

NATURVIDENSKAB OG TEKNOLOGI
DIREKTE FRA FORSKNINGSVERDENEN

AKTUEL *natur* VIDENSKAB

NEDBØRS- EKSTREMER OG REGNFATTIGE SOMRE



Bæredygtige klodser
Verdens tangskove modvirker global opvarmning
En genfejl, der går lige i hjertet

NR.2 - 2019 MAJ: 50 KR.

Forskningsbaseret læreruddannelse... hvordan?

**Hvordan højner man uddannelsen af grundskolelærere?
Svaret er måske ikke bare at placere uddannelsen ved universiteterne!**

Endnu engang er uddannelsen af grundskolelærere til debat. Denne gang er udgangspunktet en kritisk evalueringsrapport af den aktuelle grundskolelæreruddannelse, som blandt andet påpeger mangler ved forskningsbaseret videngrundlaget i uddannelsen. Problemet er bare, at evalueringsrapporten ikke tydeliggør, om der er tale om mangler i det almen didaktiske, fagdidaktiske eller indenfor naturfagernes naturvidenskabelig viden og forskning.

Den aktuelle evaluering af læreruddannelsen fremhæver et af læreruddannelsens mål som værende at uddanne dygtige didaktikere. Et væsentligt element til dette skal være forskningsbaseret *viden om fag, undervisning og skoleudvikling baseret på praksisnære problemstillinger som skal informere uddannelsen, ligesom "praksisviden", dvs. systematisk indsamlet og kodificeret viden om praksis, tilsvarende skal anvendes aktivt til udvikling af læreruddannelsen*. Et nyligt litteraturstudie om forskningsbaseret læreruddannelse fra 2016 fokuserer på de lærerstuderendes evne til og oplevelse af: 1) At forbinde teori og praksis, 2) Selvstyring og 3) At indgå i professionelt relationsarbejde. Dette litteraturstudie er ikke imponeret over kvaliteten og omfanget af den internationale litteratur om disse tre fokusområder. Så noget kunne tyde på, at mere forskning kan være nyttigt, men spørgsmålet om hvilken og hvordan er stadig ubesvaret.

Ting tager tid

Den førnævnte evalueringsrapport anerkender, at professionshøjskolerne er undervejs med at forbedre det forskningsbaserede videngrundlag gennem blandt andet deltagelse i forsknings- og udviklingsprojekter og opnormering af ph.d.-uddannede undervisere på læreruddannelserne. Men der er stadigvæk potentiale for at udvikle fokus på, *hvordan* forsknings- og udviklingsviden inddrages systematisk i undervisningen og studerendes bachelorprojekter. Men som Piet Hein skrev i sit berømte græk: *Ting tager tid*.

Vedrørende læreruddannelsens faglige indhold – herunder den naturvidenskabelige



Martin Krabbe Sillasen, docent, ph.d., samt
Peer Schrøder Daugbjerg, lektor, ph.d.
Begge er på VIA University College.
msil@via.dk / pd@via.dk

viden – påpegede Carl Winsløw, professor i matematikkens didaktik, Københavns Universitet allerede i en kronik i Berlingske 3. januar 2014, at vægtningen af den faglige viden i alle læreruddannelsens undervisningsfag blev kraftigt reduceret ved den seneste læreruddannelsesreform i 2013. Winsløw brugte metaforen, at grundskolelæreruddannelsens faglige ben er svagt, men til gengæld er dens praksisrelationsben stærkt.

Som et modsvar på den kritiske evalueringsrapport har uddannelses- og forskningsminister Tommy Ahlers nedsat en kommission, som blandt andet skal se på, om uddannelsen skal gøres til en femårig kandidatuddannelse og måske forankres på universiteterne. Men spørgsmålet er, om det ikke er det forkerte sted at starte. Måske skulle man i stedet fokusere på, hvad man indholdsmæssigt vil med uddannelsen, og hvordan man vil styrke den grundskolenære forskning, som professionshøjskolerne bedriver?

Professionshøjskolerne fik forskningsretten i 2013. På finansloven blev der afsat penge til professionshøjskolerne arbejde med *relevant anvendelsesorienteret forskning* indenfor og på tværs af professioner og brancher, der beskæftiger professionsbachelor, herunder lærere til grundskolen. På papiret lyder det vældig flot at få forskningsretten. Det har også vist sig problematisk, fordi forskningsmidlerne, som tilflyder professionshøjskolerne, er relativt begrænsede. Allerede efter et år med forskningsretten problematiserede professionshøjsko-

lerne i 2014, at det kun var forskningsretten, man havde fået, og ikke forskningspligt med hensyn til professionsuddannelserne. Med en forskningspligt kunne professionshøjskolerne have argumenteret for at få en større andel af forskningsbudgettet på finansloven.

Hvor mange ben skal understøtte læreruddannelsen?

På trods af denne kamp om midlerne finder uddannelsesforskere fra både universiteter og professionshøjskoler ud af at samarbejde. Her kan vi for eksempel nævne projektet ReGAME, som er et samarbejde mellem Aarhus Universitet og Professionshøjskolen VIA om udvikling af spilbaserede simulationer til matematik- og naturfagsundervisningen i grundskolen. Generelt møder vi en interesse og velvilje fra universiteter og andre forsknings- og evalueringsmiljøer til samarbejde. Måske fordi professionshøjskolerne har stor erfaring med grundskolesnær forskning?

Hvis vi skal blive i Winsløws metafor med ben, vover vi at sige, at grundskolelæreruddannelsen måske nok er tre-benet – praksisrelation, fagdidaktik og almen didaktik – men ingen af dem er særligt stærke, og ingen af dem er et akademisk fagdisciplinben forstået som universitære fagdiscipliner. Vil læreruddannelsen blive bedre af et fjerde akademisk fagdisciplinben? Eller skal de lærerstuderende lære at arbejde med faglig viden og færdigheder gennem det fagdidaktiske ben?

Nyere forsknings- og udviklingsprojekter inddrager grundskolelærere gennem iterative aktionslæringsforløb og dokumenterer disse forløb gennem praksisnær følgeforskning. Dette design tager typisk udgangspunkt i problemstillinger hentet fra grundskolens eller læreruddannelsens praksis og aktuelle udfordringer. Designet står således især på det fagdidaktiske og praksisrelationsbenene, men støtter sig også til det almen didaktiske og forskellige akademiske discipliners ben. ■

Videre læsning:

Krogh, L., B., & Madsen, A., M. (2016). *Forskningsbaseret læreruddannelse: Hvad siger litteraturen?* Udgivet af VIA University College. Kan hentes via www.ucviden.dk

indhold



Sommeren 2018 blev usædvanlig varm og regnfattig. Men hvor almindelige er den slags ekstreme hændelser? Forfatterne har analyseret danske nedbørsdata helt tilbage fra 1874.

8



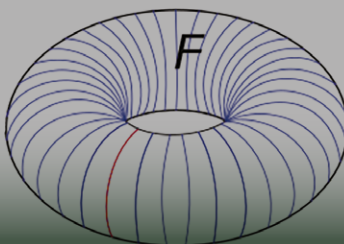
At beregne miljøomkostningerne ved et produkt fra vugge til krav kaldes livscyklusvurdering. Vi har talt med Maria Rosenberger Petersen, som arbejder med livscyklusvurderinger i LEGO, der netop er midt i en proces, som skal gøre virksomhedens produkter og emballage bæredygtige.

22



Indtil for ganske nylig blev tangskove slet ikke betragtet som en spiller i det globale klimaregnskab. Dansk forskning har dog vist, at tangskovene kan trække CO₂ ud af atmosfæren og gemme det af vejen dybt nede i havbunden.

28



En af geometriens nyeste sidegrene handler populært sagt om at forstå, hvad der sker, når rækkefølgen af begivenheder ikke er ligegyldig. Denne form for geometri – kaldet ikke-kommutativ geometri – kan siges at repræsentere en fascinerende deformeret virkelighed.

40

FORSKNING OG NYHEDER

- 4 Kort Nyt
- 8 Nedbørsektremer og regnfattige somre
- 14 Våde marker giver mere lattergas
- 18 Terahertz teknologi – ud af laboratoriet og ind i fremtiden
- 22 Bæredygtige klodser
- 28 Verdens tangskove modvirker global opvarmning
- 34 En genfejl, der går lige i hjertet

PERSPEKTIV - DEBAT

- 2 SYNSPUNKT: Forskningsbaseret læreruddannelse... hvordan?
- 40 Geometri – når faktorenes orden har betydning
- 43 Service
- 44 BAGSIDEN: Kønnenes kamp i dammen

AKTUEL NATURVIDENSKAB

Udgiver

Aarhus Universitet, Science & Technology, i samarbejde med:

- Det Natur- og Biovidenskabelige Fakultet, Københavns Universitet
- Det Naturvidenskabelige Fakultet og Det Tekniske Fakultet, Syddansk Universitet
- Det Ingeniør- og Naturvidenskabelige Fakultet og Det Tekniske Fakultet for IT og Design, Aalborg Universitet
- Roskilde Universitet

Ansvarshavende

Søren Rud Keiding, prodekan, Science & Technology, Aarhus Universitet

Redaktion

Redaktører Carsten Rabæk Kjaer og Jørgen Dahlgaard
Tlf.: 87 15 20 94

E-post: red@aktuelnaturvidenskab.dk

Hjemmeside: aktuelnaturvidenskab.dk



AALBORG UNIVERSITY
AALBORG ESBJERG COPENHAGEN



AARHUS
UNIVERSITET



KØBENHAVNS UNIVERSITET
DET NATUR- OG BIOVIDENSKABELIGE FAKULTET



DET NATURVIDENSKABELIGE
FAKULTET



DET TEKNISKE
FAKULTET



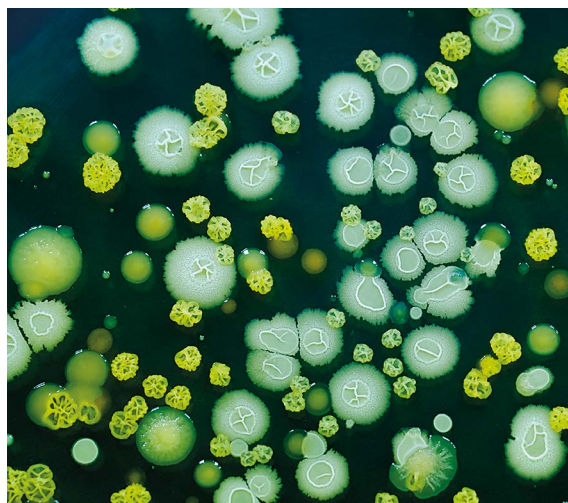
Roskilde Universitet

SPONSOR-
ABONNENTER



Danske mikroorganismer kortlægges

Sidste år (i *Aktuel Naturvidenskab* nr. 1/2018) omtalte vi en ny sekventeringsmetode til at kortlægge bakterie-DNA, som er udviklet af en forskningsgruppe anført af professor Mads Albertsen fra Institut for Kemi og Biovidenskab ved Aalborg Universitet. Denne metode har nu banet vejen for et stort projekt *Microflora Danica* ledet af Mads Albertsen og professor Per Halkjær Nielsen, også ved Aalborg Universitet, hvor man vil kortlægge alle mikroorganismer i Danmark. Målet er at skabe en global database, som kan udvides og bruges af fagfolk fra alverdens universiteter og virksomheder.



Nu skal der styr på danske mikroorganismer i projektet *Microflora Danica*. Foto: Shutterstock.

Forskerne vil indsamle over 10.000 prøver fra forskellige områder og naturtyper i Danmark og kortlægge, hvilke arter mikroorganismer der findes i hvert område. Kortlægningen er udgangspunktet for, at forskere løbende kan tilføje endnu mere information såsom organismernes funktioner, kendetegn eller interaktion. Enhver vil så kunne slå op, for eksempel hvilken funktion specifikke

bakterier har i en dyrket mark, eller hvilken kombination af bakterier der giver den bedste rensning af spildevand.

Forskerne håber, at databasen med tiden vil omfatte så meget information om de enkelte organismer, at den ikke blot bliver et hjælpemiddel for forskere, men også for samfun-

det generelt. De nye DNA-sekvenseringsteknikker er så hurtige, at man er i stand til at læse DNA i realtid og dermed kan man identificere bakterier i samme øjeblik, man tager en prøve. Det betyder, at for eksempel læger med adgang til et opslagsværk som *Microflora Danica* lynhurtigt vil kunne identificere bakterier i en patients blod og se, hvad den mest effektive behandling vil være. Og medarbejdere på et renseanlæg vil kunne identificere, hvilke bakterier der er til stede og se i databasen, hvordan de kan optimere deres renseproces ud fra det.

Projektet skal løbe over fire år og er finansieret af en bevilling på 30 millioner kr. fra Poul Due Jensens Fond.

Navnet *Microflora Danica* er med henvisning til *Flora Danica*, der er et af de største danske forskningsprojekter nogensinde, hvor alle danske planter blev kategoriseret i en omfattende håndbog, der stadig er tilgængeligt den dag i dag.

CRK, Kilde: Nyheder fra Aalborg Universitet, aau.dk

Tjek med mobilen om din vare er falsk

Uægte designer-tøj, falske smartphones og kopi-medicin. Kopibranchen er en voksende milliardindustri, hvor piraterne oftest er et skridt foran producenterne, og hvor det er svært at vide sig sikker som forbruger.

Men to forskere fra Nano-Science Center på Københavns Universitet har udviklet et 100 % piratsikkert mærkningssystem, hvor hver enkelt vare har et mærke eller et såkaldt "tag", der svarer til et unikt fingeraftryk. Gennem næsten 10.000 tests har forskerne nu bevist, at deres metode virker.

»Du kan sætte det på en vinflaske, på et guldur, et maleri – ja, hvad som helst. Mærket behøver ikke at være større end et komma. Og det er umuligt at kopiere, for sandsynligheden for, at to varer har samme fingeraftryk, er lig nul,« siger forsker og lektor Thomas Just Sørensen, der sammen med forskerkollega Riikka Arppe-Tabbara har udviklet systemet.



Eksempel på QR-kode med små spray-mærker. Foto: Thomas Just Sørensen.

Tagget består af en smule gennemsligt blæk, der indeholder en masse mikropartikler, som sprayeres ud på en strejkode af for eksempel papir. Ligesom hvis man kaster en håndfuld sand på en overflade, danner partiklerne tilfældige, men helt unikke mønstre af bittesmå hvide prikker, når de sprayeres på. Chancen for, at der opstår to identiske møn-

stre ved denne metode, er uendelig lille.

Blækket kan sprayeres på enhver slags strejkode og på mange slags materialer, så taggene kan derfor masseproduceres billigt. Systemet fungerer sådan, at hver enkelt vare, der forlader en fabrik, er udstyret med sit eget tag, som er registreret i en database.

Det smarte ved systemet er ikke kun, at det er kopisikkert. Det gør det også muligt for kunden selv at validere sin vare. Med en app på sin mobiltelefon kan man nemlig scanne varens tag og tjekke, om der er et match i databasen. Under forskernes 9.720 tests var der 0 % falske positive.

Forskerne mangler nu kun at udvikle software-delen, som forventes færdig i løbet af det næste år. Resultatet er offentliggjort i tidskriftet *ACS Applied Materials & Interfaces*.

Maria Hornbek, Københavns Universitet

Et køligere klima skaber større biodiversitet

Kloden har sandsynligvis aldrig haft en større biodiversitet end i dag. Det skyldes et relativt koldt klima, men ikke så koldt som i en istid.

Desværre er mangfoldigheden på retur pga. den globale opvarmning. Vi er faktisk midt i "den sjette masse-død" i klodens historie, hvor utallige arter uddør. Det kan tage millioner af år, inden den evolutionære proces bevirker, at Jorden igen bliver beboet med nye og andre planter og dyr.

Det er konklusionen på et forskningssamarbejde mellem de naturhistoriske museer i København og Helsinki i Finland, hvor forskerne har "taget temperaturen" på sammenhængen mellem biodiversitet og klimaforandringer længere tilbage i Jordens geologiske historie end nogen tidligere har gjort.

Forskerne har analyseret data fra *The Paleobiology Database* og været på feltarbejde i blandt andet Grønland.



Christian Mac Ørum studerer 450 millioner år gamle ordoviciske kalksten i Kronprins Christian Land i det nordøstlige Grønland.

Foto: Jan Audun Rasmussen

Databasen indeholder oplysninger om indsamlede fossiler fra forskellige steder på kloden og fra forskellige perioder i Jordens geologiske historie. Gennem fire år har forskerne blandt andet brugt "Big data" og analyseret sig frem til resultaterne ved at sammenstille fundene på en ny måde i den sammenhæng.

Christian Mac Ørum fra Københavns Universitet, som har ledet studiet, siger:

»Ved at undersøge fortidens dyr og arternes tilpasningsevne, kan vi få et mere nøjagtigt svar på, hvad der fører til kriser i økosystemerne, og hvad der sker bagefter. Vi er nu kommet et stort skridt videre i forståelsen og sammenhængen mellem klima- og miljøpåvirkning på den samlede biodiversitet på kloden. Det gælder både intervaller med artsdannelse, samt intervaller med masseuddønder gennem millioner af år.«

Konklusionen på studiet er, at vores nuværende klima er det bedste for bevarelsen af mangfoldigheden blandt dyr og planter, men måske er vi desværre på retur i den henseende.

Forskernes arbejde er netop blevet offentliggjort i det prestigefyldte amerikanske tidsskrift *Proceedings of the National Academy of Science* (PNAS).

Svend Thaning, Københavns Universitet

Nyttige vandmænd

Vandmænd findes overalt i havet mellem havbund og overflade, og fra polerne til de tropiske områder. De har ingen hjerne eller hjerte og kan virke uskyldige, men flere anser dem for at være en plage. Men de kan også være en værdifuld nyt ressource, hvilket det internationale forskningsprojekt GoJelly nu er i gang med at undersøge.

Adjunkt Jamileh Javidpour fra Biologisk Institut ved Syddansk Universitet forsker i, hvordan man kan bruge vandmænds biomasse konstruktivt til at fjerne mikroplastik fra havene og samtidig gavne både økonomi og iværksætteri.

Når vandmænd formerer sig eller bliver stressede, udsender de slim i det omgivende havvand. Denne slim har den nyttige egenskab, at den binder sig til mikroplast. Slimen fra vandmænd har tidligere vist sig nyttig, ikke



Foto: Colourbox.

kun til at indfange nanopartikler, men også som et enzym og en naturlig masse, der er rig på mikroorganismer. Teorien er, at slimen aktivt kan bruges til at fjerne mikroplast, for eksempel ved at blive inkluderet i filtre.

Derudover kan selve vandmanden potentielt bruges i flere forskellige produkter fra rynke-

creme til snacks og gødning til landbruget.

»GoJelly viser sig innovativ ved at forvandle en gene til en værdifuld ressource, men vi må ikke glemme den naturlige rolle disse organismer spiller i det marine økosystem,« siger Jamileh Javidpour.

Derfor samler en gruppe forskere fra Danmark, Norge, Tyskland, Slovenien og Israel data om både fisk og vandmænd for at forstå spillet mellem disse i den marine fødekæde.

I Kerteminde er et større vandmandsbrug nu ved at blive indrettet, og det forventes at være klar til forskningsbrug til efteråret. Her skal Jamileh Javidpour yngle vandmænd til forskningsbrug og undersøge muligheder for vandmandens kommercielle anvendelser.

Majken Brahe Ellegaard Christensen, SDU

Leg skal skabe teknologiforståelse

Den 1. marts i år tog Undervisningsministeriet fat på at udrulle faget teknologiforståelse til 46 udvalgte folkeskoler i en treårig forsøgsperiode.

»Hvis vi skal have flere til at interessere sig for teknik og blive ingeniører, så handler det om, at vi skal vise de helt små børn, at teknik er spændende og sjovt, inden de fastlåses i forestillingen om, at det kun er for specielle matematiske genier,« forklarer Bjarke Maigaard Pedersen fra SDU Embodied Systems for Robotics and Learning.

Han har udviklet Bricko, som et bud på en robot, der kan få kodning og programmering væk fra computerskærmen og ud i fingrene på børn helt ned til 1. og 3. klasse. Børnene fanger forbydere med den rullende robot ved at sætte Legoklodser sammen.

»Og det synes børn er sjovt,« siger Bjarke Maigaard Pedersen og håber, at den legende tilgang til teknologi kan være med til at bryde det skisma, at selvom vi om få år vil mangle ingeniører, så planlægger kun 2,6 procent af



Robotten Bricko i aktion. Foto: SDU

de danske 15-årige en karriere som ingeniør. Det tal er gennemsnitligt 6,9 procent for de resterende OECD-lande, viser tal fra Engineer the Future.

»Jo flere sanser, du involverer i læring, des bedre sidder det fast. Da vi testede robotten, observerede læreren, at de børn, som ikke er stærke i matematik og normalt trækker sig, levede sig fuldt ind i projektet.«

Bjarke Maigaard Pedersen har bygget Bricko

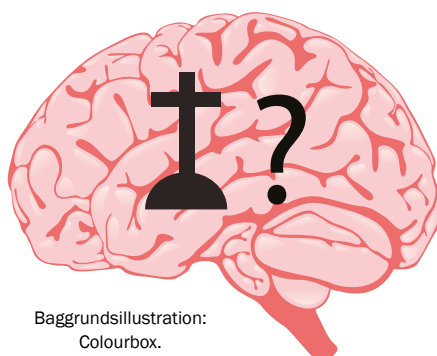
op omkring Legoklodsen, som børn i forvejen forbinder med leg og er helt trygge ved. Hver farve klods har sin kommando: Kør frem, tilbage, drej rundt, sig lyde. Klodserne har alle fået tilføjet et id. Når du sætter klodserne på styrepladen, aflæser en mikrocontroller id'erne og sender informationerne via bluetooth til robotbilen. Når robotbilen modtager informationerne, kan den begynde at udføre de enkelte programmeringskommandoer.

Birgitte Dalgaard, Det Tekniske Fakultet, SDU

Hjerne-genoplivning

Pattedyrs hjerner er ekstremt følsomme for udsving i forsyningen af ilt, og selv ganske korte tidsrum uden blodcirkulation og ilt kan føre til celledød og uoprettelige skader i hjernen. Det er baggrunden for, at de fleste lande i verden opererer med et hjernedøds-kriterium. I en nylig artikel i *Nature* udfordrer Nenad Sestan fra Yale University i New Haven, Connecticut, og kolleger det eksisterende paradigme om, hvor uoprettelige hjerneskaderne i virkeligheden er.

I artiklen beskriver forskerne en teknologisk platform bestående af et apparat til at sørge for blodgennemstrømning, en cellebeskyttende væske samt en kirurgisk procedure, som har vist sig i stand til at genoprette mikrocirkulationen og cellefunktioner i isolerede grisehjerter flere timer efter, at de er blevet udtaget af den døde krop. Systemet, som forskerne har kaldt BrainEx, er designet til at efterligne pulserende blodgennemstrømning ved normal kropstemperatur, når den cirkulerer



Baggrundsillustration: Colourbox.

rer den cellebeskyttende opløsning gennem den isolerede hjerne. Fire timer, efter at forskerne havde fjernet grisehjerne fra døde grise fra et slagteri, kobled de hjernerne til deres BrainEx-system. Gennem en seks timer lang periode med gennemstrømning observerede forskerne en reduktion i celledød og genopretning af visse funktioner i cellerne såsom omsætning af sukker og proteinsyntese samt aktivitet i synapserne (mellemrummet mellem to nerveender). Forskerne målte ingen overordnet elektrisk aktivitet

i hjernen, som kunne forbindes med mere avanceret hjernefunktion eller bevidsthed. Men de havde dog også helt bevidst forsynet deres cellebeskyttende væske med stoffer, der blokerer nervecellerne fra at udsende signaler. Undersøgelser af isoleret væv viste, at neuronerne havde potentiale til at kunne "fyre" (det vil sige udsende et aktionspotential), hvis de blev stimuleret direkte.

Forskerne skriver, at udvikling af deres eksperimentelle teknik vil kunne medvirke til at kaste lys over menneskehjernen i grænselandet mellem basal hjerneforskning og klinisk forskning. Men de skriver samtidig, at det selvfølgelig vil rejse en række etiske spørgsmål at udføre tilsvarende eksperimenter på menneskehjerner. Det er også muligt, at deres system vil kunne bruges på andre organer end hjernen med det formål at bevare vævets funktion efter værtens død.

CRK, Kilde: *Nature* vol. 568, pp 336–343 (2019)

Første billede af et sort hul

Billedet af et sort hul, der blev offentliggjort den 10. april, kandiderer uden tvivl til årets videnskabsbillede 2019. Begejstringen var i hvert fald stor, da et internationalt forskerhold på en koordineret pressekonference flere steder på kloden kunne annoncere, at det var lykkedes dem at tilvejebringe det første direkte visuelle bevis på et supertungt sort hul. Det videnskabelige gennembrud blev samtidig beskrevet i en serie af seks artikler i et særnummer af det videnskabelige tidsskrift *Astronomical Journal Letters*. Billedet viser det sorte hul i centrum af galaksen Messier 87, som befinder sig i galaksehoben Virgo. Det sorte hul har en masse 6,5 milliarder gange større en vores egen Sol, og det ligger i en afstand af Jorden på cirka 55 millioner lysår.

