere frekvenser til at forudsige, hvordan egenskaberne af gummiet er ved højere frekvenser. Men selv om dette naturligvis er et kvalificeret gæt, er det netop et gæt. Det vil selvsagt være meget bedre, hvis man kunne måle direkte ved de relevante frekvenser. Gennem et ph.d.-projekt i samarbejde med Continental Dæk har vi videreudviklet en unik metode til at gøre netop dette.

To ting adskiller sig i den nye metode: måleprincippet og størrelsen på målecellen. Lad os tage det sidste først: Størrelsen af målecellen betyder noget for, hvor højt vi kan gå op i frekvens. Når vi rammer instrumentets egenfrekvens, kan vi ikke længere få meningsfulde målinger, fordi det går i "selvsving". Og jo mindre selve målecellen er, jo højere er egenfrekvensen. Tænk for eksempel på, at en stor tromme giver en dybere lyd (altså en lavere frekvens) end en lille tromme, når man slår på dem. Et almindeligt rheometers egenfrekvens er omkring 100 Hz, mens vores målecelles egenfrekvens er 100.000 Hz – altså 1000 gange højere.

Måleprincippet er også helt anderledes, idet vi bruger såkaldte piezo-elektriske skiver til at generere forskydninger i gummiet ved at sætte spænding på dem. Ved hjælp af en matematisk model kan vi oversætte det elektriske signal til mekaniske stivheder. Målemetoden blev udviklet på RUC til at måle på underafkølede væsker for næsten 30 år siden. Nu findes metoden også i Continentals forsknings- og udviklingsafdeling.

Gennem vores forskning og samarbejder med Vejdirektoratet og Continental har vi således været med til at danne en grundlæggende forståelse og et fundament for den videre udvikling af veje og dæk med minimal rullemodstand. Det giver mindre energiforbrug ved kørsel og dermed mindre udledning af CO_2. Og selv om besparelsen ikke er stor for den enkelte bilejer, kan det godt blive til meget for den samlede trafik. ■



Kom og oplev din kommende
uddannelse til u-days

22.- 24. februar 2024

AARHUS
UNIVERSITET

study
with
Aarhus

u-days



PÅ JAGT EFTER METHAN-VENTILEN I VERDENS SØER

Ørnsø ved Silkeborg
Foto: Jens Cederskjold/
CC BY 3.0 Deed

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.

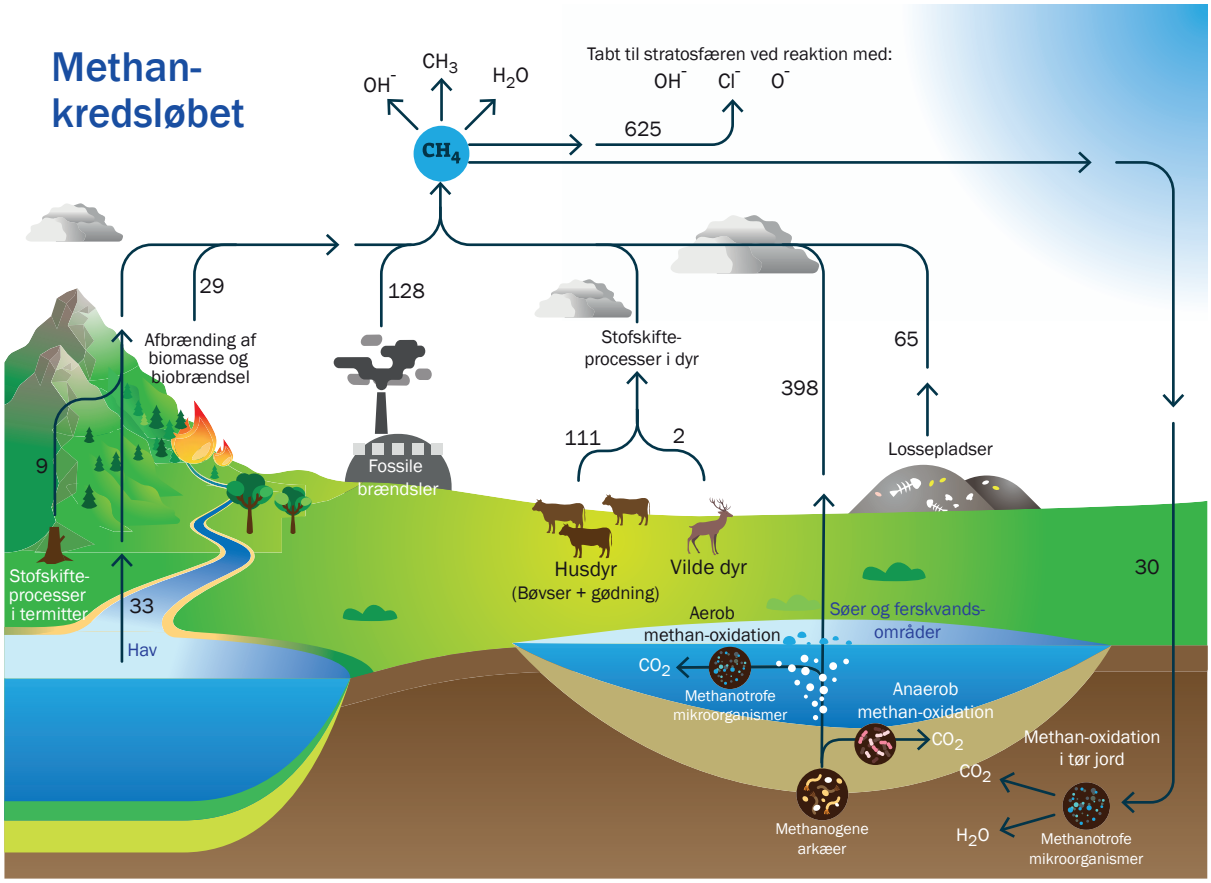
Danmarks Frie Forskningsfond dækker alle videnskabelige hovedområder og uddeler hvert år godt 1 mia. kr. til forskningsprojekter baseret på forskernes egne ideer. Danmarks Frie Forskningsfond består af 84 anerkendte forskere udpeget på baggrund af deres høje faglige kompetence. Formand for Danmarks Frie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

Ferskvandssøer og vådområder er de største bidragydere til drivhusgassen methan i atmosfæren, men det er endnu uklart, hvad der egentlig styrer, hvor meget methan der sendes fra søbunden mod himlen. Det skal danske forskere nu finde ud af, og forskningen kan få betydning for de modeller, der skal forudsige fremtidens klima.

Alle, der har dristet sig til at gå på bare fødder ud i en dansk sø, ved, at det bobler op fra søbunden med noget, der ligner luftbobler. Disse bobler består dog ikke af ilt, men af blandt andet drivhusgassen methan (CH_4), som bliver dannet i søbunden, bobler op mellem tæerne på den, der vover sig ud i søen, inden de rammer vandoverfladen og stiger mod himlen. I atmosfæren bidrager methan til global opvarmning, hvor methan er 25 gange mere potent som drivhusgas sammenlignet med CO_2.

Nuvel, at en dansker træder et par skridt ud i Arresø kommer ikke til at vælte den globale klimabalance, men Arresø er heller ikke den eneste ferskvandssø, hvorfra der bobler methan op. Det gælder alle verdens 117 millioner ferskvandssøer, og det gør dem og andre ferskvandssystemer til den samlet set største bidragyder af methan til atmosfæren. Når køer tygger drøv og bøvser methan, eller når der bliver trukket naturgas op fra undergrunden, kommer det ikke i nærheden af at skabe lige så stor en klimaeffekt.

Atmosfærens indhold af methan er tredoblet siden industrialiseringen, og det har resulteret i et ikke ubetydeligt bidrag til de klimaforandringer, som vi fornemmer i dag, og som vi kommer til at mærke den fulde effekt af i de kommende år. I modsætning til CO_2, som vi efterhånden har ret godt styr på, er verdens klimaforskere dog stadig i tvivl om, hvad der har drevet stigningen i koncentrationen af methan i atmosfæren, og om det kommer til at stige yderligere i fremtiden, samt hvad det vil betyde for klima, biologi og mennesker.



Figur modificeret efter forlæg fra Shutterstock. Tal efter Rosentreter, J.A. et al: 2021 og Saunois, M. et al: 2020.

Figuren viser de væsentligste kendte kilder til udledning af methan til atmosfæren. Tallene angiver den omtrentlige årlige udledning i millioner tons (bemærk, at der er store usikkerheder på disse tal). Methan forsvinder fra atmosfæren ved reaktioner i stratosfæren, mens methanotrofe mikroorganismer i jorden omsætter en del methan i deres stofskifteprocesser. I søen kan man se, hvordan en del af den producerede methan forsvinder igen ved anaerob oxidation af mikroorganismer i søbunden. Det er denne proces, Bo Thamdrup er særligt interesseret i.

Dette hul i forskningsverdenens kollektive viden har danske forskere nu tænkt sig af fylde ud.

»Når nu ferskvandssystemer er den største bidragyder til methan i atmosfæren, og vi kan se, at koncentrationen af methan ændrer sig, gør det os interesseret i at finde ud af, hvad der sker på det mekanistiske niveau i søerne, når de frigiver methan. Det vil fortælle os noget om, hvad vi kan forvente i fremtiden, og om vi kan gøre noget ved det,« fortæller professor Bo Thamdrup fra Biologisk Institut ved Syddansk Universitet. Bo Thamdrup har modtaget en millionbevilling fra Det Frie Forskningsråd til at blotlægge ferskvandssystemernes methan-hemmelighed.

