

NATURVIDENSKAB OG TEKNOLOGI
DIREKTE FRA FORSKNINGSVERDENEN

AKTUEL *natur* VIDENSKAB

TYNGDEBØLGER

Danmarks lumske LER

Kan forståelsen af ET ENZYM løfte humøret?

Hvad er MENINGEN MED LIVET?

NR.6 - 2017 DECEMBER : 50 KR.

Kan videnskaben måles og vejes?

Videnskab handler om at måle og veje, det har vi vidst siden Galilei.
Men hvad med videnskaben selv? Kan den måles og vejes objektivt
som ethvert andet naturfænomen?

»Mål alt, hvad der er måleligt, og gør det måleligt, som ikke er det«. Sådan hører man ofte naturvidenskabens program opsummeret. Citatet kan tolkes på flere måder. Hvis man opfatter det som en generel opfordring til at lade eksperimentet være den endelige prøvesten, illustrerer det et vigtigt aspekt af naturvidenskaben, selv om citatet ignorerer den afgørende rolle, teorier spiller for videnskabens vækst. Men hvis man fristes til at tage skridtet videre og sige, at det, der ikke kan måles, ikke eksisterer, ender man hurtigt i blindgyder. For eksempel i troen på, at en strengt videnskabelig beskrivelse af menneskets adfærd skal ske uden henvisning til "subjektive" begreber som bevidsthed, følelser og tanker. Denne – ret beset utrolige – tankegang lå faktisk til grund for den gren af psykologien, der går under navnet behaviorisme.

Der er vist ikke mange behaviorister tilbage, men ironisk nok har tankegangen om, at det, der ikke kan måles, ikke eksisterer, fået nyt liv og er inden for de senere år begyndt at hemsøge videnskaben som helhed. Nu gælder det spørgsmålet om videnskabens og ikke mindst videnskabsfolkernes kvalitet. Og ambitionen er at måle denne kvalitet objektivt.

Er vi blevet dobbelt så kloge på 10 år?

Det er uomtvisteligt, at videnskaben har gjort fantastiske fremskridt siden Galilei. Vi har også på fornemmelsen, at nogle forskere har betydet mere for den udvikling end andre. Newton, for eksempel. Eller Bohr og Einstein. Men i lang tid har vi manglet et kvantitativt mål for videnskabelige meritter. I mangel af det har vi været overladt til at lade videnskabsfolk bedømme hinanden. Det lyder ikke særligt effektivt, når man skal uddele



Anders Smith er chefkonsulent ved DTU Energi. Sammen med Jørn Madsen har han skrevet den populærvidenskabelige bog *Alt er relativt – eller er det nu også det?*, som netop er udkommet i 2. udgave. Han er siden 2016 blevet en 10 % bedre forsker, idet hans h-indeks er steget fra 20 til 22.
ansm@dtu.dk

forskningsmidler eller besætte stillinger. Mængden af artikler stiger jo eksponentielt, og forskere har ofte hundredvis af artikler på deres cv – tænk hvis man skulle læse alle dem.

Heldigvis er der hjælp at hente. Bibliometrien – den statistiske analyse af forskningsartikler og deres indbyrdes citationer – har med digitaliseringen af stort set hele den videnskabelige litteratur fået et enormt datamateriale at bygge på. Det har ført til ny indsigt og værdifulde studier af for eksempel citationspraksis. Men det har også ført til en opfattelse af, at man kan vurdere folk alene ud fra de tidsskrifter, de publicerer i, og hvor mange citationer deres artikler får (ofte udtrykt ved det såkaldte h-indeks: Hvis 32 af en forskers artikler hver især er blevet citeret mindst 32 gange, har vedkommende et h-indeks på 32).

Der er imidlertid grund til at være skeptisk over for denne rent kvantitative opgørelse af videnskabelig kvalitet. I de seneste ti år er der for eksempel publiceret i omegnen af 25 millioner artikler – omtrent lige så mange som i hele det 20. århundrede. Hvorfor er vi så ikke blevet dobbelt så kloge? Hvor er de videnskabelige gennembrud, der kan måle sig med relativitetsteorien eller opdagelsen af atomets struktur?

H-indekset fortæller ikke alt

Videnskabens synlige produkt er artikler. Men videnskaben er ikke identisk med samlingen af videnskabelige artikler, om ikke andet så af den grund, at mange (måske størstedelen) af artiklerne ikke bringer videnskaben videre. Enten fordi de er forkerte, eller fordi de bare er irrelevante – noget man i øvrigt først kan bedømme efter et godt stykke tid. Det forhindrer ikke, at de bliver citeret og bidrager til nogens h-indeks: Der er adskillige studier, der viser, hvordan forkerte teorier eller kendsgerninger lever et hårdnakket liv i litteraturen, fordi man citerer den artikel, alle de andre også har citeret, og ikke er opmærksom på den nyere forskning. Det indledende citat er et godt eksempel: Den tyske Galilei-kender Andreas Kleinert påviste i en interessant artikel fra 2009, at citatet ikke kan identificeres noget steds i Galileis værker, og at det er opstået (på fransk) i det 19. århundrede. Alligevel lever citatet stadig i bedste velgående i litteraturen som en ytring af Galilei.

Så der er god grund som forsker til at holde fast i, at den bedste måde til at bedømme kollegerne stadig er at læse deres artikler, høre deres foredrag og diskutere deres ideer kritisk – og ikke lade h-indekset eller navnet på tidsskriftet være en afgørende faktor i hverken tildelingen af stillinger eller bevillinger. ■

indhold



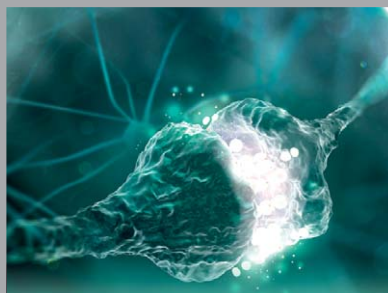
Hvorfor er der ingen 60-årige atleter, der topper verdensranglisten? Fordi de er blevet for gamle og musklerne for svage. Men hvad sker der egentlig med vores muskler, når vi ældes, og kan vi gøre noget ved det?

8



I undergrunden under Danmark findes plastisk ler – en jordtype, som har udfordret ingeniører i årtier. Nu skal et nyt forskningsprojekt gøre os klogere på lerets opførsel, så skader på bygninger og anlæg bedre kan undgås i fremtiden.

14



Et nyt forskningsprojekt skal afklare samspillet mellem strukturen og funktionen af et enzym, som spiller en central rolle i produktionen af "humørmolekylet" serotonin i hjernen. Enzymet kan nemlig være et interessant mål for nye lægemidler mod depression.

32



Uden at indregne den omstændighed, at hver eneste livsform har et indre formål, kan vi ikke forstå fænomenet liv. Men det betyder til gengæld ikke, at der dermed findes et stort samlenende formål med det hele.

42

FORSKNING OG NYHEDER

- 4 Kort Nyt
- 7 Danske han-ørreder er igen rigtige hanner
- 8 Når musklerne ældes
- 14 Danmarks lumske ler
- 20 Jagten på skrumpefrit glas
- 24 Tyngdebølger
- 32 Kan forståelsen af et enzym løfte humøret?

PERSPEKTIV - DEBAT

- 2 Synspunkt:
Kan videnskaben måles og vejes?
- 38 Camp Century – en "varm kartoffel" fra den kolde krig
- 42 Hvad er meningen med livet?
- 44 Bøger og service
Boganmeldelse:
Pascal - Matematik og mirakler
- 48 BAGSIDEN:
Parringskald for døve øren

AKTUEL NATURVIDENSKAB

Udgiver

Aarhus Universitet, Science & Technology,
i samarbejde med:

- Det Natur- og Biovidenskabelige Fakultet, Københavns Universitet
- Det Naturvidenskabelige Fakultet samt Det Tekniske Fakultet, Syddansk Universitet
- Det Teknisk-Naturvidenskabelige Fakultet, Aalborg Universitet
- Roskilde Universitet

Ansvarshavende

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

Redaktion

Redaktører Jørgen Dahlgaard og Carsten Rabæk Kjaer
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



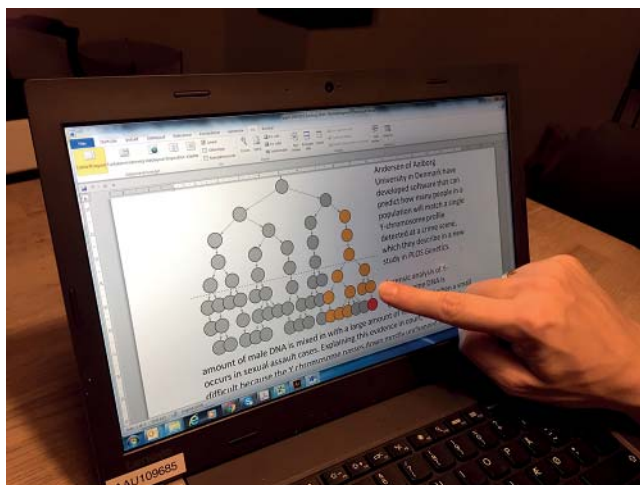
Roskilde Universitet

SPONSOR-
ABONNENTER



Matematisk model hjælper domstolene

Aalborg-forsker har sat præcise tal på den såkaldte *bevismæssige vægt* af DNA fra Y-kromosomer. Det er et værdifuldt værktøj for domstolene, når de skal afgøre sager om seksuelle overgreb mod kvinder. I de tilfælde vil en almindelig DNA-prøve ofte indeholde så meget DNA fra kvinden selv, at det kan være svært at isolere den DNA, der stammer fra gerningsmanden. Derfor vælger retsgenetikere i den situation ofte at fokusere på den DNA, der sidder på Y-kromosomer, fordi den med sikkerhed stammer fra en mand.



I modsætning til en almindelig DNA-profil, der som regel bliver lavet ud fra alle de 22 kromosompar, der ikke er kønskromosomer, har der hidtil været stor usikkerhed om, hvor megen bevismæssig vægt man kan tillægge en Y-profil. Det skyldes, at Y-kromosomet hos mænd, der har fælles forfædre, ofte vil forekomme uden nogen særlig variation. Derfor har Mikkel Meyer Andersen sammen med sin kollega David Balding fra University of Melbourne i Australien udarbejdet en computermodel, der kan hjælpe med at forstå, hvor mange mænd der har samme profil i en po-

pulation. Det kan have afgørende betydning for, om der kan fælles dom i en sag.

»Vi kan med denne nye metode hjælpe retten ved at indsnævre antallet af mulige gerningsmænd fra måske flere hundrede tusinder til under 100 – og ofte endda langt færre,« forklarer Mikkel Meyer Andersen.

Når man skal afgøre, hvor stor bevismæssig vægt en DNA-profil har, bruger man begrebet *“random match probability”*. Det betegner sandsynligheden for, at en tilfældig mand på

gaden har den samme DNA-profil som den, der er fundet på gerningsstedet – og dermed hvor meget vægt profilen kan tillægges som bevisbyrde. Med normale DNA-profiler er tallet forsvindende lille, men med Y-profiler er det sværere at gennemskue.

»Brødre, fædre, farfædre, onkler og fætre på fædrene side vil ofte have samme Y-profil. Det kan gå helt ud i halvtreds led, så der kan sagtens være match mellem mænd, som slet ikke

ved, at de er i familie med hinanden,« forklarer Mikkel Meyer Andersen. »De er dog langt tættere beslægtet gennem deres fædre end to tilfældige mænd fra populationen,« siger han.

Computermodellen kan simulere populationer med en lang række forskellige variabler; hvor mange drengebørn, man får i gennemsnit; hvor stor befolkningstilvæksten er; hvor stor mobiliteten er osv.

Sanne Holm Nielsen, AAU.

Forskernes arbejde er offentliggjort i det amerikanske tidsskrift *PLOS Genetics*.

Hvor sur er jorden egentlig?

PH-værdien spiller en stor rolle for det økosystem og miljø, som planter og dyr trives i på jordbunden. Det kan opfattes som et udtryk for surhedsgrad, og er blot et mål for frie brintioner. Men surhedsgraden har også betydning for tilgængeligheden af næringsstoffer og forekomsten af giftige stoffer. Jo lavere pH-værdi er, jo surere er det miljø, man undersøger. Er jorden sur, vil man kunne finde en høj koncentration af tungmetaller, der burde være giftige for jordbundens planter og dyr.

Forskere fra henholdsvis Institut for Bioscience og Institut for Geoscience ved Aarhus Universitet har netop påvist en mulig fejl i metoden, der til daglig bruges til at måle jordens surhedsgrad. Normalt bliver en jordprøve tørret i laboratoriet, hvorefter den knuses og opblandes med demineraliseret vand eller en bufferopløsning, før man måler pH-værdien i



Med en ny, robust pH-måler, kan forskere nu måle jordens pH direkte i felten. Foto: Knud Erik Nielsen, AU.

prøven. En ny robust pH-måler gør det imidlertid muligt at måle jordens pH-værdi direkte i jorden.

Målinger blev foretaget i både skov og hede i en periode fra marts til oktober. Her viste

der sig at være en stor forskel mellem den pH-værdi, forskerne kunne måle med konventionelt udstyr og den pH-værdi, der måles direkte i jorden. Faktisk viste målingerne afvigelser på op til 1 pH-enhed fra en forventet pH-værdi på 4 til den egentlige målte pH-værdi på 3 eller endda under. Fordi pH-skalaen er logaritmisk, kan denne forskel i pH-værdien være tegn på op til 10 gange så høj en koncentration af brintioner, end man førhen har kunne påvise i naturlige jorde. På trods af jordens ekstreme surhed fandt forskerne overraskende mange jordbundsdyr i prøverne. Det kan altså nu være nødvendigt at genoverveje, hvordan jordens surhedsgrad spiller en rolle for biologiske processer og for økotoxikologiske vurderinger af tilgængelighed af tungmetaller.

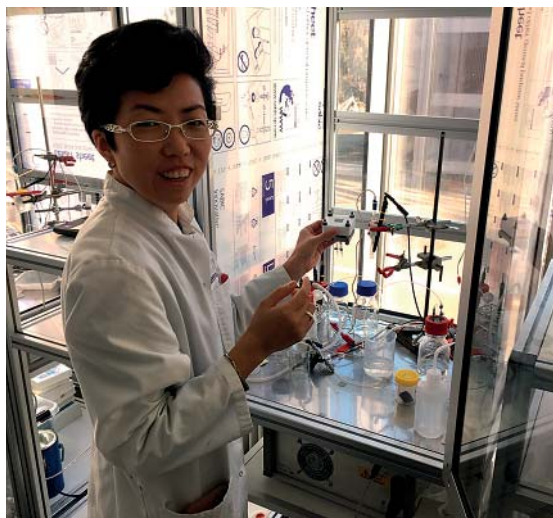
Sara Helm Knudsen. Kilde: doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.08.003

Ny metode til at genanvende platin

Det er lykkedes forskere fra SDU Chemical Engineering at få patent på en miljøvenlig metode, hvor op til 90 procent af det meget kostbare metal platin bliver genanvendt. Det kan på sigt betyde det kommercielle gennembrud for brændselsceller.

»Brændselsceller er nødvendige, hvis vi skal nå målet om, at halvdelen af det danske energiforbrug skal komme fra vedvarende energi i 2030 og 100 procent i 2050. Hvis vi for eksempel skal have virksomheder til at droppe olien til deres maskiner, er vi nødt til at tilbyde virksomhederne et pålideligt alternativ. Her er brændselsceller en rigtig god mulighed, siger lektor Shuang Ma Andersen.

Brændselsceller er den grønne motor, som kan køre på brint. Så når vinden ikke blæser, kan brændselscellerne producere el fra lagret brint og dermed være den stabiliserende faktor i energisystemet.



Lektor Shuang Ma Andersen står bag en ny miljøvenlig metode til at genindvinde platin fra brændselsceller. Foto: Birgitte Dalgaard

Problemet er, at brændselsceller er afhængige af platin som katalysator for at fungere optimalt. Men platin er et af verdens mest sjældne metaller. Alt efter det aktuelle marked handles det til priser, som er dobbelt så dyre som guld. Det betyder, at brændselsceller ikke er et konkurrencedygtigt alternativ.

»Derfor er der tre muligheder. Enten at højne platinets udnyttelsesgrad, genanvende det eller finde et alternativ til platin,« forklarer Shuang Ma Andersen.

Den traditionelle metode, man i dag anvender for at genanvende platin, kræver, at man bruger giftige kemikalier eller danner miljøskadelige stoffer. Den nye metode er baseret på elektrokemisk genindvinding af platin fra brændselsceller, og den er efter en lang proces blevet anerkendt til at få et patent i USA. Forskerne på SDU Chemical Engineering kan nu arbejde videre på at gøre metoden mere effektiv og udvikle den til at genanvende platin i stor skala.

»I forsøg har metoden vist, at det er muligt at genanvende op til 90 procent platin fra brændselscellerne, men jeg forventer, at vi kommer helt op omkring de 100 procent,« siger Shuang Ma Andersen.

Birgitte Dalgaard, SDU

Første danske søheste-fund i 50 år

En tidlig morgen i begyndelsen af november går den lokale ravsamler David Jensen rundt i mørket på stranden ved Kalundborg Fjord. Hans UV-lampe lyser søpindsvin, forsteninger og krabbeklør op, som stormen Ingolf få dage tidligere har rusket op på stranden, og pludselig, i tungen foran hans støvle, ligger den der – søhesten.