Den lyse ring på billedet skyldes lys, der afbøjes af den intense tyngdekraft rundt om det sorte hul. Da end ikke lys kan undslippe

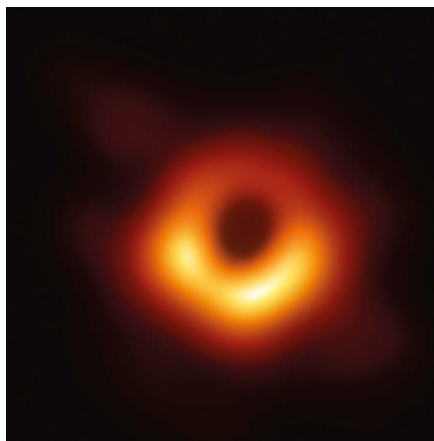


Foto: Event Horizon Telescope Collaboration.

tyngdekraften fra selve det sorte hul, når det er tilstrækkeligt tæt på, ses det sorte hul kun i form af den "skygge" det kaster, når det som her befinder sig i en sky af glødende gas. Denne skygge er 2,6 gange større end udstrækningen af selve det sorte hul, hvis

grænse kaldes begivenhedshorisonten. I dette tilfælde vurderes størrelsen på det sorte hul til at have en udstrækning på cirka 40 milliarder kilometer. Faktisk er sorte huller på trods af deres enorme masse relativt små astronomiske objekter, hvilket gør dem notorisk svære at observere.

At det er lykkedes forskerne at foretage de banebrydende observationer skyldes et koordineret samarbejde med otte forskellige jordbaserede observatorier bestående af i alt 51 individuelle radioteleskoper placeret rundt om jorden. Tilsammen udgør dette netværk et samlet virtuelt teleskop på størrelse med Jorden kaldet *Event Horizon Telescope* (EHT). Det sorte hul i centrum af Messier 87 var valgt som oplagt mål for EHT, fordi det var forudsagt til at være et af de største, som kunne ses fra Jorden.

CRK, Kilde: <https://eventhorizontelescope.org>

Tilbage til Egtved

Som mange læsere formentlig allerede har opdaget, er de berømte bronzealderkvinder – Egtvedpigens og Skrydstrupkvinden – for nylig i overført betydning blevet bragt hjem til Danmark igen. Deres oprindelse var ellers af forskere fra Nationalmuseet og Københavns Universitet i henholdsvis 2015 og 2017 blevet flyttet til udlandet, nærmere betegnet Schwarzwald og Böhmen i Tyskland, på baggrund af studier af strontiumisotoper i de to kvinders hår, tænder og negle.

Men ifølge et nyt studium publiceret i *Science Advances* af Erik Thomsen og Rasmus Andreasen fra Institut for Geoscience på Aarhus Universitet er der en væsentlig fejlkilde, der ikke er taget højde for i disse studier. Det drejer sig om de kort over udbredelsen af strontiumisotoper i Midt- og Vestjylland, der blev brugt til at sammenligne værdierne i kvindernes hår, tænder og negle med, og som viste, at disse værdier ikke kunne være blevet opnået i lokalområderne. Ifølge det



Egtvedpigens, berømt for sin bemærkelsesværdige klædedragt. Foto: Roberto Fortuna og Kira Ursem/CC BY-SA 2.0

nye studium er problemet med disse kort, at de ikke tager højde for, at landbrugets anvendelse af jordbrugskalk kraftigt kan påvirke strontiumværdierne, da den danske landbrugskalk indeholder store mængder strontium med en lav strontiumsignatur (signaturen betegner forholdet mellem isotoperne ^{87}Sr og ^{86}Sr). Derfor er det afgørende, at prøver til kortlægning af strontiumværdierne i miljøet tages i uberørte søer, åer og bække.

De to forskere har derfor taget en række prøver fra 20 uberørte damme, søer og kilder inden for en radius af 10 km fra Egtvedpi-

gens gravhøj. Og deres data viser, at strontiumværdierne i Egtvedpigens rester kunne være opnået inden for den radius.

Også Skrydstrupkvinden kunne

sagtens have fået sin strontiumsignatur lokalt – selv om de ældste målinger i hendes tænder og hår er relativt høje, og de yngste fra de sidste fire år af hendes liv er relativt lave. Hendes grav ligger meget tæt på den såkaldte hovedopholdslinje, hvor indlandsisen stoppede under sidste istid. Aflejringerne vest for hovedopholdslinjen har relativt høje strontiumværdier, mens aflejringer øst for linjen har lavere strontiumværdier, uanset om de er fra uberørte områder eller landbrugsområder. Det tolker de to geologer som, at hun er vokset op på hedesletten vest for hovedopholdslinjen, og at hun cirka fire år før sin død flyttede til det bakkede morænelandskab øst for linjen.

CRK, Kilde: scitech.au.dk, *Science Advances*, Vol. 5, no. 3, eaav8083

Kornmark på øen Møn juli 2018. Kornet var på dærende tidspunkt cirka halvt så højt som det forventede, hvilket sandsynligvis skyldes den regnfattige periode Møn og Danmark var ramt af i maj, juni og juli måned. Foto: S. H. Mernild.

Om forfatterne:



Sebastian H. Mernild (ph.d. og dr. scient.), Professor i klimaforandringer og administrerende direktør for klimaforskningssenteret Nansen Centeret, Bergen. sebastian.mernild@nersc.no



Jens Hesselbjerg Christensen (ph.d.) er professor i klimafysik ved Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet. jhc@nbi.ku.dk



John Cappelen er seniorklimatolog ved Danmarks Meteorologiske Institut. jc@dmi.dk

Mernild og Hesselbjerg er udpeget af FN's klimapanel IPCC til at være henholdsvis Lead Author og Review Editor på den kommende FN hovedklimarapport, AR6, under arbejdsgruppe 1.

NEDBØRS- EKSTREMER OG REGNFATTIGE SOMRE

Sommeren 2018 blev usædvanlig varm og regnfattig. Men hvor almindelige er den slags ekstreme hændelser? Forfatterne har analyseret danske nedbørsdata helt tilbage fra 1874 og finder en generel stigning i både middelnedbør og ekstreme nedbørshændelser over tid.

Siden 1880 er den globale middeltemperatur steget omkring 1,1 grader Celsius. Hovedårsagen til denne udvikling forklares bedst ud fra den stigende koncentration af CO₂ i atmosfæren. Kigger vi specifikt på Danmark er middeltemperaturstigningen i samme periode steget omkring 1,4 grader (baseret på data fra DMI's temperaturdatabase). Disse tal dækker såvel globalt som i Danmark over regionale variationer. Mens middeltemperaturen viser en ret entydig opadgående tendens,

forholder det sig anderledes med nedbøren. Her er variationerne betydelige, og retningen af ændringerne kan både gå mod tørrere eller vådere forhold. Det gælder således også for Danmark, hvor den årlige gennemsnitlige nedbør varierer ganske betydeligt fra egn til egn. Her vil vi forsøge at sætte dette i perspektiv set i lyset af den globale opvarmning.

Nedbøren over Danmark

Nedbør har været målt systematisk i Danmark siden DMI etablerede et observationsnetværk i 1874.

Samlet set viser disse målinger, at landsgennemsnittet af den årlige nedbør er steget siden da. Men der er også betragtelige variationer fra år til år (Figur 1). I gennemsnit er nedbøren siden 1874 steget med cirka 11 mm per årti frem til 2017, hvor de ekstreme nedbørsår – de mest våde år alle på nær ét var at finde i sidste halvdel af perioden, nemlig mellem 1946 og 2017. To tredjedele af de mest regnfattige år var at finde i første halvdel af tidsperioden mellem 1874 og 1945. Den årlige middelnedbør var 685 mm i

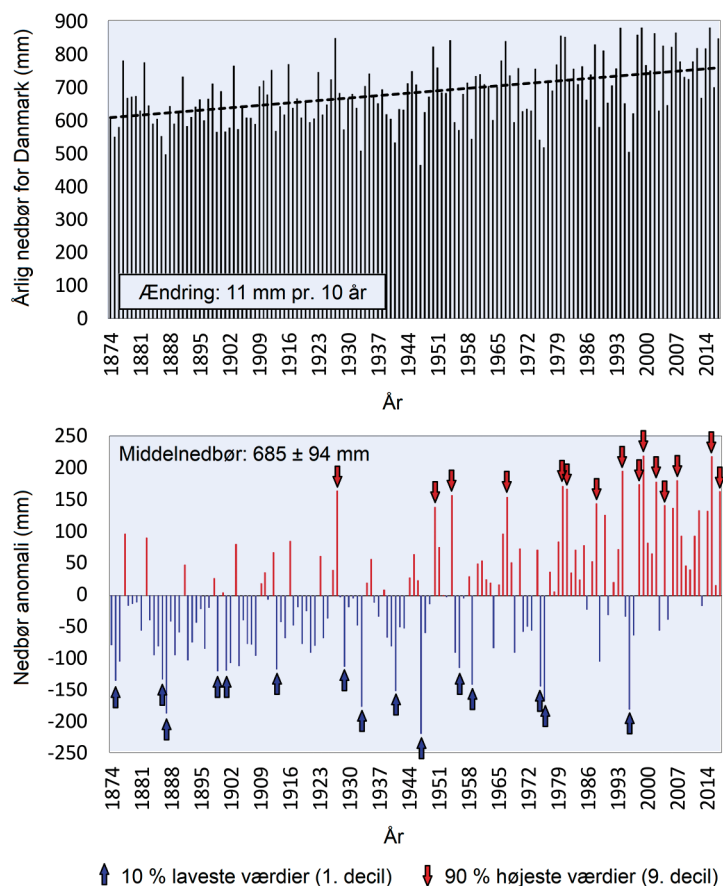
	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec	Årlig
Største nedbørsmængde													
mm	123	109	107	98	138	124	140	167	162	177	155	140	905
År	2007	2002	2019	1936	1983	2007	1931	1891	1994	1967	1969	1985	1999
Mindste nedbørsmængde													
mm	6	2	7	3	9	1	15	10	18	12	13	7	466
År	1996 1997	1932	1918 1969	1893 1974	1959	1992	1904 1983 1994	1947	1933	1922	1902	1890	1947
Største 24 timers nedbør på en lokalitet													
mm	50,0	61,8	54,8	66,5	94,0	153,1	168,9	151,2	132,7	100,8	62,3	74,6	---
År	1886	1881	1970	1969	2007	1880	1931	1959	1968	1982	1981	2010	---

↑ Tabel 1: Største og mindste nedbørsmængde målt i Danmark for hver måned angivet med årstal, samt største 24 timers nedbør for hver måned. Største og mindste nedbør observeret til dato er vist med fed skrift (kilde: DMI). Den største danske døgnintensitet på 168,9 mm blev målt i juli i Marstal i 1931.

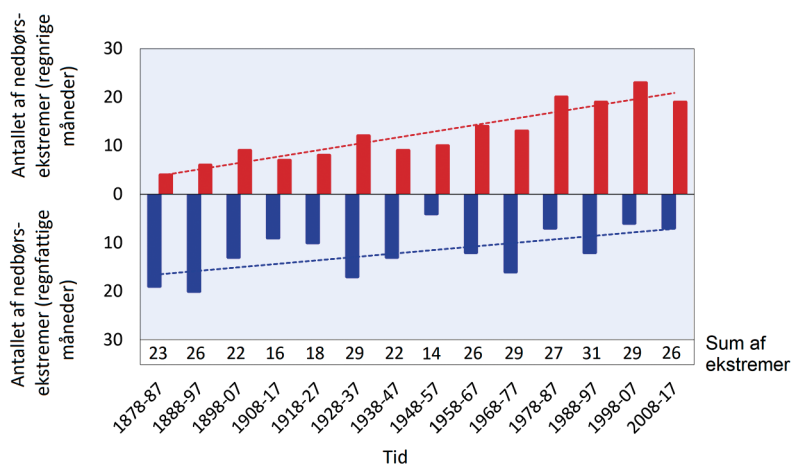
perioden fra 1874 og til 2017, hvor middelnedbøren over de seneste godt 10 år (2008-2017 var 778 mm mod 616 mm per år for årtiet 1881-1890. Den største årsnedbør blev målt i 1999 og var 905 mm, og det tørreste år med sølle 466 mm var 1947 (Tabel 1).

Disse årsmidler dækker over betragtelige sæsonvariationer, som det giver yderligere indsigt at studere. Kigger vi på månedsbasis, er antallet af ekstremt regnrige måneder i gennemsnit steget siden 1874, mens antallet af ekstremt regnfattige måneder samtidig er aftaget (Figur 2). Det betyder, at vi i Danmark over tid har set et skift i nedbørsmængde fra at være karakteriseret ved flere regnfattige måneder imod flere regnrige måneder. Beregnes antallet af månedsektremer (summen af ekstreme regnrige måneder og regnfattige måneder), ser vi en stigning i antallet af ekstremhændelser på seks hændelser per 100 år.

Juni måned 1992 er til dato den absolut regnfattigste måned observeret i Danmark med blot 1 mm, og oktober 1967 den mest regnrige måned med 177 mm. Der er en markant sæsonmæssig variation i forekomsten af ekstrem nedbør.



Figur 1. Tidsserie af årlig nedbør for Danmark 1874 til i dag (øverst). Nedbørsanomali i forhold til perioden 1874-2017, hvor ekstremnedbørsår er vist med pile: blå pile viser de 10 procent laveste hændelser (1. decil) og de røde pile af de 10 procent højeste hændelser (9. decil). ± er standardafvigelsen.



Figur 2. Antallet af nedbørsektremer – regnfattige (blå) og regnrige måneder (rød) – for Danmark for perioden 1878-2017 vist i tiårs-intervaller. De ekstrem regnfattige måneder er beregnet ud fra de 10 procent laveste hændelser (1. decil), og de ekstrem regnrige måneder ud fra de 10 % højeste hændelser (9. decil). Summen af nedbørsektremer per årti er ligeledes vist, hvor en lineær sammenhæng gennem sum af sektremer indikerer en stigning på seks hændelser pr. 100 år.

Generelt om den danske nedbør

Fordeling

Geografisk set er nedbøren over Danmark ujævnt fordelt. Den gennemsnitlige årlige nedbør er størst i Sydvestjylland – og lokalt langs den jyske højderyg og højtliggende områder – på grund af orografisk nedbør (den nedbør, der opstår, når en luftmasse presses op over en bakke, hvorved vanddampen fortættes, og der bliver dannet skyer og nedbør) med omkring 900 mm om året. Nedbøren er mindst i Kattegat- og Storebæltsregionen og på Bornholm med omkring 500 mm om året.

Nedbørskorrektion

Den målte nedbør er ofte underestimeret. Blandt andet fordi dråberne blæser forbi måleren på grund af turbulens, dråberne fordamper fra opfangsarealet på



En af DMI's nedbørsstationer, der er beliggende i indre København i Botanisk Have. Her er der målt nedbør siden 1874. Foto: DMI's teknikere.

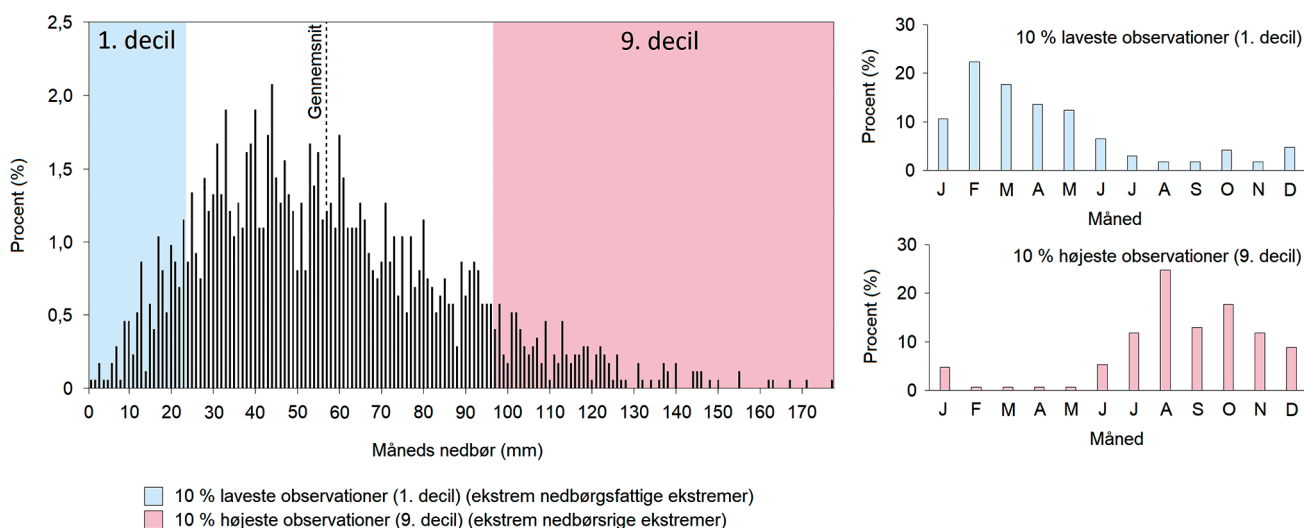


Beliggenheden af DMI's nedbørsstationer, hvorfra data om nedbøren er indsamlet siden 1874.

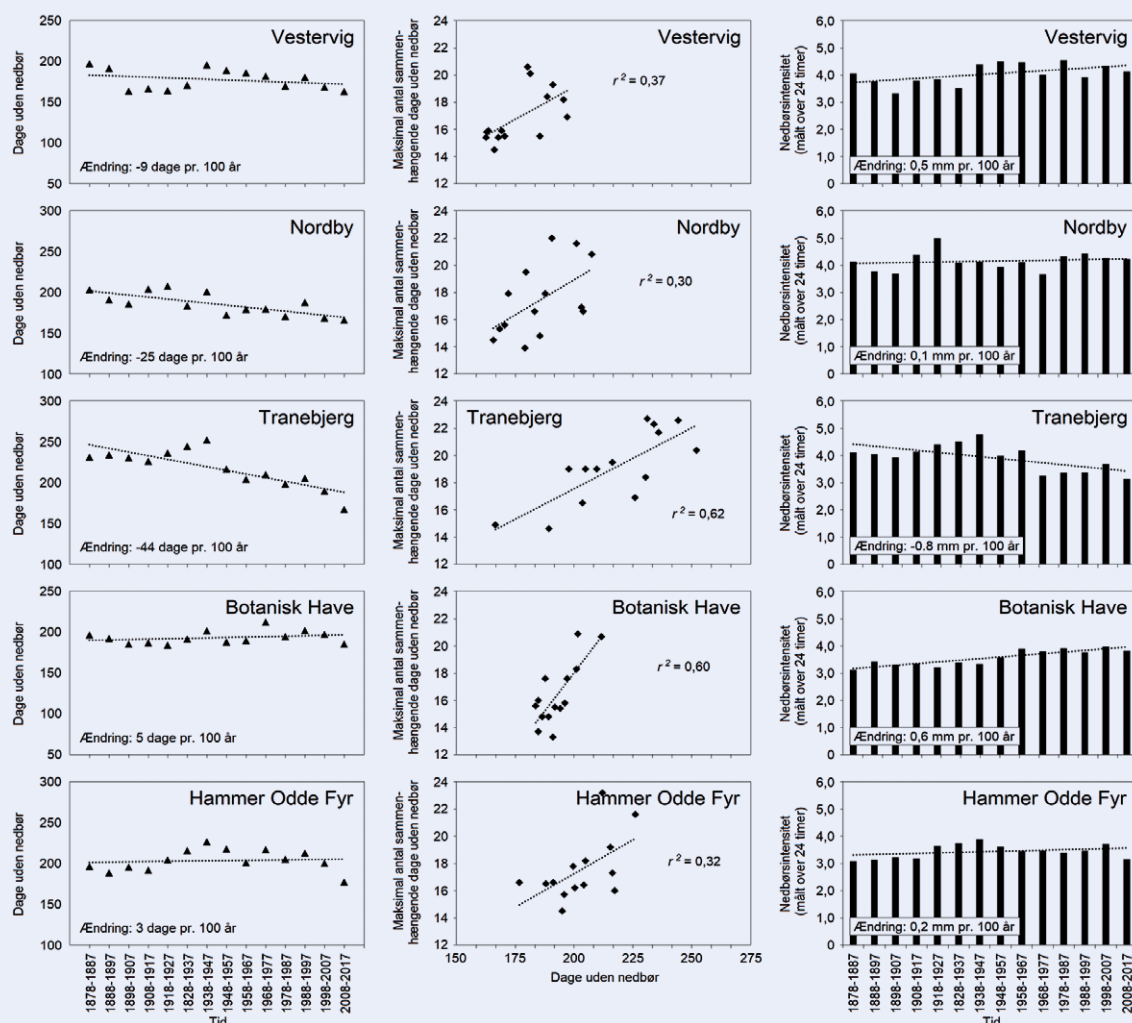
instrumentet, inden dråberne når målebeholderen, og fordi dråberne bliver siddende på siden af opfangsarealet og derved aldrig når målebeholderen. Derfor er der behov for nedbørskorrektion. En korrektionen, der varierer fra 0–30 %, hvor nedbøren kun falder som regn, til op imod 50–75 %, hvor nedbøren falder som sne. Nedbørskorrektion beregnes for eksempel ud fra temperatur- og vindforhold og nedbørsintensitet afhængig af, hvilke korrektionsberegninger der anvendes.

Ekstremer

Ekstremer begivenheder ligger per definition langt fra det "gennemsnitlige". Ekstremværdihændelser er derfor baseret på tidligere observationer og den periode, de dækker. Nedbørsektremer kan inddeles i både regnrige- og regnfattige ekstremer. Ekstremhændelser er i litteraturen ofte defineret som de 10 % laveste værdier (1. decil) – regnfattige-ekstremer – af en tidsserie, hvorimod de 10 % øverste værdier (9. decil) er defineret som regnrige-ekstremer. Disse er også anvendt i dette studie.



Figur 3. Den procentvise fordeling af månedsnedbør for Danmark for 1874 til 2018 med en angivelse af månedsgennemsnit (57 mm per måned) samt månederne liggende inden for de 10 % laveste (1. decil, lyseblå) og højeste (9. decil, lyserød) observationer. Til højre er vist den procentvise forekomst fordelt per måned. Bemærk, at der ikke tages hensyn til forskelle i antal dage i måneden, hvilket dog kun påvirker resultatet marginalt.



Figur 5. Antallet af dage uden nedbør (trekanter), sammenhængen mellem antallet af dage uden nedbør og nedbørsintensitet (søjler) for de fem DMI-stationer. Beregningerne er foretaget som middelværdier for hver årti (1878–1887, 1888–1897, etc.). r^2 -værdierne angiver korrelationskoefficienten ved en antaget lineær sammenhæng. r^2 angiver graden af sammenhæng mellem de to parametre, det vil sige den del af variationen i den afhængige parameter (maksimal antal sammenhængende dage uden nedbør), som kan forklares med variationen i den uafhængige parameter (dage uden nedbør).

De mest regnrige måneder (de 10 procent højeste hændelser; 9. decil: > 97 mm pr. måned) forekommer typisk fra juni til november (Figur 3), hvor de største nedbørsmængder målt over 24 timer samtidig er op til tre gange mere intense end i vintermånederne (december til februar). Det forklares kort ved, at varm luft indeholder mere vand end kold. De mest regnfattige måneder (de 10 procent laveste hændelser; 1. decil: < 23 mm pr. måned) forekommer af samme årsag også typisk i perioden fra januar til maj.

Sommeren 2018

Månederne maj til juli i 2018 vil blive husket som både varm og regnfattig i Danmark. I de tre

måneder maj, juni og juli faldt der tilsammen kun 59 mm, og det gjorde dem samlet set til de mest regnfattige af den tilsvarende tremåneders periode siden 1874. Sommeren 1976 var ligeledes regnfattig. Her var månederne juni til august samlet set den mest regnfattige tre-måneders periode, der er observeret siden 1874 med blot 49 mm. For de samme tre måneder (juni til august) var 2018 den 22. mest regnfattige sommer, da august ikke blev så tør som månederne før. Disse nedbørsmængder over Danmark var forårsaget af længerevarende stabile højtryksområder over Nord- og Vesteuropa, som formåede at holde lavtryk og nedbør på afstand.

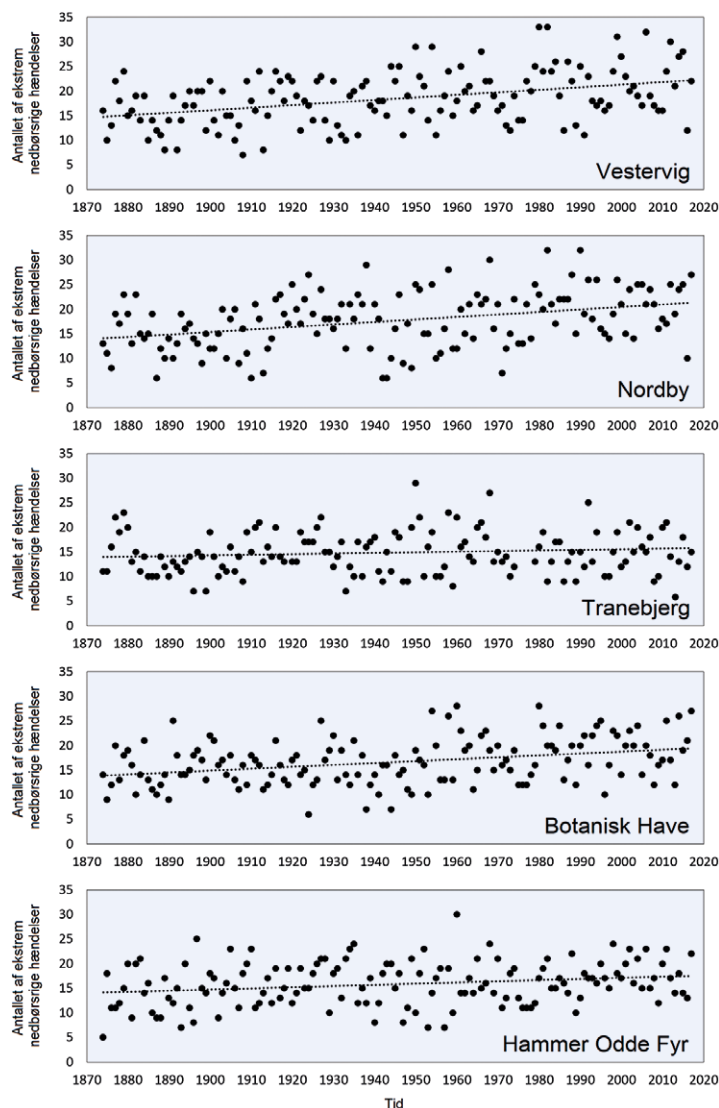
De regnfattige forhold fra maj til juli 2018 fik samfundsøkonomiske konsekvenser. Således blev kornhøsten ifølge organisationen Landbrug & Fødevarer den ringeste siden 1983. Sommerens tørvejr skal ses i sammenhæng med et efterår i 2017 (september til november), som var den 9. vådeste efterårsperiode siden 1874 med hele 291 mm – kombinationen af meget efterårsnedbør i såperioden for vintersæd og begrænset nedbør i vækstsæsonen gav forventeligt en meget ringe kornhøst.