Ferskvandssøer vælter methan ud i atmosfæren

Der kan være mange forklaringer på, at verdens ferskvandssystemer muligvis har afgivet mere methan til atmosfæren de seneste 150 år end de foregående 10.000. Mange af disse forklaringer kan skyldes menneskers aktiviteter, når vi for eksempel gøder vores marker, og det leder til større kvælstofbelastning i søerne, eller når vi i forbindelse med dæmninger laver store kunstige søer. Rismarker er også ferskvandssystemer, som formentlig bidrager en hel del til udledning af methan. I alt står ferskvandssystemer for godt halvdelen af verdens methanudledning.

Forskere har rent faktisk godt styr på, hvordan methan bliver dannet i søerne. Det sker, når nogle mikroorganismer kaldet methanogener omsætter organisk stof i sedimenterne. I processen med at lave flere mikroorganismer ud af organisk materiale i sedimenterne bliver der som biprodukt dannet methan, der starter med at ligge som lommer af sumpgas i sedimentet, indtil en



Foto: Jesper Fried Vive

Om Bo Thamdrup

Bo Thamdrup er udannet biolog fra Aarhus Universitet, hvor han også skrev sin ph.d., inden han drog til Tyskland for at forske ved Max-Planck-Institut für Marine Mikrobiologie. I dag er han professor ved Biologisk Institut på Syddansk Universitet, hvor han særligt interesserer sig for mikrobiel økologi og globale stofkredsløb.

Sådan bliver methan dannet i søbunden

Methanogenesen er den biokemiske proces, hvor methan (CH_4) dannes som et slutprodukt ved nedbrydning af organisk materiale. Denne komplekse proces udføres af methanproducerende arkæer og involverer flere trin.

Figuren viser overordnet den komplicerede reaktionsvej, der danner methan ud fra CO_2 og hydrogen (H).

Det første trin i denne proces involverer reduktionen af CO_2 til en forløber kaldet formylmethanofuran. Dette trin er et afgørende skridt, da det skaber en reaktiv mellemliggende forbindelse, der kan omdannes til methan. Derefter bliver formylmethanofuran omdannet til methan ved hjælp af hydrogen som en elektron- og protonkilde. Dette sker gennem flere mellemtrin, hvor forskellige enzymer og coenzymer ("hjælpeforbindelser") er involveret, inklusive coenzym M (CoM) og coenzym B (CoB), der fungerer som transportører af elektroner og protoner.

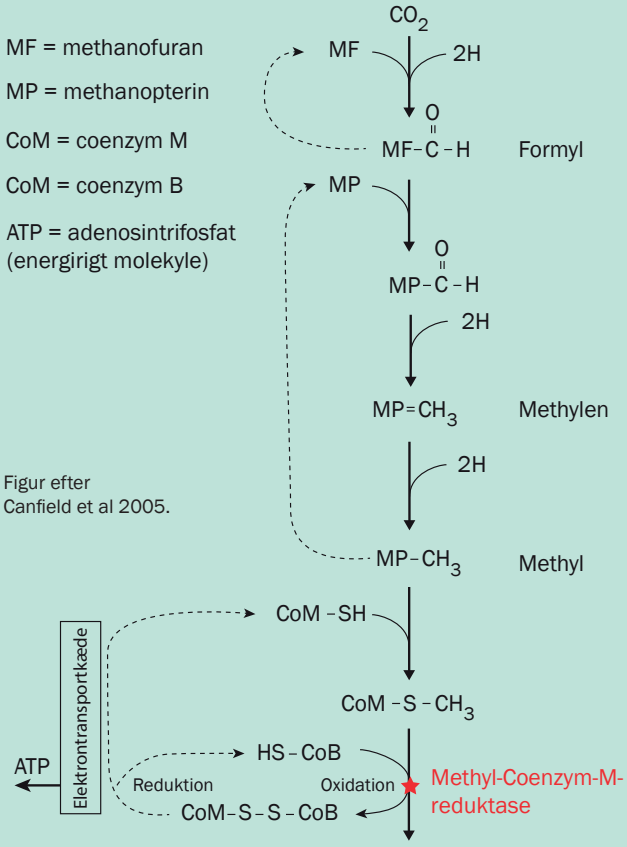
Det sidste trin i reaktionen (markeret med en rød stjerne) er katalyseret af et enzym kaldet methyl-CoM-reduktase, der er et nøgleenzym i methanproducerende arkæer.

Methanogenesen kan også involvere omdannelsen af acetat (CH_3COO^-) til methan og CO_2. Også denne såkaldt "acetoklastiske methanogenese" udføres af methanproducerende arkæer og involverer flere enzymer og komplekse biokemiske processer.

Arkæernes udbytte af methanogenesen er hverken methan eller vand, men derimod energi, som de kan bruge til vækst.

Methanogenesen er en strengt anaerob proces, hvilket betyder, at den kun finder sted i miljøer uden oxygen. Derudover er det en del af den naturlige cyklus for carbon i akvatiske økosystemer og spiller en vigtig rolle i

MF = methanofuran
MP = methanopterin
CoM = coenzym M
CoM = coenzym B
ATP = adenosintrifosfat (energirigt molekyle)



Figur efter Canfield et al 2005.

nedbrydningen af organisk materiale og methanproduktionen i vådområder som søer, sumpe og moser.

I drøvtyggeres fordøjelsessystemer, for eksempel hos køer, hjælper methanproducerende arkæer med at fjerne H_2 i nedbrydningen af komplekse planterester, udvinde energi fra processen og bidrage til, at processerne forløber. Denne symbiotiske relation mellem dyr og mikroorganismer er afgørende for dyrenes fordøjelsesprocesser og har en indirekte indvirkning på methankoncentrationen i atmosfæren.

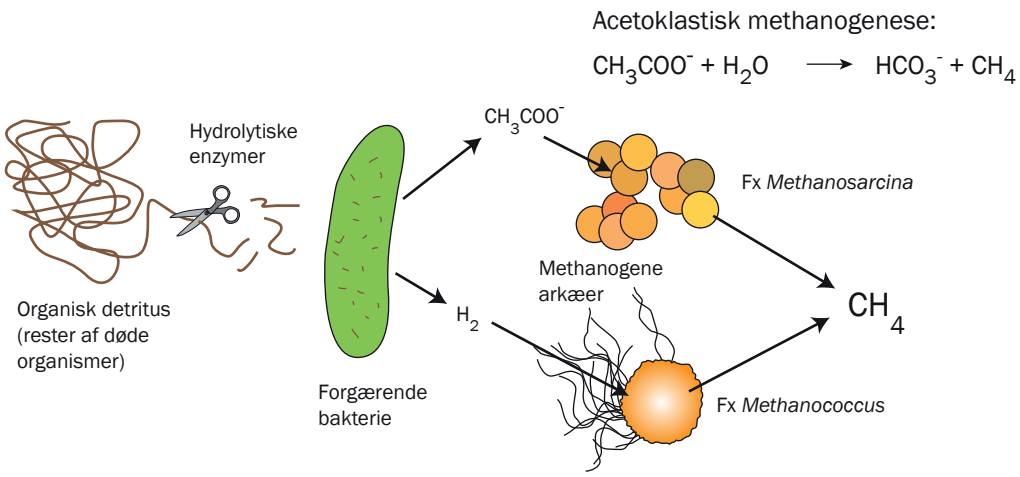
fod, en klov eller en pote slipper det fri.

At der bliver dannet methan i ferskvand og ikke saltvand skyldes meget simpelt, at der faktisk ikke er så mange andre muligheder for organisk materiale i søer at blive nedbrudt på. I saltvand findes der meget sulfat, og her står sulfatbakterier for at nedbryde organisk stof. Sulfatbakterier producerer ikke methan. Det gør til gengæld methanogenerne, som i deres livscyklus nedbryder organisk materiale og undervejs danner gasserne methan og CO_2. Gasserne bliver frigivet til atmosfæren.

»Denne proces, hvor organisk materiale bliver omdannet til methan og CO_2, foregår overalt, hvor forholdene er til det. Selve processen foregår også i biogasanlæg, så den er rimelig velundersøgt, og det samme er arkæernes (bakteriernes) aktiviteter. Derfor ved vi også, at jo varmere det bliver, des mere aktive bliver disse mikroorganismer, og jo mere methan vil de producere. Det er en ond cirkel, som vi ikke rigtig kan gøre noget ved, og det bliver kun værre, i takt med at temperaturerne på kloden stiger,« forklarer Bo Thamdrup.

Mikroorganismer æder 90 % af det producerede methan

Methanogenerne er kun en del af den ligning, som er afgørende for den samlede udledning af methan fra ferskvandssystemer. En anden del af ligningen er en type af



Figuren viser, hvordan methandannelsen foregår ud fra rester af organismer (detritus) i søbunden. Selve methandannelsen foregår i methanogene arkæer i et iltfrit (anaerobt miljø), men disse arkæer er afhængige af hydrogen eller acetat til processen. Disse leveres af forgærende bakterier, der først har nedbrudt plantematerialet.

bakterier, som rent faktisk lever af methan og er i stand til at trække energi ud af gasarten, ligesom man kan trække energi ud af biogas. Man har kendt til disse bakterier i 100 år og studeret dem intenst. Denne forskning viser blandt andet, at bakterierne skal bruge ilt for at omdanne methan til noget andet, og her opstår problemet. Der findes nemlig ikke ilt i søbunden, hvor metanogenerne lever, og hvor methanen bliver produceret. Derfor spiller de bakterier, som lever af methan, nok ikke den store rolle i det samlede methanregnskab. Her kommer der dog et "men"...