»Det er den første dokumenterede søhest i danske farvande i over 50 år, så der er virkelig tale om en sjælden gæst,« siger Peter Rask Møller, der er kurator for fiskesamlingen på Statens Naturhistoriske Museum på Københavns Universitet.

Statens Naturhistoriske Museum har sammen med DTU Aqua i mere end ti år kortlagt de danske fisks udbredelse i et projekt kaldet Fiskeatlasset, og her er søhesten en af de arter, man har håbet ville dukke op.

»For os forskere er sådan et fund mere værd end fiskens vægt i rav,« siger Henrik Carl, der er leder af Fiskeatlas-projektet.

Søheste er sjældne i dansk farvand, fordi her er for koldt. Den Engelske Kanal er dens nærmeste rigtige levested så langt nordpå i forhold til mere varme vande sydpå, hvor de normalt lever. Man mener, at denne søhest kan være kommet hertil i ballastvand med et stort skib eller via havstrømme sydfra.

»Det er muligt, at den har opholdt sig i vore farvande hele sommeren, men er bukket for kulden, og så er skyllet i land efter stormen Ingolf,« teoretiserer Henrik Carl.

Der findes to arter af søheste i Nordvesteuropa, og begge er kun med sikkerhed fundet en enkelt gang tidligere i danske farvande. En kortsnudet søhest blev fundet levende i Svendborgsund i 1952, mens en almindelig søhest blev fanget ved Faaborg i 1964.

En usædvanlig gæst i Danmark: En kortsnudet søhest. Foto: Henrik Carl, Fiskeatlasset.



Begge disse er gemt på museet Naturama i Svendborg. I forbindelse med Fiskeatlassets kortlægning er der indrapporteret yderligere fire observationer af søheste, men ingen af disse er dokumenterede med fotos eller lignende, og det vides ikke, hvilke af arterne, der var tale om. Den nye søhest fra Kalundborg er en kortsnudet søhest.

Michael Skov Jensen, Københavns Universitet

Truslen fra supervulkaner

Selvom ethvert vulkanudbrud kan synes som en voldsom begivenhed, hvis man befinder sig i dets umiddelbare nærhed, er det de færreste vulkanudbrud, der ligefrem truer kan betegnes som civilisationstruende. Vulkanudbrud i den størrelsesklasse betegnes *superudbrud*, og de er defineret ved at udspy mindst 1000 gigatons materiale (som kan begrave enorme landområder i aske og have langtidseffekt på klimaet). Heldigvis er vulkanudbrud af den kaliber meget sjældne, i hvert fald i et menneskeligt tidsperspektiv. Men da de i princippet repræsenterer en trussel mod menneskeheden, er det interessant at vurdere, hvor almindelige den slags begivenheder er i et længere tidsperspektiv end der rækker en enkel valgperiode. Og det er Jonathan Rougier fra University of Bristol i Storbritannien og kolleger for nylig kommet med et opdateret bud på.

Forskerne har gennemgået en database



Mount Helens i USA under udbrud. I forhold til et superudbrud er der dog kan tale om et lille pip.

Foto: Mike Doukas - USGS Cascades Volcano Observatory

over 1379 store, eksplosive vulkanudbrud fra de seneste 100.000 år. De fandt, at i en række tilfælde, var størrelsen af store udbrud blevet "rundet ned", så de ser mindre ud, end de i virkeligheden var. Desuden konkluderede forskerne, at nogle udbrud simpelthen manglede i databasen. Ved at tage hensyn til disse forhold beregnede forskerne, at superudbrud sker med en hyppighed indenfor et tidsinterval på 5.200 og 48.000 år med et bedste gæt på en gang hver 17.000 år. Det er en væsentlig opskrivning af hyppigheden, da tidligere estimater har angivet intervallet til mellem 45.000 og 714.000 år.

Det seneste superudbrud fandt sted i Taupo, New Zealand for godt 25.000 år siden. Forhåbentlig betyder dette ikke, at det næste superudbrud allerede ligger og ulmer.

CRK, Kilde: *Earth Planet. Sci. Lett.* (2017), doi.org/10.1016/j.epsl.2017.11.015

Nye bogstaver i biologiens alfabet

Der skal måske laves en lille smule om i den undervisning, der gives i dagens biologitimer. Altså de timer, hvor man lærer, at biologiens alfabet ikke består af 29 bogstaver, men derimod kun 4. Nemlig bogstaverne A, T, G og C som hver repræsenterer en byggesten, en base, i det naturlige DNA-molekyle. Et overvældende faktum har i mange år været, at selvom der findes utallige forskellige arter, så er alle dyr og planter DNA opbygget af netop disse 4 baser.

Men nu er det lykkedes et hold forskere ved The Scripps Research Institut i Californien at indsætte kunstige DNA-byggesten i DNA'et hos en levende *Escherichia coli*-bakterie. Men ikke nok med det, så var cellen i stand til at kopiere de kunstige baser og "oversætte" dem til egentlige proteiner. De to nye baser har forskerne kaldt for dNaM og dTPT3 – populært blot kaldet X og Y.

Det revolutionerende ved disse kunstige byggesten er deres evne til at binde til hinanden på en anden måde, end vi kender fra naturlige baser i DNA'et. De nye X- og



Illustration: Shutterstock

Y-baser er ikke forbundet med de normale brintbindinger, men holdes i stedet sammen af den simple grund, at de begge er hydrofobe (vandafvisende), og derfor søger mod hinanden. Forskerne valgte at indsætte de nye baser i et gen, der normalt koder for et fluorescerende protein, som udsender en svag, grøn farve. Hvis ikke baserne blev læst korrekt af cellens maskineri, og derfor ikke blev oversat til det rigtige protein, ville man

ikke have set nogen farve. Men forsøget var en succes, og cellerne indeholdt proteinet med den grønne farve. De nye resultater kan bane vejen for at skabe helt nye proteiner, som for eksempel vil kunne bruges som helt nye lægemidler, der ikke er afhængige af naturens egne proteiner.

Sara Helm Knudsen, Kilde: [doi:10.1038/nature24659](https://doi.org/10.1038/nature24659)



SDU's biologer i gang med at indfange bækkørreder til undersøgelser. Det lille billede viser en bækkørred som er klar til at få taget en blodprøve. Foto: Jane Ebsen Morthorst.

Danske han-ørreder er igen rigtige hanner

Hanfisk, som lever nær udledninger fra spildevandsrensningsanlæg, har i mange lande vist sig at være feminiserede. Det skyldes oftest spildevandets indhold af hunlige kønshormoner – for eksempel naturlige østrogener og syntetiske p-pille-østrogener, som kun fjernes fra spildevandet, hvis rensningsanlægget udfører avanceret rensning.

Feminiseringen viser sig blandt andet som forhøjede koncentrationer af æggeblommeproteiner i hannernes blod. Det er en "early warning" om, at der er hormonforstyrrende stoffer i vandet, som påvirker deres hormonsystem. Det kan medføre intersex; en tilstand, hvor hanner udvikler ægceller i testiklerne.

»I laboratorieforsøg med zebrafisk ser vi, at flere fisk udvikler sig som hunner, når de udsættes for østrogener i det livssta-

die, hvor deres kønsorganer udvikles. Hvis forholdet mellem kønnene forskydes væk fra 50:50, har det selvfølgelig betydning for, hvorvidt en population af fisk kan overleve i længden,« siger Jane Ebsen Morthorst, biolog, SDU.

De fleste danske kommunale rensningsanlæg er avancerede og fjerner naturlige østrogener og syntetiske p-pille-østrogener så effektivt, at koncentrationerne i det rensede spildevand er for lave til at feminisere hanfisk.

»Alligevel fandt vi udbredt feminisering blandt nogle bækkørred-hanner i blandt andet fynske vandløb i perioden 2000-2004, men fra 2010-2016 konstaterede vi, at denne feminisering af hanfiskene var fuldstændig forsvundet,« siger hun.

»Vi granskede alle de mulige kilder til østrogen-aktivitet i vandløbene, og under-

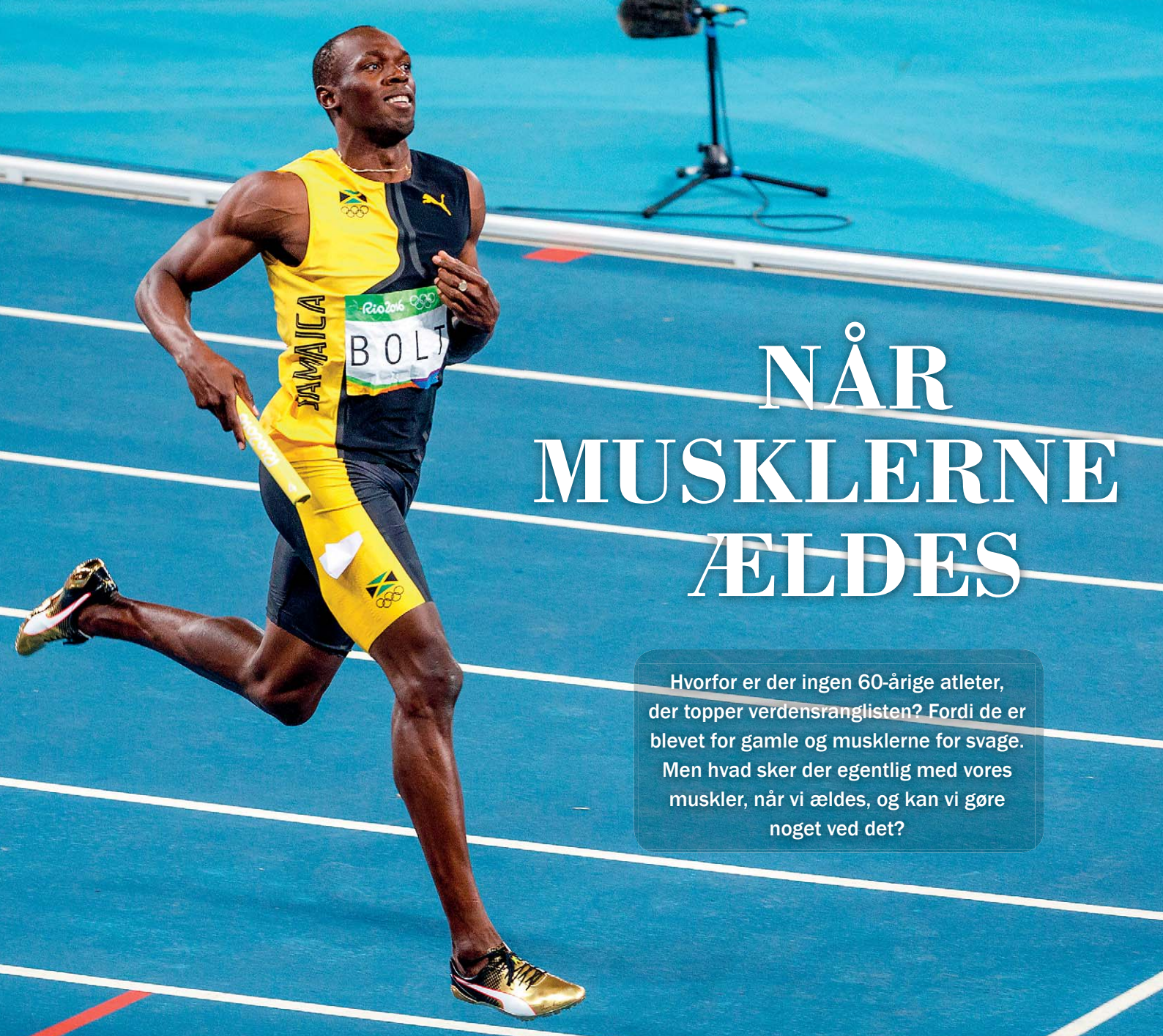
søgte, om der var ændringer mellem 2004 og 2010. Vi kunne udelukke ændringer i blandt andet nedbør/vandføring og landbrugspraksis, og den eneste væsentlige ændring, der stod tilbage, var at udledningen af dårligt rensed spildevand fra spredt bebyggelse til vandløbene var blevet minimeret i perioden.

Fra omkring 2003 er der sket en udbredt og markant forbedring af spildevandsrensningen på ukloakerede ejendomme i spredt bebyggelse, fordi myndighederne stillede krav om forbedret rensning.

»Det har med stor sandsynlighed medført en forbedring af miljøtilstanden i de danske vandløb,« siger Jane Ebsen Morthorst.

Studiet er publiceret i *Environmental Toxicology and Chemistry*.

Birgitte Svennevig, SDU

A full-page photograph of Usain Bolt in mid-stride on a blue running track. He is wearing a yellow and black Jamaica singlet with 'JAMAICA' and 'Rio 2016' logos, and a bib that says 'BOLT'. He is holding a yellow baton. The background is a blurred blue track with white lane markings.

NÅR MUSKLERNE ÆLDES

Hvorfor er der ingen 60-årige atleter, der topper verdensranglisten? Fordi de er blevet for gamle og musklerne for svage. Men hvad sker der egentlig med vores muskler, når vi ældes, og kan vi gøre noget ved det?



Om forfatteren
Kathrine Nielsen er ph.d. i muskelfysiologi fra University of Otago i New Zealand, hvor hun har undersøgt effekten af motion på muskelaldring. Hun er desuden aspirerende videnskabsformidler. kath.bjerregaard@gmail.com

Fænomenet Usain Bolt smadrede verdensrekorden i hundredemeterløb i 2009, da han var 23 år gammel. Han har holdt sig på verdenstoppen indtil i år, hvor han fyldte 31 og stoppede karrieren med et nederlag, der gav genlyd i sportsverdenen – Usain Bolt vandt “kun” VM-bronze. Med undtagelse af få, meget teknisk betonedede, sportsgrene, topper atleter typisk i tyverne, holder måske niveau indtil først i trediveerne, hvorefter de enten stopper, mens legen er god, eller hurtigt bevæger sig ned ad ranglisterne. Dette er resultatet af muskelaldring, en proces hvor

kroppens største organ langsomt svækkes og bliver mindre. Overvej nu, om du umiddelbart kan se, at Usain Bolt skulle have mistet en betydelig mængde muskelmasse, der kunne forklare faldet i præstationer. Nej, vel? Det er der en række forklaringer på.

Muskelaldring består både af et løbende tab af muskelmasse, altså bliver selve musklen mindre, og et tab af muskelfunktion. De forskellige processer starter formentlig allerede i trediveerne, hvilket forklarer hvorfor sportsstjerner præstationer – som ofte er afhængige af, at hele musklens potentiale bliver

udnyttet – er synligt påvirkede allerede i starten af trediveerne. Der er simpelthen ikke råd til at tabe bare få procent af musklens hurtighed, udholdenhed eller restitution, hvis man vil være verdens bedste sprinter. Det er også derfor, at vi almindelige dødelige, som ikke nærmer os vores maksimale potentiale på vores ugentlige motionsløbeture, ikke mærker synderligt til denne begyndende aldring, før vi når op i fyrrerne eller halvtredserne. Muskelaldringen kommer snigende, og faktisk opdager vi slet ikke, at vores muskler er blevet mindre før omkring 60-års alderen. Herfra anslås det, at vi taber 1-2 % muskelmasse

årligt, og at vi omkring 80-års alderen har mistet cirka 50 % af vores oprindelige muskelmasse.

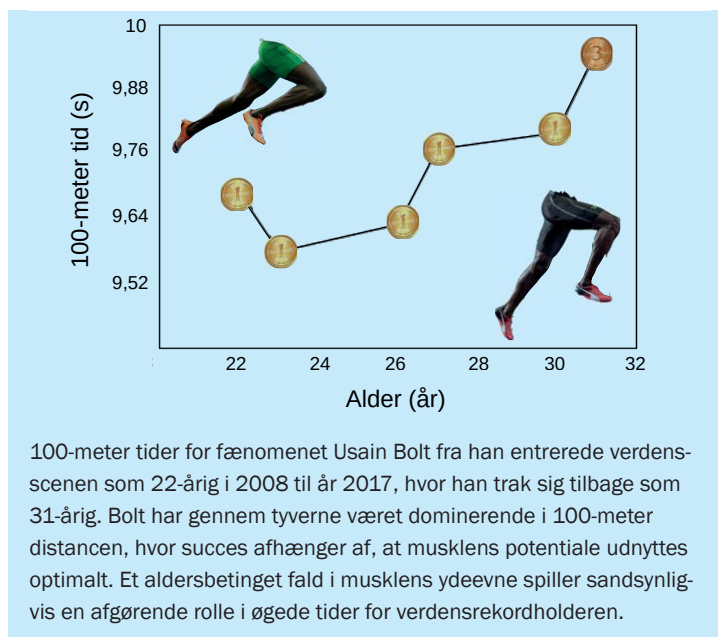
Muskler erstattes af andre væv

Grunden til, at muskelaldringen længe går ubemærket hen, er, at tabet af muskelmasse skjules af andre væv, som indtager pladsen, som den svindende muskelmasse efterlader. Vi ser med alderen ophobning af fedtvæv og bindevæv rundt om musklerne. Det betyder, at for eksempel en lårmuskel ikke ser spor mindre ud, hvis vi måler lårets omkreds på den samme person som henholdsvis 40- og 60-årig.

Det er endnu uklart, præcis hvorfor disse vævstyper ophober sig omkring musklerne med alderen. Vi ved, at kroppens forbrænding falder med alderen, således at fedt ophobes mange steder i kroppen. Fedtvæv er med til at skabe en uprovokeret betændelsestilstand (inflammation), som, når fedt ophobes i større mængder, spreder sig til hele kroppen. En sådan vedvarende betændelsestilstand er i sig selv karakteristisk for den aldrende krop, hvilket sandsynligvis er med til at øge produktionen af bindevæv og derved påvirke musklernes sammensætning. Alternativt kan det være, at ældre muskler er mere udsatte for mange små skader og derfor danner mere arvæv i forbindelse med reparationen af disse skader, som så ophober sig i musklen.