DMI's nedbørsstationer

DMI's nedbørsstationer placeret rundt om i landet giver en unik mulighed for på enkelte lokaliteter at

Tabel 2: Nedbørsmængde målt i Danmark for perioderne: maj, juni og juli; maj, juni, juli og august; og juni, juli og august. Månederne i 2018 er vist med fed og i 1976 i kursiv. Kilde: DMI.

Maj, juni og juli (mm)		Maj, juni, juli og august (mm)		Juni, juli og august (mm)	
1	59 (2018)	1	<i>112 (1976)</i>	1	<i>49 (1976)</i>
2	75 (1992)	2	127 (1899)	2	55 (1983)
3	79 (1921)	3	127 (1975)	3	91 (1899)
4	92 (1876)	4	133 (1876)	4	96 (1975)
5	92 (1975)	5	137 (1947)	5	98 (1887)
6	99 (1899)	6	144 (1887)	6	110 (1995)
7	99 (1904)	7	158 (1913)	7	113 (1955)
8	99 (1934)	8	159 (1921)	8	114 (1876)
9	99 (1959)	9	160 (2018)	9	114 (1904)
10	<i>100 (1976)</i>	10	160 (1959)	10	120 (1996)
----	----	----	----	22	142 (2018)



Figur 6. Antallet af nedbørsekstremer – ekstreme regnrige dage – for hvert år for hver af de fem nedbørsstationer i Danmark for perioden 1878–2017. Antallet af de ekstremt regnrige dage er bestemt ud fra de 10 procent højeste hændelser (9. decil).

analysere for eksempel nedbørsudvikling og -variation, nedbørsintensitet, varighed og hyppighed af regnfattige perioder. I Danmark er der fem nedbørsstationer, der har målt nedbør stort set uden forstyrrelser tilbage til januar 1874 (Figur 4). Disse er placeret i henholdsvis Vestervig og Nordby i Vestjylland, i Tranebjerg på Samsø, i Botanisk

have i København og ved Hammer Odde Fyr på Bornholm.

På de tre vestdanske stationer ses en tendens mod, at antallet af tørvejrdsdage (dage med under 1 mm nedbør) i gennemsnit er aftaget (Figur 5). Da det er længere sammenhængende tørvejrperioder, som afgør, om der opstår tørke,

kan sammenhængen mellem antallet af tørvejrdsdage og det maksimale antal sammenhængende dage uden nedbør give et fingerpeg om, hvorvidt vi ser en ændring i forekomsten af tørke. For hver af de fem stationer finder man, at jo færre dage uden nedbør, jo kortere synes den længste sammenhængende tørvejrperiode at være. Samtidig ses det, at nedbørsintensiteten (målt over 24 timer) for nogle stationer i gennemsnit er steget over tid. Lidt mere enighed mellem landsdelene finder man ved at se på antallet af regnrige nedbørsekstremer, som er steget for alle fem stationer (Figur 6). Det er muligvis et udtryk for, at jo varmere luften er, jo mere intens er nedbøren, dog med betydelige variationer selv indenfor et lille geografisk område som Danmark.

Næste skridt: at se på konsekvenserne

De nedbørstatistikker, vi her har kikket på, påpeger, at der kan konstateres nogle relativt robuste ændringer i både middelnedbør og forekomsten af mere ekstreme nedbørshændelser, relateret til forekomsten af både meget våde og meget tørre perioder. Det ligger i god tråd med, hvad blandt andet rapporterne fra FN's klimapanel (IPCC) peger på som de vejrtyper, Danmark skal forvente at se mere til i takt med, at den globale opvarmning øges. Interessen for disse ændringer retter sig naturligvis imod de mulige konsekvenser for samfundet. I de analyser, vi præsenterer her, har vi ikke fokuseret på effekterne, men udelukkende set på observationer, og selv om længere perioder med rekordrige nedbør oftest giver egentlig tørke, så er tørvejr og tørke ikke det samme. Tilsvarende giver kraftig nedbør ikke altid anledning til oversvømmede engdrag eller kloaker. For at kunne drage samfundsrelaterede konklusioner om effekten af de tendenser, vi påpeger, skal vi uddybe analyserne og blandt andet have et endnu bedre overblik over, hvordan den årlige variation af disse ændringer ser ud. ■

Videre læsning: Cappelen, J. (ed), 2019. Denmark - DMI Historical Climate Data Collection 1768-2018. DMI Report 19-02. (bliver publiceret i foråret 2019).

Mernild og andre 2015. Greenland precipitation trends in a long-term instrumental climate context (1890–2012): Evaluation of coastal and ice core records. International Journal of Climatology, 35, 303–320, doi:10.1002/joc.3986.

Boberg og andre 2010. Improved confidence in climate change projections further evaluated using daily statistics from ENSEMBLES models. Clim. Dyn., 35, 1509–1520.

Allerup, P. og andre 2000. Correction of precipitation based on off-site weather information. Atmos. Res., 53, 231–250.

Danmarks Meteorologiske Institut: dmi.dk



Vil du bidrage til at skabe en harmonisk planet for mennesker og natur?

Så skal du læse til civilingeniør i fysik og teknologi eller cand.scient. i fysik

Flyvemaskiner, GPS, internet, stråleterapi og rumrejser. Vores højteknologiske samfund bygger på viden om fysik og på fysikkens love. Det er også principper fra fysikkens og teknologiens verden, som skal bidrage til at øse klimaudfordringerne og skabe værktøjer til øget bæredygtighed.

På Syddansk Universitet i Odense har de to uddannelser, civilingeniør i Fysik og Teknologi

og cand.scient. i Fysik, samme kurser og projekter de to første semestre.

På dit første studieår får du derfor det bedste naturvidenskabelige og ingeniørfaglige grundlag. Samtidig får du indblik i begge uddannelser, før du vælger din endelige retning. Uanset hvad du vælger, bliver du blandt de mest eftertragtede for jobmarkedet - og planeten.

Marker med vinterafgrøder, som i foråret står under vand, ligner nærmest rismarker. Det er dog helt almindelig korn, som spirer i takt med, at vandet fordampes. Når vandet er væk, vil der ikke være meget nitrat tilbage i jorden. Nogle år er der risiko for, at frøene er rådnet op, før de når at spire. Foto: Bo Elberling.

VÅDE MARKER GIVER MERE LATTERGAS

De våde lavninger på dyrkede marker udgør en overraskende stor kilde til drivhusgassen lattergas, viser ny forskning. Et godt råd vil være at lade disse områder forblive grønne, så de året rundt optager nitrat fra omgivelserne og dermed minimerer frigivelsen af lattergas.

Der er så dejligt ude på landet... Sådan skrev H.C. Andersen. Og det er da også en dejlig oplevelse at bevæge sig rundt i et kuperet landskab med marker, småskove og søer – ikke mindst, når foråret har bidt sig fast, det hele grøner, og viben slår et slag i luften. Ikke alle landmænd kan dog helt glæde sig over idyllen. Deres arbejde vanskeliggøres af, at en del af deres marker står under vand. Stedvis ligner det mest gadekær, som tiltrækker gravænder og måger. Nye undersøgelser viser, at disse områder kan udgøre en overraskende stor kilde til den vigtige drivhusgas lattergas. Ikke fordi de gødes eller indeholder store mængder af nitrat, men fordi nitratholdigt vand løber til fra omgivelserne. De bare marker og de iltfrie betingelser i de oversvømmede marker optimerer nemlig nedbrydningen af nitrat til lattergas og frit kvælstof, uden at det kommer afgrøderne til gæde.

Hvor skal de grønne bræmmer være?

Lattergas er den vigtigste drivhusgas fra landbruget. Hidtil har der været fokus på grønne bræmmer med naturlig vegetation langs årer og søer for at undgå udsivning af nitrat og algeopvækst og dermed iltsvind i vores vandløb, søer og kystnære områder. Der er allerede lovpligtige bræmmer på to meter langs vandløb. Såkaldte MFO-bræmmer (miljøfokusområde) er en fællesbetegnelse for de udyrkede bræmmer, der ligger enten langs vandløb eller et andet sted på marken. Fremadrettet er der et krav om, at MFO udgør 5 % af det dyrkede land. Disse MFO-bræmmer skal være mellem 1 og 20 meter brede. Forundersøgelser i trekantsområdet – Sorø, Ringsted og Roskilde – viser, at det kan være en rigtig god ide at placere bræmmer i de lave dele af markerne, som efterår og forår står under vand og alligevel er svære

at dyrke uden betydelige udgifter til dræning.

Målinger i felten

Målinger af pløjelaget på tværs af marker viser overraskende, at der hvor der er nitrat er lattergasfrigivelsen lille, men der hvor nitratholdet ofte er lille, kan frigivelsen af lattergas være meget stor. Paradokset skyldes, at i de tørre dele af markerne er der ilt til stede, og organisk stof og gødning omsættes hurtigt ved nitrifikation; en proces i jorden, hvor mikroorganismer producerer nitrat. Under nitrifikationen kan der frigives små mængder lattergas. Nitrat er nemt at opløse i vand, og når det regner, løber nitratholdigt vand derfor ned til de lavere dele af markerne. I lavningerne samler vandet sig om efteråret, og disse lavninger forbliver til tider under vand det meste af vinteren. I det tidlige forår tørrer lavningerne langsomt ud og forsinker bearbejdningen af jorden.



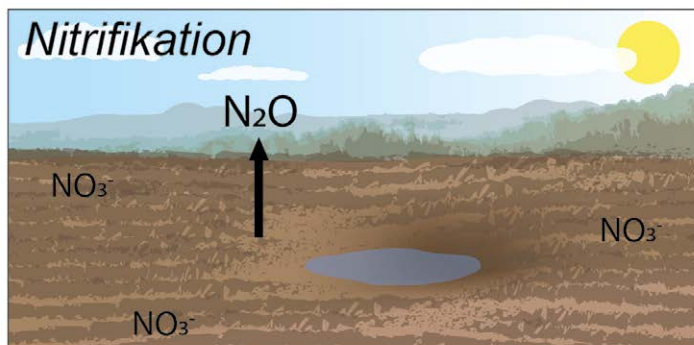
Bo Elberling er professor ved Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet. Han forsker i processer i jordmiljøet og spillet mellem planter og mikroorganismer. Email: be@ign.ku.dk

Den dårlige dræning i lavninger skyldes blandt andet, at der over mange år er sket en langsom udvaskning af jordens fineste partikler (ler og silt), som ender i disse lavninger. Det betyder, at når det nitratholdige vand løber til i lavningerne, har vandet svært ved at sive ned i jorden. Det danner de mange oversvømmede marker, hvor iltfrie forhold betyder, at nitrat hurtigt kan laves om til lattergas.

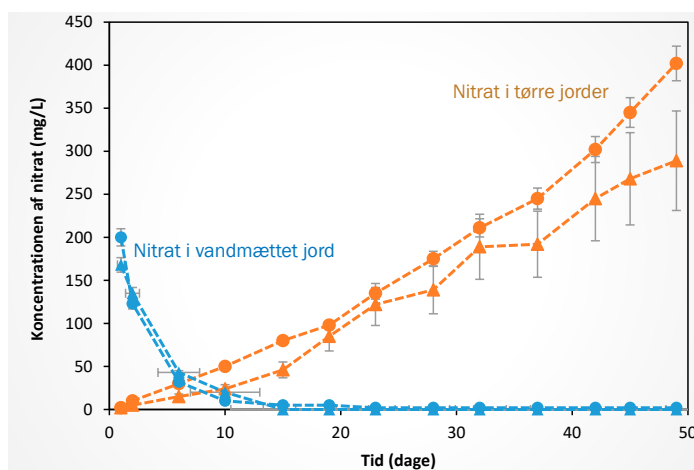
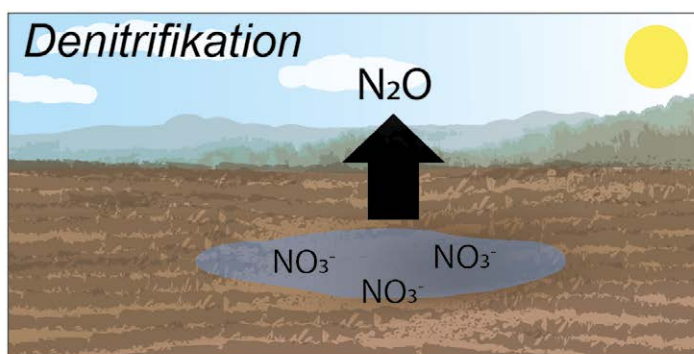
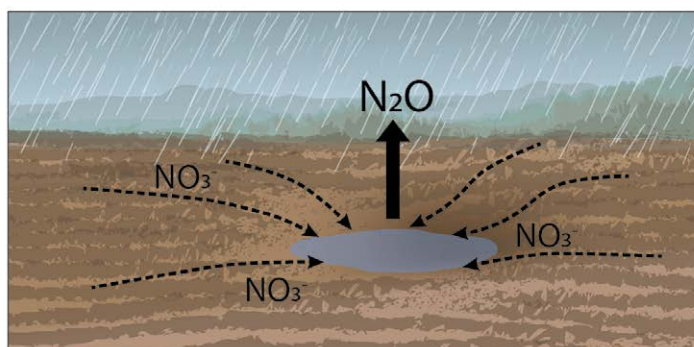
Feltmålinger fra Sorø viser, at pløjelagets nitratindehold og målte frigivelser af lattergas kan være mere end 100 gange højere end normalt umiddelbart efter nedbør. Men kun i oversvømmede lavninger. Efter 10 dage var lattergasfrigivelsen ikke længere målbar, og nitratindeholdet mindre end 5 mg/L. I de tørre dele af markerne var koncentrationerne halveret og udvasket til både lavninger og sivet ned til dybere jordlag.

Kolonneforsøg i laboratoriet

I dette projekt er der taget små jordkolonner med hjem i laboratoriet. Her er der tilsat nitrat i forskellige koncentrationer, samtidig med at kolonnerne er blevet oversvømmet. Når jordkolonnerne er helt vandmættede, sker omdannelsen af nitrat hurtigt: i løbet af 3-5 dage er mere end 80 % af den tilsatte nitrat omsat og cirka 40 % frigivet i form af lattergas. Disse kolonneforsøg viser, at omdannelsen af nitrat til lattergas og frit kvælstof sker hurtigt, men viser også, hvorfor oversvømmede marker ikke hele tiden frigiver lattergas. Man skal nærmere forestille sig en bøvs af lattergas i op til 10 dage efter kraftig nedbør, hvor der er tilført betydelige mængder af nitrat. Desuden betyder hastigheden af processen, at i områder med udbredte oversvømmelse, når nitratindeholdet slet ikke ud i alle dele af oversvømmelsen, men omsættes i randområderne. Det betyder, at målinger af lattergasfrigivelse fra mark til mark og fra år til år vil variere meget og er svære at omregne til areal-bidrag – tab af kvælstof i form af lattergas per hektar. De foreløbige undersøgelser tyder på, at et markant kuperet



De tørre dele af marken er domineret af nitrifikation, produktion af nitrat og dermed en ophobning af nitrat. Når det regner, løber vandet til lavningerne, og her sker dannelsen af nitrat til lattergas ved processen denitrifikation.



Figuren viser koncentrationen af nitrat i jorden målt som den vandopløselige koncentrationer i en blanding af jord og vand (1:2,5). Med orange ses, hvordan nitratindeholdet stiger i tørre jorder i felten (42 marker) i efteråret 2018 (trekanter) og i laboratoriet (cirkler) ved stuetemperatur. Tilsvarende ses med blå, hvordan nitratindeholdet falder hurtigt i lavninger umiddelbart efter markerne er blevet vandmættet. Det ses, at udgangspunktet for nitratindeholdet i de oversvømmede marker er lavere end koncentrationen i tørre jorder. Det skyldes formentligt nitratudvaskning, før markerne er helt vandmættet.

terræn med mange små oversvømmede arealer giver anledning til de største tab af kvælstof. Så marker, der er fuldstændig oversvømmet, medfører ikke en stor frigivelse af lattergas.

Årsbudget for lattergas

I de seneste to år er tre marker nær Sorø blevet målt gentagne gange – både de oversvømmede områder og de omkringliggende tørre marker. Det er vigtigt at gentage målingerne



↑ Sådan kan man forestille sig langt flere lavninger i fremtiden – med vegetation året rundt og derfor minimal frigivelse af lattergas. Foto: Bo Elberling.

af lattergas, fordi frigivelsen sker som pulse. Umiddelbart efter regn kan frigivelsen være mere end 100 gange højere end før nedbøren, og 8-10 dage senere er frigivelsen faldet til udgangspunktet. Ved at lave mange gentagne målinger kan der gives et forsigtigt bud på et samlet bidrag fra en typisk mark, hvor 5 % er oversvømmet i fire måneder om året. I 2018 udgjorde de oversvømmede områder af de tre marker ved Sorø samlet set mere end 95 % af markernes samlede frigivelse af lattergas. Hvis denne kilde til lattergas ikke er indregnet i de nuværende bud på landbrugets lattergasbidrag, så er de nuværende tal fra landbruget måske ikke helt retvisende. Som sagt er der stor usikkerhed omkring, hvordan der skal skaleres til mere eller mindre kuperede marker, og hvordan den naturlige variation vil være fra år til år. Den maksimale frigivelse forventes at være knyttet til længere perioder med varmt vejr i sensommeren og foråret, der giver anledning til nitratproduktionen i markernes tørre dele efterfulgt af markante nedbørsbegivenheder, der betyder transport og nedbrydning af nitrat i lavbundsområderne. De bedste bud på et fremtidigt klima i Danmark ser desværre ud til, at netop den kombination (tør sensommer efterfulgt af markant nedbør) er ret sandsynlig – så problemet går ikke væk af sig selv.

Betydning af landbrugspraksis

Der er stor forskel på, hvordan jorden dyrkes. Grønne marker og efterårsafgrøder i form af kvælstofbindende planter som ærter er

populære. Disse afgrøder nedpløjes før vinter, så markerne er klar til at blive tilsået næste forår, og så der kan ske en langsom frigivelse af kvælstof til afgrøderne næste år. Det regnes for at være en god miljøløsning. Men fordi sensommeren kan være både varm og regnfuld, betyder det, at der efter nedpløjning allerede sker en hurtig nedbrydning og dermed en produktion af nitrat, som med regnvand kan føre nitrat til lavningerne. Efteråret 2017 og 2018 er gode eksempler. Resultatet er, at de bare jorde efter nedpløjning ikke har planter, der kan optage nitrat, og derfor frigives store mængder af lattergas – ikke som man skulle tro, hvor der er mest nitrat, men der, hvor nitrat løber til – lavningerne i marker. Man kan kalde det hotspots, fordi hovedparten af hele markens lattergasfrigivelse frigives fra typisk mindre end 5 % af markerne. Hvis man tager prøver af disse hotspots 5-10 dage efter nedbør, så er der ingen nitrat – fordi den jo netop er lavet om til lattergas og i øvrigt frit kvælstof, som der er masser af i atmosfæren og på ingen måder skader miljøet.

Det er ironisk, at netop de dele af landbrugsområdet, som er sværest at dyrke og giver mindst udbytte, er årsag til hovedparten af frigivelsen af lattergas. Optimering i forhold til arealanvendelsen og lattergasfrigivelse er slet ikke tænkt ind i nuværende rådgivning til landbruget. Dette på trods af, at det koster penge for landbruget at "fyre for fuglene" ved bringe kvælstof ud på markerne og så tabe en betydelig

del til atmosfæren i form af enten lattergas eller frit kvælstof.

Løsninger

En del af løsningen er landbruget og Danmarks Naturfredningsforening selv kommet med. De dårligste drænedes områder skal identificeres via droner og satellitbilleder, og så er det en samfundsmæssig opgave at sikre, at disse områder tages ud af drift for at give plads til små naturområder med anden vegetation, der kan optage hovedparten af den nitrat, der løber til fra omkringliggende marker. Det betyder en betydelig reduktion af lattergasfrigivelsen, samtidig med at små naturområder kan være vigtig yngle- og skjulesteder for dyr og fugle. Den naturlige vegetation optager desuden kuldioxid fra atmosfæren, som kan ende som tørv netop på grund af de våde og iltfrie forhold. Derved sikres en mere langsigtet ophobning af kulstof i jorden. Der kan opstå forhold, hvor der også dannes metan, men de fleste undersøgelser fra danske moser viser, at metanfrigivelsen målt i CO₂-ækvivalente er markant mindre end den mængde kulstof, der begravnes i form af tørv. Så samlet set er det en betydelig reduktion af landbrugets drivhusgasfrigivelse.

Et vigtigt forhold er dog, at disse områder ikke nødvendigvis medfører lige så meget biodiversitet som andre former for MFO-bræmmer. De mere tørre, næringsfattige og gerne kalkrige områder giver nemlig ofte en helt anden grad af diversitet ved at blive taget ud af den normale drift. ■

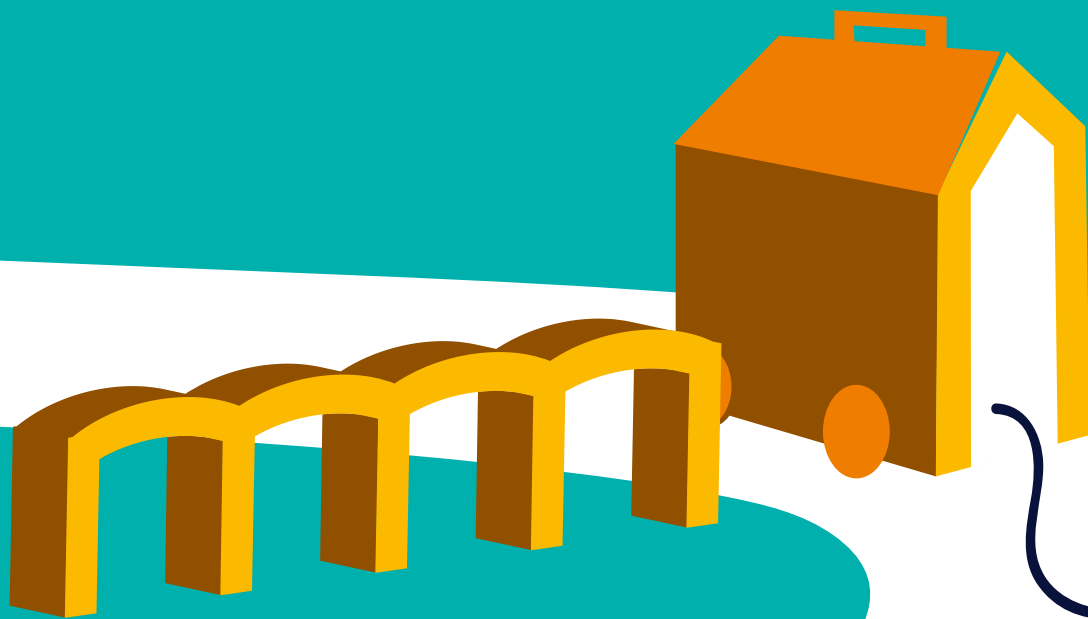
Videre læsning
Elberling, B. & Jørgensen, C.J. (2013) Kulstof & kvælstof på godt og ondt - danske vådområders bidrag til drivhusgasbudgettet. Geovid 4, 9-12.

Kjaer C.R. (2000) Lattergas i atmosfæren - ikke noget at grine af! Aktuell Naturvidenskab 2000 nr. 05.

Reay m.fl. (2012) Global agriculture and nitrous oxide emissions. Nature Climate Change 2, 410-416.

DET RULLENDE UNIVERSITET

FÅ EN LÆRERIG UNDERVISNINGSDAG PÅ JERES EGET
GYMNASIUM MED STUDERENDE FRA **AARHUS UNIVERSITET**



Med Det rullende Universitet kan jeres elever

- ✓ få et realistisk indblik i livet som universitetsstuderende
- ✓ blive undervist af studerende i spændende og relevante emner af høj faglig kvalitet
- ✓ høre om forskellige uddannelser på Aarhus Universitet
- ✓ få større viden om overgangen fra gymnasium til universitet

Vi ruller også gerne ud til jeres gymnasium!