»Vi har fundet ud af, at der dybere i sedimentet også findes andre mikroorganismer, som kan omsætte methan uden brug af ilt. Det er disse mikroorganismer, som er fokus i vores projekt, fordi de rent faktisk kan have betydning for, hvor meget methan der bliver frigivet fra søbunden,« siger Bo Thamdrup.

Forskernes indledende undersøgelser i Ørnsø ved Silkeborg viser, at disse mikroorganismer er i stand til at fjerne op imod 90 procent af den methan, som methanogenerne producerer. De kan med andre ord være essentielle for, at verden ikke bliver gasset til af methan med den dertilhørende uoverskuelige påvirkning af atmosfæren, klimaet og livet på Jorden.

»Disse indledende undersøgelser rejser en masse spørgsmål, som vi er nødt til at få besvaret, hvilket er sigtet med dette forskningsarbejde. Er det normalt, at disse mikroorganismer fjerner så meget methan fra sedimentet, og foregår det også på samme måde i andre søer og i andre lande? Vi er også nødt til at vide, hvilke betingelser der understøtter fjernelsen af methan fra søbunden, og om disse betingelser ser ud til at ændre sig i fremtiden,« forklarer Bo Thamdrup.

Måske skal unikke forhold være til stede for at fjerne methan

I forskningsarbejdet skal Bo Thamdrup med sine kollegaer angribe problemstillingen fra alle tænkelige vinkler. Første mål er naturligvis at undersøge, om de methanspisende mikroorganismer også fjerner op imod 90 procent af methanen i andre danske søer. Forskellige søer har forskellige kemiske og fysiske forhold, som muligvis kan påvirke vilkårene for de mikroorganismer, som lever i søbunden. For eksempel kan vandets surhedsgrad være anderledes, der kan være forskel på tilførslen af næringsstoffer som nitrogen og fosfor og deraf følgende algevækst (eutrofiering), søens dybde, mængden af organisk materiale, og så kan indholdet af jernforbindelser eller sulfat være forskelligt med betydning for de mikrobiologiske processer i søbunden. For eksempel er Ørnsø kendetegnet ved et højt indhold af jern, idet Funder Å, der løber ud i Ørnsø, leder en masse okker ud i søen, og når det bundfælder sig, bliver sedimentet fyldt med jernforbindelser.

»Vi har en idé om, at det kan spille ind i mikroorganismernes liv, men det skal vi undersøge i både søerne og i laboratoriet,« fortæller Bo Thamdrup.

Forskerne vil blandt andet indsamle prøver fra søerne for både at undersøge det mikrobielle samfund i søbunden og dets kapacitet for at danne methan og omdanne det til biomasse og CO_2, hvilket sammenlignet med methan er en svagere drivhusgas. Det gør forskerne i laboratoriet ved at tilføre isotopmærket methan til sedimentprøverne og følge, hvad der bliver af methanen, og hvordan det bliver omsat. Bliver det i store mængder indarbejdet i det

DANMARKS FRIE FORSKNINGSFOND
INDEPENDENT RESEARCH FUND DENMARK

Søer, søer og atter søer

Der findes i verden flere end 117 millioner søer, som samlet set dækker 3,7 procent af klodens landoverflade. De fleste af søerne er dog relativt små og ikke større end et par fodboldbaner. Det gælder 90 millioner af dem, hvor man på en god dag kan kaste en sten fra den ene bred til den anden. Langt de fleste søer ligger også relativt tæt på havets overflade, idet 85 procent findes i en højde på under 500 meter. De kan dog også findes meget højere oppe i landskabet. Den højest placerede sø er Ojos del Sadado på grænsen mellem Chile og Argentina 6.290 meter over havets overflade. Der vokser ingen planter i søen, men forskere har identificeret mikroorganismer, som kan tåle både salt, kulde og syre i det gamle vulkankrater.



Foto: NASA

Great lakes på grænsen mellem USA og Canada rummer ca. 20 % af verdens ferskvand.

Verdens største sø er Bajkalsøen i Rusland, som indeholder 20 procent af verdens ferskvand og rummer næsten 23.000 km^3 vand. Søen er samtidig 1.741 meter dyb og dermed verdens dybeste. Samlet rummer Great Lakes på grænsen mellem USA og Canada cirka 20 procent af verdens ferskvand, men fordelt på flere søer. Den næst dybeste sø i verden er Tanganyikasøen, som samtidig er verdens længste med en længde på hele 660 kilometer. Finland kaldes i folkemunde for de tusinde søers land, og det er meget passende med 187.000 søer i landet. Det blegner dog i forhold til Canadas to millioner søer.

Den store variation i verdens søer kommer også med en stor variation i fysiske forhold, kemi, biologi og mikrobiologi. Om disse forhold er nok til at have betydning for udledning af methan fra søerne, skal Bo Thamdrups forskningsarbejde vise.

Variationen er knap så stor blandt Danmarks 120.000 søer, hvoraf de fleste er ganske små. Danmarks største søer er Arresø og Esrum Sø, der begge ligger i Nordsjælland. Fælles for de fleste danske søer er, at de blev dannet i forbindelse med, at isen fra den seneste istid trak sig tilbage og efterlod store isklumper i landskabet. Isklumperne trykkede ikke bare landskabet ned og lavede fordybninger, men fyldte efterfølgende også hullerne op med smeltevand.

Der kan være stor forskel på de kemiske forhold i de danske søer. For eksempel indeholder søer i Jylland generelt mere sulfat, da Jylland i større udstrækning består af gammel havbund, der har et naturligt højere niveau af sulfat end andre former for jordbund. Søer, som ligger nær landbrug, har også ofte et højere indhold af kvælstof. Søer, der får vand fra åer og vandløb, har generelt højere koncentrationer af det, som kommer opstrøms fra vandløbet, om det så er jern eller andre mineraler.

mikrobielle miljø, er det et tegn på, at der er godt gang i de methanelskende mikroorganismer, men hvis det derimod bare stiger til vejrs, er aktiviteten af de methanspisende bakterier ikke så høj.

Forskerne undersøger også, hvilken dybde processerne foregår i. Det gør de ved at undersøge methanomsætningen i forskellige lag af deres sedimentprøver.

En del af forskningsarbejdet går også ud på at karakterisere de mikroorganismer, som står for methanbalancen. Til det formål benytter forskerne genetiske sekventeringsmetoder, hvormed de kan karakterisere alle relevante mikroorganismer. Disse sekventeringsundersøgelser giver også forskerne et indblik i de gener, som er ansvarlige for omdannelsen af methan til noget andet.

»Når vi har fået kortlagt alt det, skal vi også undersøge, hvad der sker, når vi ændrer på de kemiske og fysiske forhold i prøverne. Hvad sker der, når vi ændrer ved surhedsgraden eller mængden af jern i vandet? Hvad har det af betydning for omsætningen af methan? Det vil også her være interessant at se, hvad vi kan gøre for at stimulere processen yderligere. Her kan vi få indsigt i, hvad vi muligvis kan gøre i søer for at øge omsætningen af methan og dermed mindske frigivelsen af drivhusgassen til atmosfæren,« siger Bo Thamdrup.

Muligt samarbejde mellem mikroorganismer

Endelig er det sigtet med forskningsarbejdet, at forskerne skal kortlægge den enzymatiske processer, som mikroorganismer-

DANMARKS FRIE FORSKNINGSFOND
INDEPENDENT RESEARCH FUND DENMARK

ne benytter sig af, når de skal omdanne methan. Bo Thamdrup fortæller, at methan helt generelt er et svært molekyle at splitte ad, men at der er energi i det for de mikroorganismer, som kan finde ud af det. Det kræver dog, at der først tilføres energi for at sætte gang i processen.

Fra bakterier i havbunden ved forskere, hvordan det er muligt for mikroorganismer at udnytte energien i methan, men det kan ikke nødvendigvis overføres til ferskvandsmiljøet. Faktisk er det muligt, at processen ikke kan udføres af én art alene, men at den kun kan udføres af typer mikroorganismer i fællesskab.

Kortlægningen af de enzymatiske processer i omdannelsen af methan kan give forskerne en fornemmelse af, om nogle miljøændringer i fremtiden kan bremse processen og dermed lede til større udledning af methan fra søer, eller om miljøændringer måske i stedet kan fremme processen. Det kan dreje sig om højere temperaturer eller større udledning af forskellige stoffer til søer som følge af øget nedbør.

»Vi vil med dette projekt skabe indsigt i, hvordan dette filter for methanudslip responderer på for eksempel klimaforandringer. Noget kan påvirke filteret negativt, mens andet kan være positivt. Man kunne forestille sig, at øget nitratudledning fra landbrug kan være med til at holde methanudledningen i skak, da nogle af disse organismer i søbunden bruger nitrat som elektronreceptor, men vores foreløbige resultater tyder dog på, at det ikke er tilfældet,« forklarer Bo Thamdrup.

Skal med i avancerede klimamodeller

Bo Thamdrup mener, at de opdagelser, som bliver gjort i forskningsarbejdet, kan komme til at påvirke den måde, som vi forvalter ferskvandsområder på. Opdager forskerne, at forvaltningspraksis ændrer på nogle af de processer, som viser sig at være vigtige for methanudledningen, kan det give anledning til at se på, om praksis skal justeres for ikke at lede til øget methanudledning. Det omvendte kan også være tilfældet.