Mystisk celledød

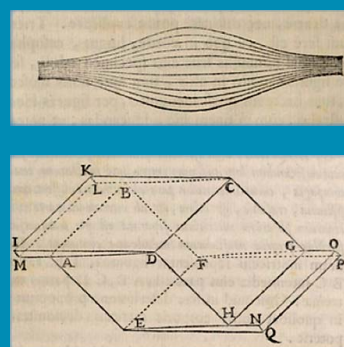
Men hvor forsvinder den muskelmasse, som erstattes af fedt og bindevæv, hen? En muskel består af mange hundrede eller tusinde af muskelfibre. En muskelfiber er en speciel type celle, da den indeholder flere hundrede cellekerner, hvorimod en normal celle fra eksempelvis huden kun indeholder en enkelt cellekerne. Cellekernerne er vigtige, fordi det er her produktionen af musklens proteiner starter. Muskelfibre er i stand til at reparere sig selv, selvom de mister en eller flere cellekerner, hvorimod en celle med kun en kerne ville dø. Det



100-meter tider for fænomenet Usain Bolt fra han entrerede verdensscenen som 22-årig i 2008 til år 2017, hvor han trak sig tilbage som 31-årig. Bolt har gennem tyverne været dominerende i 100-meter distancen, hvor succes afhænger af, at musklens potentiale udnyttes optimalt. Et aldersbetinget fald i musklens ydeevne spiller sandsynligvis en afgørende rolle i øgede tider for verdensrekordholderen.

Stolte danske traditioner

Når det handler om muskelforskning, har Danmark stolte traditioner. Faktisk kan vores bidrag til forståelsen af menneskets muskulatur spores helt tilbage til 1600-tallet, hvor Nicolaus Steno, ved hjælp af sine geometriske modeller var med til at grundlægge teorien om, at individuelle muskelfibre forkortes i musklens sammentrækning. I dag arbejder forskningsgrupper ved både Københavns og Syddansk Universitet med at bedre forståelsen af muskelaldring med fokus på

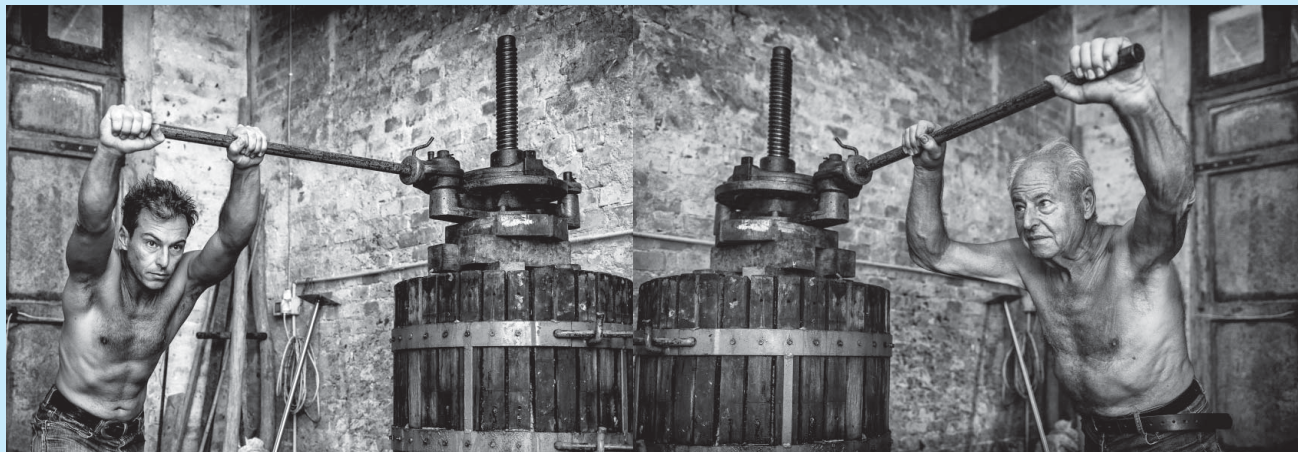


ændringer i muskelstamceller, sener og bindevæv samt effekten af motion og mangel derpå.

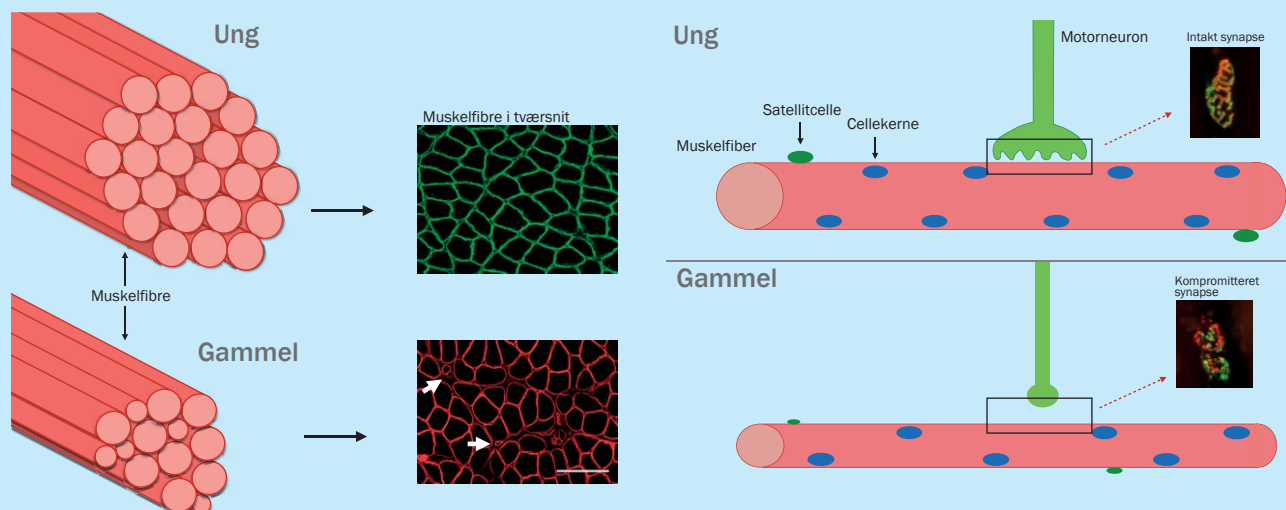
gør muskelfibre unikke. Noget tyder dog på, at vi med alderen mister hele muskelfibre. Dermed bliver der færre fibre til at trække sig sammen, og derfor bliver vores evne til at lægge kraft i vores bevægelser også mindre. Fordi en muskelfiber er en speciel celletype, er det dog endnu uvist, hvordan de dør. Et bud er, at musklens stamceller, også kaldet satellitceller, mister evnen til løbende at erstatte muskelfiberens cellekerner. Satellitcellerne sidder på overfladen af muskelfiberen og kan producere nye cellekerner, som fiberen skal bruge, enten når den mister cellekerner på grund af skader, eller når fiberen har brug for at

vokse sig større, hvilket sker når vi træner. Nogle forskere mener, at satellitcellerne med alderen opbruger deres kapacitet til at støtte muskelfiberen, som derfor langsomt dør. Andre peger på, at forandringer i satellitcellens miljø, såsom ophobning af bindevæv, kan bidrage til, at satellitcellernes kapacitet falder.

En anden teori er, at muskelfiberens evne til at nedbryde de proteiner, som ikke længere skal bruges, bliver nedsat med alderen, og at fiberen derfor akkumulerer ødelagt protein. Ødelagte proteiner er usunde for cellen, da de forhindrer normale processer i at foregå og



Fotos: Shutterstock



Aldersbetingede ændringer

Oversigt over aldersbetingede ændringer i musklen. Musklen består af mange individuelle celler, de cylinderformede muskelfibre. Med alderen ser vi en reduktion i antal og størrelse på muskelfibrene, også betegnet muskelfiberatrofi. Dette kan vises i tværsnit, hvor man med fluorescente markører kan visualisere muskelfibrenes omrids og se, at den aldrende muskel (rød) in-

deholder et antal forholdsvis små fibre sammenlignet med den unge muskel (grøn). Samtidig hænger muskelaldning sammen med en nedbrydning af forbindelsen mellem muskelfiber og motorneuroner – den neuromuskulære synapse. Muskelfiberen aktiveres via synapsen. Uden aktivering vil der opstå et fald i proteinsyntese og derfor muskelatrofi. Synapsen består af

en række proteiner på henholdsvis motorneuronen og muskelfiberen. Disse proteiner kan visualiseres med fluorescente markører for motorneuron (grøn) og muskelfiber (rød), og herved kan man vise en aldersbetinget ændring i strukturen på synapsen.

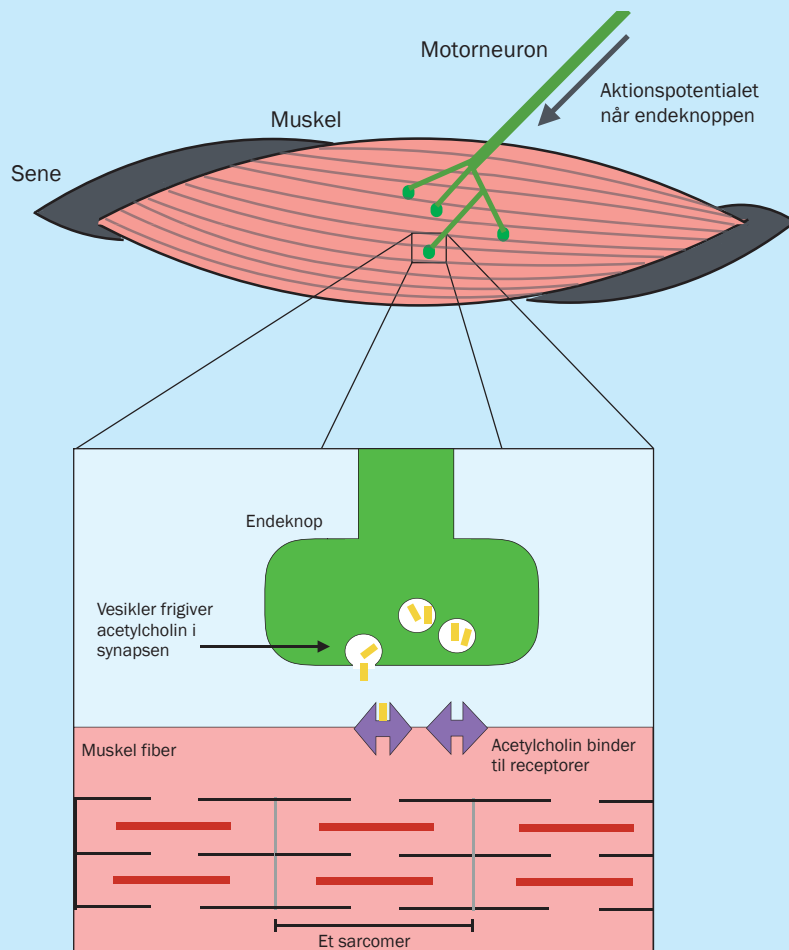
De viste billeder er alle af muskler fra mus.

aktiverer stress-mekanismer. I sidste ende kan det lede til celledød. Muskelfibre er kæmpe celler, som kræver stor udskiftning i proteiner. Derfor skal de ødelagte proteiner løbende nedbrydes, men en af de primære nedbrydningsmekanismer, autofagi, er beviseligt kompromitteret i aldrende muskler. Det har fået stor opmærksomhed de senere år, da den nedsatte evne til autofagi med alderen ikke kun ses i muskler, men også i mange andre organer.

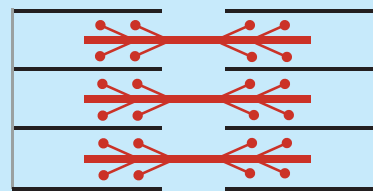
Muskelfibre på skrump

Den anden mekanisme, som mange mener ligger bag det aldersbetingede muskeltab, er muskelfiberatrofi. Atrofi betyder, at noget skrumper, og i biopsier fra gamle muskler ser man ofte, at mange af fibrene er blevet meget tynde. Muskelfiberens tykkelse er især afhængig af indholdet af protein, altså må tyndere fibre indeholde mindre protein. Derfor mener mange, at atrofi til dels skyldes

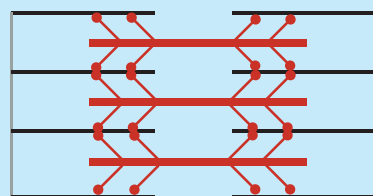
forandringer i balancen mellem proteinsyntese og proteinnedbrydning. Hvis nedbrydning af protein foregår hurtigere, end der dannes nyt protein, resulterer det selvsagt i et underskud af protein, og derfor skrumper muskelfibrene. Hvorvidt det underskud, man observerer i aldrende muskelfibre, hovedsageligt skyldes en nedgang i proteinsyntesen eller en opregulering af nedbrydende enzymer, er der delte meninger om.



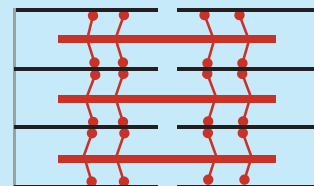
Afslappet – myosin (rød) er ikke bundet til aktin (sort)



Sammentrækning – myosinhoveder bundet til og trækker i aktin



Forkortet – Myosin har trukket i aktin fra begge ender og fiberen er blevet kortere



Sådan fungerer muskler

Musklene danner basis for alle vore bevægelser, men fungerer kun i samarbejde med en række andre væv. For at musklen kan trække sig sammen (kontrahere) skal den aktiveres af et motorneuron. Motorneuronet sender et aktionspotentiale til axonets endeknop, som danner synapse med en muskelfiber. Motorneuronet udskiller transmitterstoffet acetylcholin, som krydser synapsen

mellem motorneuron og muskel og binder til receptorer på musklens overflade. Bindingen af acetylcholin resulterer i en åbning af calciumkanaler, hvorved calcium diffunderer ind i muskelcellen og sætter gang i tværbrocyclussen. Tværbrocyclussen har sit navn efter dannelsen af tværbroer mellem proteinerne aktin og myosin. Myosinproteinet har en masse myosinhoveder, som binder til og

“trækker” i aktin ved hjælp af molekylet ATP. Myosin og aktin er arrangeret i enheder kaldet sarcomerer, og hver enkelt muskelfiber indeholder mange sarcomerer i forlængelse af hinanden. Når aktin bliver trukket ind over myosin og forkortes hver enkelt sarcomer, forkortes hele muskelfiberen. Den energi, der dannes ved forkortelsen af muskelfiberen, bliver herefter overført til senen.

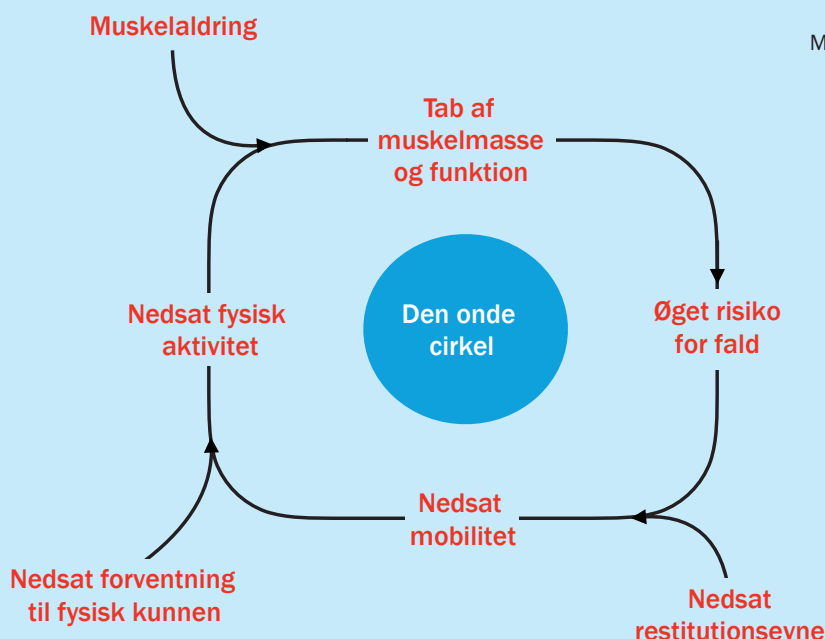
Til gengæld er der bred enighed om, at muskelfiberatrofi også opstår, fordi forbindelsen til de nerver, som skal aktivere musklerne, bliver svækket med alderen. Hver eneste muskelfiber er tilknyttet en nervecelle (et såkaldt motorneuron). Med alderen ser man, at strukturen af kontaktfladen mellem muskel og nervecelle – synapsen – langsomt nedbrydes. Det betyder, at en voksende gruppe af muskelfibre ikke har forbindelse til et motorneuron

og derfor ikke længere kan trække sig sammen. Da sammentrækningerne er med til at stimulere proteinsyntese, resulterer manglende aktivering fra motorneuronerne i, at den isolerede muskelfiber langsomt skrumpet ind.