Besøg DRU.AU.DK
eller skriv til os på DETRULLENDEUNIVERSITET@AU.DK



AARHUS
UNIVERSITET

TERAHERTZ TEKNOLOGI

– ud af laboratoriet og ind i fremtiden

Fra sporing af sprængstoffer til fremtidens 6G-netværk
– så vidt spænder de potentielle anvendelser af såkaldt terahertz-teknologi.
Bag navnet gemmer sig blot et område i det elektromagnetiske spektrum,
det først i løbet af de seneste 30 år er blevet muligt at udforske i detaljer.



Forfatteren

Esben Skovsen er lektor på Institut for Materialer og Produktion ved Aalborg Universitet. Esben forsker i optik og spektroskopi og er blandt andet projektleder på to THz-relaterede forskningsprojekter. es@mp.aau.dk
www.mp.aau.dk/researchgroups/physics/

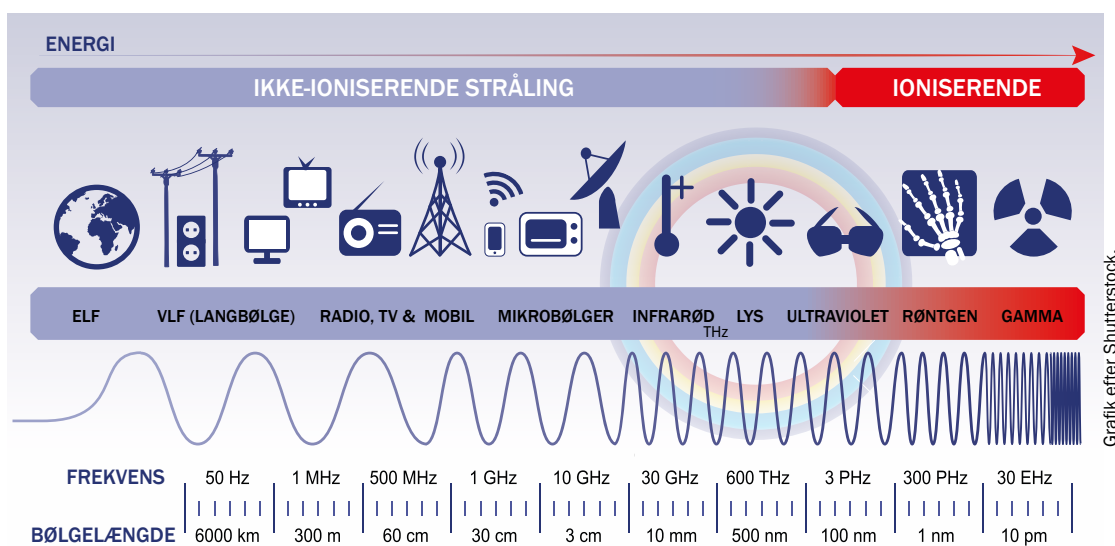
Elektromagnetiske stråling i intervallet mellem infrarødt lys og mikrobølger kaldes terahertz-stråling (THz-stråling). Indtil slutningen af 1980'erne var det svært at lave og måle THz-stråling på en praktisk måde, og der har derfor været en lang periode, hvor THz-området var den mindst udforskede del af det elektromagnetiske spektrum. Problemet var, at datidens elektriske komponenter var for langsomme til at generere stråling med så høje frekvenser ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hertz}$), og at foton-energien af THz-stråling var for

lille til, at man kunne finde egnede materialer til at udvikle en THz-laser. Det har dog ændret sig i løbet af de seneste 30 år, hvor den nødvendige teknologi stille og roligt er blevet tilgængelig. Det er nu blevet muligt at anvende THz-stråling til alt muligt fra sporing af sprængstof og narko til diagnosticering af hudkræft og krops-skannere, der kan kigge efter skjulte våben gennem vores tøj.

Hvad var tricket?

I slutningen af 1980'erne og starten af 90'erne opdagede man, at man kunne generere og måle

frit-propagerende THz-pulser ved hjælp af såkaldte fotokontakter, som man aktiverede med en pulseret laser. Fotokontakterne fungerede med andre ord som en slags antenner, der kunne udsende og opfange THz-stråling, når de blev aktiveret af en kort laserpuls. Ved at variere tiden fra man aktiverede THz-kilden, til man aktiverede detektoren, kunne man måle, hvornår THz-pulsen nåede frem. Senere har man fundet ud af, at man også kan drive fotokontakterne med en kombination af to lasere med næsten samme frekvens. På den



Oversigt over det elektromagnetiske spektrum. En terahertz er 10^{12} Hz og forkortes THz. Oftest defineres THz-området til at være frekvensområdet fra 0,1 THz til 10 THz. I luft svarer det til bølgelængder fra 30 μm til 3mm. Frekvensbåndet fra 0,3-3,0 THz kaldes THF-båndet og ligger lige over EHF-båndet, hvor fremtidens 5G-netværk kommer til at operere. THz-stråling er ikke-ioniserende og er ufarligt for mennesker ved lave intensiteter.

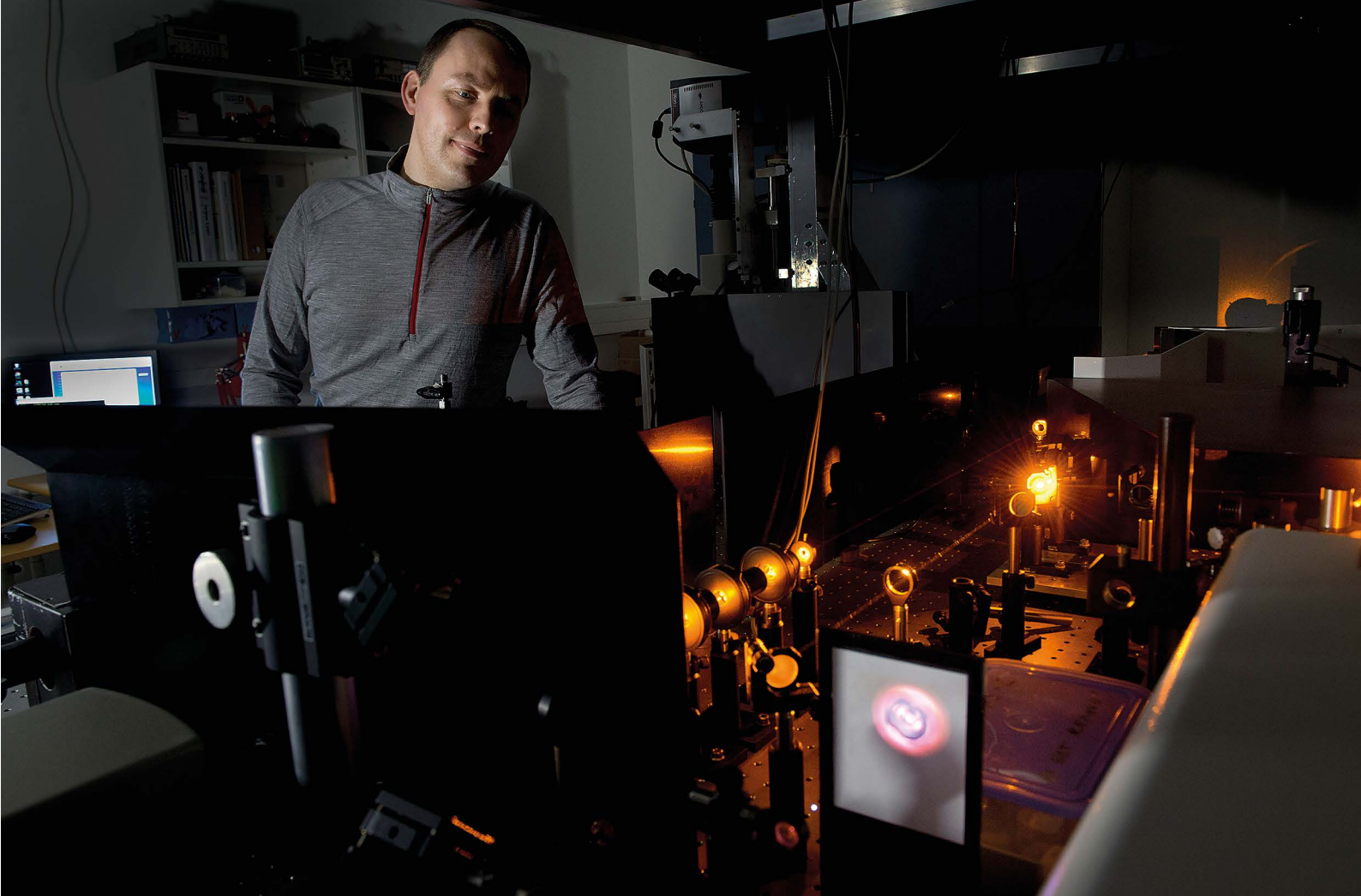


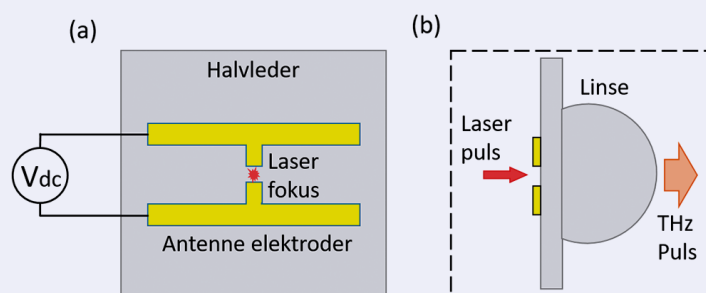
Foto: Lars Horn, "Baghuset".

måde udsendes der stråling med en frekvens, der svarer til forskellen mellem de to lasers frekvens. Nu om dage er der mange alternative metoder til at lave og måle THz-stråling, men THz-teknologi baseret på forskellige varianter af fotokontakter er stadig den mest udbredte uden for universiteternes forskningslaboratorier.

Lange bølgelængder - og hvad så?

De lange bølgelængder, sammenlignet med synligt lys, giver både fordele og ulemper. Når bølgelængden er sammenlignelig med dimensionerne af de optiske komponenter, er man nødt til at tage højde for diffraktion. Diffraktion er en interferenseffekt, der gør, at strålingen ikke længere bare løber langs rette linjer, som man antager i den geometriske optik. Selv almindelige komponenter som spejle og linser er derfor "små nok" til at få strålingen til at "bøje om hjørner". Dette er blandt andet kendt fra diffraktionsmønstret, der

THz-antenne baseret på en fotokontakt



Figurerne viser, hvordan en THz-antenne baseret på en såkaldt fotokontakt fungerer – set forfra (a) og fra siden (b). Fotokontakten består af et fladt stykke halvleder, typisk gallium arsenid, hvorpå der er lavet to metalliske antenneelektroder. Elektroderne forbindes til en spændingsforsyning, der kan påtrykke en spændingsforskel på omkring 5-40 Volt mellem elektroderne. Når en kort laserpuls fokuseres og sendes ind i gabet mellem de to elektroder, der udgør antennen, vil laserpulsens område inde i gabet lede i nogle få picosekunder. Derved vil der løbe en kortvarig strøm mellem elektroderne, som vil få antennen til at udsende en THz-puls. THz-pulsens vil også typisk vare nogle få picosekunder og indeholde frekvenser fra nogle få hundrede gigahertz op til nogle få terahertz.

For at få mest mulig THz-effekt koblet ud af antennen monteres der oftest en linse på bagsiden, hvor THz-strålingen kommer ud. Man kan også bruge en lignende antenne til at måle THz-stråling ved at måle strømmen mellem de to elektroder, når en indkommende THz-puls rammer antennen.

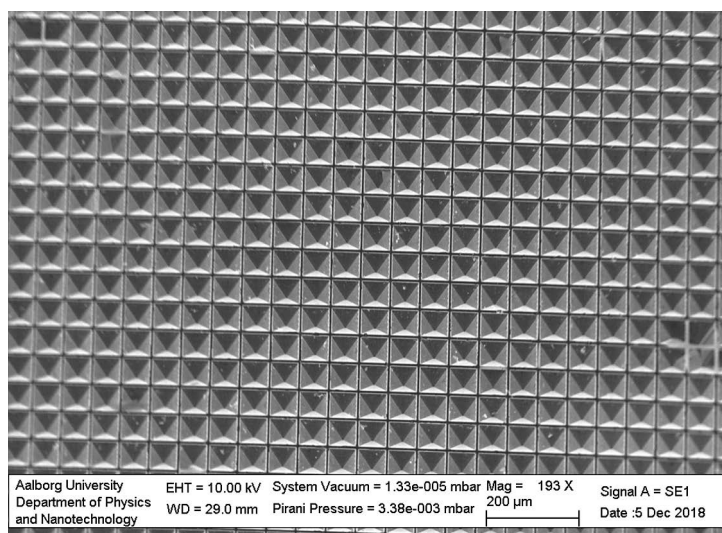
THz-forskning i Danmark

Forskning indenfor THz-optik og -spektroskopi kom til Danmark i 90'erne via en ung forsker, der på udenlandsophold i USA var blevet introduceret til emnet af en af THz-teknologiens pionerer, Professor Daniel Grischkowsky. Der blev etableret en forskningsgruppe på Kemisk Institut ved Aarhus Universitet kaldet Femtolab, som stadig eksisterer den dag i dag, og THz-forskning var en fast aktivitet i gruppen indtil omkring årtusindsskiftet. Omkring samme tid startede en tidligere ph.d.-studerende fra Femtolab, Peter Uhd Jepsen, en ny THz-forskningsgruppe på DTU. Han er i dag leder af Danmarks største THz-forskningsgruppe, som nu er en del af DTU Fotonik.

I 2014 nåede THz-forskningen til Aalborg Universitet, da denne artikels forfatter, som er tidligere specialestuderende fra Femtolab i Aarhus, startede en række studenterprojekter omkring THz-optik. Disse har efterfølgende udviklet sig til flere større forskningsprojekter. Sidste år blev en tidligere ph.d.-studerende fra THz-gruppen på DTU, Pernille Klarskov Pedersen, ansat til at starte en ny THz-gruppe på Aarhus Universitet, hvor det hele startede for cirka 30 år siden.

THz-aktiviteter på Aalborg Universitet:

THz-forskningsgruppen på Aalborg Universitet arbejder for tiden primært på to THz-relaterede forskningsprojekter: Det første (CITS) handler om at udvikle mere kompakte og effektive THz-kilder, som i fremtiden vil kunne monteres på droner eller i håndholdte apparater. Dette projekt er et samarbejde mellem Aalborg-, Aarhus- og Syddansk Universitet og er betalt af Det Frie Forskningsråd. Målet for det andet projekt (DETRIS) er¹, at udvikle udstyr til at opdage sprængstoffer på sikker afstand vha. THz-spektroskopi. Dette projekt er støttet af Innovationsfonden og er et samarbejde mellem Aalborg Universitet og firmaet MyDefence Communications, som fremstiller teknologi til at jamme droner og vejsidebomber.



Elektronmikroskopibillede af et eksempel på en THz-antireflekterende overflade fremstillet ved at ætse pyramide-formede fordybninger ned i en siliciumoverflade. Hvis strukturerne er mindre end bølgelængden af den indkommende THz-stråling, vil de elektromagnetiske bølger "se" et brydningsindeks, som varierer gradvist fra cirka 1,0 i luft til 3,5 i silicium hen over en afstand, som er sammenlignelig med bølgelængden af strålingen. Derved reduceres refleksionstabene i forhold til, hvis man havde en brat overgang mellem de to materialer.

Strukturen på billedet er lavet i 2018 af en gruppe nanoteknologistuderende som en del af deres 5.-semesters projekt på bacheloruddannelsen i Nanoteknologi ved Aalborg Universitet.

dannes, når man sender synligt lys gennem en tynd spalte.

Når bølgelængden bliver stor, bliver det til gengæld nemmere at lave strukturer, som er mindre end bølgelængden. Når man gør det, kan strålingen ikke længere "føle" strukturerne, men vil i stedet se en slags effektivt materiale med nye egenskaber, hvilket kaldes metamaterialer. Det vil sige, at man ved at mikro-strukturere materialer kan give dem nye egenskaber.

Alsidede anvendelser

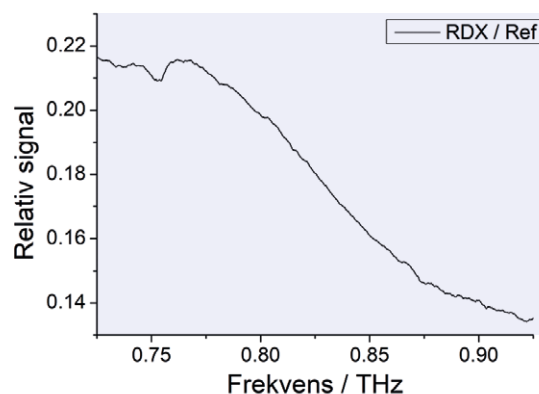
Mange ikke-elektrisk ledende materialer er gennemsigtige for THz-stråling. Blandt andet er plastik, tøj, papir, pap, træ og keramik helt- eller delvist gennemsigtigt i THz-området. Selvom indtrængningsdybden kan være begrænset, giver det mulighed for anvendelser, hvor man for eksempel kan kigge efter skjulte våben gennem tøj i sikkerhedskontrollen i en lufthavn eller kan kigge gennem indpakningen i forbindelse med kvalitetskontrol af fødevarer. Der er også eksempler på, at man med THz kan se svagheder i sprøjtestøbte plastikdele eller kan måle orienteringen af fibre i fiberforstærkede plastmaterialer.

Andre materialer opfører sig helt omvendt og absorberer kraftigt i THz-området, selvom de er gennemsigtige i det synlige område. Det gælder for eksempel vand og vanddamp i almindelig atmosfærisk luft. Det sidste er specielt en udfordring, når man arbejder med THz-teknologi under realistiske forhold, hvor luftfugtigheden ikke holdes kunstigt nede. På den anden side giver den kraftige absorption i vand mulighed for at måle ganske små variationer i vandkoncentration. Det kan for eksempel udnyttes til at måle vandindholdet i planter på en ikke-destruktiv måde. Forskere har også vist, at hudkræftceller har en lille forskel i vandkoncentration i forhold til raskt væv. THz-afbildninger af huden kan derfor bruges til at kortlægge udstrækning af hudkræft.

Udover vand har for eksempel sprængstoffer og narkotika også vist sig at have karakteristiske absorptionsstoppe i THz-området. Det har selvfølgelig åbnet op for en række spændende anvendelser af THz-teknologi indenfor sikkerheds- og forsvarsindustrien.

Fremtidens 6G-netværk og THz-teknologi

På trods af alle de nyttige anvendelser nævnt ovenover, så ligger det største potentiale for THz-teknologi i fremtiden nok inden for trådløs kommunikation. I dag består vores trådløse mobilnetværk i Danmark af det såkaldte 4G-netværk. Næste generation af trådløs kommunikationsteknologi, 5G-netværket, er allerede på vej og fungerer ved frekvenser på helt op til 300 gigahertz (GHz), hvilket svarer til 0,3 THz. Det er derfor meget sandsynligt, at fremtidens kommunikationsnetværk (6G) vil komme til at operere i THz-området.



THz-spektrum målt i refleksion for RDX, som er det aktive stof i C4-sprængstof, målt i forhold til refleksionen fra et metalspejl (referencen). Fordi RDX har en absorptions-top omkring 0,80-0,85 THz, så varierer brydningsindekset omkring resonansen. Da den brøkdeler af strålingen, der reflekteres fra prøven, afhænger af brydningsindekset, vil det reflekterede signal også ændre sig på en karakteristisk måde i nærheden af resonansen. Det kan bruges til at identificere sprængstoffer som fx RDX.

Disse er blot nogle af de mange spændende og meget forskellige anvendelsesmuligheder af THz-teknologi, som forskerne har fundet indtil videre, og der skal nok komme flere til. Den nødvendige teknologi er netop ved at være

moden nok til at komme ud af forskningslaboratorierne på universiteterne og blive brugt til nytte for resten af vores moderne samfund. Det er en spændende tid, vi går i møde for både THz-forskning og -teknologi. ■

Tidevand fortæller om undergrunden

Når forskere ønsker at studere Jordens indre uden at skulle foretage dyre borer i undergrunden, udnytter de, at seismiske bølger kan bevæge sig gennem materialerne i undergrunden og give information om deres beskaffenhed. Seismiske bølger giver ikke kun information om strukturen af materialerne i undergrunden, men også om de kræfter, der virker på dem. Hvis der således sker deformationer i undergrunden, sådan som det sker i jordskælvzoner, kan dette ændre den hastighed, hvormed de seismiske bølger bevæger sig gennem jordlagene. Hvis man vil drage konklusioner om kræfterne i undergrunden ud fra hastigheden af de seismiske bølger kræver det imidlertid, at man har data, der viser, hvordan materialer reagerer på kræfterne under kendte forhold. Sådanne data har man hidtil kun haft fra eksperimenter i labora-



Forskeren Christoph Sens-Schönfelder i færd med at installere en midlertidig seismisk station i Atacama-ørkenen. Foto: C. Sens-Schönfelder, GFZ.

toriet, men nu er det for første gang lykkedes de to tyske forskere Christoph Sens-Schönfelder og Tom Eulenfeld at udnytte feltdata fra enkelt målestation, til at vise, hvor følsomt seismiske bølger reagerer på deformationer i de materialer, de udbreder sig i.

Konkret har forskerne målt den seismiske baggrundsstøj, der blandt andet opstår i undergrun-

den, når havets bølger brydes i brændingen. Og denne støj har de brugt til at observere den deformation, som forårsages af Månens tidevandseffekt på Jorden – et naturligt deformations-eksperiment, der optræder med stor forudsigelighed. Målingerne blev foretaget på forskningsfaciliteten *Integrated Plate Boundary Observatory* i Atacama-ørkenen i det nordlige Chile.

Ved hjælp af opdateret software lykkedes det forskerne at registrere selv de mindste ændringer i de seismiske bølgers hastighed og kombinere disse ændringer med deformationen af undergrunden. Siden deformationen af jorden fra tidevandskræfterne kendes med stor præcision, er det nu muligt at karakterisere undergrunden endnu mere omfattende end tidligere.

CRK, Kilde: GFZ, Helmholtz Centre Potsdam



BÆREDYGTIGE KLODSE

At beregne miljøomkostningerne ved et produkt fra vugge til krav kaldes livscyklusvurdering, og det er et vigtigt værktøj i omstillingen til en mere bæredygtig produktion. Vi har talt med Maria Rosenberger Petersen, som arbejder med livscyklusvurderinger i LEGO, der er midt i en proces, som skal gøre virksomhedens produkter og emballage bæredygtige.

Forfatter
Carsten R. Kjaer
Aktuel Naturvidenskab
crk@aktuelnaturvidenskab.dk

I takt med indførelsen af affaldssortering har de fleste danskere efterhånden fået øjnene op for, at plastik ikke bare er plastik. Der findes mange forskellige typer, som bruges til vidt forskellige formål – og ikke alt kan genbruges. Fælles for de fleste plastmaterialer i dag er dog, at de er baseret på det samme råmateriale, nemlig olie. Og denne olieafhængighed har man besluttet at gøre op med i koncernen LEGO. Her har man sat sig det mål, at alle kerneprodukter samt emballage i 2030 skal være mere bæredygtige. »Det betyder, at al den plastik, der bruges til at producere de flere end 4000 forskellige plastikelementer skal være lavet af andre og mere bæredygtige materialer end olie, for

eksempel plantemateriale,« fortæller Maria Rosenberger Petersen.

Maria arbejder som LCA-manager, hvor der bag forkortelsen gemmer sig det engelske udtryk Life Cycle Assessment, altså livscyklusvurderinger på dansk. Hun har oprindeligt en kandidatgrad i geologi fra Aarhus Universitet, og umiddelbart vil man måske undre sig over, hvordan geologi kan være relevant i en virksomhed som LEGO. Men via sin erfaring med at arbejde med miljøvaredeklarationer på Aalborg Portland A/S og derefter som konsulent i Center for Bæredygtigt Byggeri på Teknologisk Institut, giver matchet masser af mening. Maria bidrager nu til den store omstillingsproces, der skal gøre produktionen af

LEGOs produkter mere bæredygtige med sin ekspertise i at regne på miljøbelastningen af produkter i hele deres levetid – fra råstof over det færdige produkt til det i sidste ende genbruges eller bortskaffes.

Plastik af sukkerrør

Hvis alle LEGOs elementer var lavet af præcis samme slags plastik, ville opgaven med at finde alternativer være relativt nemt at overskue.

»Men der indgår i dag omkring 20 forskellige slags plastik i produktionen af hele arsenalet af elementer,« fortæller Maria. »Og nogle af elementerne er sat sammen af flere forskellige dele, der kan bestå af forskellig slags plastik. Så det gør det jo til en noget mere kompliceret proces at skifte plastikken ud«

Plast

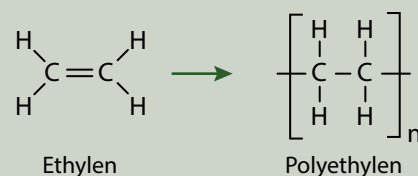
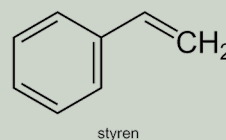
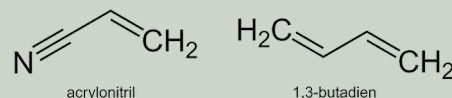
Selv om vi alle har en ide om, hvad plastik er, er det faktisk ikke så let at give en både enkel og dækkende definition af materialet plastik (eller blot plast, som er den tekniske og faglige betegnelse, man anvender indenfor industrien). Ordet plast er afledt af det græske ord *plasticos*, der betyder formbar. For at et materiale kan kaldes plast skal det som minimum være (eller have været) plastisk formbart, i det væsentlige være organisk, og det skal være højpolymert. Det sidste udtryk refererer til, at plastik er polymerer – det vil sige, at det er opbygget af mange ens byggeklodser (monomerer). En polymer af en given type anses for højpolymer, hvis dens fysiske egenskaber ikke ændres væsentligt med den relative molekylmasse.