Efter forskerne har fået kortlagt de danske søer og omdannelsen af methan i dem, er det også målet at bekræfte fundene i søer rundt om i verden, hvor forholdene muligvis er anderledes, men hvor de samme processer formentlig styrer både de mikroorganismer, som producerer methan, og dem, der spiser det igen, inden det bliver frigivet til atmosfæren.

»Ultimativt skal vores resultater indgå som en lille brik i de store matematiske modeller, der prøver at komme med så præcise bud på fremtidens klima som muligt. I den sammenhæng spiller methan en rolle, og derfor gør både de methanproducerende og de methanspisende mikroorganismer det også. Forståelsen af dem og det, som de laver, er en lille brik i det store puslespil, men det er en vigtig brik at få på plads for at få et fuldstændigt billede,« siger Bo Thamdrup. ■

Videre læsning:
Canfield, D.E., E. Kristensen, and B. Thamdrup (2005): *Aquatic Geomicrobiology.* Elsevier Academic Press

Saunois, M. et al: 2020: *The Global Methane Budget 2000–2017.* Earth System Science Data. Vol. 12, iss. 3 ESSD, 12, pp 1561–1623.

Rosentreter, J.A. et al: 2021: *Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources.* Nature Geoscience, 14, pp 225-230.

KOM I LABORATORIET PÅ ROSKILDE UNIVERSITET OG FÅ RESULTATER MED HJEM TIL DIN SRP/SOP

Hvis du skriver dit studieretningsprojekt inden for **Biologi, Bioteknologi, Fysik, Kemi** eller **Matematik**, så har du mulighed for at komme i laboratoriet på Institut for Naturvidenskab og Miljø på Roskilde Universitet og få resultater med hjem til dit projekt

Vores øvelser lægger op til, at du arbejder med din egen faglige vinkel, men du vil sammen med andre gymnasieelever fra hele landet lave eksperimenterne i laboratoriet med undervisning af Roskilde Universitets forskere på dagen.

Med øvelserne får du:

Adgang til den nyeste forskning på området
Adgang til vores professionelle udstyr og laboratorier
Sparring med en forsker fra Roskilde Universitet på dagen
Inspiration til litteratur, hvor du kan benytte Roskilde universitetsbibliotek.

SRP/SOP-øvelserne ligger i uge 9 og i uge 44 2024
Læs mere og tilmeld dig via QR-koden.
Næste tilmeldingsfrist er den 16. februar.

RUC



Moderne fisketrawlere kan hurtigt fange store mængder af fisk, og på den måde true ikke bare enkelte fiskearter, men også hele økosystemer med kollaps.
Foto. Shutterstock

OPLEVER VI EN MENNESKESKABT SJETTE MASSEUDDØEN?

Jordens geologiske lag bærer spor af mindst fem episoder af masseuddøen af arter i fortiden. Flere forskere mener, at mennesket har startet den sjette masseuddøen. Forfatterne ser i denne artikel nærmere på dokumentationen for den påstand.

Tal for hvirveldyr og planter peger på, at arter typisk uddøde i et 100-200 gange højere tempo i 1900-tallet i forhold til baggrunden under rolige perioder i fortiden. Nordamerikanske og europæiske ferskvandsfisk uddøde endnu hurtigere. Med sådanne hastigheder vil 75% af disse ferskvandsfisk fremover kunne forsvinde på få tusinde år, hvilket kvalificerer til betegnelsen "en menneskeskabt masseuddøen". Ovenikøbet er der ikke levnet plads til natur, som kunne gøre det muligt for nye arter at dukke op til erstatning for dem, som forsvinder. I denne artikel ser vi nærmere på tallene for arters uddøen og konsekvenserne for fremtiden.

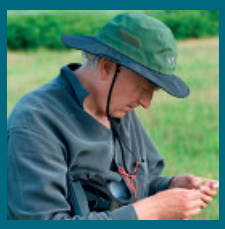
Arters uddøen under rolige perioder og katastrofer

Ingen arter lever evigt. Men under rolige perioder i Jordens udvikling uddøde de fleste arter ganske langsomt efter en gennemsnitlig levetid på mellem 0,7 og 7 millioner år. Inden arterne forsvandt, kunne de have givet ophav til modificerede afløsere, eller der opstod nye artstyper med markant anderledes tilpasninger og levevis. Det er så differensen mellem tempoet for artsdannelse og uddøen, der afgør om artsantallet stiger, er konstant eller falder.

Vores viden om den langsigtede artsdannelse og uddøen over årmillioner stammer især fra studier af døde dyr og planter, som sank til bunds i havområder og søer og blev bevaret som fossiler i klipper. Deres alder kan dateres med radioaktive isotoper. Andre fossiler findes i asfaltsumpe, mosetørv, rav og størknet mudder.

Smukkest tager udviklingen sig ud, når fossile arter forsvinder og nye arter dukker op i regelmæssige kronologiske lagserier. Særligt berømte er danske kalkklinter ved for eksempel Stevns, der dækker perioden fra slutningen af Kridttiden og ind i den efterfølgende

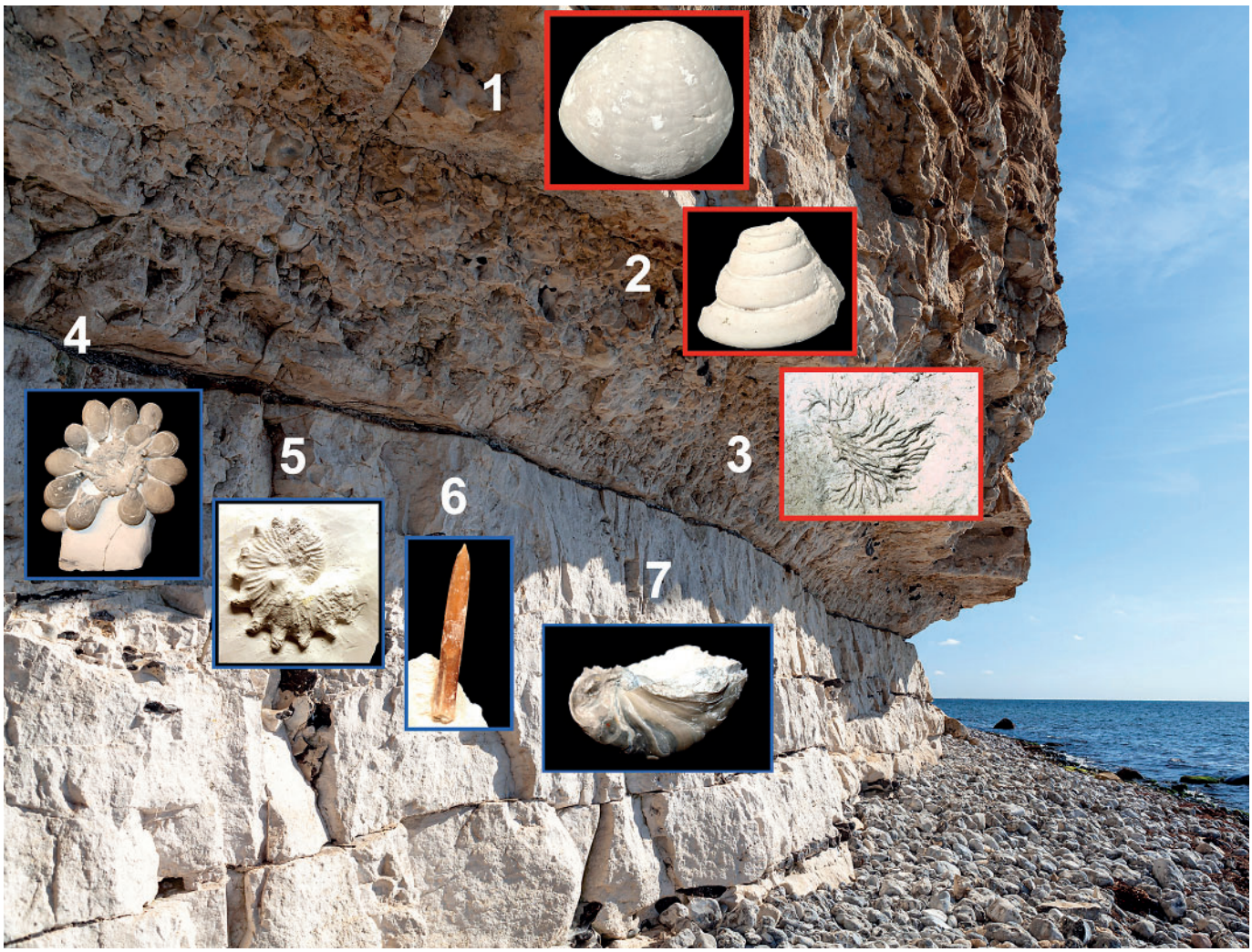
Om forfatterne



Kaj Sand-Jensen er professor i ferskvandsøkologi ved Biologisk Institut, Københavns Universitet.
ksandjensen@bio.ku.dk



Peter Wiberg-Larsen er ph.d. i ferskvandsbiologi og emeritus fra Aarhus Universitet.
pwl@ecos.au.dk.