Muskelkvaliteten falder med alderen

Foruden et stigende antal af fibre, som ikke længere er forbundet med et motorneuron og derfor ikke

kan trække sig sammen, er aldrig af musklen også forbundet med en nedsat evne for fibre selv til at trække sig sammen. Præcis i hvilken del af maskineriet, alderen trykker, er endnu uklart. Man har dog undersøgt muligheden for, at aldrig påvirker kvalitet såvel som kvantitet af musklen, både med fokus på musklen som helhed og på den enkelte fibers evne til at trække sig sammen. Når en muskel trækker sig sammen, foregår det



Muskeldrøringens onde cirkel.

ved en proces kaldet tværbrocyclussen, hvor proteinerne myosin og aktin glider hen over hinanden og derved forkorter muskelfiberen. Hurtigheden af denne proces er afhængig af calcium-koncentrationen i fiberens indre, samt hvor effektivt myosin og aktin binder sig til hinanden. Flere studier peger i retning af en aldersbetinget ændring i mængden og den molekylære struktur af myosin, således at færre tværbroer dannes, og musklen derfor producerer mindre kraft.

Den kraft, musklen producerer, skal leveres til senen, som fæstner musklen til knoglen, for at kraften kan omdannes til bevægelse. Derfor har man også undersøgt, om den faldende muskelfæst i aldrende muskler er forbundet med nedsat kvalitet af senerne. I mange studier af ældre sener har man observeret, at strukturelle forandringer i de kollagenbundter, som danner senerne, kan være med til at hæmme kraftoverførslen mellem muskel og sene. I dette scenarie er det altså ikke den enkelte muskelfibers evne til at producere kraft, men snarere musklens mulighed for at konvertere kraften til bevægelse, som gør ældre muskler svagere.

Vi skal gøre en aktiv indsats

Den dårlige nyhed er, at vi alle vil blive konfronteret med muskeldrøring. Måske kan du allerede mærke, at trapperne er blevet hårdere at bestige, måske sidder du og tænker, at dette tilhører en fjern fremtid, men faktum er, at det vil berøre os alle før eller senere. Det eneste, vi kan gøre, er at forsøge at forsinke processen så længe som muligt. Her kommer så den gode nyhed: Der findes et effektivt og enkelt middel til at gøre netop dette – motion. Musklerne er selvsagt det organ, som aktiveres mest, når vi dyrker motion, og er derfor også det organ, som drager mest fordel deraf. I de seneste 10 år har et stigende antal studier undersøgt effekten af både styrketræning og udholdenhedstræning på muskeldrøring, og resultaterne er opmuntrende. Man har vist, at især styrketræning kan forhindre muskelatrofi ved at vedligeholde både proteinsyntesen og satellitcellerne, der som nævnt er leverandører af cellekerner. Samtidig har forsøg med udholdenhedstræning vist, at især motionsløb og cykling kan styrke forbindelsen mellem muskel og motorneuron, vedligeholde musklernes respiration, øge blodtilførslen samt styrke musklens evne til at restituere. Den måske vigtigste besked at tage med

fra disse forsøg er, at det aldrig er for sent at gøre en indsats for at bevare muskelmassen, og at lidt er bedre end ingenting.

Desværre bliver mange ældre mennesker med tiden mindre fysisk aktive, og derfor har man i en række studier forsøgt at adskille effekterne af fysisk inaktivitet og aldringen selv. Disse forsøg har vist, at selvom aldringen i sig selv uægteligt har en effekt, så er en stor del af det muskeltab, vi ser hos ældre mennesker, sandsynligvis forbundet med en reduceret fysisk aktivitet. Desuden viser en række studier, at perioder med inaktivitet påvirker ældre muskler i langt højere grad sammenlignet med unge muskler. Dette er problematisk, fordi ældre mennesker oftere er udsat for fald og brækkede knogler, som gør dem sengeliggende i længere perioder, hvilket fører til voldsom muskelatrofi. For at gøre ondt værre er det langt sværere at genvinde den tabte muskelmasse for ældre individer, hvilket fører til en ond cirkel af muskeltab og nedsat aktivitet, som så fører til accelererende muskeltab. Disse fund har ledt til en større indsats for hurtigst muligt at få ældre mennesker op fra sygehussengen ovenpå operationer eller sygdomsforløb.



På Københavns Universitet har du gode muligheder for at opleve vores 21 naturvidenskabelige bacheloruddannelser. Det hjælper dig til at vælge den uddannelse, der bedst matcher, hvad du vil. Du kan blandt andet:

- Komme til Åbent Hus den 1. og 3. marts
- Blive "Studerende for en dag"
- Besøge os med din klasse

Læs mere om vores uddannelser og dine mange muligheder på [**science.ku.dk/ba**](https://science.ku.dk/ba)

21 NATURVIDENSKABELIGE BACHELORUDDANNELSER:

Biokemi, Biologi, Biologi-bioteknologi, Datalogi, De fysiske fag, Forsikringsmatematik, Fødevarer og ernæring, Geografi og geoinformatik, Geologi-geoscience, Have- og parkingeniør, Husdyrvidenskab, Idræt, Jordbrugsøkonomi, Kemi, Landskabsarkitektur, Matematik, Matematik-økonomi, Molekylær biomedicin, Nanoscience, Naturressourcer, Skov- og landskabsingeniør

FØLG OS PÅ FACEBOOK OG INSTAGRAM OG FÅ MERE INFO OM STUDIELIVET PÅ UDDANNELSERNE:

 Læs på SCIENCE

 @scienceku

KØBENHAVNS UNIVERSITET
DET NATUR- OG BIOVIDENSKABELIGE FAKULTET



DANMARKS LUMSKE LER



Forfatteren

Thomas Rye Simonsen er uddannet civilingeniør i Teknisk Geologi fra Aarhus Universitet i 2008 og har siden arbejdet hos rådgivningsfirmaet Geo, som er specialister i geoteknik. I perioden 2015 – 2018 laver han en erhvervs-ph.d. i samarbejde med Geo og Aarhus Universitet. Her forsker han i, hvordan plastisk ler opfører sig under vores bygninger. Projektet skal gøre ingeniører og geoteknikere i stand til bedre at forudsige lerets opførsel i forbindelse med byggeri og danne grundlag for nye og mere præcise beregningsmetoder med henblik på optimering af fremtidige funderingsløsninger for byggerier på plastisk ler. Institut for Ingeniørviden- skab, Aarhus Universitet thrs@eng.au.dk

I undergrunden under Danmark findes plastisk ler – en jordtype, som har udfordret ingeniører i årtier. Nu skal et nyt forskningsprojekt gøre os klogere på lerets opførsel, så skader på bygninger og anlæg bedre kan undgås i fremtiden.

De fleste af os opfatter det som en selvfølge, at vores bygninger bliver stående der, hvor de er opført og ikke pludselig braser sammen eller slår store revner på grund af bevægelser i undergrunden. Det skyldes, at vi i Danmark rent naturgeografisk lever i et fredssommeligt område. Vi oplever ikke markante jordskælv eller vulkanudbrud, vi har ingen store floder, som kan forårsage voldsomme oversvømmelser, og grundet vores relativt flade

terræn har vi ingen altødelæggende jordskred. Desuden har vi dygtige ingeniører og lang tradition for god byggeskik, så det er sjældent, at vi ser alvorlige skader på bygninger, broer og veje, som skyldes undergrunden – heldigvis.

Men den danske undergrund kan nu sagtens byde ingeniørerne på udfordringer. I 1940'erne måtte ingeniørerne således se måbende til, da Skive Museum hævdede sig 10 centimeter i løbet af få år efter op-

førelsen. Og for nylig har Banedanmark betalt over 100 millioner kr. for at redde den gamle Lillebæltsbro, som er sunket 75 centimeter siden 1935. Årsagen til problemerne for disse bygningsværker – og mange andre i Danmark – er en særlig jordtype, som er vidt udbredt i den danske undergrund, nemlig plastisk ler. Plastisk ler er nok Danmarks mest komplicerede jordtype, som sætter sit umiskendelige præg på landskabet mange steder og sætter grå hår i hovedet på bygningsingeniører.

Kvældetryk

Kvældetryk er et udtryk for den kraft, som leret kan udvide sig med. Kvældetrykket måles i laboratoriet og svarer til den vægt, der skal påføres leret, så det ikke udvider sig. Lerprøven, der måles på, er cirka 6 cm i diameter og 2 cm i højden og monteres i en stålring i et apparat som vist på fotoet. Når der tilsættes vand til prøven, vil lerminerallerne indbygge vandmolekylerne i deres struktur, og lerprøven vil derfor udvide sig. Apparatet måler den kraft, som leret udvider sig med, og det er lerets kvældetryk.



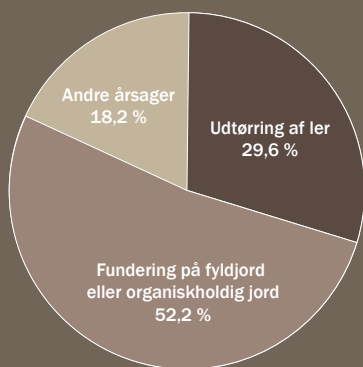
En lerprøve samt et apparat til måling af kvældetryk.



Når kvældetrykket er bestemt i laboratoriet, ved ingeniørerne, hvilken potentiel kraft der kan udløses i leret under en kommende bygning. Hvis kvældetrykket

er højere end den last, som bygningen påfører jorden – det kan typisk være, hvis der er foretaget en kælderudgravning – er der stor risiko for, at leret vil udvide sig og

dermed hæve bygningen ovenover. På baggrund af denne viden kan ingeniørerne designe en fundamentsløsning, der er i stand til at modstå disse hævnings.



Årsager til 713 revneskadede ejendomme i Danmark siden 1985. Kilde: Geo's arkiv.

Plastisk ler kan få huse til at slå store revner, hvis det tørrer ud, for eksempel som følge af træer i nærheden. Foto: Geo →



Ler med uheldige egenskaber

Plastisk ler minder mest af alt om en halvhård modellervoks eller en lidt stivere udgave af juledekorationer. At leret er "plastisk" har intet at gøre med materialet plastik, men refererer til dets materialeegenskaber. Det betyder, at leret er meget deformerbart, og den egenskab stammer fra lerets evne til at indeholde rigtig meget vand.

I byggetekniske sammenhænge har plastisk ler mange uheldige egen-

skaber. For eksempel vil leret, selv om det virker temmelig stift, kunne give anledning til store sætninger som følge af sammentrykning fra bygningslast. Sætninger, som finder sted i takt med, at vandet i leret langsomt presses ud ved belastning. Ydermere har leret den uheldige egenskab, at det hæver sig, hvis det bliver befriet for vægt – for eksempel hvis man fjerner en stor jordmængde i forbindelse med en kælderudgravning. Kræfterne i leret er enorme og kan forårsage alvorlige skader

på en bygning, hvis bygningen vejer mindre end den jordmængde, man fjerner. Problemerne opstår, fordi det plastiske ler besidder, hvad geoteknikerne kalder et højt kvældetryk. Kvældetryk er et udtryk for den kraft, som leret kan udvide sig med.

Ikke nok med, at leret kan hæve eller sætte sig ved af- og belastning – leret kan også give anledning til store skader på bygninger, hvis det får lov til at tørre ud. Igen er det lerets store vandindhold, der er



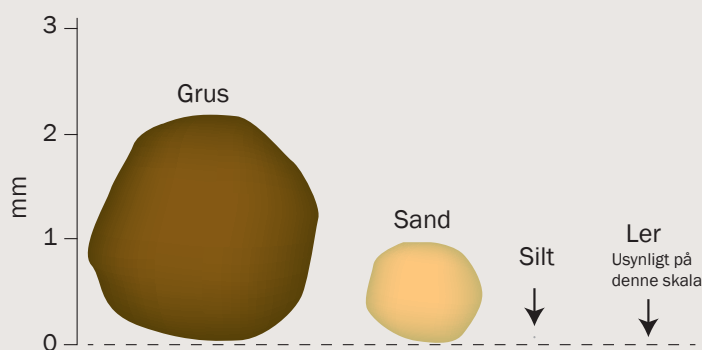
For cirka 10 år siden skred en cirka 100 år gammel banedæmning syd for Vejle udlagt over plastisk ler pludselig sammen.
Foto: Torben Thorsen



Blottet overflade af plastisk ler. Bemærk volumenreduktionen, når leret tørrer ud, og de medfølgende store sprækker.
Foto: Thomas Rye Simonsen

Kornstørrelse

I sand er de enkelte korn mellem 0,06 og 2 mm i diameter. Derfor kan man tydeligt fornemme kornene i en håndfuld sand fra stranden eller fra sandkassen, og man kan også se dem med det blotte øje. Er kornene større end 2 mm defineres materialet som grus eller sten. Er kornene mellem 0,06 mm og 0,002 mm, er der tale om jordarten silt. I en silt kan det være vanskeligt at skelne de enkelte korn med det blotte øje, og våd silt kan nemt forveksles med ler. Tør silt derimod, vil i hånden føles som finmalet mel. Når kornstørrelsen bliver mindre end to tusindedele millimeter (eller 0,002 mm), taler man om ler. Ler er således den mest finkornede jordart, der findes, og i en ler er det selsagt helt umuligt at skelne de enkelte "korn" med det blotte øje.



Netop fordi ler består af mikroskopiske partikler har ler grundlæggende forskellige egenskaber i forhold til sand- eller grusjord. I sand og grus er sammenhængskraften og dermed jordens styrke primært styret af kontaktryk-kene (eller friktionen) mellem de

enkelte korn, hvorimod sammenhængskraften i en lerjord er af kemisk eller molekylær art – også kaldet kohæsion. Ingeniører og geoteknikere omtaler derfor typisk sand- og grusjord som friktionsjord, mens lerjord betegnes kohæ-sionsjord.

synderen, for når vandet forsvinder fra leret – f.eks. fordi det suges ud af leret af træerødder – medfører det en markant reducere af volumen.

Sætter sit præg på bygninger og landskab

Udtørring af ler under huse er en hyppig skadevolder i Danmark. Geo har udført over 700 undersøgelser af

revneskadede ejendomme de sene-ste mere end 30 år. Dataene afslører, at næsten 1/3 af alle revneskadede ejendomme skyldes udtørring af ler under husets fundament. Typisk opstår skaderne, hvis der står store træer nær ved bygningen. Træernes rødder kan fjerne store mængder vand fra leret og være medvirkende til skader på ejendomme.

Det er selvfølgelig ikke kun huse, der påvirkes af det plastiske lers bevæ-gelser. For cirka 10 år siden var det for eksempel nær gået galt syd for Vejle, hvor en banedæmning udlagt over plastisk ler pludselig skred sam-men. Heldigvis blev skredet opdaget, inden der kørte tog på skinnerne.

Faktisk er plastisk ler så ustabil,

Lermineraller

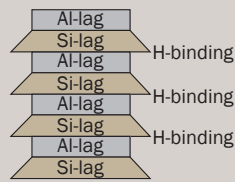
Der findes en række forskellige lermineraller. To af de mest almindelige kendte er kaolinit og smectit. De har forskellig geologisk op-rindelse og kemisk opbygning og dermed også vidt forskellige egen-skaber. Smectit kan blandt andet stamme fra omdannet vulkansk aske, mens kaolinit stammer fra kemisk nedbrydning af feldspat, som er en af hovedbestanddelene i granit.

Lermineraller er kendetegnet ved deres pladeformede opbygning af vekslende lag af aluminium (Al) og silika (Si) og inddeles typisk efter den måde, hvorpå lagene ordner sig på. Overordnet klassificeres ler-mineraller som enten 1:1 eller 1:2 lermineraller.

1:1 lerminerallerne som kaolinit består af stakke af flager, hvor hver

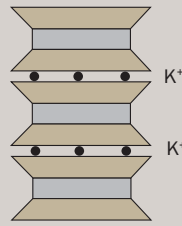
Lag og flager

1:1 ikke-ekspansiv



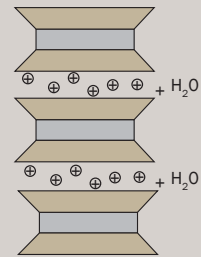
Kaolinit

1:2 ikke-ekspansiv



Illit

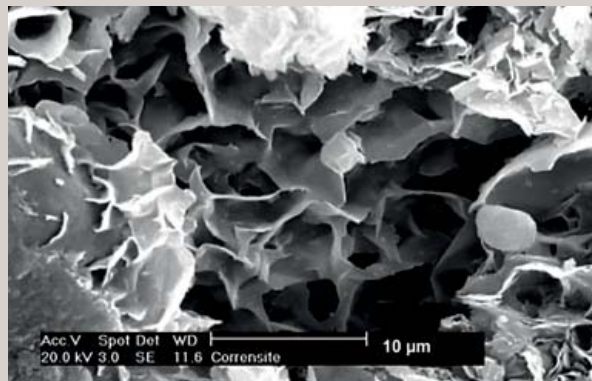
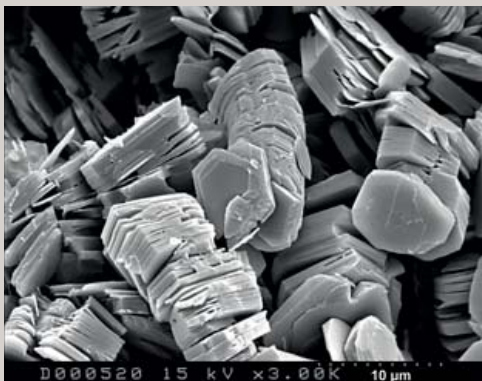
1:2 ekspansiv



Smectit og vermiculit

flage består af et Al-lag og et Si-lag. Imellem hver flage er der en stærk hydrogenbinding. Denne opbygning gør leret relativt inaktivt, idet der ikke umiddelbart kan indbygges andre ioner imellem flagerne. Man siger, at kaolinit har en lav ionbytningskapacitet. Overfladearealet af mineralet er ligeledes relativt beskedent i forhold til andre lermineraller. Det er på omkring 20 m²/gram.