Den mest anvendte plasttype hos LEGO er såkaldt ABS-plast. Den består af de tre monomerer akrylonitril, butadien og styren. Det er en plasttype, der udmærker sig ved fremragende hårdhed, glans, sejhed og elektrisk isolering, men som også er relativt dyrt at fremstille, da det netop består af tre forskellige monomerer, der skal sættes sammen. Egenskaberne af ABS-plast kan fintunes ved for eksempel at ændre på mængdeforholdene mellem dets tre komponenter og ved at variere polymerisationsgraden – det vil sige, hvor mange gange de enkelte monomerer repeteres.

Kilde: Plastindustrien



Granulat af ABS-plast er råmaterialet til de fleste af LEGO's elementer. Foto: LEGO.



Hertil kommer, at produktionen af LEGO klodser i dag bygger på mere end 60 års optimering af de materialer, der i dag bruges. Så det er et supereffektivt system, der nu er i gang med at blive omstillet. »Og det er selvfølgelig klart, at der ikke må gås på kompromis med kvaliteten og holdbarheden af de elementer, der bliver produceret af de nye plantebaserede plasttyper,« siger Maria.

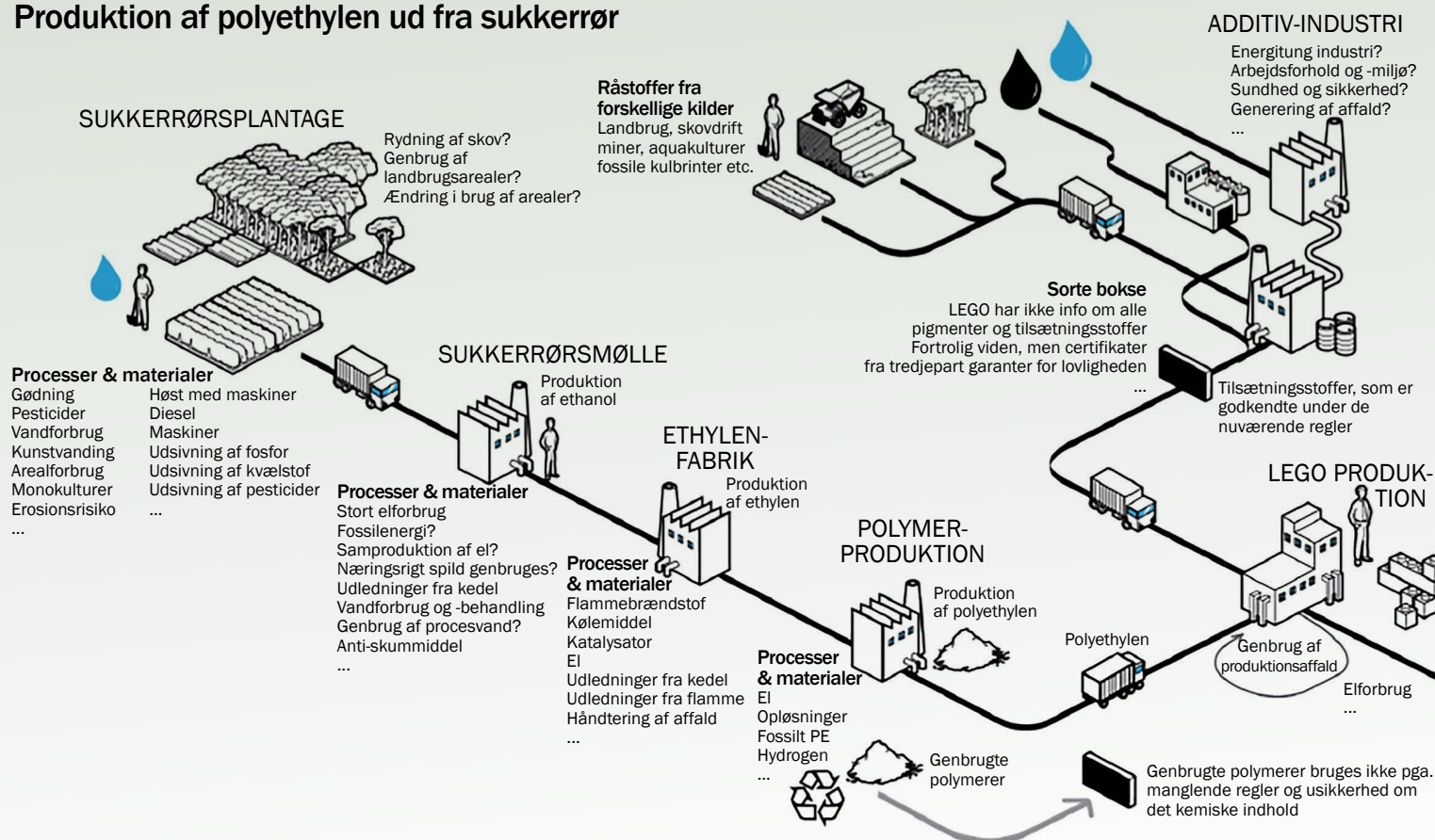
Sidste år kunne man finde de første plantebaserede plastikelementer i LEGO's sortiment, og det er naturligvis elementer, der forestiller træer, buske og blade. De er lavet af polyethylen – også blot kaldet PE-plast – som er en blød, fleksibel og holdbar plasttype. Teknisk set er den plantebaserede polyethylen identisk

Maria Rosenberger Petersen har en kandidatgrad i geologi fra Aarhus Universitet i 2009. I sit speciale, som hun lavede i samarbejde med Aalborg Portland A/S, arbejdede hun med reduktion af CO₂-udslip i cementproduktionen ved at erstatte kridt (CaCO₃) med alternative råmaterialer.

Efter studiet arbejdede hun i en periode som gymnasielærer i geografi og kemi, men da der åbnede sig en mulighed for at komme til at arbejde med mikroskopi og materialer inden for R&D på Aalborg Portland A/S, slog hun til. Her blev hun også introduceret til bæredygtighed i byggeriet, og hvordan man beregner miljøaftryk på blandt andet byggematerialer. Siden skiftede hun til et job som konsulent i Center for Bæredygtigt Byggeri på Teknologisk Institut, hvor hun arbejdede med livscyklusvurderinger inden for byggematerialer. I 2016 kom hun til LEGO, hvor hun nu arbejder som LCA-manager og arbejder med livscyklusvurderinger inden for en helt anden slags byggematerialer.



Produktion af polyethylen ud fra sukkerrør



med konventionel polyethylen lavet ud fra olie – den eneste forskel er altså, at råmaterialet er et andet, nemlig sukkerrør. »Når vi netop er startet med polyethylen, skyldes det, at fremstillingen af polyethylen er en forholdsvis enkel proces sammenlignet med andre plasttyper, vi bruger«, fortæller Maria. Det er således ikke, fordi polyethylen er den plasttype, LEGO bruger mest af – kun cirka 1-2 % af den nuværende samlede produktion af LEGO-elementer er lavet af polyethylen.

Alt skal med i regnskabet

Marias arbejde går konkret ud på at vurdere den samlede miljøbelastning – udtrykt blandt andet i CO₂-ækvivalenter – af alle de mange processer, der indgår fra sukkerrørerne dyrkes på marken til klodserne eventuelt ender som affald, der skal bortskaffes – altså hele klodsens livscyklus. Og der er mange ting, der skal med i dette store regnskab, som man måske ikke lige ville tænke på i første omgang. »Når man går fra en værdikæde baseret på olie til en

baseret på plantemateriale bliver der en masse ting relateret til den måde, man dyrker planterne på, der får betydning«, siger Maria. »Hvor meget vand bruger man for eksempel til kunstvanding? Hvor meget gødning og hvor mange pesticider, bruger man? Og hvad betyder høstmetoden for CO₂-regnskabet?«

Udover disse rent dyrkningsmæssige aspekter er der selvfølgelig også den vigtige problematik at forholde sig til, om man ved at bruge plantemateriale til plastik kommer til at lægge beslag på landbrugsjord, som ellers kunne være brugt til fødevarerproduktion.

»Sukkerørerne til den polyethylen, vi bruger, kommer fra Brasilien«, siger Maria. »Cirka 1 % af Brasiliens areal er opdyrket med sukkerrør, og heraf går cirka halvdelen til produktion af sukker, mens den anden halvdel går til produktion af bioethanol – altså brændstof. En lille andel af denne bioethanol går til at lave plastik, så det er altså den del af

sukkerørproduktionen, vi "byder ind i". Derfor kan man ikke sige, at produktionen af plastik til LEGO sætter sig noget nævneværdigt spor på Brasiliens fødevarerproduktion. Maria fortæller også, at det tyske NOVA-institut har beregnet, at selv hvis man baserede størstedelen af verdens samlede produktion af plastik på plantemateriale, ville det ikke udgøre en væsentlig konkurrence for fødevarerproduktionen.

»Vi kan derudover se, at der ikke er nogen korrelation mellem sukkerrørproduktionen og rydning af regnskov, som jo også er en bekymring, man oplagt kunne have«, siger Maria. Det antyder, at når man rydder regnskov i Brasilien, er det ikke for at dyrke sukkerør – her er det nærmere husdyrproduktionen, der er den store synder.

Et mere helstøbt billede af miljøaftryk

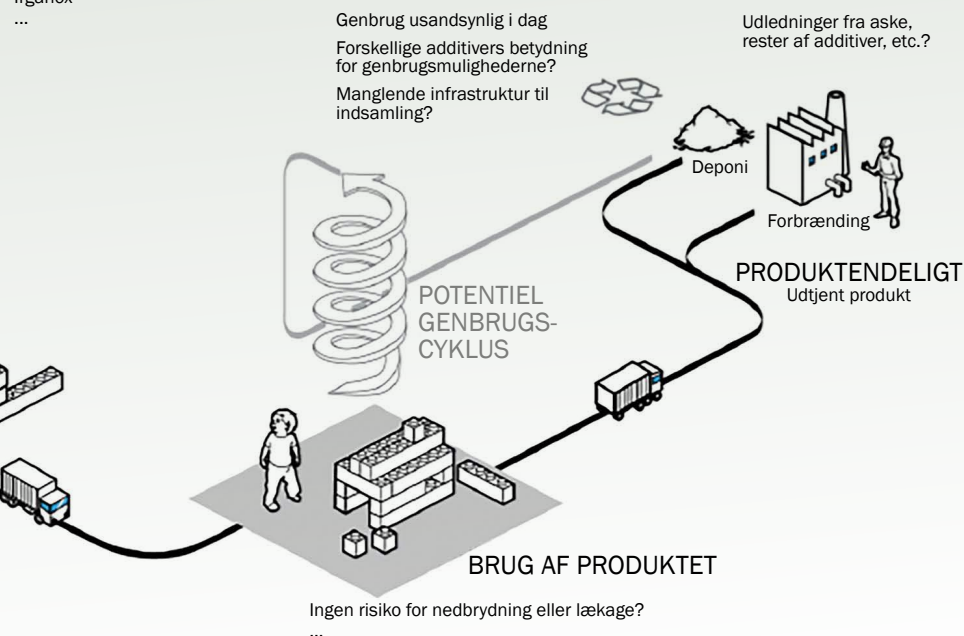
»I traditionel produktion af polyethylen-plast er fremstillingsprocesserne rent miljømæssigt dyre, da de

Livscyklusvurdering

Figuren viser alle de kendte og ukendte faktorer, LEGO skal tage i betragtning i en livscyklusvurdering af elementer fremstillet ud fra polyethylen-plast baseret på sukkerrør.

Illustration: LEGO

Eksempler
på additiver:
Irgafos
Irganox
...



forskellige trin i processen kræver tilførsel af energi», siger Maria. »Her har produktionen af polyethylen ud fra sukkerrør i Brasilien den fordel, at det er en lukket proces: Energien til at få processerne til at køre får man nemlig fra restprodukter fra sukkerrørsproduktionen, herunder bladele samt den masse, der er tilbage, når sukker-juicen er trukket ud af rørene. Desuden anvender man restprodukter fra fermenteringen af sukkeret til gødsning af sukkerrørsmarkerne.«

Udover det miljøaftryk, der kan omregnes til CO₂-ækvivalenter, er der også andre bæredygtighedsprincipper, der indgår i kravene til produktionen af plantebaseret plast – for eksempel at der ikke må bruges børnearbejdere, og at de sociale forhold for arbejderne i produktionen i det hele taget skal være i orden. »Den slags ting er ikke regnet med, når man kigger på olieværdikæden«, siger Maria. »Vi ender derfor med at kunne få et

Livscyklusvurderinger

Livscyklusvurdering (på engelsk: Life Cycle Assessment) er en metode til at vurdere miljøbelastningen af et produkt gennem hele dets levetid – fra råmaterialerne udvindes over fremstillingsprocesser og brugen af produktet (inklusive vedligehold og reparation) til bortskaffelse af alle dets restprodukter.

Figuren viser et tænkt eksempel på en livscyklusanalyse-beregning af et produkt. Til venstre ses de konkrete stoffer, som produktet vil give anledning til, at der bliver udledt til miljøet i dets levetid – enten som emissioner til atmosfæren eller til vandmiljøet. Disse kan så grupperes i forskellige miljøpåvirkningsfaktorer, som i dette eksempel er påvirkning af klimaet, syrerregn og næringsstoffer til vandmiljøet (som kan give algevækst og dermed iltsvind). Hver af de tre miljøpåvirkningsfaktorer er repræsenteret ved

Eksempel på beregning

Livscyklus kortlægning	Miljøpåvirknings kategorier	Resultat !
<u>Emissioner til luft</u> CO₂ 1,3 kg CO 3 kg CH₄ 6 kg SO₂ 0,001 kg NO_x 0,08 kg HCl 0,9 kg <u>Udledning til vand</u> PO₄ 2,0 kg NH₃ 0,1 kg	1,3 kg CO₂ x 1 3 kg CO x 3 6 kg CH₄ x 25 0,001 kg SO₂ x 1 0,08 kg NO_x x 0,7 0,9 kg HCl x 0,88 0,08 kg NO_x x 0,13 2,0 kg PO₄ x 1 0,1 kg NH₃ x 0,33	160,3 kg CO₂ Ækv. 0,849 kg SO₂ Ækv. 2,043 kg PO₄ Ækv.

et enkelt stof (henholdsvis CO₂, SO₂ og PO₄), og derfor angives den samlede belastning for hver kategori i ækvivalenter af disse stoffer.

Man bruger ofte livscyklusvurderin-

ger til at sammenligne forskellige potentielle produktionsmetoder, eller til at identificere de led i ens produktion, der er særligt belastende, så man kan fokusere sin indsats der.



Sukkerrør fra Brasilien er råstoffet til mere bæredygtige klodser i LEGOs sortiment.

Foto: Maria Rosenberger Petersen.

meget mere helstøbt billede af vores produktions miljømæssige og sociale aftryk ved at gå over til at basere den på plantemateriale.»

Mere eller mindre kompliceret plastik

Som nævnt skal alle LEGOs kerneprodukter og emballage være bæredygtige i 2030 – men for netop emballage skal denne omstilling allerede være gennemført i 2025. Den del af omstillingen vil ifølge Maria også være lidt mindre krævende, idet der ikke er så høje krav til kvaliteten og holdbarheden af plastik til emballage. »Vi kigger selvfølgelig også på muligheden for at genanvende plastik, og det vil formentlig være nemmere at gøre i forbindelse med emballage end til produktionen af klodser«, siger Maria.

Omstillingen til at basere al produktionen af LEGO elementer på andre materialer end olie vil nødvendigvis være en længere proces, da der er forskel på, hvor kompliceret det er at fremstille de omkring 20 forskellige plasttyper, der indgår i LEGOs sortiment. Polyethylen-plast er relativt simpelt at fremstille, fordi det grundlæggende er opbygget af en enkelt byggeblok (en monomer) nemlig ethylen, der kobles sammen i lange kæder. Til sammenligning

er det en noget mere kompliceret sag at syntetisere den plast, som LEGO bruger langt mest af og som den traditionelle klods er lavet af, nemlig såkaldt ABS-plast. Den er nemlig opbygget af tre forskellige monomerer (akrylonitril, butadien og styren), som skal laves hver for sig og kobles sammen.

Fra plastik til affald

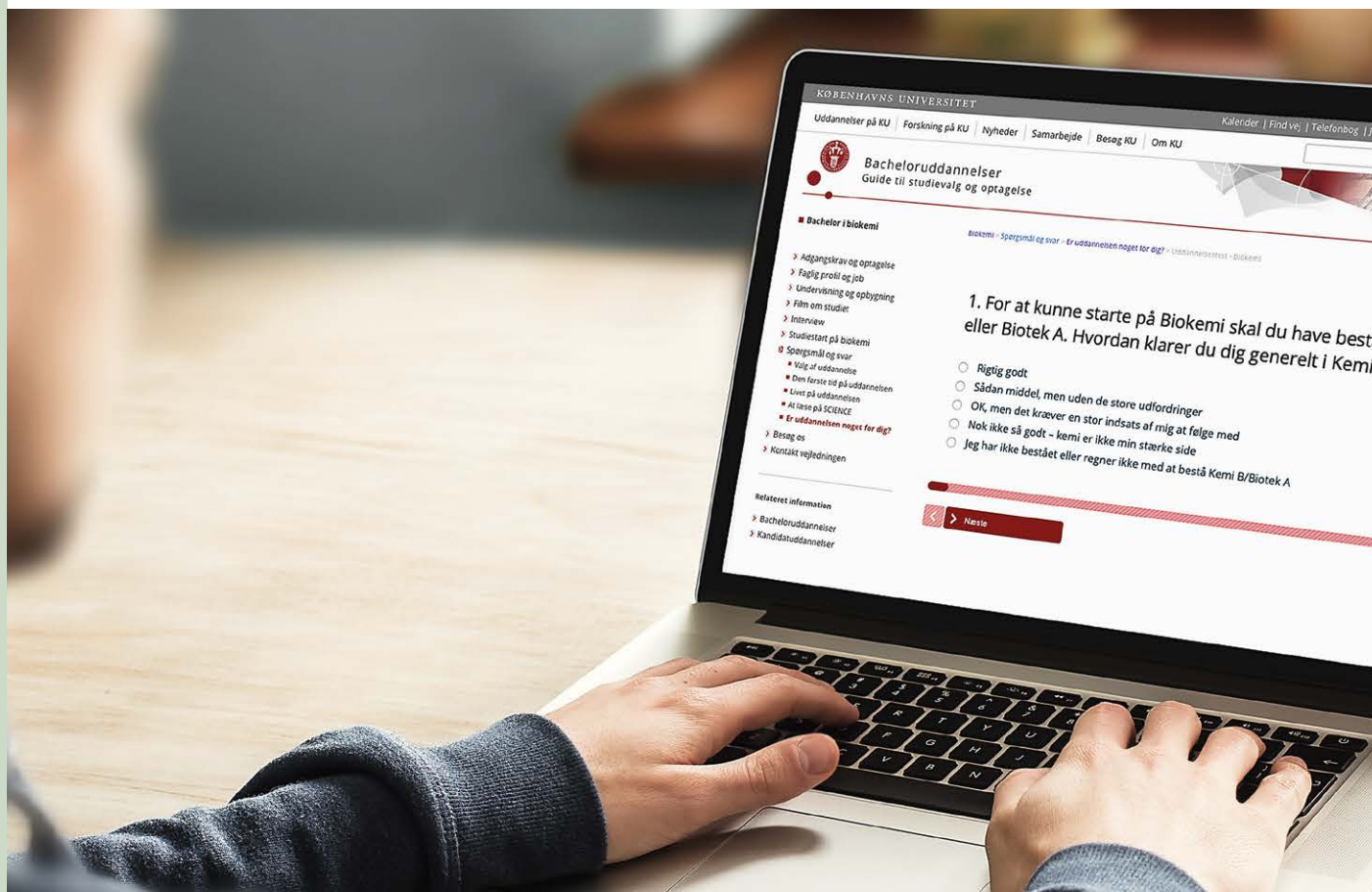
»I virkeligheden findes der ikke en entydig definition af, hvad det vil sige, at et produkt er bæredygtigt,« siger Maria. »Hvis man har den holdning, at en produktion slet ikke må sætte sig noget miljømæssigt aftryk, er der ikke mange ting, vi kan producere med god samvittighed. Når vi i LEGO snakker om, at vores produkter skal være bæredygtige, betyder det derfor, at vi som virksomhed har defineret en række kriterier, som skal være opfyldt, før vi betragter produkter og emballage som bæredygtige.«

Plastikforurening er et emne, der er megen fokus på for tiden, så det er selvfølgelig også noget, man forholder sig til i LEGO, hvor man lever af at producere plastikprodukter. Nu knytter problemerne med plastikforurening sig først og fremmest til "engangsplastik" som emballage, mens selve klodserne som udgangspunkt ikke så let havner i miljøet, da de netop er lavet for at

have en varig brugsværdi. Faktisk ved man ikke præcist, hvor lang levetid en almindelig LEGO klods har ved almindeligt brug. De ældste klodser fra LEGOs barndom har efterhånden 60 år på bagen, og de fungerer stadig i bedste velgående, hvis ikke de er blevet behandlet usædvanligt hårdhændet. Men selv LEGO klodser vil også med tiden kunne ende som affald, der skal håndteres forsvarligt. »Vi kan ikke gøre så meget ved, at ikke alle lande er lige effektive til at indsamle og håndtere affald forsvarligt, og at plastik fra LEGO på den konto havner i miljøet« siger Maria. »Men vi kan have fokus på at minimere mængden af plastikemballage og at arbejde på at vore plastikprodukter så vidt muligt kan genbruges.« Hun fortæller også, at de hos LEGO ikke anser bionedbrydeligt plastik som en del af løsningen, da det kan give det fejlagtige indtryk, at så er det ikke noget problem at smide plastik i naturen.

Personligt mener Maria, at det er ærgerligt, hvis problemerne med plastikforurening helt kommer til at overskygge de mange gode ting, der er at sige om plastik – at det kan bruges til så mange forskellige ting, og at det har så lang holdbarhed. »Plastik er et helt fantastisk materiale – når man altså bruger det korrekt, siger hun. ■

TJEK DIT STUDIEVALG



Banker dit hjerte for natur- og biovidenskab?
På Københavns Universitet kan du nu tage et
Uddannelsesstjek på de naturvidenskabelige
bacheloruddannelser. Det giver dig en fornemmelse
af, om en uddannelse er noget for dig.

Klik dig ind på den uddannelse,
du er interesseret i på
SCIENCE.KU.DK/BA
– du finder Uddannelsesstjekket
på studiets hjemmeside.

Blæretang (*Fucus vesiculosus*) og buletang (*Ascophyllum nodosum*) i tidevandszonen nær Nuuk, Grønland. Foto: Scott Bennett

VERDENS TANGSKOVE MODVIRKER GLOBAL OPVARMNING

Om forfatteren
Kristian Sjøgren er
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 Aarhus Universitet, Michael Møller Hansen. Læs mere på www.dff.dk

Indtil for ganske nylig blev tangskove slet ikke betragtet som en spiller i det globale klimaregnskab. Dansk forskning har dog vist, at tangskovene kan trække CO₂ ud af atmosfæren og gemme det af vejen dybt nede i havbunden. Nu skal forskerne finde ud af, hvor meget arktiske tangskove kan modvirke den globale opvarmning.

Klimadebatten når måned for måned nye højder, mens det ene forskningsresultat efter det andet på den mest grusomme vis illustrerer, hvor galt det egentlig står til med klodens helbred. Regnskovene bliver fældet, koralrevene dør, havniveauet stiger, og varmere vejr varsler om klimakatastrofer, som ingen af os kan gemme os for.

Midt i al elendigheden er der dog lyspunkter. Eksempelvis viste dansk forskning for nylig, at tangskove

trækker i den modsatte retning og rent faktisk er i stand til at hive CO₂ ud af atmosfæren og gemme det af vejen i havbunden eller i mørket i dybhavet langt under havets overflade.

Opdagelsen var overraskende, fordi forskere ikke indtil da havde været opmærksomme på tangskovenes rolle i at binde betydelige mængder CO₂ mere eller mindre permanent under havets overflade. Opdagelsen har gjort, at de selvsamme danske forskere nu er gået i gang med et

stort treårigt forskningsprojekt, hvori de skal kortlægge betydningen af Grønlands tangskove for det globale klima.

»Over det seneste årti er der kommet stort fokus på, hvordan havets skove bidrager til at binde CO₂ fra atmosfæren og dermed modvirke drivhuseffekten. I den sammenhæng har man dog ikke regnet med tangskovene, da man ikke har ment, at de kunne opbygge et undervandslager af kulstof. Den antagelse har dog vist sig at være for-

Om Dorte Krause-Jensen

Dorte Krause-Jensen er seniorforsker ved institut for Bioscience ved Aarhus Universitet. Hun tog sin kandidatgrad i biologi ved Aarhus Universitet og sin ph.d. ved Københavns Universitet. Hendes forskning fokuserer på verdens havgræsenge og tangskove, deres respons på globale og lokale påvirkninger, deres rolle i kystnære økosystemer, specielt i forhold til tilbageholdelse af kulstof og næringsstoffer, og deres anvendelse i forvaltningssammenhæng som indikatorer for den økologiske tilstand i havet.