Stevns Klint med den berømte mørke horisont med lerlaget (kaldet fiskeleret på Stevns Klint), som skiller det underliggende, fine hvide lag fra Kridttiden fra det øvre, yngre lidt grovere lag fra Palæogen. Der skete markante ændringer i såvel mikroskopiske som de viste karakteristiske større fossiler i overgangen.

De viste fossiler fra Palæogen er: 1. Echinocorys (søpindsvin), 2. Leptomaria (snegl), 3. Cyclostomata (mosdyr), mens de ældre fossiler fra Kridttiden er: 4. Tylocidaris (søpindsvin), 5. Ammonit, 6. Belemnit, 7. Pycnodonte (musling).

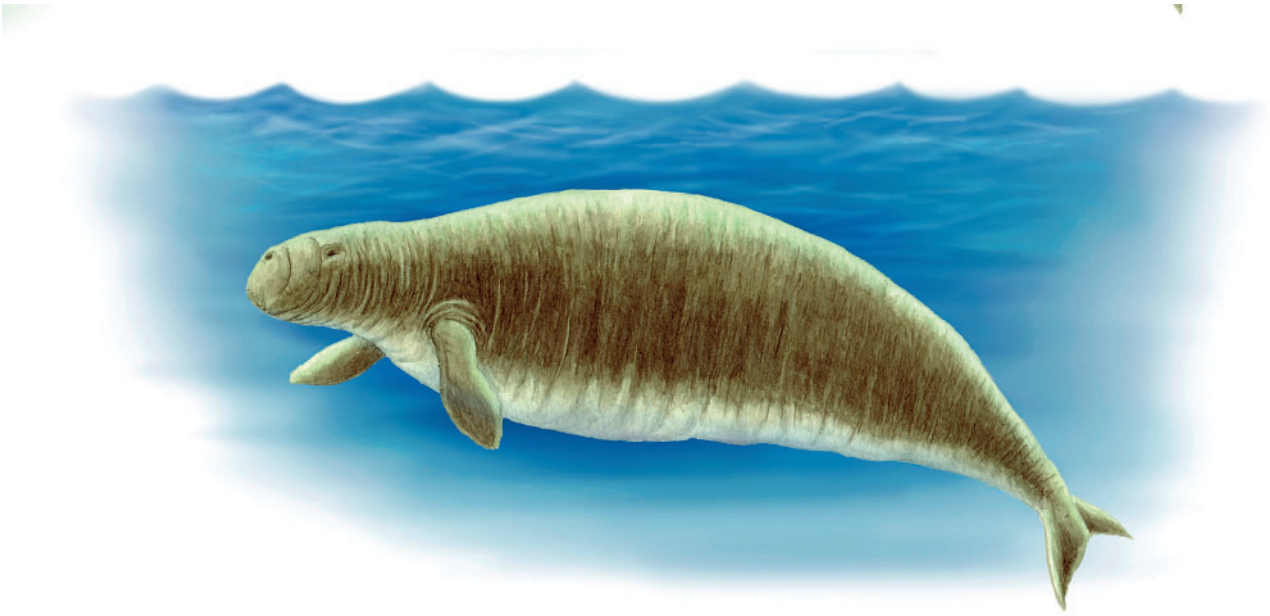
Foto af Stevns Klint: Michael Bille; fotos af fossiler: Jesper Milàn, Geomuseum Faxe.

Palæogen-tid. De marine mikroalger beklædt med fine kalkskaller, der dannede skrivekridtet i Kridttiden, sammen med de smådyr, der havde levet af dem, afløses efterhånden af nye arter i Palæogen-tiden.

Overgangen mellem de to tidsperioder skete brat og markeres af et fossilfattigt, mørkt lerlag, som findes i adskillige danske og udenlandske lokaliteter. Lerlaget har et stærkt forhøjet indhold af iridium, som er et sjældent grundstof på Jorden, men har et højt indhold i visse meteoritter. Ifølge teorien bragede en asteroide med en diameter på 10 km for 65,5 millioner år siden ind i Jorden ved det, der i dag er Yucatan-halvøen i Den Mexicanske Golf. Nedslaget udløste en verdensomspændende katastrofe, som formentlig var årsagen til den seneste af fem store globale episoder af masseuddøen i Jordens historie. Flere end 75 % af marine arter, der efterlader sig genkendelige fossiler, forsvandt på grænsen mellem Kridttiden og Palæogen-tiden, hvilket er definitionen på en masseuddøen.

Nedslaget af kæmpeasteroiden skete måske ovenikøbet på et kritisk tidspunkt i Jordens historie. For i de forudgående 0,3 millioner år havde den indiske landmasse bevæget sig over en stor aktiv vulkan, der havde forurenet atmosfæren med sod og gasser og sat Jordens økosystem under pres.

Tilsvarende analyser af lagserier fastlægger de fire tidligere perioder med masseuddøen af arter gennem Jordens seneste 550 millioner år. Ud over den femte masseuddøen, der afsluttede Kridttiden, så er de bedst undersøgte den tredje og allerstørste masseuddøen ved overgangen fra Perm til Triastiden for 252 millioner år siden, hvor man regner med at 70-95 procent af alle arter på Jorden uddøde, og en mindre masseuddøen ved overgangen fra Trias til Juratiden for 201 millioner år siden. De blev formentlig begge udløst af intensiv vulkansk



Tegning af Stellers søko, der tidligere levede langs kysterne i det nordlige Stillehav. Hovedet var lille, kroppen op til 9 meter og vægten voldsomme 8-10 tons. Da den blev opdaget i 1741, fandtes den kun ved Kommandør-øerne i Beringshavet. Bestanden var i aftagen, formodentlig fordi den havde hård konkurrence fra søpindsvin, der spiste samme føde som søkøerne (fastsiddende rød- og brunalger). Søpindsvinenes antal kontrolleres af havoddere, som blev nedlagt i stort antal på grund af deres værdifulde pels. Stellers søko var et nemt bytte for fangere og blev udryddet på bare 27 år.

aktivitet, der gradvist øgede mængden af drivhusgasserne CO_2 og CH_4 (methan) i atmosfæren, så Jordens temperatur steg med beregnede 4-10 grader, udløste omfattende skovbrande, jorderosion og ørkendannelse på land samt forsuring og iltvind i havet. På mange måder mindede omstændighederne ved forløbet om den nuværende globale udvikling.

Det er vanskeligere at vurdere hypotesen om den menneskeskabte sjette masseuddøen i nutiden, fordi der er et meget kortere tidsrum på højst hundreder eller få tusinde år til rådighed til at fastlægge forløbet for en proces, som man for de tidligere episoder af masseuddøen har data fra flere millioner år til at fastlægge. Vi beskriver derfor tidshorisonten for den igangværende masseuddøen ud fra de mest troværdige data.

Nutidens artsuddøen af hvirveldyr

Fra nyere tid findes velbeskrevne eksempler på, at mennesket på kort tid slagtede samtlige dronter på Mauritius, gejrfugle i Nordatlanten og Stellers søkøer i Stillehavet. Og der er fossile beviser på, at krybdyr, fugle, pattedyr og endog blød-

dyr uddøde på oceaniske øer kort tid efter, at mennesket ankom og bosatte sig. Et kendt eksempel er de ikke-flyvedygtige kæmpefugles uddøen på New Zealand omkring 200 år efter maoriernes ankomst i det 12. århundrede. På Madagaskar uddøde syv arter af 150 kg tunge kæmpe-lemurer nogle hundrede år efter øens kolonisering.

Det er muligt at få overblik over især hvirveldyrs uddøen siden år 1500, som kan sammenlignes med fortiden. Dermed kan vi bedre svare på, om arterne faktisk uddør så hurtigt i nutiden, at 75% af dem kan forventes at forsvinde indenfor et kort åremål. Kendskabet til udbredelse og status for de få tusinde arter af pattedyr, fugle, krybdyr og padder er bedre end for de formodede tusindvis af planter samt millioner hvirvelløse smådyr, heriblandt utallige tropiske insekter, som endnu ikke er beskrevet og navngivet.

Hvis man ser på fossiler af hvirveldyr i de geologiske lag, så uddøde de i rolige perioder i fortiden i et tempo på omkring 1 art per 10.000 arter i løbet af 100 år. Det svarer til 1 art per 1 million arts-leveår, som forkortes til enheden 1 E/MSY (1 Extinction per Million-Species-Year). Tempoet af pattedyrs, fugles og padders uddøen efter år 1900 er omkring 100-250 E/MSY, eller 100-250 gange hurtigere end under rolige perioder i fortiden. Tempoet for arternes uddøen var omtrent halvt så stort i perioden 1500-1900 som efter 1900.

Hvor langt er vi fra masseuddøen af hvirveldyr?

Hvor hurtigt, arterne vil uddø i fremtiden, vides ikke. Men tempoet af uddøen vil potentielt kunne stige, da vi kan forvente fortsat indskrænkning af naturområder samt globale klimaændringer. De mest følsomme arter vil uddø først, mens mere hyppige og vidt udbredte arter vil klare sig længst. Men benytter vi tallene fra 1900-tallet og antager, at uddøen forløber som en fast andel af det altid eksisterende antal arter, betyder det, at et faldende antal arter vil uddø i takt med, at det samlede artstal reduceres over tid. Halveres artstallet på for eksempel 1000 år, så halveres denne resthalvdel til en fjerdedel i de næste 1000 år, så 75 % af arterne er forsvundet på 2000 år.