De ekspansive 1:2 lermineraller er bygget op af flager bestående af et Al-lag og to Si-lag, og der er svage bindinger imellem flagerne. Grundet de svage bindinger er lermineralet meget tilbøjelig til at indbygge andre kationer mellem sine lag og har derfor en meget høj ionbytningskapacitet. Overfladearealet kan ligeledes være helt op til 50 gange større end i kaolinit, imponerende 1000 m²/gram.



Elektromiskopi-fotos af kaolinit (venstre) og smectit (højre). Bemærk forskellen i opbygningen, som gør, at smectit har et meget større overfladeareal end kaolinit. Fotos: Wilson et al. 2014.

Ler – et anvendeligt materiale

Nok er visse lertyper problematiske i forhold til byggeri, men lerminerallers specielle egenskaber er eftertragtet indenfor mange andre anvendelsesom-

råder. Ler anvendes i alt fra mursten og keramik til kosmetikprodukter og tandpasta. Pulveriseret ler er også en af hovedkomponenterne i boremud-

der, som er en tyktflydende væske der er uundværlig i olieindustrien. Bore-mudder anvendes til at stabilisere de dybe oliebrønde, så de ikke kollapser.

at selv skråninger med hældninger på helt ned til 5-6° er i risiko for at skride, hvis de rette omstændigheder er tilstede (for eksempel massiv nedbør). Flere steder kan man i dag ved selvsyn se aktive skred i plastisk ler – som i skoven umiddelbart øst for den gamle Lillebæltsbro, hvor der jævnligt sker markante skred i skråningen ned mod Lillebælt.

Ler og lerjord – hvad er det?

Når geologer og geoteknikere snakker om materialer som ler eller sand, er de defineret ved deres kornstørrelse, altså diameteren af de enkelte korn i materialet. Ler er den mest finkornede af alle jordarter og er defineret ved at have kornstørrelser mindre end 0,002 mm.

Når man snakker om lerjord er det vigtigt at vide, at der findes mange forskellige slags. Og faktisk indeholder de hyppigst forekommende typer lerjord også meget andet end ler, for eksempel silt, sand og grus. Indholdet af ler og andre kornstørrelser afhænger helt af, hvilke geologiske processer der har medvirket til at danne leret. Eksempelvis vil

Plastisk ler – et 40 millioner gammelt materiale

Det plastiske ler i Danmark stammer fra den geologiske tidsperiode Eocæn for 35-55 mio. år før nu. Dengang var det globale klima markant varmere end i dag, der var stort set ikke is ved polerne, og det globale havniveau var flere hundrede meter højere. Det areal, der nu er Danmark, var dengang dækket af et dybt hav, og på bunden af dette hav blev der aflejret ler, som vi i dag kan finde i vores undergrund. Det er afgørende, at der var tale om et dybhav, for når korn af sand og grus skylles ud i havet af for eksempel floder, vil disse partikler bundfældes tæt på kysten på grund af deres vægt og den ringe energi i havvandet. Det er kun de allerfineste partikler – nemlig lerpartiklerne – der kan holde sig flydende og dermed har en chance for at blive ført med havstrømmene ud på dybt vand.

Dybhavet eksisterede over det danske område i mange millioner år, og i løbet af årene blev der bundfældet flere hundrede meter tykke lag af mikroskopiske lerpartikler. I samme periode skete der heftige vulkanudbrud i Nordatlanten, da Amerika og Europa begyndte at glide fra hinanden på grund af pladetektoniske bevægelser. Asken fra vulkanud-

Geologisk kort over Danmarks undergrund. Bæltet med grå/mørkegrå farver, som strækker sig fra Nordvestjylland over Østjylland til Fyn/Sjælland og ned mod Femern Bælt er, hvor vi i dag kan finde plastisk ler nær terræn. Modificeret efter Geocenter Danmark 2010.

bruddene endte i havet sammen med lerpartiklerne, og asken blev med tiden omdannet til lermineralet smectit.

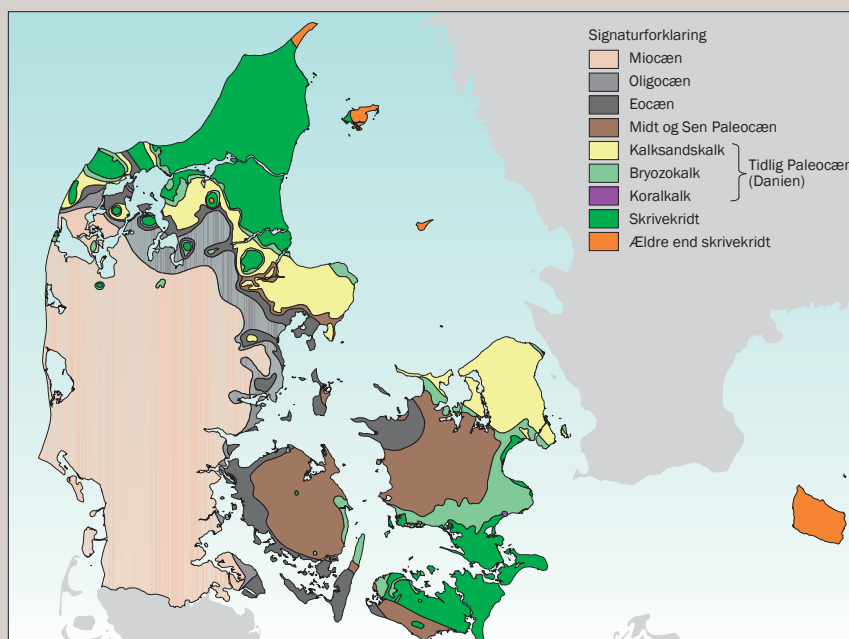
Kortet th viser fordelingen af hav og land, som den kan have set ud i slutningen af Eocæn for cirka 35-40 mio. år siden. Som det fremgår, lå ikke kun den centrale del af Danmark langt fra kysten, men også dele af England og landene syd for os samt store dele af Nordsøen. Mange af disse steder vil man derfor også kunne finde plastisk ler aflejret i dette urgamle ocean.

Faktisk forskes der i lande som England, Frankrig og Belgien også intenst i plastisk lers egenskaber. I London er store dele af undergrundsbanens tunneller udgravet i



Illustration: Geocenter Danmark, 2010

plastisk ler, mens man i Belgien siden 1980 har haft et laboratorium i mere end 200 meters dybde i dybtliggende lag af plastisk ler. Formålet her er at studere lerets kemiske og mikrobiologiske egenskaber med henblik på at udvikle og bygge sikre depoter til radioaktivt affald dybt under jordens overflade.



en ler, som er aflejret af en gletscher under istiden, typisk være en blanding af ler, silt, sand og grus og kan indeholde helt ned til 10-20 % ler, men stadig blive betegnet som en lerjord. Denne type ler kaldes moræneler. Plastisk ler har derimod typisk et lerindhold højere end 60 % og er helt fri for større partikler som sand og grus.

Da forskellige lertyper har vidt

forskellige egenskaber, har vi som geoteknikere brug for at kunne klassificere de forskellige lertyper. Det gør vi blandt andet ved at måle lerets plasticitetsindeks, som er et udtryk for, hvor meget vand leret kan indeholde og stadig være plastisk eller deformerbart. Plasticitetsindekset bestemmes ved at måle, hvor meget vand leret indeholder i to forskellige tilstande. Den ene tilstand er, hvor leret bliver så vådt,

at det netop bliver flydende, og den anden tilstand er, hvor leret bliver netop så tørt, at det ikke længere kan rulles ud til en tynd pølse på 3 mm i diameter. Forskellen på vandindholdet ved disse to konsistensgrænser er lerets plasticitetsindeks.

Moræneler, som rigtig mange danskere i Østjylland, Fyn eller Sjælland vil kunne finde, hvis de graver et hul i deres have, har typisk et plas-

ticitetsindeks på mellem 10 og 20 %. De plastiske lertyper, som vi her har med at gøre, kan derimod have plasticitetsindeks på helt op til 200 %. Den opmærksomme læser vil måske undre sig over, hvordan jord kan have vandindhold på over 100 %. Det skyldes, at vi ingeniører ikke beregner vandindhold i volumenprocent, men i vægtprocent i forhold til den tørre vægt. Hvis en jordprøve for eksempel vejer 100g i våd tilstand og 40g efter at være blevet tørret, så er vandindholdet $w = (100 - 40) / 40 \cdot 100 \% = 150 \%$.

I virkeligheden er det et særligt mineral – lermineralet smectit – der er grunden til, at det plastiske ler kan optage så meget vand. Alle lermineraller har en helt speciel opbygning, som gør, at de kan udskifte nogle af deres ioner under de rette omstændigheder – man taler om et lerminerals ionbytningskapacitet. Smectit har den højeste ionbytningskapacitet af alle lermineraller, og det plastiske ler i Danmark er meget rigt på smectit.

Problemfyldt undertryk i leret

Når man laver en dyb udgravning over plastisk ler, falder trykket i leret. Når trykket falder, skabes et undertryk i leret, og som vi kender det fra fysikkens love, vil trykforskelle altid forsøges udlignet. Det sker i leret ved, at vand fra områder med højere tryk bevæger sig i retning af de lavere tryk. Trykudligningen kan dog tage flere årtier, fordi lerets meget tætte struktur gør, at vandet har svært ved at strømme igennem leret. Men i takt med, at vandet ligeså langsomt strømmer til, vil smectit-mineralerne optage vandet i deres struktur. Det kan få leret til at udvide sig op til 500 %.

Når man bygger ovenpå plastisk ler, er ingeniørerne derfor nødt til at designe bygningen på en måde, så den kan modstå lerets udvidelser. I langt de fleste tilfælde betyder det, at man må hamre lange pæle af stål eller beton ned i jorden, som udover at bære bygningens vægt også skal modstå de kræfter fra leret, som forsøger at hæve



bygningen. Desuden kan det være nødvendigt, at lave hulrum under kældergulvene, så lerets opadrettede kræfter ikke ødelægger gulvet.

Målinger skal forbedre beregningsmodeller

I et nyt forskningsprojekt er vi netop nu i gang med at gøre os klogere på det plastiske lers måde at opføre sig på igennem et omfattende måleprogram på en række byggepladser i Aarhus. Ved hjælp af avanceret måleudstyr, som er installeret i ned til 75 meters dybde, kan vi måle de undertryk, der opstår, når det plastiske ler befries for vægt, ligesom vi med stor nøjagtighed kan måle, hvor meget leret hæver sig.

Vi er dermed i stand til – for første gang – at koble trykforhold og bevægelser sammen. Sammenholdt med laboratorieforsøg og vores øvrige viden om leret gør de nye data os i stand til at forbedre beregningsmodellerne. Dermed kan vi mere præcist forudsige lerets – og dermed bygningens – bevægelser.

Løsningen er måske enkel

Når ingeniørerne har beregnet, hvor meget leret vil udvide sig, skal byggeriet designes, så det kan modstå lerets udvidelser. Og det fordyrer projektet. Men måske er problemerne ikke altid så store, som vi tror.

De lange pæle af stål eller beton, som bygninger skal stå på, bankes typisk ned i jorden med stor kraft af en tonstung maskine. Det er velkendt, at denne proces skaber meget høje tryk i jorden, idet pælene fortrænger jorden, så den flytter sig væk fra pælene. Det er nærliggende at forestille sig, at de høje overtryk som pæleramningen genererer i jorden kan udligne de undertryk som kælderudgravningen har skabt. Dette er dog aldrig forsøgt eftervist i praksis. Igen vores målinger håber vi på at kunne vise, at trykkene udligner hinanden. Hvis det er tilfældet, vil det være helt ny viden. Det vil betyde, at de hævninger, som vi i dag beregner os frem til, slet ikke vil ske. Undertrykket er altså blevet udlignet langt tidligere end forventet – og endda ved en proces, som alligevel skal udføres. Hvis vores teori holder stik, vil vi i fremtiden ikke skulle være bekymrede for, om vores bygninger hæver sig på grund af plastisk ler – så længe bygningerne står på pæle.

Da de tryk og bevægelser vi gerne vil måle, typisk vil udvikle sig i mere end 50 år, er det sin sag at forsøge at drage endelige konklusioner i løbet af et 3-årigt forskningsprojekt. Derfor skal målingerne da også fortsætte i mange år frem i tiden, før vi kan knække koden til lerets opførsel. ■

Målinger som denne fra Aarhus Havn skal være med til at afdække, om det plastiske lers kvældetryk udlignes af den måde, bygninger konstrueres.

Foto: Kenny Kataoka Sørensen.

Videre læsning:

Artiklen er en udvidet version af artiklen *Forskere til kamp mod lumske jordtyper i undergrunden* oprindeligt bragt på Videnskab.dk

Generel geologisk viden om plastisk ler:

Naturen i Danmark – geologien. Gyldendal.

Geoviden nr. 3/2010 og 3/2012:

<http://geocenter.dk/publikationer/geoviden/>

Videnskabelige tekster om smectit og geotekniske egenskaber af plastisk ler:

Effects of smectite content on the deformation behaviour of clays. Ph.d.-afhandling af Michael Lodahl.

Grønbech et. al. 2014: *Geotechnical properties of Søvind Marl – a plastic Eocene clay*. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(4)

Forfatterne:

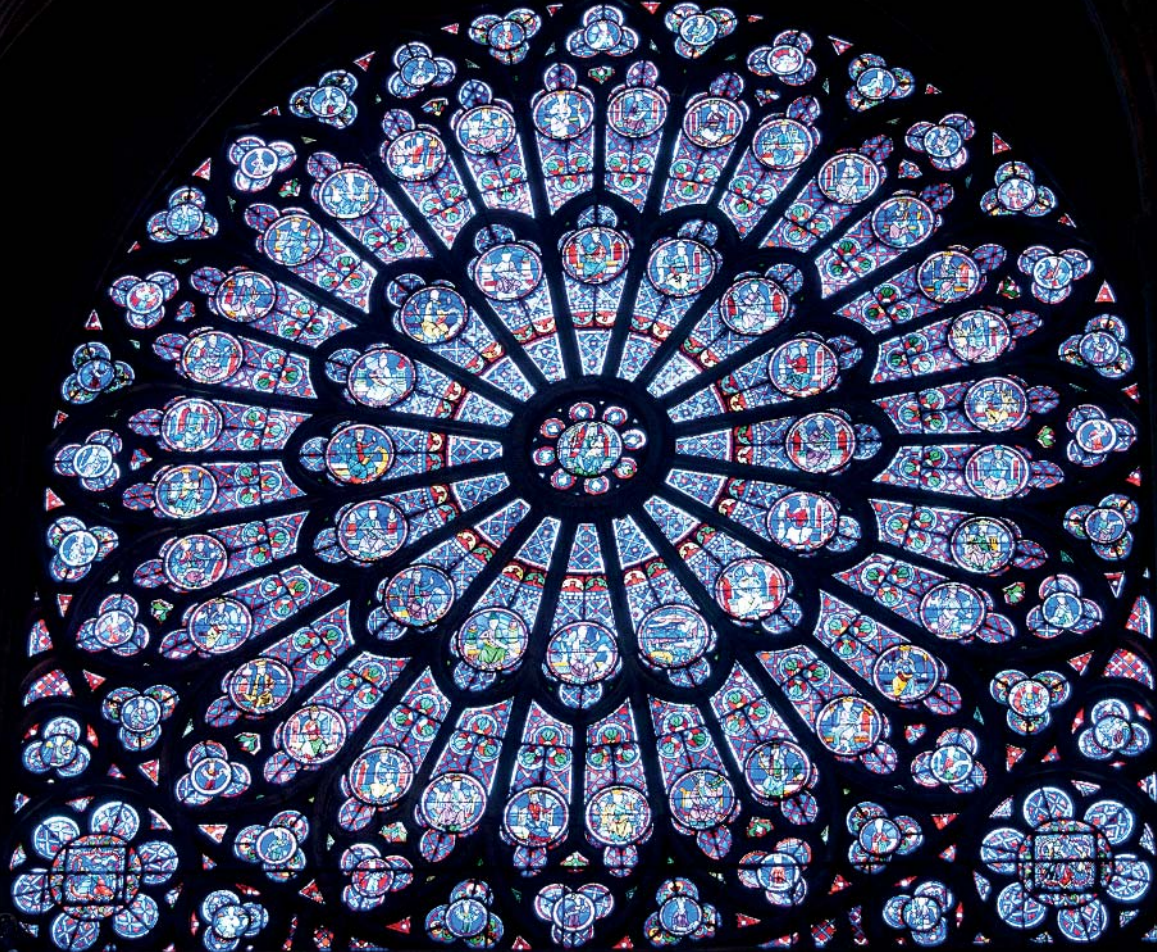


Tobias K. Bechgaard er ph.d. studerende og forsker i, hvordan glas-strukturer relaxerer ved forhøjet temperatur. tkb@bio.aau.dk



Morten M. Smedskjær er professor MSO og leder af forsknings-gruppen Oxide Glass Chemistry, der forsker i sammenhænge mellem atomar struktur og egenskaber af oxidglas-materialer. Han modtog sin ph.d.-grad i materialekemi i 2011 og arbejdede som forsker ved Corning Inc. fra 2011 til 2012. mso@bio.aau.dk

Begge ved Oxide Glass Chemistry Group, Institut for Kemi og Biovidenskab, Aalborg Universitet <https://sites.google.com/view/smedskjaer>



JAGTEN PÅ SKRUMPEFRIT GLAS

De fleste glastyper flyder ved stuetemperatur så langsomt, at glasset i praksis er uforanderligt. Men når man opvarmer glas – fx i forbindelse med produktion af skærme til mobiltelefoner – er bittesmå volumenændringer i glasskærmene et reelt problem. Med det rette kemiske design af glasset, kan det problem formentligt løses.