Hun leder projektet *Carbon sequestration of ARctic marine Macroalgae (CARMA)*, der er et interdisciplinært, internationalt samarbejde i krydsfeltet mellem marin økologi, geologi, oceanografi, remote sensing, biokemi og genetik.

I projektet deltager også Carlos M. Duarte (King Abdullah University of Science and Technology, KAUST, Saudi-Arabien), Mikael K. Sejr, Marit Solveig Seidenkrantz, Daniel Frazier Carlson, Sarah Bachmann Ørberg (Aarhus Universitet) og Thomas Larsen (Max Planck, Tyskland). Projektet er finansieret af Danmarks Frie Forskningsfond.



kert, og derfor er der stor interesse for at finde ud af, hvor meget CO₂ tangskovene egentlig er i stand til at binde,« fortæller kvinden bag det nye forskningsprojekt, seniorforsker Dorte Krause-Jensen fra Institut for Bioscience, Marin Økologi, ved Aarhus Universitet.

Tangskove kan opsnappe CO₂-udledningen fra 60 millioner danskere

At forskere indtil nu har overset tangskovenes betydning for det globale CO₂-regnskab skyldes, at tangskovene vokser på sten i modsætning til alle havets andre skove, eksempelvis ålegræsenge, saltmarsker og mangrover, der vokser på blødt havbund. Intuitivt giver det mening, at ålegræstæpper, saltmarsker og mangrover kan trække CO₂ ud af atmosfæren, lagre det i plantemateriale og gemme det af vejen som rødder, andre døde plantedele og partikler i den bløde sand- eller muderbund under sig; men det kan tangskovene ikke på klippebund. Klipper er i den sammenhæng et dårligt sted at vokse, fordi der

på klipper ikke kan akkumuleres dødt plantemateriale under tangskoven.

Alligevel kan tangskovene bidrage til at trække CO₂ ud af atmosfæren og lagre det i havbunden. Dorte Krause-Jensens forskning viste for nogle år siden, at tang fra tangskovene ofte bliver revet løs fra klippeunderlaget og driver med strømmen til andre steder i havet. Der kan tangen enten blive lagret i blødt havbund eller forsvinde ned i dybhavet flere kilometer under havets overflade. Opdagelsen gjorde, at man ikke længere kunne ignorere tangskovenes bidrag til det globale klimaregnskab.

Læg dertil, at blandt alle havets skove udgør tangskovene det største areal. Den globale udbredelse af tangskove er estimeret til 3,4 millioner kvadratkilometer, hvilket svarer til 80 gange Danmarks areal. Man er som minimum nødt til at danne sig et overblik over omfanget af transporten af død tang fra tangskovene til havbunden og dybhavet.

»Vi har lavet et første og meget groft skøn over tangskovenes bidrag til at tage CO₂ ud af atmosfæren og lagre det på havbunden. Det viser, at tangskovene potentielt set kan binde CO₂ i et omfang, der svarer til, hvad 60 millioner danskere udleder. Det ændrer selvfølgelig ikke markant i det globale klimaregnskab, men det er da af en vis betydning, som ikke kan ignoreres,« forklarer Dorte Krause-Jensen.

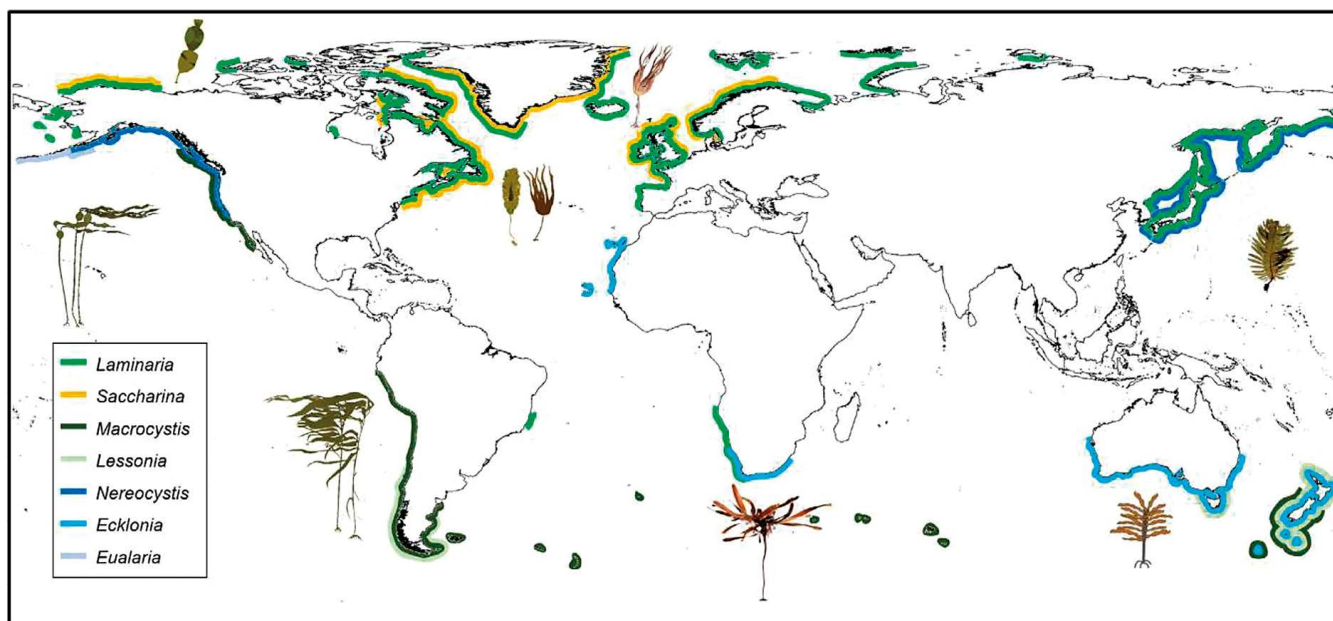
Tangskove kan have stor betydning for både klima og dyr

I sin forskning skal Dorte Krause-Jensen over de næste tre år sætte alle sejl ind på at kortlægge de grønlandske tangskove. Grønlands kyststrækning udgør med sine mange bugter, folder og småøer en kystlinje på 44.000 kvadratkilometer, hvilket er op mod 12 procent af verdens samlede kyststrækning. Ydermere består en stor del af kystlinjen af klipper og stenbund, der udgør ideelle betingelser for tang at vokse på.

Tangskovene langs Grønlands kyster er desuden både miljømæssigt



**DANMARKS FRIE
FORSKNINGSFOND**
INDEPENDENT RESEARCH
FUND DENMARK



Global udbredelse af skove af store brunalger (kelp). De kan i øvrigt blive meget lange – op til 60 meter. Efter Thomas Wernberg et. al. 2019.

og klimamæssigt interessante på flere forskellige måder.

- For det første er tangskovene hjemsted for store mængder fiskeyngel, der gemmer sig i virvaret af tang, indtil de er store nok til at bevæge sig ud på det åbne hav. Tangskovene er en slags rugekasse for rigtig mange af de fisk, der er kommercielt interessante, så uden tangskovene ville køledisken hos den lokale fiskehandler formentlig være mere kedelig at kigge ned i.
- For det andet kan tangskovene trække kulsyre ud af havet og skabe lokale miljøer, der er mindre sure end det omkringliggende hav. Dermed skaber de betingelser, som er gode for skaldannende dyr som muslinger, der ellers kan få problemer, i takt med at havet bliver mere og mere surt. Dog stopper tangskovens fotosyntese om natten, så de i stedet for at tage kulsyre ud af vandet producerer CO_2 og dermed selv bidrager til en forsurening af lokalmiljøet. Det har mange skal- og bløddyr dog lært at tilpasse sig, så de primært danner deres skaller om dagen, hvor vandet er mindst surt. Derudover er der under den arktiske sommer i Grønland faktisk talt lyst hele tiden, hvilket gør havet omkring

tangskovene til mere eller mindre permanente oaser med lav surhedsgrad i vandet gennem sommeren, hvor skaldyrene mest har brug for det.

- For det tredje vokser tangskovene hurtigt og trækker mest CO_2 ud af atmosfæren, når havet omkring dem er lyst og varmt. I takt med at klimaforandringerne smelter havisen og dermed forlænger åbenvandsperioden, vil netop de betingelser blive mere gunstige omkring Grønland til fordel for tangskovens muligheder for at udbrede sig.
- Til sidst, men ikke mindst, vokser tangskovene omkring Grønland henover flere breddegrader og klimagrader, hvilket vil sige, at forskerne kan bruge viden om tangskovens udbredelse og betingelser i det sydlige Grønland i dag til at sige noget om, hvordan tingene kan komme til at se ud i det nordlige Grønland i fremtidens varmere klimascenarie. I dag er udbredelsen af tangskove i havet ud for det nordlige Grønland meget sparsom, da der mange steder kun er isfrit i et par uger eller måneder om året. I fremtiden ser det formentlig meget anderledes ud, og den fremtid kan det sydlige Grønland tegne allerede i dag.

»Tangskovene kommer ikke til at løse klimakrisen, men de bidrager til at få indfanget noget kulstof, og så stimulerer de biodiversiteten omkring Grønland. I takt med at det bliver varmere, og tangskovene breder sig, regner vi med, at deres økologiske funktion bliver større. Derfor er Grønland så interessant i den her sammenhæng,« siger Dorte Krause-Jensen.

Vil bruge satellitter til at kortlægge Grønlands tangskove

Over de næste tre år skal Dorte Krause-Jensen sammen med sine kollegaer kortlægge flere elementer vedrørende de indtil videre relativt ukendte tangskove.

For det første skal forskerne kortlægge den nuværende udbredelse af tangskove i havet omkring Grønland. Kun på den måde kan de danne sig et overblik over tangskovens kapacitet for at lagre CO_2 . Jo større tangskovene er, des bedre er det for både klimaet og miljøet. Forskerne vil i den sammenhæng benytte flere forskellige kilder til at lave et udbredelseskort og ydermere undersøge tangskovens skæbne.

Forskerne vil blandt andet benytte satellitfoto i kombination med data om lysforhold og observationer fra undervandsvideo til at afgøre, hvor tangskovene er, hvor langt fra kysten



de vokser, og hvor dybt i havet de gror. Da forskerne allerede kender til tangskovens biologi, ved de også, hvor meget lys skovene skal bruge for at vokse. Lyset er dermed med til at afgøre, hvor dybt under havets overflade forskerne regner med at kunne finde dem. Koblingen af satellitfotos og topografiske kort skal gerne danne grundlaget for det allerførste oversigtskort over de grønlandske tangskove.

Forskerne vil også benytte satellitfoto til at følge tangmåtters bevægelser rundt i havet. Når vejrforholdene viser tænder, river tang sig ofte løs fra klipperne, samler sig i store måtter og flyder ud til havs. Hvis forskerne skal afgøre, hvad der sker med det plantemateriale, som tangskovene udgør, er de nødt til at vide, hvor tangen forsvinder hen. Det vil de spore med satellitter. Udover satellitfotos vil de også benytte GPS'er, der skal sættes direkte på tangmåtterne, for at forskerne kan følge tangens bevægelse fra kysten til dens endestation i dybhavet, i havbunden eller på stranden.

»Vi bliver de første til at gøre det her. Selvom der er kommet mere interesse omkring tangskovene over de seneste år, er ingen endnu kommet med konkrete data på hverken de grønlandske tangskoves udbredelse eller tangmåtternes færden og skæbne,« fortæller Dorte Krause-Jensen.

DNA-analyse skal finde død tang i havbunden

I projektet vil forskerne også udvikle metoder til at identificere tang i havbunden. Selvom forskerne kan se, at tangen falder til bunds langt fra Grønlands klippekyster, er det alligevel ikke sikkert, at det døde plantemateriale bliver en del af havbunden og dermed bidrager til havbundens kulstoflager.

På den baggrund vil Dorte Krause-Jensen sammen med sine kollegaer udvikle DNA-værktøjer, der kan bruges til at afgøre, om der er rester af tang i havbunden eller ej.

For det første vil forskerne lave et katalog af DNA-profiler fra de mest

udbredte arter af tang. De vil derefter udvikle teknikker til at kunne finde stykker af netop de kendte tangarters DNA i havbunden. På den måde kan de verificere, at en del af det kulstof, som tangen optager, når den vokser på klipperne, rent faktisk også bliver bundet i havbunden, når tangen dør. Du kan læse mere om selve teknikken i boksen på næste side.

»Hovedformålet med vores projekt er indledningsvist at finde ud af, hvordan man overhovedet kan finde spor fra tang i havbunden. De hidtidige teknikker, der har været baseret på isotop-analyser, har ikke været gode nok til formålet, og derfor er vi nødt til at udvikle nogle nye. Disse teknikker baserer sig på det, der hedder miljøDNA eller eDNA,« forklarer Dorte Krause-Jensen.

Vil finde flere hundrede år gammelt død tang

Det sidste delprojekt i det treårige forskningsarbejde går ud på at kvantificere, hvor meget tangskove-

Feltarbejde omkring buletang (*Ascophyllum nodosum*) i tidevandszonen nær Nuuk, Grønland. Forrest i billedet: Dorte Krause-Jensen, bagest i billedet Sarah Backmann Ørberg (tv) og Núria Marbà (th). Foto: Scott Bennett



**DANMARKS FRIE
FORSKNINGSFOND**
INDEPENDENT RESEARCH
FUND DENMARK

Er der spor af tang-DNA i havbunden?

I forskningen vil Dorte Krause-Jensen benytte en specifik DNA-analyseteknik, hvor forskerne analyserer på miljø-DNA. Miljø-DNA er DNA, der er tilstede i en miljøprøve, eksempelvis en jordprøve, vandprøve eller luftprøve. I en miljøprøve er der DNA fra både levende organismer, men også frit DNA, der er efterladt af enten levende organismer i form af ekskrementer, hudrester og andre efterladenskaber eller efterladt af døde organismer, som er gået i opløsning. Forskere er typisk interesseret i det ekstracellulære DNA, der på grund af eksponering til miljøet uden for den beskyttende celle ofte er fragmenteret og nedbrudt til kortere stykker af DNA, der er lettere at analysere på.

I Dorte Krause-Jensens studie undersøger forskerne miljø-DNA fra havbundsprøver for at lede efter DNA fra tang. Det gør forskerne ved at kopiere og sekventere de stykker af tang-DNA, som de er interesserede i. Forskerne kan kopiere DNA ved hjælp af PCR (polymerase chain reaction), hvor de blandt andet tilføjer en primer (kort enstrengt DNA-sekvens, der matcher et stykke af det ønskede tang-DNA) og DNA-polymerase (enzym, der fremmer syntesen af DNA). Under høj temperatur bliver DNA'ets dobbeltstreng splittet i to enkeltstreng, og dernæst sænker forskerne temperaturen i prøven, så primeren kan sætte sig fast på DNA'et og angive, hvor DNA-polymerasen skal starte sin kopiering. Dernæst sekventerer forskerne de mange kopier af DNA med Next Generation Sequencing.

Desværre er det med de nuværende metoder meget svært kun at kopiere tang-DNA, fordi tang evolutionært udgør en polyfyletisk gruppe, hvilket vil sige, at de tre hovedgrupper af tang (grøn-, rød- og brunalger) ikke har en fælles flercellet stamfar. Dermed er det svært for forskerne at finde en region på deres DNA, som er unik for tang uden også at inkludere alle



Oparbejdning af prøver fra havbunden til analyse for rester af tang.

Foto: Carlos Duarte

andre planter og dyr. Forskerne har derfor valgt at kopiere et kort stykke af ribosomalt DNA, som er fælles for alle planter, dyr og svampe.

Da forskerne således kopierer og dernæst sekventerer meget andet end tang-DNA, skal de holde resultatet op mod online DNA-databaser for at kunne identificere, om der er tang i miljøprøven og om muligt identificere tangens slægt eller art. Deres udfordring er dog, at de nuværende DNA-databaser er utilstrækkelige med hensyn til tang-DNA, især fordi den DNA-region, som oftest findes i databaserne, er for lang til miljø-DNA-analyser. Desuden dækker DNA-databaserne slet ikke grønlagre.

På baggrund af disse mangler er forskerne allerede i gang med at komplementere de eksisterende online DNA-databaser med ribosomalt DNA fra 37 nordatlantiske og grønlandske tangarter.

Næste skridt for forskerne bliver at finde ud af, hvordan de kan oversætte tilstedeværelsen og eventuelt mængden af tang-DNA til biomasse og egentlige kulstoflagre.

Dette vil de blandt andet gøre med en række laboratorieeksperimenter, hvor de vil tilføre en kendt mængde tang fra de forskellige hovedgrupper til sediment uden kulstof, og derefter foretage miljø-DNA-analyser.

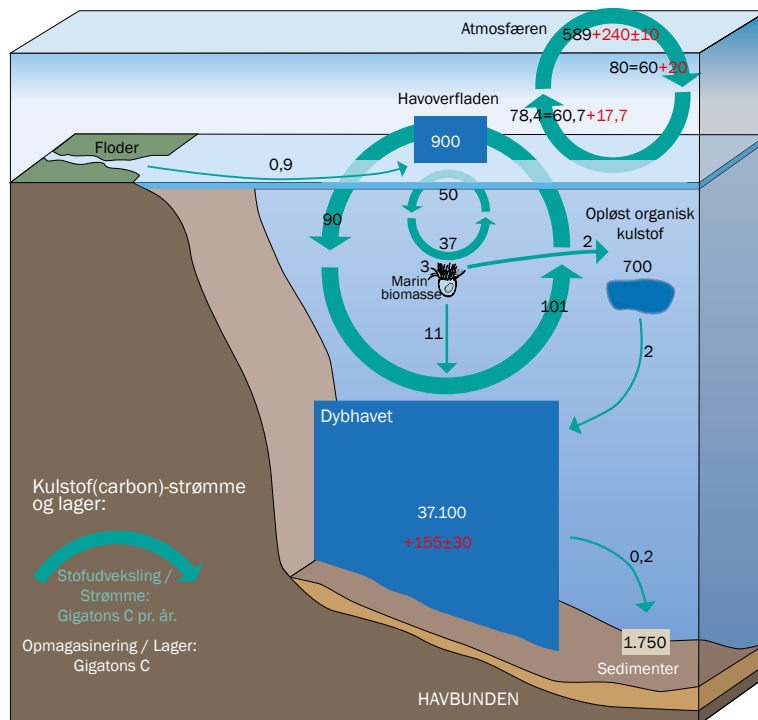
ne bidrager til at tage CO₂ ud af atmosfæren. Forskerne vil også kigge på, hvordan lagringen af materiale fra tang i havbunden har ændret sig over tid.

Forskerne har adgang til prøver af havbundens overfladelag samt boreprøver af havbunden fra rundt omkring Grønland. Nogle af dem er taget tæt ved kysten og på lavt vand, mens andre er taget på dybt vand langt fra kysten.

Havbundsprøverne kan forskerne bruge til først og fremmest at identificere, hvor i havet omkring Grønland der findes lagre for kulstof i form af død tang fra tangskovene. For det andet kan forskerne også bruge boreprøvernes stratificerede lag til at finde ud af, hvordan lagring af kulstof fra tang har ændret sig over tid.

- Forskerne vil blandt andet undersøge, om der er mere DNA fra tang i de øvre og dermed også yngre lag af havbunden. Inden for de seneste 30 år har klimaforandringerne virkelig taget fat, og måske kan man i havbunden se, at det har betydet, at der er kommet mere og mere dødt plantemateriale fra tang.
- Forskerne vil også kigge endnu længere tilbage i tiden. Den lille istid er betegnelsen for en kuldeperiode, der varede fra 1300-tallet til midt i 1800-tallet. Denne kolde periode har utvivlsomt haft indflydelse på isdækket i havet ud for Grønland og dermed også for tangskovenes muligheder for at brede sig. Spørgsmålet er, om det kan ses i havbundsprøverne?

»Vi er først lige begyndt, så der kommer til at gå noget tid, før vi har konkrete data. Når vi til gengæld har dem, vil de kunne bidrage til både en bedre forståelse af bidraget fra havets skove i forhold til at modvirke klimaforandringerne og en bedre forståelse af tangskovenes økologiske funktion i dag og i fremtiden,« siger Dorte Krause-Jensen. ■



Havets rolle i den globale kulstofcyklus. Havets skove i form af tangskove, ålegræse m.m. indgår endnu ikke i afbildninger af det globale kulstofkredsløb. Havet kan indeholde flere kulstof-lagre (blå), og deres årlige udveksling internt og med andre lagre (som atmosfæren) er vist i de grønne pile. Estimaterne af stofudveksling er både for organisk og uorganisk kulstof. Rød angiver bidrag fra menneskelige aktiviteter. Illustration efter IPCC 2001 og 2013.

Balancen tipper i det globale CO₂-regnskab

Milliarder og atter milliarder ton kulstof i form af CO₂ bliver hvert år udvekslet i klodens store kulstofkredsløb. Menneskets bidrag til det globale kulstofkredsløb i form af CO₂, som især stammer fra afbrænding af fossile brændstoffer og cementproduktion, betyder, at der kommer mere og mere CO₂ i atmosfæren. Mere CO₂ i atmosfæren betyder, at Jorden får sværere ved at komme af med varmen, den ellers permanente is omkring blandt andet Grønland smelter, temperaturen stiger, og det samme gør det globale havniveau.

I atmosfæren er der tæt på 750 gigaton kulstof (1 gigaton er 1 milliard ton). Til sammenligning indeholder Jordens skorpe 100.000.000 gigaton, jordlaget på Jordens overflade 1.500 gigaton, havene 38.000 gigaton og landjordens samlede plantemateriale 560 gigaton.

Der udveksles hele tiden kulstof mellem de forskellige aktører. Planterne optager via deres fotosyntese 120 gigaton kulstof om året, mens de samtidig udleder 60 gigaton.

Bakteriers nedbrydning af døde dyr og planter udleder 60 gigaton kulstof om året, mens landjorden optager 3 gigaton. Havet er nogenlunde i balance, men optager dog en smule mere, nemlig 92 gigaton, end de udleder, hvilket er 90 gigaton. Tager man menneskers bidrag til hele ligningen ind i beregningen, udleder vi samlet set blot omkring 9 gigaton om året. De 9 gigaton er dog nok til at tippe skalaen, så det samlede indhold af CO₂ i atmosfæren hvert år stiger med 4 gigaton. 4 gigaton lyder måske ikke af meget i forhold til de 100.000.000 gigaton, der er lagret i Jordens skorpe, men det er nok til, at kloden bliver varmere år for år. Det ubesvarede spørgsmål er, hvor havets skove passer ind i denne ligning, og hvor meget af det overskydende kulstof de kan optage. Dette spørgsmål for søger forskere verdenen over nu at besvare. Det er dog interessant at bemærke, at forskning har vist, at der under et givent areal af havets skove lagres lige så meget kulstof som under landjordens skove. Havenes skove opsamler bare CO₂ meget hurtigere.

Havets skove indfan-
ger CO₂: Videnskab.
dk/en/node/28519

Videnskab.dk/
naturvidenskab/gro-
enlandke-tangsko-
ve-modvirker-havfor-
suringen

Dorte Krause-Jensen
et.al: Long photope-
riods sustain high pH
in Arctic kelp forests,
Science Advances
14 Dec 2016. Vol. 2,
no. 12, e1501938.
DOI: 10.1126/
sciadv.1501938

Dorte Krause-Jensen
& Carlos M. Duarte:
Substantial role of
macroalgae in marine
carbon sequestration,
Nature Geoscience
volume 9, pages
737–742 (2016).
DOI: 10.1038/
ng eo2790.

Dorte Krause-Jensen
et.al: Sequestrati-
on of macroalgal
carbon: the elephant
in the Blue Car-
bon room (2018).
Biology Letters.
DOI: 10.1098/
rsbl.2018.0236

Forfatterne



Malene Bredal Brohus er postdoc ved Sektion for Bioteknologi, Institut for Kemi og Biovidenskab, Aalborg Universitet. Malene har speciale i proteinkemi og var med til at åbne calmodulin-projektet. Hun har lavet en stor mængde biofysiske analyser af calmodulin-varianter, evne til at binde calcium-ioner og til at binde til calcium-kanaler. mbrohus@bio.aau.dk



Helene Halkjær Jensen er postdoc ved Sektion for Bioteknologi, Institut for Kemi og Biovidenskab, Aalborg Universitet. Med en baggrund i cellebiologi har Helene arbejdet på calmodulin-projektet siden 2018. Hun udvikler en metode til at undersøge calmodulins effekt på hjerteslag i laboratoriet. hj@bio.aau.dk



Mette Nyegaard er lektor ved Institut for Biomedicin, Aarhus Universitet. Mette er genetiker og har en bred erfaring i kortlægning af gener i sjældne sygdomme. Hun ledte arbejdet med at identificere den første calmodulin-mutation. nyegaard@biomed.au.dk



Foto: Colourbox

EN GENFEJL, DER GÅR LIGE I HJERTET

Mutationer i det lille protein calmodulin har vist sig at være involveret i sygdomme, der kan medføre hjerterytmeforstyrrelser og endda hjertestop.

Det har åbnet forskernes øjne for, hvilke andre hemmeligheder dette livsvigtige protein gemmer på.