For værdier på 100-250 E/MSY vil 75 % uddøen indtræffe efter

omkring 5.400-13.600 år, hvilket målt med evolutionens og geologisk målestok er meget hurtigt. Åremålet for 50 % uddøen er det halve, 2.700-6.800 år. Fremskrivningen understreger, at den sjette masseuddøen for de nævnte hvirveldyr banker på, men endnu ikke er indtruffet.

Ferskvandsfisk med dyster prognose

Tallene for den faktiske uddøen af nordamerikanske ferskvandsfisk er markant højere (430 E/MSY), og her estimeres tidsrummet for 75 % artsuddøen til godt 3000 år. Kendskabet til ferskvandsfisk er stort i Nordamerika, hvor 57 af de 1200 arter uddøde i 1900-tallet, flest efter 1950. Små arter og såkaldte endemiske arter (dvs. med en meget begrænset udbredelse) blev hårdest ramt. Nordamerika omfatter Mexico, USA og Canada, og alle tre nationer mistede arter, Mexico flest. De uddøde arter var for eksempel begrænset til en enkelt sø i højlandet eller de øverste bække i et enkelt vandsystem. Men fiskerimæssigt vigtige arter i de store amerikanske søer forsvandt også. Årsagerne til artsuddøen varierer fra udtørring af søer og vandløb, over vandløbsregulering til intensivt fiskeri. I et enkelte tilfælde blev en art opdaget og navngivet samtidig med, at den blev erklæret for uddød.

Blandt Europas 525 hjemmehørende ferskvandsfisk uddøde 2,7 % i sidste århundrede (270 E/MSY). 37 % af arterne er desuden truede, og de fleste lever i et bælte omkring Middelhavet fra Spanien til Tyrkiet. Området er hårdt ramt af udtørring, sommertemperaturer over 40 °C og voldsomme skovbrande. Ferskvandsfiskene i Nordamerika og Europa ser derfor ind i en fremtid, hvor endnu flere arter risikerer at uddø i de nærmeste århundreder.

Uddøen af planter

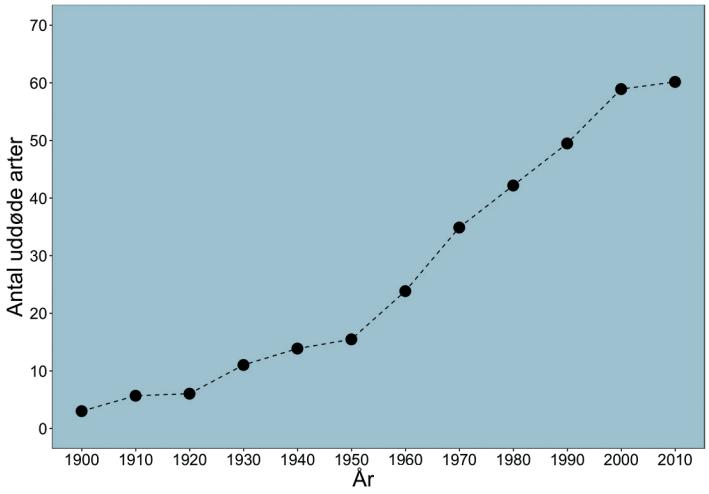
Plantearter lever gennemgående ti gange længere end dyrearter, og de uddør også i mindre grad under katastrofer. Alligevel er der sket markante skift i vegetationen, for eksempel fra dominans af nåletræer til blomsterplanter i troperne efter Kridttiden. Planternes større robusthed skyldes, at de har overlevelsesstadier i form af frø og sporer samt stængler og knolde i jorden. De kan endvidere formere sig vegetativt eller uden fremmedbestøvning. Og de kan ændre sig og blive mere robuste ved kromosomfordobling. Dobbelt så mange gener øger tilpasningsevnen til klimaændringer og mindsker risikoen for, at et vigtigt gen tilfældigvis helt forsvinder med tiden. De fleste hvirveldyr mangler derimod robuste overlevelsesstadier og må oprethol-

Forholdene ved arters uddøen før og nu

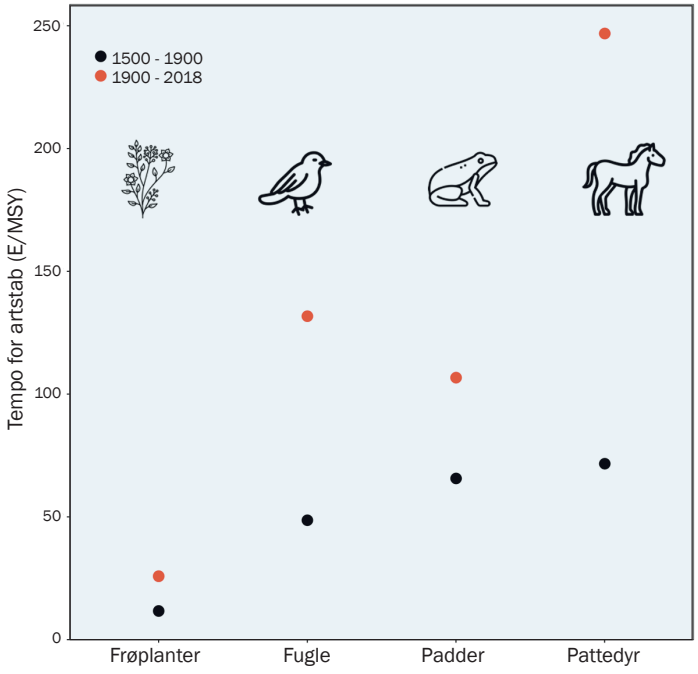
Forholdene ved arternes uddøen i nutiden minder om dem ved to tidligere katastrofer med masseuddøen i overgangene Perm-Trias og Trias-Jura for henholdsvis 252 og 201 millioner år siden. Men i dag er anderledes, da der sker og er sket massiv indskrænkning af naturarealer til marker, industri og bosættelse, som derfor ikke står til rådighed for arters overlevelse og nye arters opståen.

Udviklingen i atmosfæren, på kontinenterne og i havet er angivet i tabellen for en række forhold. Påvirkningerne er graduerede på en subjektiv skala fra 3: Meget stærk; 2: En del; 1: Lille; 0: Ingen. Hg er kviksølv, og PAH angiver polycykliske aromatiske kulbrinter, der dannes ved skovbrande, ufuldstændig forbrænding m.m. Efter især Fox (2022), Van de Schotbrugge, Wu et al. (2015) og Müller et al. (2023).

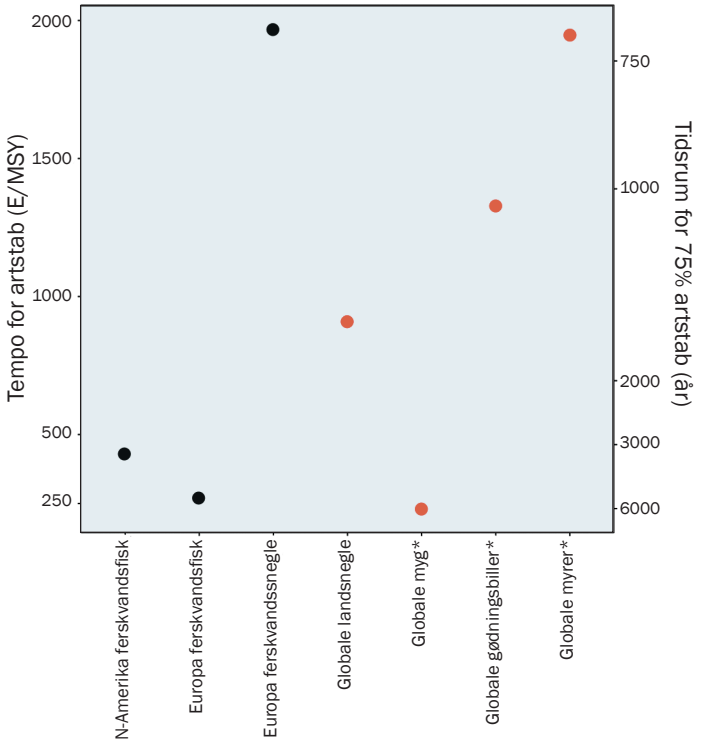
		Perm-Trias	Trias-Jura	Nutiden
Atmosfære	Sur nedbør	2	1	1
	Øget CO_2	3	3	3
	Øget Hg og PAH	3	2	1
	Øget metan	3	2	2
	Global opvarmning	3	3	3
Kontinenter	Skovbrande	3	3	2
	Skovdød	3	3	2
	Øget jordforvitring	3	3	2
	Naturindskrænkning	0	0	3
Havet	Forsuring	3	1	1
	Opvarmning	3	2	2
	Eutrofiering/iltsvind	3	3	3



Uddøen af nordamerikanske ferskvandsfisk op gennem 1900-tallet steg markant efter 1950. Efter Burkhead (2012).



Tempo for hvirveldyrs og frøplanters uddøen i perioderne 1500-1900 og 1900-2018. Værdien 1 E/MSY betegner 1 art uddød per 1 million arts-leveår. Uddøen under rolige perioder i fortiden var typisk 0,1 E/MSY for planter og ti gange højere 1 E/MSY for hvirveldyr. Efter Humphreys et al. (2019).



Tempo for uddøen af arter i de seneste 100 år (venstre y-akse) og tidsrum for uddøen af 75 % af arterne i fremtiden med uændret tempo (højre y-akse). Værdier for nordamerikanske og europæiske ferskvandsfisk, europæiske ferskvandssnegle og gennemsnit for alverdens landsnegle. *Den globale uddøen for myg, gødningsbiller og myrer er beregnet under den forudsætning, at primær tropisk skov forsvinder med uændret tempo og er væk om 225 år og omdannet til sekundær opvækst og spredte skovrester.