I middelalderens Europa blev der bygget store katedraler og kirker. Mange af disse er smukt udsmykket med glasmalerier, hvori små stykker af farvet glas er samlet i en større mosaik.

Disse glasmalerier er årsag til en udbredt, men forkert, opfattelse af, hvordan glas opfører sig. Glasset

i glasmalerierne er typisk tykkere i bunden end i toppen, hvilket har ledt til den misforståelse, at tyngdekraften over flere hundrede år har fået glasset til langsomt at flyde fra top mod bund. Glas kan sagtens flyde ved stuetemperatur, men det sker for de fleste glastyper så langsomt, at glasset i katedralerne skulle være mange milliarder år gammelt for at forklare den

tykkere bund. Det flyder nemlig kun med cirka 1 nanometer per milliard år.

Skrumpende glas påvirker vores skærme

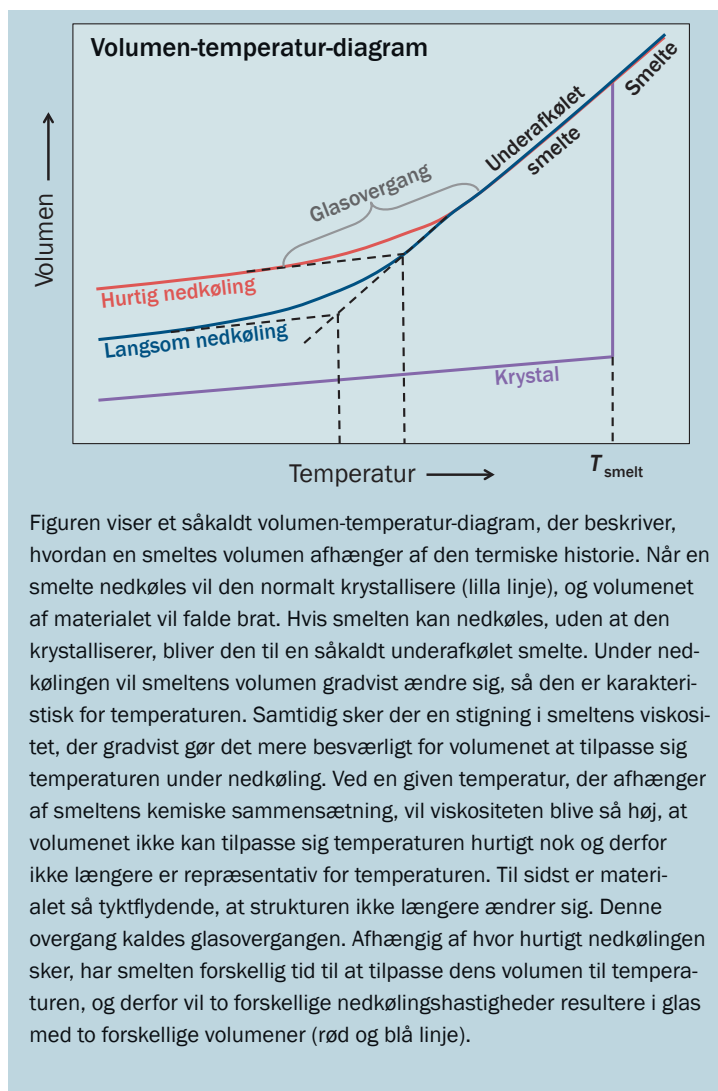
Selvom glasset ikke flyder tilstrækkeligt ved stuetemperatur til, at vi kan observere det, kan lignende processer give problemer for producenter af højteknologisk glas. Glas

← Glasmaleri fra Notre Dame i Paris, Frankrig. Katedralen stod færdigbygget i år 1345 e.Kr. Foto: Colourbox

er som materiale og tilstandsform defineret ved ikke at være i termodynamisk ligevægt. Derfor sker der kontinuert en reduktion i glassets volumen for at reducere dets energiniveau. Det sker ved, at atomerne i glasset konstant flytter sig i forhold til hinanden for at opnå en mere energimæssig favorabel struktur, hvilket leder til bittesmå reduktioner i glassets volumen. Denne såkaldte *volumenrelaksation* har så stor en energibarriere ved stuetemperatur for de fleste glasmaterialer, at det ikke er muligt at observere i løbet af et menneskes levetid. Hvis temperaturen øges, vil den øgede tilgængelige energi gøre det nemmere at krydse energibarrieren. Det fører til en forøgelse af hastigheden, hvormed volumenrelaksation sker. Denne volumenrelaksation ved forhøjet temperatur giver store udfordringer for producenter af for eksempel skærme til fjernsyn, tablets og mobiltelefoner.

Når man under produktionen sætter elektronik på glasset, er det nødvendigt at opvarme det, og det kan lede til små ændringer i glassets volumen. Denne volumenrelaksation under produktionen kan forvrænge billedet og forringe billedkvaliteten.

I takt med, at opløsningen af dagligdagens skærme forøges, og størrelsen af hver enkelt pixel formindskes, bliver tolerancen for volumenrelaksation under påsætningen af elektronik mindre og mindre. Glaskemikere forsøger at løse dette problem ved at forstå



Figuren viser et såkaldt volumen-temperatur-diagram, der beskriver, hvordan en smeltes volumen afhænger af den termiske historie. Når en smelte nedkøles vil den normalt krystallisere (lilla linje), og volumenet af materialet vil falde brat. Hvis smelten kan nedkøles, uden at den krystalliserer, bliver den til en såkaldt underafkølet smelte. Under nedkølingen vil smeltens volumen gradvist ændre sig, så den er karakteristisk for temperaturen. Samtidig sker der en stigning i smeltens viskositet, der gradvist gør det mere besværligt for volumenet at tilpasse sig temperaturen under nedkøling. Ved en given temperatur, der afhænger af smeltens kemiske sammensætning, vil viskositeten blive så høj, at volumenet ikke kan tilpasse sig temperaturen hurtigt nok og derfor ikke længere er repræsentativ for temperaturen. Til sidst er materialet så tyktflydende, at strukturen ikke længere ændrer sig. Denne overgang kaldes glasovergangen. Afhængig af hvor hurtigt nedkølingen sker, har smelten forskellig tid til at tilpasse dens volumen til temperaturen, og derfor vil to forskellige nedkølingshastigheder resultere i glas med to forskellige volumener (rød og blå linje).

Viskositet

Viskositet er et mål for den indre gnidningsmodstand i en væske. Eller sagt med andre ord: hvor tyktflydende en væske er. En tyndtflydende væske som vand er et eksempel på en væske med lav viskositet, mens honning er et eksempel på en væske med højere viskositet. Formelt er viskositet (η , i enheden Pa s) defineret som forholdet mellem en påført forskydningspænding (σ , i enheden Pa) og den observerede forskydningsrate (γ , i enheden s^{-1}), det vil sige $\eta = \sigma / \gamma$.

sammenhængen imellem glassets volumenrelaksation, den kemiske sammensætning og de målbare fysiske egenskaber.

Fra smelte til glas

For at forstå drivkraften bag volumenrelaksation under opvarmning må man forstå, hvordan glassets volumen afhænger af produktionsmetoden. Hertil kan man med

fordel tage udgangspunkt i et volumen-temperatur-diagram, der beskriver materialets volumen som funktion af temperatur (se boks). Produktion af glas starter oftest med en smelte, det vil sige en væske. I væsketilstanden er energien meget højere end energibarrieren mod volumenrelaksation, og energien er derfor tilstrækkelig høj til, at den atomare struktur kan ændres

En smeltes fragilitet kan bestemmes ved hjælp af et såkaldt differentielt scanningkalorimeter, som ph.d.-studerende Tobias Bechgaard her er i færd med at benytte. Foto: Camilla Kristensen.



Hvad består glas af?

Glas kan som en tilstandsform produceres af forskellige materialer, herunder både organiske og uorganiske stoffer. Det, man typisk forbin-der med glas, og som vi kender fra vores dagligdag, er såkaldte uor-ganiske oxidglas. De består som regel hovedsageligt af siliciumdioxid (sand, SiO_2), hvori der er blandet for eksempel natriumoxid (Na_2O) og calciumoxid (CaO) for at modificere glassets egenskaber. Siliciumdi-oxids rolle i glasset er at være en såkaldt netværksdanner, det vil sige der dannes et tredimensionelt netværk af silicium-tetraeder. Natrium-og calciumoxid er såkaldte modificerende elementer, hvis formål er at bryde Si-O-Si bindinger, hvilket for eksempel sænker viskositeten.

Den kemiske sammensætning af skærmglas, som vi kender fra vores mobiltelefoner, er mere kompliceret og kan bestå af mere end 10 forskellige oxider. I skærmglas er blandt andet aluminiumoxid (Al_2O_3) en vigtigt komponent for at opnå de ønskede egenskaber.

øjeblikkeligt. Når temperaturen ændres en smule, kan smeltens atomare struktur derfor tilpasse sig den nye energitilstand meget hurtigt. Når smelten nedkøles fra

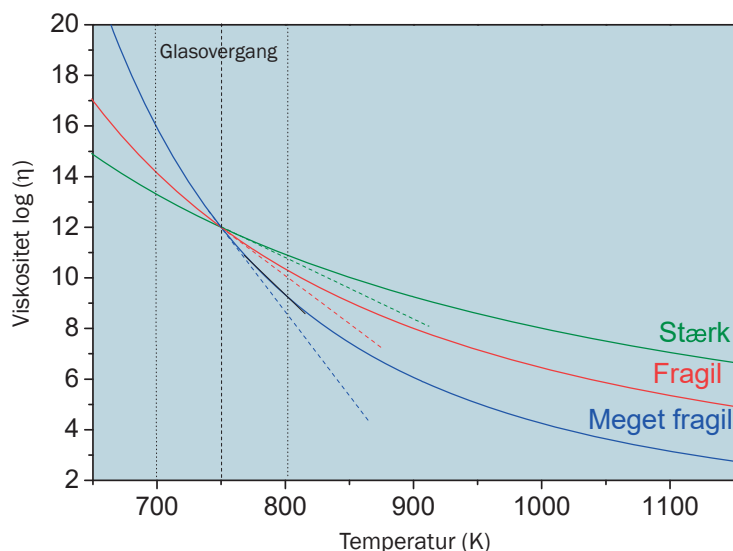
høj temperatur, formindskes volu-menet derfor i takt med nedkølin-gen. En smelte, der køles til under smeltepunktet, vil ofte krystallise-re og blive til et fast krystallinsk

stof. Nogle smelter med en særlig kemisk sammensætning kan dog køles til under smeltepunktet uden at krystallisering finder sted. En smelte i denne tilstand kaldes en underafkølet smelte. Eftersom en underafkølet smelte stadig er flydende, og temperaturen stadig er høj, kan smeltens struktur og volu-men stadig tilpasse sig temperatu-ren hurtigt. Imidlertid vil smelten begynde at blive mere tyktflydende ved nedkøling, man siger at dens viskositet stiger (se boks). Som følge af den højere viskositet ved lavere temperatur formindskes den molekylære mobilitet, og smeltens volumen kan ved en given visko-sitet og temperatur ikke længere tilpasse sig temperaturen tilstræk-kelig hurtigt. Det forårsager, at systemet kommer ud af ligevægt, og i takt med, at temperaturen sænkes yderligere, bliver smelten gradvist mere tyktflydende, indtil den bliver helt fast. En smelte, der er blevet fast uden at krystallisere, er et glas.

Glassets volumen afhænger af dets termiske historie

Det særlige ved glas er, at det har lignende struktur som en væske på atomart plan, men ikke har væ-skens egenskab til at kunne tilpas-se sig formen på den beholder, den opbevares i. I stedet opfører glas sig som et fast stof, der er defineret ved at have en fast form, når det ikke påvirkes af en ekstern kraft. Overgangen imellem en smelte, der har fuld atomar mobilitet, og den helt "frosne", faste glas kaldes glasovergangen og er en signatur for alle glasmaterialer. Afhængigt af hvor hurtigt smelten afkøles, har den forskellig tid til at tilpasse sit volumen til temperaturen. Det betyder, at glassets volumen ved stuetemperatur afhænger af, hvor hurtigt glasset er blevet kølet. Man siger, at volumen er afhængig af glassets *termiske historie*. Selvom glasset er "frosset" fast, kan struk-turen på atomniveau stadig ændre sig, da glasset ikke er i termodyna-misk ligevægt. Disse mikroskopiske ændringer i struktur kan ske ved temperaturer, hvor glasset ellers

Diagrammet viser en smeltes ligevægtsviskositet ved forskellige temperaturer. Det ses, at for en *stærk* smelte (grøn linje) påvirkes viskositeten ikke så meget af temperaturen omkring glasovergangen. For den *fragile* smelte (rød linje) er ændringen i viskositet med temperatur stor og for den *meget fragile* smelte (blå linje) er ændringen meget stor. Glasovergangstemperaturen er her defineret som temperaturen, hvor viskositet er lig 10^{12} Pa s. De tre smelter er her sat til at have samme glasovergangstemperatur.



synes fast og kan lede til små reduktioner i glassets volumen. Øges temperaturen, sker ændringerne i volumen hurtigere, hvilket er årsagen til, at volumenrelaksation bliver et problem for skærmproducenter.

Hvordan kan vi kontrollere volumenrelaksationen?

For at der kan ske en observerbar relaksation af glassets volumen, skal to betingelser være opfyldt. For det første skal der være en energimæssig fordel ved relaksationen. Glassets struktur skal altså ændre sig således, at det samlet har et lavere energiniveau efter relaksationen.

For det andet skal relaksationen i volumen ske tilstrækkelig hurtigt.

I udgangspunktet findes der to forskellige tilgange til at kontrollere graden af volumenrelaksation. Man kan enten designe glassets kemiske sammensætning således, at den energimæssige fordel ved relaksationen er meget lav og dermed forhindre den første betingelse for, at relaksationen kan ske. Alternativt kan man sikre, at energibarrieren mod volumenrelaksation er så stor, at relaksationen sker meget langsomt og dermed forhindre den anden betingelse for relaksation.

Empiriske undersøgelser har vist en korrelation imellem, hvordan

glassets volumen relaxerer og smeltens såkaldte *fragilitet*. Fragilitet beskriver hastigheden, hvormed smeltens viskositet ændrer sig med ændringer i temperatur i temperaturområdet omkring glasovergangen.

En smelte betegnes *fragil*, når en lille ændring i temperaturen resulterer i en stor ændring i viskositeten, imens en smelte betegnes *stærk*, hvis en tilsvarende ændring i temperaturen kun giver en lille viskositetsændring. En fragil smelte er kendetegnet ved at have en meget stor energibarriere mod relaksation, hvorimod en stærk smelte er kendetegnet ved at have en energimæssig favorabel struktur, der ikke tillader megen relaksation, fordi strukturens energiniveau i forvejen er meget lavt.

Et spørgsmål om den rette kemi

Det er altså muligt at manipulere volumenrelaksationen ved hjælp af smeltens fragilitet, der er kontrolleret af smeltens kemiske sammensætning (se boks).

Ved at designe kemien i smelten således, at den bliver stærk, kan den energimæssige fordel (drivkraft) ved volumenrelaksation formindskes eller elimineres. Ifølge nogle forskere er det muligt ved hjælp af yderst nøjagtigt design af den kemiske sammensætning at frem-

stille et glas, der slet ikke relaxerer under opvarmning. Det gøres ved at optimere antallet af bindinger i glasstrukturen. Desværre er den kemiske sammensætning af de glaskompositioner med lav energimæssig fordel ved relaksation, som vi i dag kender, ikke anvendelige for industrielle glasproducenter. Derfor arbejder vi ved Aalborg Universitet på at designe industrielt relevante glas, der udviser lav relaksation. Det gør vi ved at kombinere computersimuleringer af glasstrukturer på udvalgte sammensætninger og eksperimentelle målinger af for eksempel fragilitet og volumenrelaksation.

I stedet for at opnå en energimæssig favorabel glasstruktur kan volumenrelaksationen også forhindres ved at lave glas med så høje energibarrierer mod relaksationen, at den ikke kan ske. Ved at designe den kemiske sammensætning således, at fragiliteten er meget høj, vil der givet være en stor energimæssig fordel ved volumenrelaksation. Men fordi aktiveringsenergien for volumenrelaksation samtidig er meget høj, betyder det, at den energi, der skal være til stede, er så høj, at volumenrelaksationen ikke kan foregå ved de bearbejdningstemperaturer, skærmene behandles ved, når elektronikken skal sættes fast. Det bevirker, at der i praksis ikke sker i relaksation i glassets volumen. ■

Yderligere læsning: Shelby, J. E. "Introduction to glass science and technology, Royal Society of Chemistry." Cambridge CB4 OWF, UK (2005).

Bechgaard, Tobias K., et al. "Fragility and configurational heat capacity of calcium aluminosilicate glass-forming liquids." *Journal of Non-Crystalline Solids* 461 (2017): 24-34.

Gulbilen, Ozgur, et al. "Viscous Flow of Medieval Cathedral Glass." *Journal of the American Ceramic Society* 101 (2018) 5-11.