Enhver hjertelæge har i skuffen nogle patientjournaler, som forbliver en gåde. De kan involvere børn med uforklarlige hjerteproblemer eller familier med nedarvede hjertefejl, hvor man ikke kan finde et defekt gen. Netop sådan en familie findes i Sverige: for nu ca. 30 år siden, besvimelede en 12-årig dreng under en fodboldkamp. Hans 15-årige bror døde pludseligt under

en svømmekonkurrence. Blandt deres øvrige søskende og senere nevøer og niecer lider mange af hyppige besvimelser. Dog har ingen af de berørte familiemedlemmer vist nogen tegn på sygdommen forud for hændelserne. De har normale hjertediagrammer (EKG), og deres hjertestruktur er normal ved ultralydsscanning. Fælles for hændelserne er, at de opstår i situationer med fysisk eller psykisk

påvirkning. Der ses først tegn på en underliggende hjertesygdom, hvis man optager et EKG/hjertediagram under fysisk belastning.

Den svenske familie er i dag diagnosticeret med den sjældne hjerterytmelidelse *catecholaminergic polymorphic ventricular tachycardia* (CPVT), som typisk skyldes fejl i hjertets ryanodinreceptorer, en klasse af calciumkanaler i hjertecel-

Et meget vigtigt protein

Calmodulin er et meget unikt protein, fordi det er ekstremt bevaret. Mennesker har tre gener, som koder for calmodulin, *CALM1-3*. Selvom der er variationer i den genetiske sekvens for *CALM1-3*, produceres der fuldstændig identiske proteiner fra de tre gener – det er usædvanligt. Men også når man kigger på andre arter, er calmodulin forbløffende bevaret. Figuren viser en sammenligning af protein-sekvensen for calmodulin fra forskellige arter. Hvert bogstav repræsenterer en specifik aminosyre og en rød markering indikerer variation i den pågældende aminosyre sammenlignet med menneske-proteinsekvensen. Selv så forskellige arter som mus og laks har calmodulin-protein, der er præcis magen til det i mennesker. I planter

				20				40	
Menneske	ADQLTEEQIA	EFKEAFSLFD	KDGDGTITTK	ELGTVMRSLG	QNPTEAELQD	50			
Gris	ADQLTEEQIA	EFKEAFSLFD	KDGDGTITTK	ELGTVMRSLG	QNPTEAELQD	50			
Mus	ADQLTEEQIA	EFKEAFSLFD	KDGDGTITTK	ELGTVMRSLG	QNPTEAELQD	50			
Laks	ADQLTEEQIA	EFKEAFSLFD	KDGDGTITTK	ELGTVMRSLG	QNPTEAELQD	50			
Bananflue	ADQLTEEQIA	EFKEAFSLFD	KDGDGTITTK	ELGTVMRSLG	QNPTEAELQD	50			
Kornblomst	ADQLTEEQIA	EFKEAFSLFD	KDGDGTITTK	ELGTVMRSLG	QNPTEAELQD	50			
Gær	SSNLTTEEQIA	EFKEAFSLFD	KDNNGSISSS	ELATVMRSLG	LSPSEAEVND	50			
		60		80		100			
Menneske	MINEVDADGN	GTIDFPEFLT	MMARKMKDTD	SEEEIREAFR	VFDKDGNGYI	100			
Gris	MINEVDADGN	GTIDFPEFLT	MMARKMKDTD	SEEEIREAFR	VFDKDGNGYI	100			
Mus	MINEVDADGN	GTIDFPEFLT	MMARKMKDTD	SEEEIREAFR	VFDKDGNGYI	100			
Laks	MINEVDADGN	GTIDFPEFLT	MMARKMKDTD	SEEEIREAFR	VFDKDGNGYI	100			
Bananflue	MINEVDADGN	GTIDFPEFLT	MMARKMKDTD	SEEEIREAFR	VFDKDGNGFI	100			
Kornblomst	MINEVDADGN	GTIDFPEFLT	LMARKMKDTD	SEEEIREAFR	VFDKDGNGFI	100			
Gær	LMNEIDVDGN	HQIEFSEFLA	LSRQLKSND	SEQELLEAFK	VFDKDGGLI	100			
		120		140					
Menneske	SAAELRHVMT	NLGEKLTDEE	VDEMIREADI	DGDGQVNYEE	FVQMMTAK	148			
Gris	SAAELRHVMT	NLGEKLTDEE	VDEMIREADI	DGDGQVNYEE	FVQMMTAK	148			
Mus	SAAELRHVMT	NLGEKLTDEE	VDEMIREADI	DGDGQVNYEE	FVQMMTAK	148			
Laks	SAAELRHVMT	NLGEKLTDEE	VDEMIREADI	DGDGQVNYEE	FVQMMTAK	148			
Bananflue	SAAELRHVMT	NLGEKLTDEE	VDEMIREADI	DGDGQVNYEE	FVTMMTAK	148			
Kornblomst	SAAELRHVMT	NLGEKLTDEE	VEEMIREADI	DGDGQVNYEE	FVKIMMAK	148			
Gær	SAAELKHVIT	STIGEKLDAE	VDDMLREVS	DGSGEINIQQ	FALL-SK	146			

er der desuden kun få forskelle. Og i gær – en encellet organisme – er proteinet nogenlunde samme størrelse og har forholdsvis ens sekvens.

Det fortæller, at calmodulin er et meget vigtigt protein med en fuldstændig basal funktion. Man vil højst sandsynligt ikke kunne leve uden!

lerne. Fejlene betyder, at patienterne kan besvime eller få hjertestop uden varsel, når hjertet pludseligt skal præstere under adrenalinpåvirkning som ved motion, eller når man bliver forskrækket.

Men undersøgelser af den svenske families DNA viste, at ingen i familien havde fejl i de gener, der koder for ryanodinreceptoren eller i andre gener, der er kendt for at være involveret i sygdommen CPVT. Derfor indledte den ene af denne artikels forfattere, Mette Nyegaard, sammen med en lille håndfuld kollegaer i 2006 jagten på det ukendte sygdomsgen. Det var et møjsommeligt arbejde at kortlægge de kromosom- og genområder, som de sygdomsramte havde tilfælles og som var forskellige fra de raske familiemedlemmer. Svaret på den genetiske screening var meget overraskende: De syge familiemedlemmer havde en punktmutation i genet *CALM1*. *CALM1* er et af tre gener, som koder for proteinet calmodulin, der fungerer som en calcium-sensor i cellerne. Dette protein var aldrig før blevet kædet sammen med sygdomme i mennesker, og grundet

dets afgørende funktion i vores celler troede man dengang ikke, at mennesker kunne overleve med calmodulin-mutationer.

Calmodulin – en calciumsensor

Siden denne første calmodulin-mutation blev beskrevet i 2012, er andre patienter med uforklarlige hjerteproblemer blevet undersøgt. Det betyder, at man i dag kender omkring 30 tilfælde af mutationer i calmodulin. Alle patienterne lider af enten CPVT eller lang QT-syndrom (LQTS), som også er en hjertelidelse med spontane hjertestop. Det er meget overraskende, at calmodulin-mutationer ikke giver symptomer andre steder i kroppen, da calmodulin spiller en vigtig rolle i alle kroppens celler. Det kan skyldes, at hjertemuskulaturen er et højt specialiseret væv – men det kan også være fordi, at man ikke har ledt efter disse mutationer i andre typer patienter.

Men hvad gør calmodulin så specielt? Alle kroppens celler producerer calmodulin. Proteinets "måler" koncentrationen af calcium og giver den information videre til andre proteiner, som derefter ændrer

funktion, eksempelvis ved at aktivere bestemte signaler, åbne for iontransport eller tænde eller slukke bestemte gener.

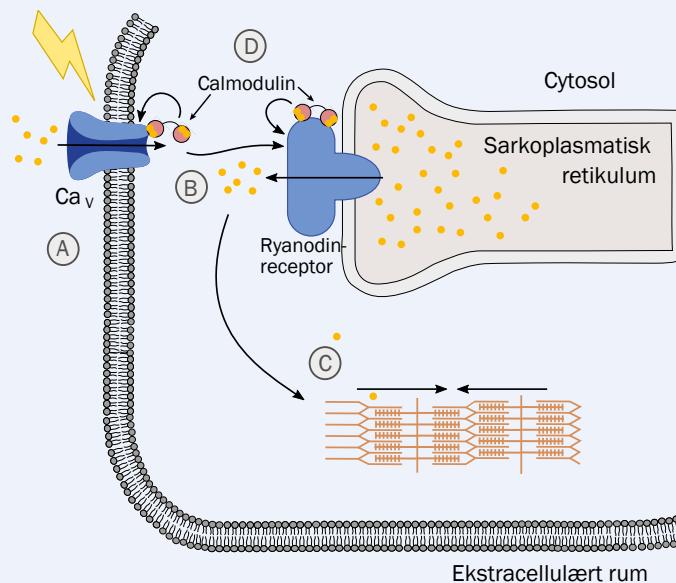
I kroppens celler fungerer calcium-ioner som et af de vigtigste signalstoffer. I cellens cytosol – det vil sige den væske, der findes inde i cellen, men uden for cellekernen og organellerne – er calciumkoncentrationen meget lav, omkring 100 nM. Uden for cellen og inde i særlige organeller, der fungerer som calciumlager (endoplasmatiske retikulum eller sarkoplasmatiske retikulum i muskelceller), er calciumkoncentrationen 1-2 mM – altså mere end 10.000 gange højere end i cytosolet. Det betyder, at der er en meget stor koncentrationsgradient af calcium hen over dels cellemembranen, dels den membran, der adskiller endoplasmatiske/sarkoplasmatiske retikulum fra cytosolet. Denne gradient kan drive en kraftig strøm af calcium ind i cellens cytosol, hvis en pore åbner, eller et transportprotein i membranerne aktiveres. Det betyder også, at selv meget små ændringer i calcium-mængden i cellen kan fungere som et signal for en specifik

Calcium og calmodulin styrer et hjerteslag

Et hjerteslag startes af et såkaldt aktionspotentiale og en hurtig strømning af Na^+ - og K^+ -ioner henover cellemembranen.

Elektrisk styrede Ca^{2+} -kanaler (Ca_v , voltage-gated calcium channel) mærker denne elektriske stimulering og åbner (A). Der er en meget stor koncentrationsgradient af Ca^{2+} over membranen, som driver Ca^{2+} gennem Ca_v -kanalen og ind i cellen. Ryanodin-receptoren, som sidder i membranen til sarkoplasmatiske retikulum inde i cellen, registrerer denne stigning i koncentrationen af Ca^{2+} i væsken inde i cellen (cyto-solet) og åbner (B). Derved strømmer en stor mængde Ca^{2+} -ioner ud fra sarkoplasmatiske retikulum og stimulerer sammentrækning af aktin-myosin-fibre (C).

På samme tid binder calmodulin nogle af de Ca^{2+} -ioner, som nu er til stede i cyto-solet (D). Calmodu-



lin binder også til Ca_v -kanalen og ryanodinreceptoren. Når calmodulin binder Ca^{2+} , ændres proteinets tredimensionelle struktur. Denne ændring signalerer til calciumkanalerne om at lukke. På den måde fungerer calmodulin som en Ca^{2+} -sensor, der

hjælper med at lukke kanalerne. Hvis ikke det sker, strømmer for meget Ca^{2+} ind i cyto-solet. Det kan gøre hjerteslaget så langt, at cellen ikke når at nulstille, inden et nyt aktionspotentiale ankommer, og så kan hjerterytmen kortslette.

cellulær funktion. For eksempel kan nogle typer receptorer aktivere såkaldte G-proteiner, som igen aktiverer et calcium-transportprotein til at åbne for en calciumindstrømning. Denne øgede mængde calcium kan efterfølgende stimulere frigivelsen af et hormon fra cellen eller en anden aktivitet.

Calcium og calmodulin styrer et hjerteslag

Under et hjerteslag udnyttes calcium-signalet til at stimulere de muskelsammentrækninger, som får hjertet til at pumpe blod rundt i kroppen. Da hjertet skal pumpe igen og igen, frigives calcium i bølger, som styrer hjerteslagene. Det er derfor ekstremt vigtigt, at calciummængderne frigives tidsmæssigt meget præcist – og ligeså vigtigt, at calcium fjernes igen, inden næste hjerteslag. Det er en elektrisk stimulering fra et såkaldt aktionspotentiale, der udgør startsignalet for indstrømningen af calcium i en hjertecelle. Calcium-indstrømning-

gen sker hovedsageligt gennem to calcium-kanaler: elektrisk styrede kanaler i cellemembranen (Ca_v) og de før omtalte ryanodinreceptorer (RyR), der sidder i membranen til sarkoplasmatiske retikulum. Først stimulerer et aktionspotentiale Ca_v til at åbne, og de indstrømmende calcium-ioner stimulerer så RyR til at åbne og lade store mængder calcium strømme fra sarkoplasmatiske retikulum ind i cyto-solet. Den sammenlagte stigning i calciumniveauet stimulerer sammentrækningen af cellens muskelfibre.

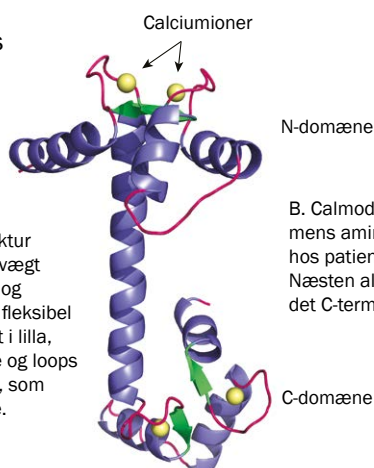
Calmodulin binder til bestemte områder på Ca_v - og RyR-kanalerne. Når calcium-koncentrationen i cyto-solet overstiger en tærskelværdi, binder calcium-ioner til calmodulin. Dermed sker der en konformationsændring af calmodulin, som forplanter sig til Ca_v eller RyR, der som følge heraf lukker. Dermed lukkes den indgående strøm af calcium, og cyto-solet kan tømmes for calcium for at gøre klar til næste hjerteslag.

Calmodulin-mutationer kan give hjertestop

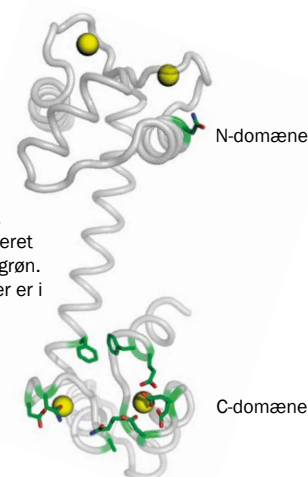
Hos patienter med calmodulin-mutationer er en af de 148 aminosyrer i calmodulin udskiftet med en anden. Denne udskiftning påvirker ofte både bindingen af calcium – den kan i nogle tilfælde være 50 gange dårligere – og bindingen til Ca_v og RyR. Det betyder, at calmodulin for det første "måler" calcium-koncentrationen forkert. For det andet bliver beskeden om ændringer i calcium-koncentrationen videregivet forkert eller for sent til Ca_v og RyR. Den manglende information fra calmodulin forplanter sig som en dominoeffekt: Når Ca_v og RyR ikke modtager rettidig besked fra calmodulin om at lukke, vil calcium-ionerne fortsætte med at strømme ind i hjertecellen, som igen vil fortsætte med at trække sig sammen, indtil calcium-strømmen bliver stoppet. Netop sådan en situation med for meget calcium i hjertecellens cytosol giver en meget stor risiko for, at hjerterytmen

Figurerne viser calmodulins struktur og vekselvirkning med ryanodinreceptoren.

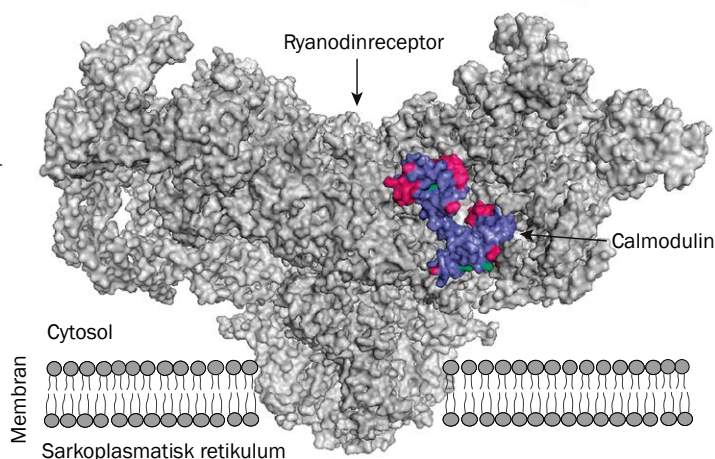
A. Den tredimensionelle struktur af calmodulin ligner en håndvægt og består af to domæner (N- og C-domænet) forbundet af en fleksibel linker-region. Alfa-helix er vist i lilla, mens beta-strenger er grønne og loops er pink. De fire calcium-ioner, som bindes af calmodulin, er gule.



B. Calmodulin er her vist i grå, mens aminosyrer, som er muteret hos patienter, er fremhævet i grøn. Næsten alle kendte mutationer er i det C-terminale domæne.



C. Calmodulin bundet til ryanodinreceptoren. For begge proteiner er overfladen vist. Ryanodinreceptoren sidder i membranen til sarkoplasmatiske retikulum med en meget stor del stikkende ud i cytosolet. Calmodulin binder til et område på siden af ryanodinreceptoren.



kortsluttes og ligger til grund for hjerterytmeforstyrrelser og i værste tilfælde hjertestop.

Funktionelle studier udført på Aalborg Universitet under ledelse af professor Michael Toft Overgaard, og andre steder i verden, har generelt afsløret, at CPVT-associerede calmodulin-mutationer ændrer calmodulins evne til at lukke RyR-kanalen, mens LQTS-associerede calmodulin-mutationer påvirker lukningen af Ca_v -kanalen.

Calmodulin: lille men vigtig

Da calmodulin bliver produceret i alle kroppens celler, kan det betragtes som et "husholdningsprotein"; et protein som er med til at opretholde de basale funktioner for at cellen kan eksistere. Men af flere grunde er calmodulin unik. Calmodulin kan nemlig vekselvirke med mere end 300 andre proteiner i cellen, hvilket er et overvældende tal. Samtidig er calmodulin et forholdsvis lille protein bestående

af blot 148 aminosyrer. Det betyder, at enhver aminosyre er vigtig, og at selv små ændringer i calmodulin kan have indflydelse på proteinets struktur og dermed funktion.

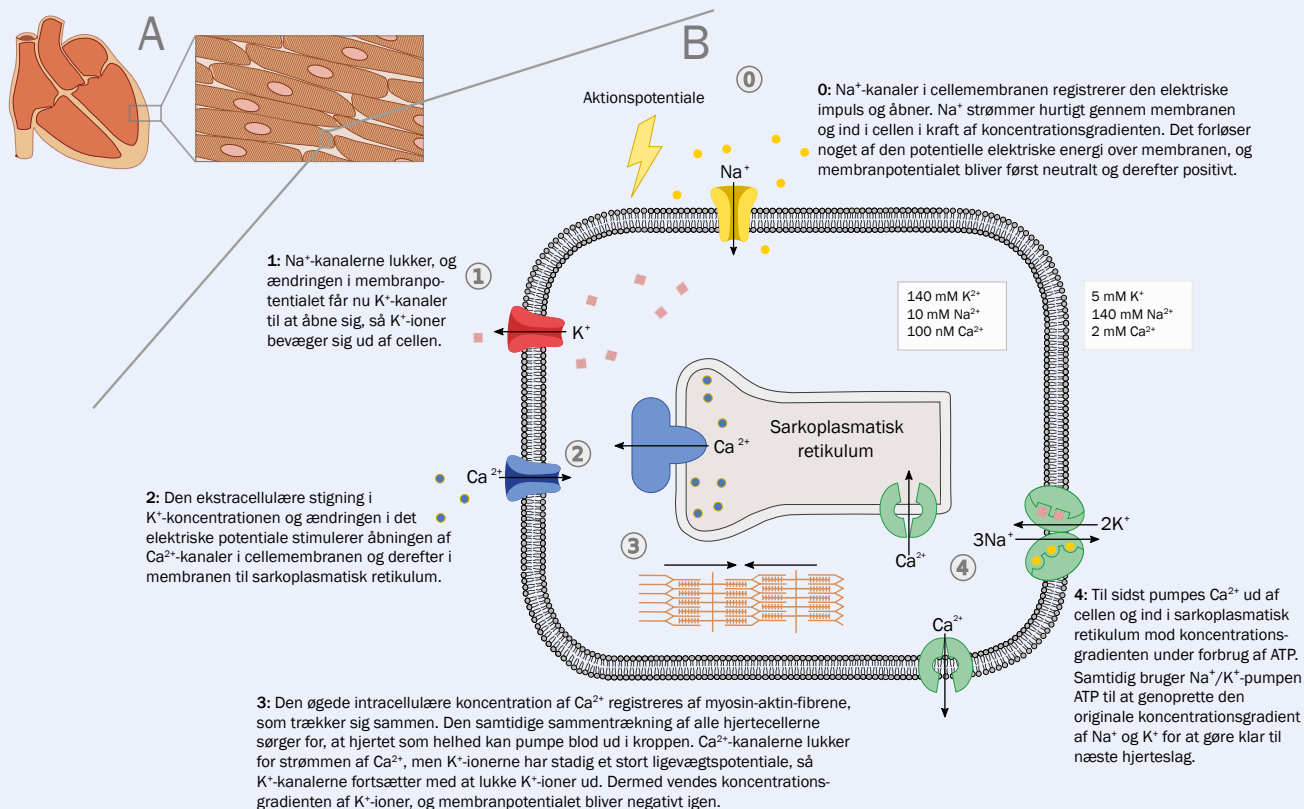
Strukturelt er calmodulin bygget op, så det har form som en håndvægt med to kugleformede domæner, der er forbundet af en fleksibel kæde af aminosyrer. Hvert domæne er formet således, at aminosyrerne kan koordinere (binde) to calcium-ioner.

Det ene domæne (kaldet det C-terminale domæne) binder calcium stærkt og kan derfor måle lave koncentrationer. Det andet domæne (kaldet det N-terminale domæne) binder calcium svagere, og måler først ved højere koncentrationer. Det betyder, at calmodulin kan fungere som en sensor af calciumkoncentrationer over et bredt område. På den måde kan calmodulin følge dynamikken af calciumstrømninger under et hjerteslag og videregive information om ændringer til andre

proteiner såsom Ca_v - og RyR-kanalerne.

Hos patienter med mutationer i calmodulin findes mutationerne altid i et af domænerne. Faktisk har næsten alle patienter mutationer i det C-terminale domæne – kun den svenske familie har en mutation i det N-terminale domæne. Det er ikke afklaret, hvorfor mutationerne er sådan fordelt. Man kan forestille sig, at patienter med mutationer andre steder ikke kan leve med dem – at et foster med sådan en mutation ville blive aborteret spontant. Omvendt kan man også forestille sig, at disse mutationer slet ikke vil give sygdom, og derfor er man ikke stødt ind i dem, når man undersøger hjertepatienter.

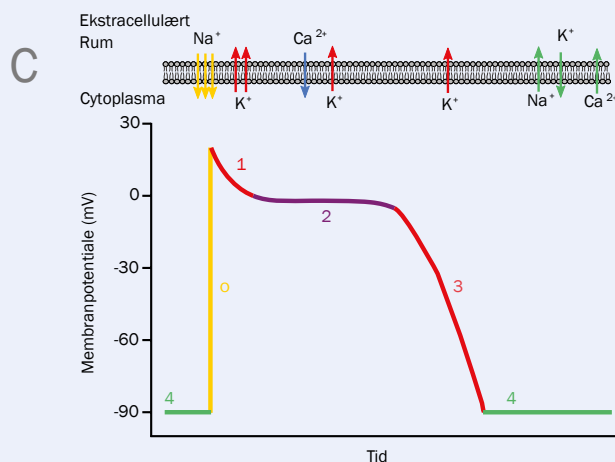
Man kan danne sig et billede af, i hvilken grad et bestemt gen tåler mutationer, ved at søge i store databaser, som indeholder gensekvenser fra rigtig mange mennesker fra raske populationer (baggrundsbe-



Sådan foregår et hjerteslag

Sammentrækning af hjertemusklen pumper blodet rundt i kroppen. Hjertemuskelcellerne er opbygget af striber af aktin og myosin (A), som kan trække sig sammen, når de stimuleres af Ca^{2+} -ioner.

B. Hjerteceller opretholder en koncentrationsgradient af K^+ , Na^+ og Ca^{2+} -ioner over cellemembranen. Dermed opstår en potentiel energi (membranpotentialet), som udnyttes ved et hjerteslag. Med en elektrode kan man måle ændringerne i hjertecellens membranpotential under et hjerteslag (C).



Ydere læsning
Jensen HH, Brohus M, Nyegaard M and Overgaard MT (2018) Human Calmodulin Mutations. Front. Mol. Neurosci. 11:396. doi: 10.3389/fnmol.2018.00396

Nyegaard M. m. fl.: (2012) Mutations in calmodulin cause ventricular tachycardia and sudden cardiac death. Am J Hum Genet. 91(4):703-12. doi: 10.1016/j.ajhg.2012.08.015.

Video med animation på LinkedIn: [kortlink.dk/xkc2](https://www.linkedin.com/company/kortlink.dk/xkc2)

folkningen). Gør man det, er der påfaldende få mutationer i calmodulin sammenlignet med andre gener. Det tyder på, at der er mange calmodulin-mutationer, som man ikke kan leve med.