Data fra bl.a. Burkhead (2012), Neubauer et al. (2015), Régnier et al. (2015), Giam (2017), Cowie et al. (2022).

de kønnet formering med samme antal kromosomer.

Træer og vedplanter er uddøde i højere tempo end urter i de seneste århundreder. Urterne overlever sandsynligvis bedre, fordi de gennemgående har bestande med mange flere individer og en kort livscyklus, som gør det muligt bedre at tilpasse sig et miljø under forandring. De få publicerede værdier for tropiske planters artsuddøen (1,2-37,5 E/MSY) svarer til en gennemsnitlig artslevetid på 18,5-580 tusinde år, som er mindst ti gange kortere end under stabile perioder i fortiden.

Snegle og insekter uddør også

Snegle på land og i ferskvand har let kendelige kalkskaller, der let bevares som fossiler. Skæbnen for 200 tilfældigt udvalgte landlevende sneglearter kunne omhyggeligt undersøges med data fra museer, artikler og eksperter. For 108 arter med tilstrækkelig god dokumentation var 20 uddøde. Det indebar et højt tempo for artsuddøen (cirka 1620 E/MSY) og et kort tidsrum på minimum 860 år for 75 % artsuddøen. En tilsvarende hurtig uddøen er beregnet for europæiske ferskvandssnegle i 1900-tallet. De uddøde angiveligt 1000 gange hurtigere end arter ved slutningen af Kridttiden og omkring 10.000 gange hurtigere end under rolige perioder i fortiden. Ferskvandssneglenes problemer skyldes, som for ferskvandsfiskene, ødelæggelse af deres levesteder ved udtørring, vandløbsudretning, forurening og temperaturstigning.

Insekter er den mest artsrige organismegruppe overhovedet. Godt 1 million arter er navngivet, men sandsynligvis findes der 2-10 millioner unavngivne arter. Insekterne oplevede et markant artstab, da meteoritten ramte Mexico. Insektangreb på fossile blade fra Mexico "dykkede" således i flere millioner år derefter, mens insektangreb på fossile blade fra Sydamerikas sydspids hurtigere kom tilbage på

niveauet fra før katastrofen. I de efterfølgende årmillioner steg insekternes artsantal voldsomt frem mod nutiden i takt med blomsterplanternes opblomstring.

Langt de fleste insektarter lever i tropiske skove, og mange af dem risikerer at forsvinde og ende i de ukendtes grav, når primær tropeskov fældes og omdannes til sekundær ny trævækst og skovrester eller bliver til plantager og marker. Med stigende global opvarmning risikerer træerne endog at visne, så der opstår savanne. Den beregnede indskrænkning af det globale artstal af insekter forudsætter, at al primær tropisk skov omdannes til sekundær skov eller skovrester i løbet af de kommende 225 år. Det er udsigten, hvis indskrænkningen af uforstyrret primær skov fortsætter med uændret hastighed. Konsekvensen varierer fra 5 % globalt artstab for stikmyg, over 30 % for gødningsbiller til 44 % for myrer i løbet af de 225 år. Tempoet for insekternes globale artsuddøen på grund af reduktionen af primær tropisk skov (229 til 1947 E/MSY) er meget større end tempoet under uforstyrrede perioder (0,1 E/MSY). Og det vil gå endnu hurtigere, hvis tropeskoven omdannes til marker eller plantager. Oveni indskrænkes insekterne i landbrugsprægede lande som Danmark pga. habitatreduktion og -fragmentering.

Hvad kan vi gøre?

Mennesket har skabt begyndelsen til en masseuddøen af arter! De viste beregninger støtter denne vurdering, selv om det dokumenterede antal uddøde arter i nutiden ikke har nået et omfang på 75 %. Men læg til, at langt de fleste arter falder i hyppighed og udbredelse, så arter på rødlister for trusselsgraden forskydes mod de alvorligste kategorier: truede, kritisk truede og ultimativt uddøde. Endvidere indskrænkes naturarealet mere og mere, og meget få procent af landjorden og havet er efterhånden upåvirkede af mennesker. Tonsvis af studier dokumenterer, at fortsat indskrænkning af naturareal endegyldigt vil reducere artstallet meget voldsomt. Der er røde tal på bundlinjen.

Hvad kan vi gøre herhjemme? Jo, vi kan tilbyde arterne bedre muligheder ved at give mere plads til natur ved at nedlægge dyrkede arealer og reducere den voldsomme forurening med næringsstoffer og pesticider. Private haveejere kan nedlægge "sterile" græs- og flisearealer til fordel for artsrige nye levesteder. Med det fremtidige varmere klima bør vi kunne tilbyde plads og overlevelse til en del af de arter, som er tvunget til at flytte mod nord bort fra de overophedede Middelhavslande. Det vil gavne nogle arter, men de mange endemiske arter i det sydlige Europa har en lille chance for at flytte sig nordpå og vil sandsynligvis forsvinde for altid i løbet af få årtier. ■



Instrilandbrugets store marker med monokulturer er reelt en ørken for dyrelivet. Der er ikke meget at komme efter for en sulten agerhøne. Foto. Shutterstock

Insekttab på grund af intensivt landbrug

Med industrilandbrugets stadigt mere intensive drift i form af kæmpemarker, fjernelse af levende hegn og smådamme, intensiv brug af gødning og pesticider er der sket en sterilisering af det åbne land for planter, insekter og insektspisende småfugle. I det intensivt dyrkede England gik bier, sommerfugle og natsværmere markant tilbage, mens ændringerne var ubetydelige i det mindre påvirkede Skotland. Sydvest for Løkken reduceredes insektmængde og ynglesucces af svaler parallelt. I Østdanmark oplevede 22 arter blandt ikke-almindelige dagsommerfugle fra 1993 til 2019 en indskrænkning fra 565 til 158 bestande; 3 arter forsvandt.

Mens reduktionen af fåtallige, specialiserede insekter over tid således er ret entydige, er den samlede biomasse af flyvende insekter påvirket komplekst af belastningen med næringsstoffer og pesticider og ikke mindst ændringer af vejrforholdene og ekstreme vejrhændelser.

Billedet er altså det samme overalt i lande med intensivt landbrug: indskrænkning af levesteder, færre blomster som foder- og nektarkilde på grund af næringsstoftilførsel fra luften samt pesticidpåvirkning, der påvirker følsomme insekter, som det især er påvist for bier. Resultatet er at insekterne direkte eller indirekte bliver udryddet.

Kilder

Brühl CA et al. 2021. Direct pesticide exposure of insects in nature conservation areas in Germany. *Scientific Reports* 11: 24144.

Burkhead NM 2012. Extinction rates in North American freshwater fishes, 1900-2010. *BioScience* 62: 798-808.

Cowie RH et al. 2022. The sixth mass extinction: fact, fiction or speculation. Biological Reviews 97: 640-663.

Fox CP et al. 2022. Flame out! End-Triassic mass extinction polycyclic aromatic hydrocarbons reflect more than just fire. *Earth and Planetary Science Letters* 584, 117418.

Giam X 2017. Global biodiversity loss from tropical deforestation. *PNAS* 114: 5775-5777.

Humphreys AM et al. 2019. Global dataset shows geography and life form predict modern plant extinction and rediscovery. *Nature Ecology and Evolution* 3: 1043-1047.

Müller J et al. 2023. Weather explains the decline and rise of insect biomoass over 34 years. Nature: doi.org/10.1038/s41586-023-06402-z

Neubauer TA et al. 2021. Currrent extinction rate in European freshwater gastropods greatly exceeds that of the late Cretaceous mass extinction. *Communications Earth & Environment* 2,97.