Borja, Lauren. "Shattering the myth of fast-flowing medieval glass." *MRS Bulletin* 42.10 (2017): 697-697.

Bohland, P., and B. Goodman. "Glassy materials with enhanced thermal stability." *MRS Bulletin* 42.1 (2017): 23-28.

Yu, Yingtian, et al. "Thermometer Effect: Origin of the Mixed Alkali Effect in Glass Relaxation." *Physical Review Letters* 119 (2017): 095501.

TYNGDEBØLGER

Om forfatterne



Marianne Vestergaard er astrofysiker med speciel forskningsinteresse i kvasarer og deres tunge sorte huller i centret af fjerne galakser.
vvester@nbi.ku.dk



Troels Harmark og



Niels Obers er teoretisk fysiker med speciale i sorte huller, relativitetsteori, holografiske dualiteter og superstreng-teori.

De er alle ansat ved Niels Bohr Institutet på Københavns Universitet og deres forskning støttes af to separate bevilninger fra Danmarks Frie Forskningsfond | Natur og Univers.

Kun to år og fire spændende målinger efter man første gang kunne bekræfte eksistensen af det fysiske fænomen kaldet tyngdebølger, står det klart, at tyngdebølger tilbyder et helt nyt og enestående værktøj til at udforske og bedre forstå vores forunderlige verden.

Både som teoretisk konsekvens af Einsteins ligninger og som eksperimentelt felt har tyngdebølger haft en svær barndom. Det var først 30 år efter Einsteins oprindelige ide fra 1918, at der var enighed om, at tyngdebølger er en del af Einsteins relativitetsteori. Derefter skulle der gå yderligere 70 år, før målingen af tyngdebølger gik fra at være en fiks ide i hovedet på nogle få urokkelige idealister, til at man prøvede at bygge måleinstrumenter, og til at man endelig detekterede dem første gang i 2015. Eksperimentet "Advanced LIGO" (aLIGO), som målte tyngdebølgerne i 2015, tog det hele 40 år at udvikle og bygge. Eksperimentets succes gav i år anledning til en Nobelpris i fysik til dens tre primære drivkræfter: Rainer Weiss fra Mas-

sachusetts Institute of Technology, Barry Barish og Kip Thorne, begge fra California Institute of Technology. Alt dette har kulmineret i fire målinger af tyngdebølger fra kolliderende sorte huller, samt den nylige observation af to kolliderende neutronstjerner med aLIGO og dets "søsterekperiment" VIRGO i Pisa, Italien. Detektion og målinger af tyngdebølger fra sammenstød af den slags kompakte objekter åbner en hel ny verden for forskerne.

Tyngdebølger

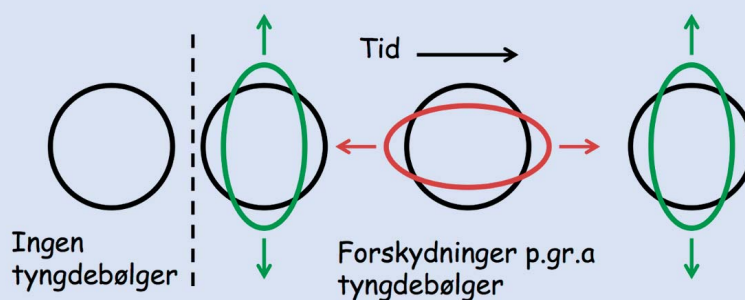
Før Einsteins relativitetsteori blev fremsat i 1915 mente forskerne, at man fuldt ud forstod, hvad rum og tid var, og at der ikke var noget nyt at lære. Einsteins relativitetsteori ændrede dette fuldstændigt. Ifølge relativitetsteorien er tiden og de tre rumlige retninger (læng-

de, højde og bredde) forenet i en fire-dimensional geometri, som kaldes for rumtiden. Rumtiden kan bøjes og krummes, og der kan udbredes bølger i rumtiden. Det, vi oplever som tyngdekraften, er i virkeligheden forårsaget af, at rumtiden krummes på grund af tilstedeværelsen af et tungt objekt. Så tyngdekraften er et udtryk for rumtidens geometri – eller med andre ord, hvor meget rumtiden krummer.

Legemer i hvile krummer rumtiden, fordi de har en masse. Når sådanne legemer accelereres i rumtiden sker der det interessante, at der opstår tyngdebølger. Disse er krumninger i rumtiden, som bevæger sig væk fra kilden (det accelererende legeme), på samme måde som bølger på vandover-

Illustration af to sorte huller i hurtig banebevægelse om deres fælles tyngdepunkt. Accelerationen i banebevægelsen skaber tyngdebølger, der bevæger sig væk fra de to sorte huller med lysets hastighed. At tyngdebølgerne forvrænger rumtiden er illustreret ved forvrængningen af de grønne tem på den blå baggrund. Energien til tyngdebølgerne kommer fra banebevægelsen: De to sorte huller mister bevægelsesenergi, hvilket bringer dem tættere og tættere på hinanden, hvor de til sidst kolliderer. I kollisionen forvrænges rumtiden voldsomt, amplituden i tyngdebølgen når sit maksimum, hvorefter det nye sorte hul stabiliserer sig.

Illustration: R. Hurt/Caltech-JPL



Virkning af en tyngdebølge

Forestil dig, at en tyngdebølge passerer gennem København og kommer direkte ovenfra. Set ovenfra er omridset af Rundetårn en cirkel. Når bølgen passerer, trykkes tårnet en smule ovalt i én retning: Cirklen bliver længere end cirkelens oprindelige omkreds i den ene retning (grøn cirkel) og kortere i den anden retning vinkelret derpå. Dernæst sker det modsatte, så tårnet (cirklen) trykkes oval i den anden retning (rød cirkel), vinkelret på den første. Cirklen bølger derefter frem og tilbage mellem de to ovaler som illustreret.

Tyngdebølger gør altså, at punkter på cirklen (eller ydermuren af Rundetårn) forskydes en lille smule i forhold til, hvor de var, før bølgen passerede. Det specielle er dog, at det egentlig ikke er selve Rundetårn, der forvrænges: Det er rummet selv, der forvrænges.

Man kan opfatte forskellen således: Når vandoverfladen bølger på et vandløb, ser vi et forvrænget *billede* af bunden af vandløbet, når bølgen passerer. Hvis vandbølger var tyngdebølger, ville vi ikke kun se et forvrænget billede, men selve vandløbsbunden ville blive forvrænget!

fladen bevæger sig væk fra din hånd, hvis du bryder en blikstille vandoverflade med hånden. Dog udbreder tyngdebølger sig med lysets hastighed igennem universet. Alle legemer med masse danner tyngdebølger – selv du, når du ændrer din løbehastighed i parken for undgå andre motionister. Dog er de forskydninger, der opstår, utroligt små. Det er kun *meget* tunge og kompakte objekter som sorte huller og neutronstjerner, der kan skabe tilstrækkeligt kraftige tyngdebølger til, at de er målbare. Det sker for eksempel, når de er i kredsløb om hinanden, idet de accelereres i banebevægelsen. Jo større accelerationen er, og jo tungere og mere kompakte objekterne er, jo kraftigere er tyngdebølgerne. Selv da er forskydningerne på en brøkdel (cirka $1/10.000$)

af udstrækningen af kernen i et brintatom, så det kræver meget fintfølende instrumenter at måle disse bittesmå forskydninger.

Hvordan sker disse forskydninger så? Lad os først se på bølgerne, der opstår, når du kaster en sten i en sø. Disse krumninger på vandoverfladen får ethvert punkt på overfladen til at hoppe lodret op og ned. Forskydningerne foregår her i blot én retning, vinkelret på bølgens bevægelsesretning væk fra stenens nedslagspunkt. Tyngdebølger er anderledes, idet de skaber forskydninger samtidigt i to retninger, vinkelret på hinanden, for eksempel lodret og vandret, og igen vinkelret på udbredelsesretningen. De er dog unikke, idet de ikke flytter på *positionen* af (vand- eller luft-) partikler i rummet,

ligesom vand- og lydbølger gør. Derimod flytter tyngdebølger *rummet selv*, når de passerer igennem selvsamme rum (se boks). Det faktum, at tyngdebølger forårsager forskydninger i rummet i to retninger vinkelret på hinanden, gør, at vi kan måle dem.

Sådan virker tyngdebølge-detektorerne

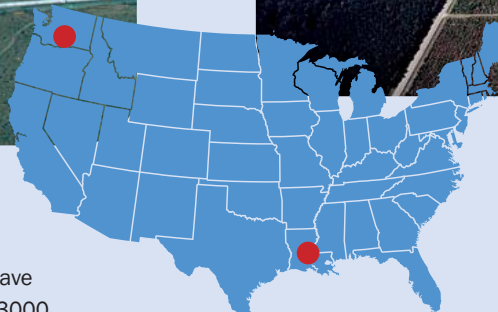
Detektorerne i eksperimentet Advanced LIGO (aLIGO) i USA udnytter en speciel egenskab ved lysbølger til at måle de bittesmå rumlige forskydninger, nemlig evnen til at skabe konstruktiv og destruktiv interferens. En laserstråle sendes til et spejl, som deler lyset i to. Derefter sendes hver lysstråle ud i hver deres 4 km lange arm, som står vinkelret på hinanden. Lyset reflekteres af et spejl for enden af



aLIGO, Hanford



aLIGO, Livingston



VIRGO, Pisa

Observatorierne aLIGO og VIRGO

Observatoriet Advanced Laser Interferometry Gravitational wave Observatory (aLIGO) består af to "teleskoper" placeret cirka 3000 km fra hinanden i Livingston i Louisiana og Hanford i Washington State, USA. Installationerne er ens, blot drejet i forhold til hinanden. Det gør, at forskerne nemmere kan filtrere de rigtige tyngdebølgesignaler fra støj. Hver af teleskoperne består af to 4 km lange arme, der står vinkelret på hinanden. De lange arme er nødvendige for, at man kan detektere de bittesmå forskydninger, som blot udgør en lille brøkdel af et atom. aLIGO er faktisk så nøjagtig, at den kan detektere forskydninger på helt ned til ca. $1/10.000$ af kernen i et brintatom, svarende til 10^{-19} meter. Det er cirka 10 gange mindre end de forskydninger, man målte i september 2015. aLIGO har været i brug siden 2015, og i august 2017 blev VIRGO i Pisa, Italien taget i brug (nederst).

VIRGO er bygget som aLIGO, blot med 3 km lange arme, i et samarbejde mellem Italien og Frankrig og en del andre medlemslande. De kortere arme gør, at signalet er svagere, men VIRGO har afgørende betydning for at bestemme, hvor signalet kommer fra i universet, idet der er brug for minimum to og helst flere detektorer til det formål.

Fotos: LIGO collaboration og VIRGO Collaboration.

armen og sendes direkte tilbage, hvorfra det kom. Når lysstrålerne mødes, samles de og rammer en detektor, som registrerer resultatet af lysbølgernes interferens. Afhængig af den reelle afstand, som lysstrålerne har tilbagelagt, vil det samlede lys skabe konstruktiv eller destruktiv interferens på detektoren, der registrerer laserlyset.

Når en tyngdebølge passerer observatoriet, vil armenes længder forskydes i forhold til hinanden, først i den ene retning, dernæst i den anden retning. Forskydningerne gør, at laserlysdetektoren ser effekten af tyngdebølgerne som

ændringer i laserlysets styrke: Lyset forsvinder og kommer igen.

Jo kraftigere laserlys, man sender igennem de lange arme, jo mere præcist kan man måle positionen af spejlene for enden af armene via de bittesmå forskydninger i lysets bølgetoppe og dale. Der er dog en grænse for, hvor godt det kan gøres, fordi den større mængde lyskvanter afsætter lidt energi i spejlene og skubber til dem på en usystematisk og uforudsigelig måde, så man ikke kan korrigere for effekten. Forskere ved kvante-optik laboratoriet på Niels Bohr Institutet i København er i samar-

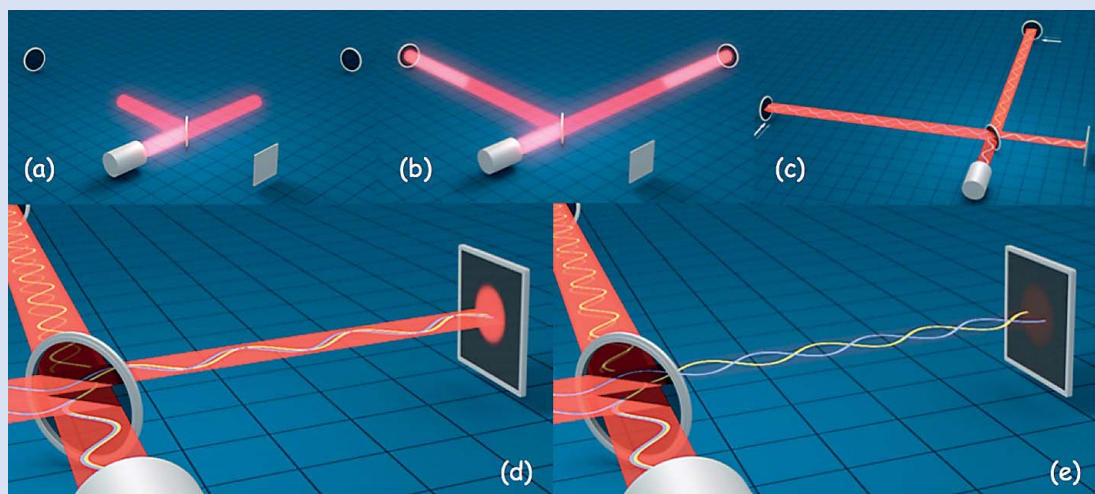
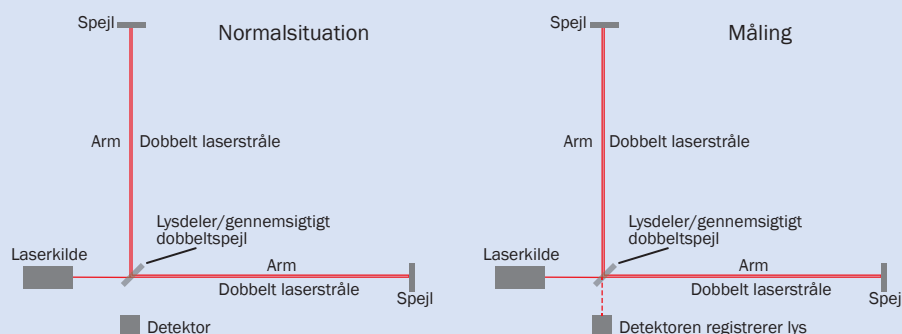
bejde med Dansk Institut for Fundamental Metrologi ved at undersøge lovende metoder til at omgå denne begrænsning, som, hvis det lykkes, kan gøre teleskopet så følsomt, at man forventer at kunne måle tyngdebølger fra et ti gange større volumen i universet.

Et epokegørende gennembrud

Den første detektion og måling af tyngdebølger skete kort efter den nyligt opgraderede aLIGO blev startet, nemlig den 14. september 2015. De svingninger, man målte og offentliggjorde i februar 2016, kom fra et sammenstød mellem to sorte huller cirka 1,3 milliarder

Måling af tyngdebølger

Principskitse:
I normalsituationen er laserlyset ude af fase og der kommer ikke noget lys til detektor. Ved måling af tyngdebølger kommer laserlyset i fase og der stømmer lys til detektoren.



Figuren er skabt af forfatterne på baggrund af en animation publiceret af LIGO-VIRGO samarbejdet.

Når tyngdebølger passerer aLIGO og VIRGO vil de to vinkelrette arme ikke længere være lige lange. Armene strækkes og komprimeres i forhold til hinanden. Dette afsløres på følgende måde (a) Laserlys sendes til spejlet som deler lyset og sender det ind i hver sin arm, vinkelret på hinanden. (b) Lyset reflekteres af et andet spejl for enden af armen. (c) Lyset samles igen og sendes mod detektoren helt til højre i figuren. (d) Når lyset fra de to arme er i fase, registrerer detektoren til højre i diagrammet et forstærket signal (konstruktiv interferens).

(e) Når lyset fra armene er ude af fase, svækkes eller udslukkes signalet helt (destruktiv interferens). Afstanden, som lyset tilbagelægger, afgør om de to delte lysstråler er i fase, når de samles igen. Uden påvirkning af tyngdebølger er lyset ude af fase (som i panel e). Når tyngdebølger strækker og sammenpresser hver af de to arme, vil afstanden lyset tilbagelægger ikke være ens, og som tyngdebølgerne passerer vil signalet først forstærkes og siden bølge imellem en forstærkning og svækkelse af lyset på detektoren.

lysår fra Jorden. De var begge cirka 30 gange så tunge som Solen og cirka 200 km i diameter og befandt sig i en hurtig dans om hinanden, hvorefter de tørnede sammen i en meget voldsom kollision. Kollisionen skabte et nyt sort hul på 62 solmasser, og en kolossal mængde energi svarende til hvilemassen af 3 sole blev udsendt i form af tyngdebølger op til og under kollisionen. Den energi svarer til lyset fra alle stjerner i universet – og der er flere stjerner end der er sandkorn på alle strande på Jorden.