Viden om calmodulin-mutationer giver nye perspektiver

I dag behandles patienter med calmodulin-mutationer med almindelige hjerte-behandlinger. Mange får indopereret en defibrillator for hurtigt at genoprette forstyrrelser i hjerterytmen og undgå hjertestop, og de får medicinsk behandling, der dæmper effekten af adrenalin. Med det, vi kender til calmodulin-mutationer i dag, kan vi begynde at danne os et billede af, hvilke konsekvenser

en eventuel nyopdaget mutation vil have. Det giver lægerne en bedre forståelse af, hvilken medicinsk behandling den enkelte patient bør modtage for at undgå hjerterytme-forstyrrelser og hjertestop. Det åbner også en dør til udvikling af ny medicin, der kan virke mere specifikt til gavn for patienter med calmodulin-mutationer.

Patienter med calmodulin-mutationer er også videnskabeligt og medicinsk interessante af mere generelle årsager: Når man forstår følgerne af mutationerne, kan man udlede viden om, hvordan det raske protein må virke. Samtidig får man en større forståelse for, hvordan calmodulin vekselvirker med andre proteiner i hjertet. Det er interessant, fordi flere af

de molekyler, calmodulin vekselvirker med, er mål for mange almindelige former for hjertemedicin. Derfor har opdagelsen af denne nye gruppe af patienter åbnet for nye vinkler i forskningen og dermed også potentielt for fremstilling af ny medicin.

Endelig er der et vigtigt spørgsmål, som trænger sig på: Kan det virkelig passe, at mutationer i så vigtigt og bevaret et protein som calmodulin udelukkende giver hjerteproblemer, eller kan vi i fremtiden forvente at opdage skadelige effekter af mutationerne i øvrige dele af kroppen, for eksempel hjernen? I så fald kan forekomsten og konsekvenserne af calmodulin-mutationer være mere omfattende, end vi hidtil har troet. ■

A photograph of three students in a laboratory setting. One student is seated in a small, blue, four-wheeled robotic car, which is equipped with a laptop, a monitor, and various electronic components. Two other students are standing next to the car, looking at the equipment. The background shows a typical university lab with other equipment and posters on the wall.

MAKE IT REAL

Simon, Martin og Simon har lavet en algoritme, som fortæller selvkørende biler, hvor de befinder sig, så de bliver på den rute, de har fået udstukket, og ikke er årsag til ulykker.

SIMON, MARTIN OG SIMON HAR LÆST ROBOTTEKNOLOGI

Med afsæt i gruppearbejde og problembaserede projekter med autentiske udfordringer bliver du undervist lige der, hvor teori og praksis mødes og er med til at flytte, forundre og forandre. Både dig og verden. AAU bringer dig derfor tættere på den virkelige verden. Og på et attraktivt job.

FÅ MERE AT VIDE OM UDDANNELSEN PÅ ROBOT.AAU.DK



AALBORG UNIVERSITET
AALBORG ESBJERG KØBENHAVN

GEOMETRI

– når faktorernes orden har betydning

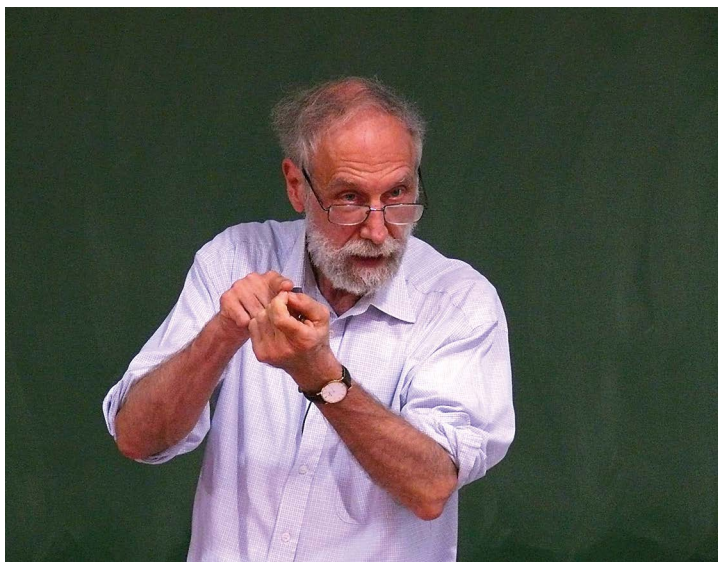
En af geometriens nyeste sidegrene handler populært sagt om at forstå, hvad der sker, når rækkefølgen af begivenheder ikke er ligegyldig. Denne form for geometri – kaldet ikke-kommutativ geometri – kan siges at repræsentere en fascinerende deformeret virkelighed, der eksisterer side om side med den verden, vi kender.

Moderne geometri er en matematisk disciplin i rivende udvikling og i tæt samspil med andre videnskaber. Man kan sammenligne udviklingen med et vildt og hurtigt voksende træ, der bredder sig ukontrolleret i alle retninger via nye skud og overraskende forbindelser. I denne tekst vil jeg introducere et enkelt af de nyeste og rigeste topskud på geometriens træ, som jeg selv er dybt fascineret af. Denne gren kaldes for *ikke-kommutativ geometri* og er vokset frem af de inspirerende tanker, som den indflydelsesrige franske matematiker Alain Connes gjorde sig i slutningen af det 20. århundrede.

Ordet “ikke-kommutativ” betyder, at det ikke er ligegyldigt i hvilken rækkefølge, man udfører to handlinger. For at tage et dagligdags eksempel, så er det helt sikkert ikke ligegyldigt, om man først tager tøj på og dernæst går ud på gaden, eller om man først går ud på gaden og dernæst tager tøj på. Rækkefølgen af disse to handlinger kan lede til vidt forskellige resultater. Rent matematisk kan ikke-kommutativitet beskrives med følgende udtryk:

$$X \cdot Y \neq Y \cdot X$$

Det vil sige, at rækkefølgen af symbolerne X og Y har en betydning, når



Den alsidige franske matematiker Alain Connes har stået fadder til feltet ikke-kommutativ geometri. Foto: Peter Potrowl/CC BY-SA 3.0

man ganger dem sammen. Vi siger også, at X og Y ikke kommuterer. Det er nærmest umuligt at overvurdere, hvor vigtig en rolle idéen om ikke-kommutativitet har for moderne videnskab. For eksempel kunne X og Y være observerbare fænomener i kvantemekanisk forstand, hvor det viser sig at være afgørende, at disse fænomener ikke kommuterer. Man kan nærmest sige, at ikke-kommutativitet udgør forskellen på klassisk mekanik og kvantemekanik.

Men hvad har ikke-kommutativitet at gøre med geometri? En del af svaret

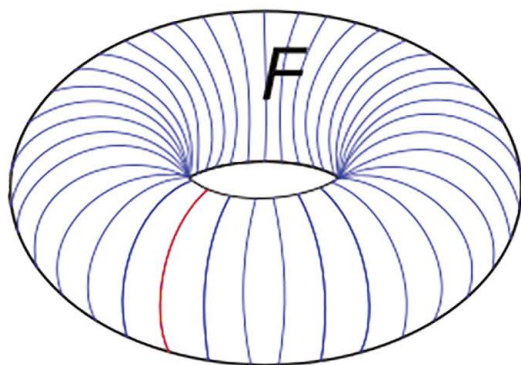
er, at ikke-kommutativ geometri er en udvidet form for geometri, der også gælder i situationer, hvor vores sædvanlige intuition om geometri er sat ud af kraft. Det vil sige situationer, hvor man ikke uden videre kan benytte sig af den geometriske forståelse, som vi alle har udviklet ved at bevæge os rundt i den verden, vi kender. For at give et eksempel kan ikke-kommutativ geometri handle om de geometriske love, der gælder inde i et atom, og ikke-kommutativ geometri har derfor tætte forbindelser til partikelfysik. Men der er også en solid mængde matematisk



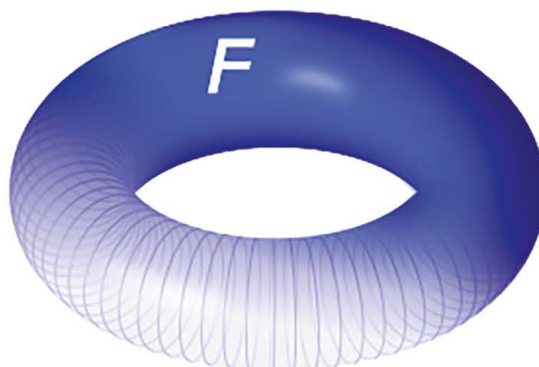
Om Forfatteren

Jens Kaad er lektor ved Institut for Matematik og Datalogi, Syddansk Universitet, hvor han forsker i ikke-kommutativ geometri og mere specifikt med ubegrænset KK-teori, som er en slags maskine, der genererer nye geometriske strukturer ud fra bestemte dybtliggende principper.
kaad@imada.sdu.dk

Lineær foliering



Kronecker-foliering



Snor man en tynd tråd rundt om en badering med en fast vinkel, beskriver tråden matematisk set en såkaldt foliering af baderingen. Er vinklen et rationalt tal, vil snoren vende tilbage til sit udgangspunkt efter et endeligt antal snoninger rundt om baderingen (lineær foliering). Er vinklen derimod et irrationalt tal, vil snoren aldrig nå tilbage til sit udgangspunkt (Kronecker-foliering). Illustration efter: User Lantonov/Wikimedia Commons/CC BY-SA 4.0

motivation for at beskæftige sig med en udvidet form for geometri.

På opdagelse på baderingen

Et af de mest berømte eksempler på en geometrisk situation, der kan beskrives med en ikke-kommutativ tilgang, kan forklares ved at kigge på en badering. Man forestiller sig nu, at man tager en syletynd tråd og vikler den rundt om sin badering, idet man hele tiden fastholder en bestemt vinkel. Dette kan være besværligt at gøre i praksis, men vi foretager her et tankeeksperiment. Den fastholdte vinkel betegnes normalt med det græske bogstav θ (theta).

Der kan nu forekomme to vidt forskellige situationer, alt efter om vinklen θ er en brøk eller ej. Det vil sige, alt efter om vinklen θ er et rationalt eller et irrationalt tal. Gode eksempler på rationale tal (brøker) er tallene $1/3$, $1/2$, $4/5$ osv., mens gode eksempler på irrationale tal er tallene $\sqrt{2}$, π , $\log(2)$.

I situationen, hvor vinklen θ er rational, sker der det, at den syletynde tråd vender tilbage til sit begyndelsespunkt, når vi har viklet den rundt om baderingen et endeligt antal gange (hvis θ for eksempel er $4/5$, skal vi blot fem gange rundt, før dette sker). I situationen, hvor

vinklen θ er irrational, vender den syletynde tråd *aldrig* tilbage til sit begyndelsespunkt, og vi kan derfor blive ved i al uendelighed med at vikle den rundt om baderingen. Det bliver således nødvendigt at bruge en uendelig lang tråd, og efter et stykke tid vil det ligne, at hele baderingen er dækket med tråd. I begge tilfælde har vi beskrevet en såkaldt foliering af vores badering.

På fransk hedder foliering "feuilletage" og kan referere til en særlig slags dej, der består af mange meget tynde lag af dej og som for eksempel kan bruges i bagværk. De enkelte lag i dejen kaldes da for folieringens blade ("feuilletés"). Man kan også tænke på en foliering, som om det var en bog, hvor de enkelte sider i bogen udgør folieringens blade. I vores eksempel med baderingen beskriver den syletynde tråd folieringens blade.

Den ikke-kommutative badering

Lad os kigge nærmere på situationen, hvor vinklen θ er et irrationalt tal. Det vil sige den situation, hvor vi har brug for en uendelig lang og syletynd tråd for at beskrive folieringen af baderingen. Denne foliering af baderingen kaldes for Kronecker-folieringen og er opkaldt efter den jødiske matematiker

Leopold Kronecker. I grove træk handler denne folierings geometri om at forstå, hvad der sker, hvis man har to variable X og Y , som ikke kommuterer, men som i stedet opfylder ligningen:

$$X \cdot Y = \theta \cdot Y \cdot X \quad (*)$$

Det vil sige, at de to variable X og Y kommuterer op til vores vinkel θ , så hver gang X og Y bytter plads, dukker vores vinkel θ op som et slags korrektionsled. Denne specielle måde at regne på tillader os at forstå Kronecker-folieringens geometri, og når vi anvender dette synspunkt, taler vi om en *ikke-kommutativ badering*.

Hvis man bevæger sig rundt på en ikke-kommutativ badering, oplever man et bemærkelsesværdigt fænomen, som jeg vil forklare lidt nærmere. Lad os tænke på baderingen, som om den var et kvadrat, hvor kanterne er blevet limet sammen parvist (sådan som de fleste baderinge nok er fremstillet). Vores sædvanlige geometriske intuition fortæller os, at vi kommer det samme sted hen, hvis vi starter et sted på kvadratet og

- først går et skridt mod øst og dernæst et skridt mod nord, eller
- først går et skridt mod nord og dernæst et skridt mod øst.



Udtrykket foliering kender vi for eksempel også fra folieret bagværk, som er kager eller brød, hvor dejen foldes og rulles ud mange gange, så den kommer til at bestå af mange tynde lag (blandt andet er croissanter lavet på denne måde).
Foto: Shutterstock

I den verden, vi kender, er det ligegyldigt, hvilken rækkefølge vi tager disse to skridt i – vi ender det samme sted under alle omstændigheder.

Nu taler vi imidlertid om en ikke-kommutativ badering, som på en subtil måde er blevet deformeret af vores irrationale vinkel θ . Her er det ikke ligegyldigt, om vi først går mod øst og dernæst mod nord, eller om vi gør det i den omvendte rækkefølge. Den ligning, vi har beskrevet i (*) fortæller os, at vi ikke ender det samme sted, fordi vi uvægerligt bliver skubbet ud af kurs af den irrationale vinkel θ !

En deformeret virkelighed

Hvordan denne type af geometrisk opførsel kan beskrives og forstås rent matematisk har beskæftiget en lang række af matematikere og gør det stadigvæk den dag i dag. I virkeligheden viser det sig, at den ikke-kommutative badering og andre lignende objekter slet ikke eksisterer som rumlige størrelser i sædvanlig forstand, men i stedet udelukkende giver mening i en abstrakt algebraisk forstand.

Dermed indskrives ikke-kommutativ geometri sig blandt de matematiske teorier, der beskæftiger sig med følgende korrespondance:

Det geometriske objekt i sig selv



Observationer fra
det geometriske objekt

Den øverste del af korrespondancen skal her forstås som en rumlig størrelse (for eksempel jordkloden), og den nederste skal forstås som målinger foretaget overalt på denne rumlige størrelse (for eksempel temperaturmålinger). Den øverste del vil da opføre sig som et geome-

trisk objekt, der kan beskrives med klassiske geometriske metoder (afstande, vinkler, volumen, retning, krumning osv.), mens den nederste del bedst kan forstås ved hjælp af algebraiske metoder (multiplikation og addition) i samspil med raffinerede konvergensbegreber (hvad det vil sige, at noget nærmer sig noget andet). Ikke-kommutativ geometri beskæftiger sig med deformationer af den nederste del, som stadigvæk giver mening i algebraens og konvergensens verden, men hvor den øverste del ikke længere eksisterer. Dog har den nye deformerede nederste del som regel en lang række karakteristika, der forbinder den med det oprindelige geometriske objekt, som vi kender det. På den måde giver det mening at tænke på ikke-kommutativ geometri som en udvidelse af den sædvanlige geometri til en ny og fascinerende deformeret virkelighed, der eksisterer side om side med den verden, vi kender. Man kan måske endda sige, at den deformerede geometri eksisterer som en integreret, men usynlig, del af den virkelighed, vi alle befinder os i. ■

Science på RUC

Naturvidenskab i virkeligheden

Interesserer du dig for Matematisk Modellering?

Nye uddannelser på Roskilde Universitet:

- **Mathematical Computer Modelling**
- **Mathematical Physical Modelling**
- **Mathematical Biosciences**

ruc.dk/matematik-pa-roskilde-universitet



Nye undervisningsmaterialer

På aktuelnaturvidenskab.dk kan du finde masser af inspiration til din undervisning.

Forløb om immunforsvaret med fokus på bakterier

I forløbet indgår blandt artiklen *Bakterier på hjernen* fra nr. 2-2018. Forløbet har en varighed på cirka 9 lektioner af 90 minutter og passer til undervisningen i biologi A og B. Udarbejdet af Inger Klit, Favrskov Gymnasium.

NV-forløb (biologi, kemi og bioteknologi) om Food Science

Forløbet indeholder forslag til øvelser og tilhørende teori og en lang række artikler fra Aktuel Naturvidenskab. Udarbejdet af Anne Marie Rasmussen, Viborg Katedralskole.

Forløb: Tilbage til Månen

Et perspektiverende forløb om udforskning af Månen til Fysik C eller astronomi C. I forløbet indgår to artikler fra Aktuel Naturvidenskab; Tilbage til Månen (4-2009) og Kina i rummet (1-2012). Udarbejdet af Bjarning Grøn, Viborg Katedralskole.

NV-Forløb: Dommedag nu - Truslen fra Rummet

Et forløb, hvor der fokuseres på meteoror og deres historiske og mulige fremtidige påvirkning på Jorden. Forløbet tager udgangspunkt i artiklen *Truslen fra Rummet* nr. 4-2001. Fag: Naturgeografi og Fysik. Udarbejdet af Poul Lindskov og Martin Erichsen, Viborg Katedralskole.

Arbejdsark

Udover forløbene kan du også finde arbejdsark til en række artikler, heriblandt:

- *Varm sommer med uventede konsekvenser for vandmiljøet* fra nr. 6-2018. Om søers økologi og klimaforandringer. Biologi B/A
- *Kan forståelsen af et enzym løfte humøret?* Fra nr. 6-2017. Om udvikling af lægemidler. Bioteknologi A.
- *HPV-vaccinen: En blanding af fakta og følelse* fra nr. 6-2018. Om formidling af naturvidenskabelig viden. Biologi B/A eller bioteknologi A i kombination med dansk (eller samfundsfag).
- *Når musklerne ældes* fra nr. 6-2017. Biologi B/A og Idræt B.

Arbejdsarkene er udarbejdet af Lone Als Egebo, Egeboer.

Prøv quizzerne!

Fx quizzen om ekstremernes herre. Find dem via aktuelnaturvidenskab.dk

Materialerne og quiz-app er lavet som led i projektet *Aktuel Naturvidenskab i gymnasiet* finansieret af VILLUM FONDEN.

OM AKTUEL NATURVIDENSKAB

Styregruppe

- **Birgitte Lyhne**, kommunikationschef, Det Natur- og Biovidenskabelige Fakultet, Københavns Universitet
- **Jens D. Holbech**, chefkonsulent, Science and Technology, Aarhus Universitet
- **Mette Christina Møller Andersen**, specialkonsulent, Det Tekniske Fakultet, Syddansk Universitet
- **Niels Kring**, chefkonsulent, Det Naturvidenskabelige Fakultet, Syddansk Universitet
- **Sanne Holm Nielsen**, kommunikationsmedarbejder, Aalborg Universitet
- **Søren Rud Keiding**, prodekan, Science & Technology, Aarhus Universitet

Redaktionsgruppe

- **Birgitte Dalgaard**, Det Tekniske Fakultet, Syddansk Universitet
- **Majken Brahe Ellegaard Christensen**, Det Naturvidenskabelige Fakultet, Syddansk Universitet
- **Carsten Rabæk Kjaer**, Aktuel Naturvidenskab
- **Jørgen Dahlgaard**, Aktuel Naturvidenskab
- **Sanne Holm Nielsen**, Aalborg Universitet
- **Signe Hansen**, Viborg Gymnasium og HF
- **Svend Thaning**, Københavns Universitet
- **Torben Jarl Jørgensen**, Roskilde 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: 6.100



Redaktionen:

Tlf.: 87 15 20 94

E-mail: red@aktuelnaturvidenskab.dk

Hjemmeside: aktuelnaturvidenskab.dk

Facebook.com/aktuelnaturvidenskab

Postadresse: Aktuel Naturvidenskab,

Ny Munkegade 120, Bygning 1520,

DK-8000 Aarhus C

Omslagsfoto:

Regn i et sommerlandskab. Foto: Shutterstock.



ABONNEMENTS-SERVICE

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

Kontakt os på telefon: 87 15 20 94

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.

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

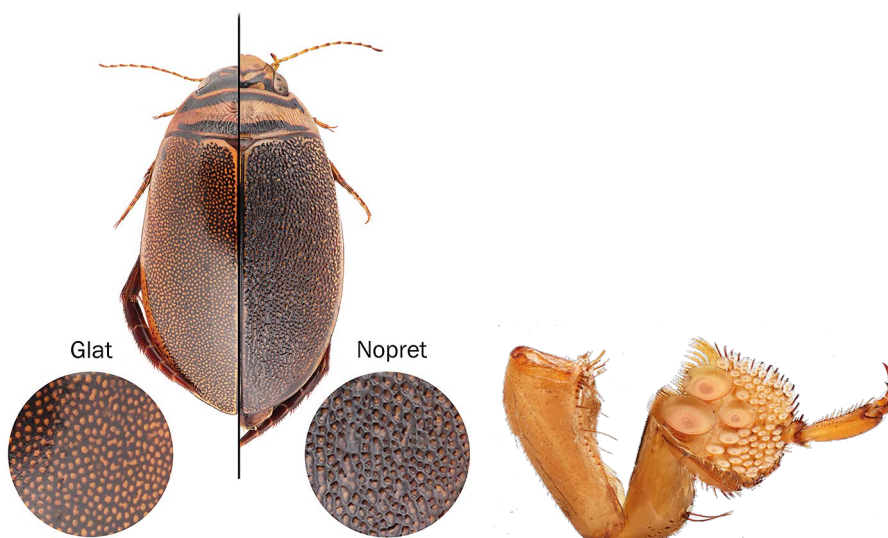
Kønnenes kamp i dammen

Af Carsten R. Kjaer, Aktuel Naturvidenskab

Mens vi mennesker i almindelighed forbinder parringsakten med noget nydelsesfuldt, kan det i dyreverdenen være en noget mere voldsom affære. Hør bare, hvad der foregår i vandkalve-verdenen: »Hos vandkalvene er der ikke et forudgående parringsspil, der synkroniserer hannens og hunnens interesser – hannerne begår et direkte overgreb på hunnen«, fortæller Kaj Sand-Jensen, der er professor ved Sektion for Ferskvandsbiologi, Københavns Universitet. »Hannen angriber pludseligt bagfra, sætter sig på hunnens ryg med sugekopperne på sine forfødder og sætter sig efterfølgende ekstra fast med kløer, mens hunnerne ofte forsøger med voldsomme bevægelser at ryste ham af – hun er måske allerede blevet parret en til flere gange, og vil derfor slippe af med ham. Og han bliver gerne siddende i op til flere timer ridende på hendes ryg, hvor hun tvinges ned under vandet, udmattes, og risikerer at drukne. Fra tid til anden tilter han hende, så hun kommer i kontakt med luften og kan forny luftboblen i bagkroppen til ånding med en ny luftboble – det er voldtægt i al dens gru«.

Et våbenkapløb

Når vandkalvehunner behandles med så lidt konduite af deres bejlere, kan det ikke undre, at hunnerne tager deres forholdsregler. Som modtræk har nogle hunner udviklet en mere nopret ryg, som hannerne har sværere ved at suge sig fast på. Men hannernes svar på den udfordring har blot været at udvikle sugekopper, der er specialiserede til at holde sig fast på en nopret ryg. Så i praksis foregår der et regulært våbenkapløb, der handler om at holde lystne bejlere fra livet og omvendt – at forhindre hunnerne i at slippe væk. Faktisk mener forskere, at denne sexkonflikt



Vandkalvehunner kan have glat eller nopret ryg for at ryste nærgående hanner af. Foto til højre viser et nærbillede af hannens forben. Foto: Johannes Bergsten (Forben: Aslak Kappel Hansen).

mellem hanner og hunner om parringen hos visse arter kan have større betydning end som så, idet den virker som en motor for evolutionær forandring. I sidste ende kan disse sexkonflikt-fremkaldte forandringer hos arten således føre til, at der opstår nye arter ved opsplitning af eksisterende arter. Men den tolkning drager Lars Lønsmann Iversen og Kaj Sand-Jensen nu i tvivl i et nyt studium, som de har udført sammen med danske og svenske kolleger. For forskerne har observeret, at hos denne vandkalv har sexkonflikten ført til det stik modsatte af ny artsdannelse – nemlig evolutionær stilstand.

Forskerne har studeret populationer af vandkalven *Graphoderus zonatus* i svenske søer, og her har vandkalvehannerne udviklet sugekopper, som matcher rygstrukturen hos hunnerne – nopret eller glat. »Vi kan se, at der i populationen af denne art har udviklet sig en situation, der fastholder arten i to typer«,

siger Lars Lønsmann Iversen. »Når hunner med nopret ryg er dominerende i antal, bliver parringspresset fra de matchende hanner så stærkt, at det giver hunner med glat ryg en fordel, og så vokser de i antal. Men når de så er blevet dominerende i antal er også hanner med matchende sugekopper gået frem i antal, og så skifter fordelene til hunner med nopret ryg«.

Det samlede resultat er altså, at der ikke er en konsistent fordel for nogen af de to typer hunner. I stedet bevæger populationen sig mod et slags ligevægtss stadium, hvor de to typer af hunner er lige almindelige.

Forskningen åbner op for en række nye spørgsmål om artsdannelse. »Det er en gåde, hvordan en art kan eksistere under scenarier hvor hannernes overgreb er så ekstreme, at det stopper hunnernes udvikling«, siger de to forskere.