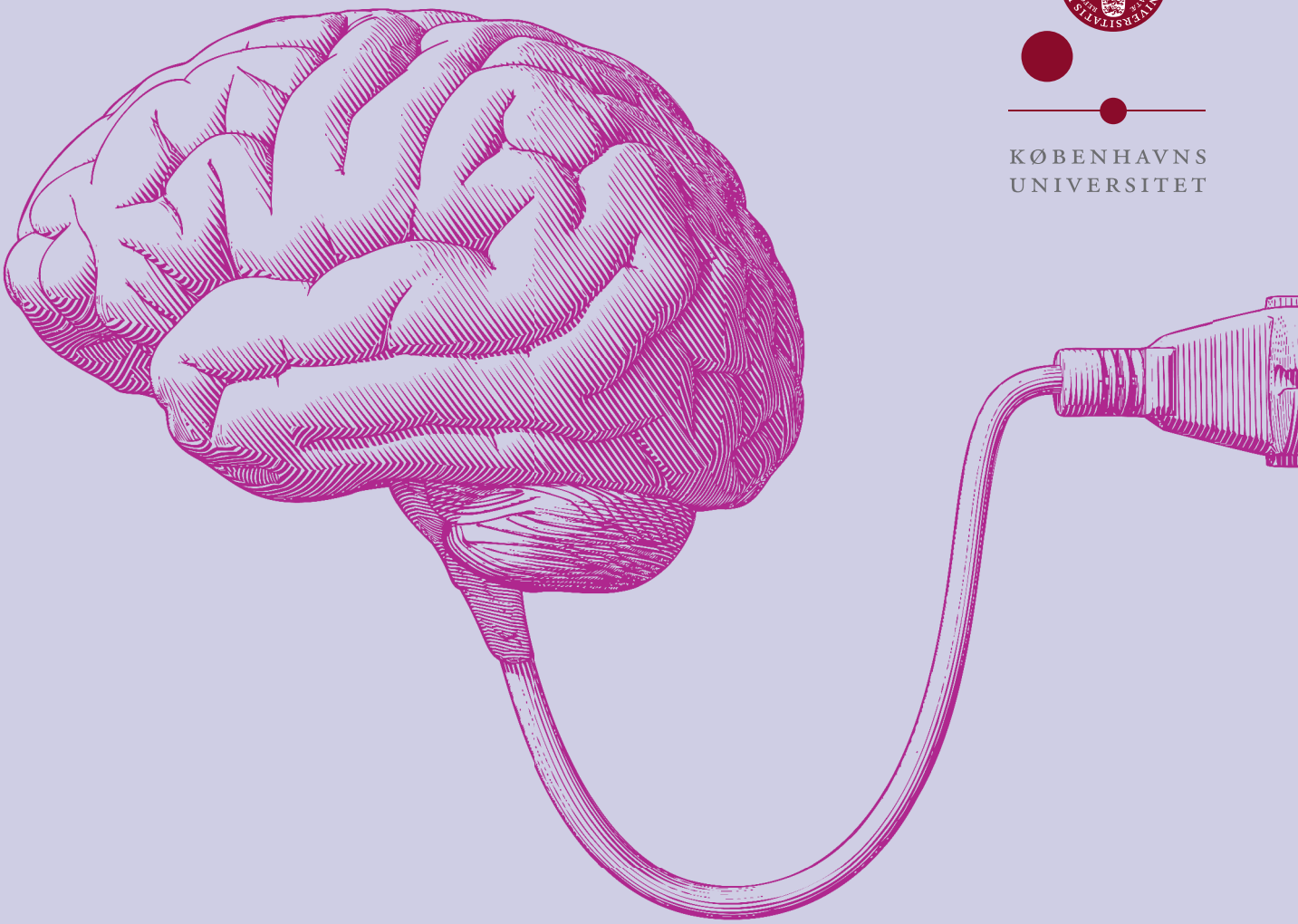
Pitman NCA et al. 2002. Extinction-rate estimates for a modern neotropical flora. *Conservation Biology* 16: 1427-1431.

Régnier C et al. 2015. Mass extinction in poorly known taxa. PNAS 112: 7761-7166.

Van de Schotbrugge & Wignall PB 2015. A tale of two extinctions converging end-Permian and end-Triassic scenarios. *Geological Magazine*.

Wu Y et al. 2021. Six-fold increase of atmospheric pCO_2 during the Permian-Triassic mass extinction. *Nature Communications* 12, 2137.

KØBENHAVNS
UNIVERSITET



INSPIRATIONSDAG FOR GYMNASIELÆRERE

Find ud af, hvorfor ølproduktion er lige så kompleks som raketvidenskab, når lektor Henrik Siegumfeldt holder aftenforedraget på SCIENCEs årlige Inspirationsdag for gymnasielærere – vi skal også smage på øllet.

Om formiddagen kan du blandt andet høre om parasitters fascinerende liv og om udfordringerne i arbejdet med kvantecomputeren. Senere er der hands-on workshops med så forskellige emner som for eksempel Van der Waals kræfter, de fysiske, biologiske og kemiske processer i vores fødevarer, hvordan miljøøkonomi kan indgå i beslutningerne om omlægningen af det danske landbrug og meget andet. Vi slutter dagen af med en middag.

Inspirationsdagen finder sted **d. 2. februar 2024**. Deltagelse er gratis, og tilmelding sker efter først til mølle-princippet.

Se programmet og tilmeld dig på

Science.ku.dk/inspirationsdag

SCIENCE Kommunikation



Undervisningsmaterialer

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

RNA-teknologi

Nyt arbejdsark om RNA-teknologi, der tager udgangspunkt i artiklen *RNA-teknologi – Det næste kvantespring i udviklingen af lægemidler* fra Aktuel Naturvidenskab nr. 3/2023.

Arbejdsarket indeholder 10 spørgsmål delt op i to portioner, der har henholdsvis et mundtligt og skriftligt fokus. Spørgsmålene fokuserer på muligheder og udfordringer ved at udnytte RNA til vacciner og medicin til behandling af sygdomme. Artiklen ligger i forlængelse af foredraget Fremtidens RNA-medicin ved Jørgen Kjems og Mette Galsgaard Malle i serien Offentlige Foredrag i Naturvidenskab.

Målgruppe: Bioteknologi A

Arbejdsarket er udarbejdet af projektgruppen på Viborg Katedralskole.

Arbejdsspørgsmål til tema om CO_2

Dette arbejdsark indeholder arbejdsspørgsmål til de fem artikler, der indgår i temaet *CO_2 – problem og ressource* fra Aktuel Naturvidenskab nr. 4/2023.

Spørgsmålene er organiseret i sektioner svarende til de fem artikler, og det er for hvert spørgsmål markeret, hvilke fag spørgsmålet umiddelbart er relevant for, så man nemt kan sortere i spørgsmålene afhængigt af hvilket fag, man bruger artiklen i (Biologi A/B, Bioteknologi A, Kemi B, Naturgeografi B).

Materialet er udarbejdet af Kim Bruun og Signe Clara Hansen, Viborg Gymnasium.

PFAS og miljøet

Arbejdsark til artiklen *Problematiske fluorstoffer overalt* Fra Aktuel Naturvidenskab nr. 2/2023. Spørgsmålene kredser om emner som egenskaber ved flour-organiske forbindelser som PFAS, bioakkumulering og toxicitet.

Målgruppe: Kemi/Bioteknologi/Biologi

Arbejdsarket er udarbejdet af Kim Bruun, Viborg Gymnasium, nov. 23.

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 intropakke 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

Redaktionsgruppe

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

Tryk: Jørn Thomsen Elbo A/S

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

Oplag: 10.300

NORDISK MILJØMÆRKNING
Svanemærket tryksag 5041-0601

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:
Foto: Shutterstock.

POST
PP DANMARK
SORTERET MAGASINPOST
ID-nr. 46144
Al henvendelse til:
Aktuel Naturvidenskab,
Ny Munkegade 120, 8000 Aarhus C
E: abo@aktuelnaturvidenskab.dk
T: 87152094



Foto: Mathias Berlin/Shutterstock

En hagerem-pingvin tager sig en powernap.

Mikrosøvnens mester

Af Carsten R. Kjaer, Aktuel Naturvidenskab

Du kender det kun alt for godt: Fornemmelsen af, at øjnene glider i, og pludseligt er nogle sekunder eller måske endda minutter forsvundet fra dit liv, mens du sad foran computeren eller TV'et eller måske endda til et møde på arbejdet. Og det er ikke bare os mennesker, der kan finde på at tage en "powernap" – såkaldt mikrosøvn er også kendt fra fugle (så kedelige udsendelser eller chefer er altså ikke en forudsætning!).

Nu viser ny forskning publiceret i tidsskriftet *Science*, at der tilsyneladende er en art, der har udviklet powernappens ædle kunst til perfektion. Det viser sig nemlig, at ynglende hagerem-pingviner (*Pygoscelis antarcticus*) døser hen flere end 10.000 gange om dagen med en gennemsnitlig varighed på fire sekunder. Samlet summer det op til mere end 11 timers søvn i døgnet. I deres undersøgelse studerede forskerne konkret 14 individer af hagerems-pingviner, som rugede i en koloni på King George Island i Antarktis. Både han og hun deltager i at ruge på æggene, hvor de skiftes til at opholde sig i reden og søge føde i havet. Forskerne observerede fuglene både ved hjælp af video og ved hjælp af implanterede elektroder, der kunne måle hjerneaktivitet. En pingvinkoloni er næppe det mindst stressende sted at sove: En konstant trussel fra ægrøvende kjover, aggressioner fra artsfæller samt et voldsomt støjniveau hørte således til dagens orden for de udvalgte forsøgspingviner.

Forskernes resultater viste, at over en observationsperiode på 10 dage var der ingen af fuglene, der på noget tidspunkt sov i længere tid. Den længste lur, der blev registreret i perioden, var således på 34 sekunder. Ved hjælp af målingerne med elektroder kunne forskerne se, hvornår pingvinerne trådte ind i et stadium med langsomme hjernebølger, som er den dominerende form for søvn hos fugle og som også ses hos mennesket. Målingerne viste, at pingvinerne havde flere end 600 korte episoder med langsom-hjernebølge-søvn i timen. Disse episoder blev endnu kortere og hyppigere, når fuglene var optaget af at passe deres æg.

Forskerne har ikke direkte målt, om effekten af disse pingviners utallige småblunde svarer til længerevarende søvn i forhold til at restituere hjerne og krop, ligesom de heller ikke har undersøgt, om de samme pingviners søvnmønster er anderledes uden for ynglетiden. Men det faktum, at pingvinerne tilsyneladende er velfungerende og har succes med at yngle på trods af deres ekstremt opbrudte søvn tyder på, at mikrosøvnen kan opfylde i det mindste nogle af de genopbyggende funktioner, som længerevarende søvn har.

Om fordelene ved mikrosøvn er de samme for pingviner som hos pattedyr som mennesker og rotter er endnu uvist. Det må fremtidig søvnforskning afklare. ■

Kilde: Science, Vol 382, Iss. 6674, pp. 1026-1031