Disse målinger er helt epokegørende! For første gang havde man

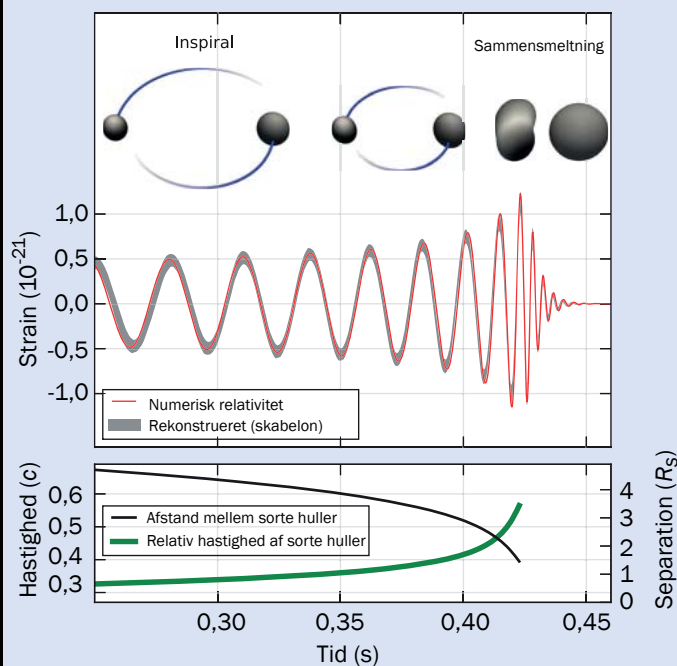
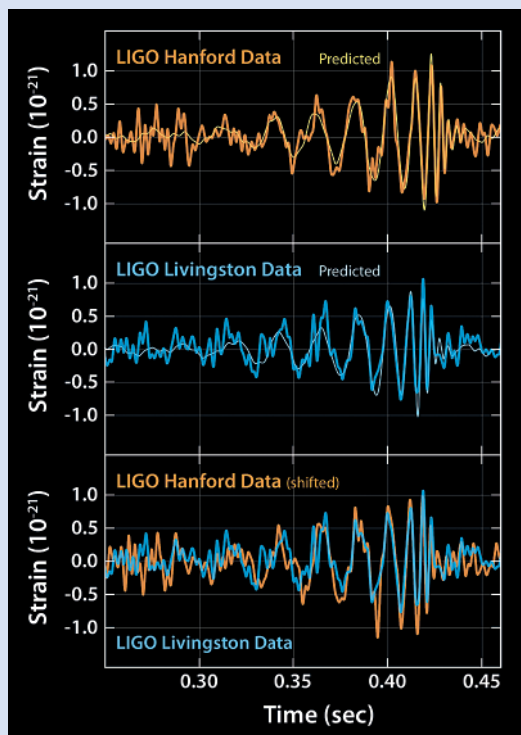
eksperimentelt bevis for, at tyngdebølger er en realitet: Nøjagtigt som Einstein forudså, kan voldsomme begivenheder få rumtiden til at bølge. Opdagelsen har flere vidtrækkende perspektiver, hvilket er årsagen til at den udløste Nobelprisen 2017. Dels viser den endnu en gang, at Einsteins relativitetsteori holder som en beskrivelse af vores verden: Rumtiden eksisterer og opfører sig præcist, som Einstein forudsagde. Og det er ikke blot en *statisk* rumtid, men også en *dynamisk* rumtid, der kan bevæge sig og bølge. Dels giver målingerne faktisk det hidtil bedste bevis for eksistensen af sorte huller.

Einsteins ligninger viser nemlig i store detaljer, hvordan de målte svingninger bør opføre sig, hvis to sorte huller kolliderer, fremfor hvis de kompakte objekter i stedet var for eksempel neutronstjerner eller almindelige stjerner.

Sidst men ikke mindst har forskerne nu en helt ny og anderledes metode, hvormed de kan veje, måle og undersøge universet. Det skyldes, at tyngdebølgerne skabes fysisk anderledes end almindelig stråling, som vi kender fra lys- og radiobølger.

Siden den første måling har man detekteret tre andre sammenstød

De første målinger fra aLIGO



De første målinger med aLIGO fra september 2015. Diagrammerne viser de relative forskydninger (kaldet "strain") i de 4 km lange arme, som svarer til absolutte forskydninger på cirka 10^{-18} meter eller en lille brøkdel af udstrækningen af en brintatomkerne. Til venstre ses de svingninger, der blev målt i de to detektorer over tiden. Selvom de sorte huller har været i banebevægelse om hinanden noget tid, er det først i de allersidste stadier, at hullernes acceleration i banen er stor nok til, at aLIGO kan detektere tyngdebølgerne. Frekvensen stiger som de to sorte huller nærmer sig (afstanden mellem bølgetoppe mindskes) og bevæger sig hurtigere og hurtigere omkring deres fælles tyngdepunkt (se tegningen til højre). Som de sorte huller nærmer sig hinanden

mindskes afstanden imellem dem (separationen, målt i forhold til radius af det sorte hul, kaldet R_s i figuren) og hastigheden stiger. Målingerne viser direkte det fantastiske faktum, at de to legemer til sidst kredser om hinanden med en afstand mellem deres centre på blot 350 km og med en utrolig stor hastighed på mellem 30 % og 50 % af lysets hastighed (1,09 milliard km/t; kaldet c i figuren). Når de to sorte hullers begivenhedshorisonter rammer hinanden, sammensmelter de to legemer, og svingningerne ophører hurtigt. I panelet til venstre er observationerne sammenlignet med forskernes modeller ("predicted", vist med en tynd kurve). Det nederste panel sammenligner direkte målingerne fra de to detektorer. Figur fra B. P. Abbott et al. 2016.

den 26. december 2015, den 4. januar 2017 og den 14. august 2017. Igen var det to tunge sorte huller med masser svarende til 10 – 30 sole, der kolliderede. Disse tre observationer viser, at "små" sorte huller, som dannes, når tunge stjerner dør, kan være ret tunge, faktisk tungere end forskerne forventede. For at skabe så tunge sorte huller, må stjernerne selv være skabt meget tidligt i universet (mindre end 2 milliarder år efter Big Bang) med et lavt indhold af tungere grundstoffer og veje

40 til 100 gange mere end Solen. Hvor hyppige sådanne kollisioner er, fortæller derfor om forholdene i galakserne, hvor stjernerne blev dannet. Observationerne vil også hjælpe til at forstå dannelsen og udviklingen af både stjerner og sorte huller igennem universets historie.

August 2017: Sammenstød af to neutronstjerner

Da man startede eksperimentet VIRGO i Pisa i august 2017 målte man to tyngdebølge-kilder. Den

sidste var speciel, idet man for første gang formåede at detektere et sammenstød mellem to neutronstjerner. Neutronstjerner kan maksimalt veje 3 Sole, så rumtidsforskydningerne er markant mindre end for sorte huller. Men signalet var det kraftigste, der endnu er målt, fordi kilden er relativt tæt på Jorden, nemlig i galaksen NGC 4993 blot 140 millioner lysår herfra. Og det skulle vise sig at blive en stor opdagelse med vidtrækkende konsekvenser. En meget vigtig ting er nemlig, at med både

VIRGO og de to aLIGO-detektorer i brug har forskerne kunne bestemme positionen af kilden langt mere nøjagtigt end hidtil. Det har betydet, at forskerne kunne vende verdens teleskoper (på Jorden og i rummet) mod denne position og se efter et elektromagnetisk signal (altså almindelig stråling). Det nye og utroligt spændende er, at dette dramatiske sammenstød faktisk blev observeret også i almindelig stråling ved forskellige bølgelængder, både ved de højeste energier i gamma-området, røntgen og helt ned til de laveste energier i det infrarøde område.

Mere end 70 rum- og jordbaserede teleskoper og tusinder af forskere verden over deltog i eksperimentet. Det har gjort, at man med sikkerhed nu har kunne sammenkæde fænomenet korte gamma-glimt med kollisioner af neutronstjerner, der indtil nu blot har været en formodning. Blot 1,7 sekunder efter kollisionen blev et gamma-glimt nemlig detekteret med de to højenergi-satellitter *Fermi* og *Integral*.

De mange observationer af elektromagnetiske signaler i timerne og ugerne efter kollisionen, hvor forskerne har kunne følge udviklingen af den kosmiske eksplosion, har gjort, at man også har kunne se, at der sker en opbygning af grundstoffer tungere end jern og mere sjældne grundstoffer som cæsium, tellurium og måske xenon. Det har meget stor betydning, fordi de meget tunge og sjældne grundstoffer, deriblandt guld og platin, ikke kan dannes inde i stjerner som andre grundstoffer. Det kræver helt specielle og derfor sjældne processer. Forskerne har formodet, at de måske kunne dannes i eksplosioner af stjerner (kaldet supernovaer) og i sammenstød af kompakte objekter, men der findes ikke direkte beviser for det.

Nu lader det til, at forskerne var på rette spor. De mange opfølgende analyser af de indsamlede data i månederne fremover vil afsløre, hvilke tungere grundstoffer der kan

Den danske forbindelse

Af de mange teleskoper, der bidrog til de spændende resultater fra den seneste detektion af tyngdebølger, er det danske 1,5m teleskop i Chile, det fællesnordiske 2,5m Nordic Optical Telescope, den delvis dansk-byggede X-shooter spektrograf installeret på Very Large Telescope i Chile samt Integral-satellitten, som er delvis bygget af forskere ved Danmarks Tekniske Universitet. Derudover har en håndfuld danske forskere fra Niels Bohr Institutet ved Københavns Universitet, som deltager i IceCube neutrino-eksperimentet på Sydpolen, også bidraget.

Over 25 danske forskere ved Niels Bohr Institutet og Danmarks Tekniske Universitet har samlet spillet en stor rolle i disse spændende målinger og opdagelser. Specielt har forskere ved forskningscentre DARK og StarPLAN på Niels Bohr Institutet været involveret i at lave opfølgende målinger af galaksen, som kilden befinder sig i, og været med til at fastlægge, at den farveudvikling (fra energirigt "blåt" lys til lav-energi "rødt" og infrarødt lys), der blev observeret i strålingen fra kilden, ikke skyldes dannelse af støv (som primært spreder det blå lys væk), men snarere skyldes en hurtig opbygning af tungere og sjældne grundstoffer (som fortrinsvist absorberer det blå lys og lader det røde lys slippe forbi). Analyserne af grundstofopbygningen har danske forskere ligeledes bidraget stort til.

dannes i disse typer kollisioner. De data, man har opnået, ligner nemlig ikke noget, forskerne har set før.

Et nyt værktøj for forskerne

Det er ikke muligt at overdrive vigtigheden af vores nye evner og muligheder for at måle tyngdebølger fra kosmiske kollisioner. Det er nok det største og mest epokegørende gennembrud i fysikken siden kvantemekanikken blev grundlagt. Årsagen er, at tyngdebølger er meget specielle. Processen, som skaber dem, er helt anderledes end fysikken, der skaber elektromagnetiske bølger og neutrinoer, og signalet kan ikke svækkes eller blive absorberet som elektromagnetisk stråling kan. Så forskerne får nogle helt andre informationer, end hvad lys alene kan give. Man kan opfatte det som at få en ekstra sans: Nu kan man både se og høre – eller måske mere passende, se og mærke.

Fordi målbare tyngdebølger skabes i meget kraftige tyngdefelter, vil de give forskerne et helt nyt indblik i fysikken i og omkring ekstreme

tyngdefelter, der er en million til en milliard gange så store, som vi kan måle på henholdsvis Solen og Jorden. Det vil tillade yderligere tests af Einsteins almene relativitetsteori. Hyppigheden af kollisionerne og fordelingen af de kompakte objekters masser fortæller om forholdene i de dele af galakserne, hvor kollisionerne sker og ikke mindst om fysikken i sorte huller selv.

Forskerne håber, at tyngdebølger som det nye værktøj, det er, vil skabe helt ny og banebrydende indsigt ligesom nye forskningsværktøjer tidligere har givet gennembrud indenfor astrofysikken eller højenergifysikken. Der er ét specielt ønske på forskernes liste: Kvantemekanikken viser, at lys opfører sig både som bølger og partikler (kaldet "lyskvanter" eller "fotoner"). Da vi nu ved, at tyngdebølger eksisterer, er der gode indicier for, at der analogt også findes en (kvante-)partikel tilknyttet tyngdefeltet, kaldet en "graviton". Da sorte hullers primære egenskab er deres tyngdefelt, håber forskerne, at tyngdebølger

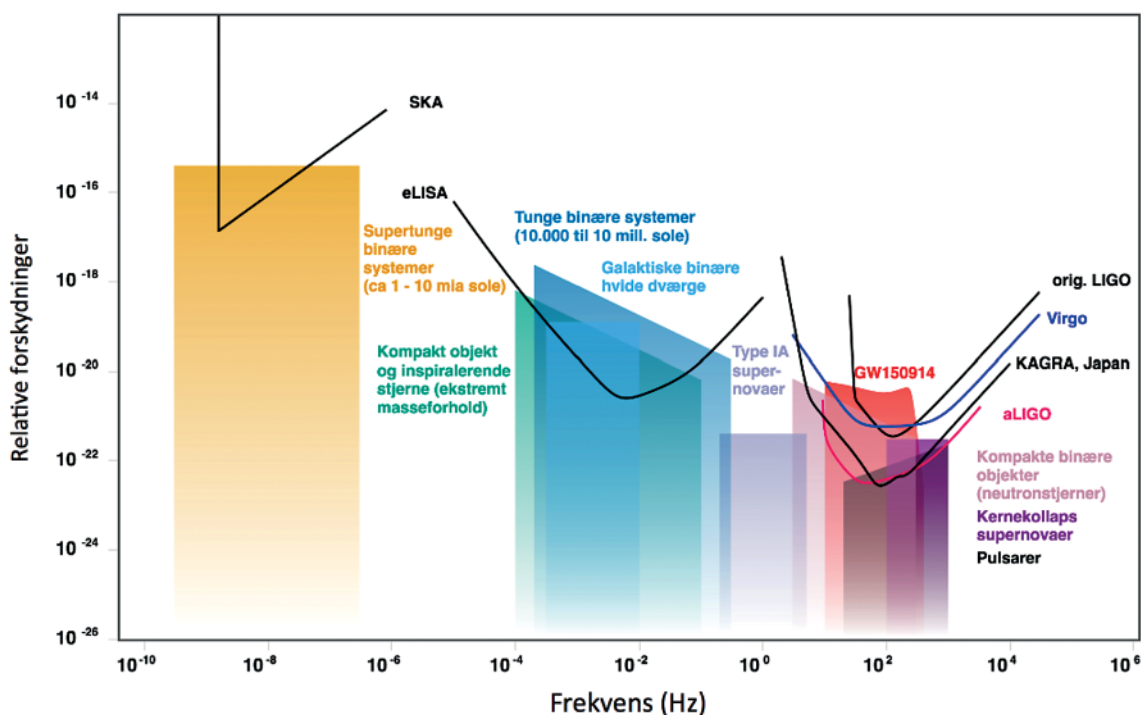
Videre læsning:
Kunsten at veje
et sort hul. Aktuell
Naturvidenskab nr.
5/2016.

Verdensbilledet
i forandring - et
hundredårigt
perspektiv. Forlaget
Epsilon 2016.

B. P. Abbott et al.
(LIGO Scientific
Collaboration and
Virgo Collaboration),
Observation of Gravi-
tational Waves from
a Binary Black Hole,
Phys. Rev. Lett. 116,
061102.

Hjemmsider:
<http://ligo.org>
www.virgo-gw.eu
[www.nobelprize.org/
nobel_prizes/
physics/laureates/
2017/popular.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2017/popular.html)

Ekstra materiale:
På siden
aktuelnaturvidenskab.dk
kan du finde ekstra
materiale til denne
artikel i form af fak-
tabokse om blandt
andet tyngdekraft,
rummets krumning
og sorte huller
(se blad nr. 6-2017).



Figuren viser med farvede stolper de relative forskydninger (lodret akse), som forventes i tyngdebølge-teleskopernes arme, samt frekvensintervallet (vandret akse), bølgerne kan måles ved, når tyngdebølgerne skyldes forskellige typer kilder. I alle tilfælde er kilderne to kompakte legemer i kredsløb om hinanden, dog er pulsarer en enkelt neutronstjerne med en radiojet i hurtigt rotation om sin egen akse. Forventnin-

gerne er baseret på Einsteins relativitetsteori. Kurverne viser følsomheden af de forskellige teleskoper, enten i brug (advanced LIGO, VIRGO) eller planlagte (Kagra i Japan; eLISA' – det rumbaserede teleskop, som forventes en realitet i år 2034; SKA skal ligge i Australien, New Zealand og Sydafrika og bliver verdens største radioteleskop i 2020, svarende til et enkelt teleskop med et areal på en kvadratkilometer).

kan bringe os et skridt videre til en teori om kvante-tyngdekraft samt om hvilke kvantebestanddele, sorte huller består af. Tyngdebølger har enormt potentiale for at afsløre ikke blot, hvad der er inde i et sort hul – noget som mange forskere og lægmænd igennem tiderne har diskuteret – men også hvordan Big Bang egentlig opstod og hvorfor. Det er emner, man er meget optagede af i den teoretiske høj-ener-gigruppe ved Niels Bohr Institutet.

Fremtiden tegner lys

Det seneste eksperiment viser, at fænomener som gamma-glimt og kollisioner af neutronstjerner er forbundet med de voldsomme begivenheder, der skaber tyngdebølger. Det giver nye muligheder for at teste og udforske de fysiske processer, der ligger til grund. Selvom fænomenerne er kendte, så er der mange uafklarede spørgsmål

og fysik, som man ikke hidtil har kunnet teste. Forskerne håber derfor at få ny information om disse fænomener, for eksempel om de helt eller delvist bidrager til opbygningen af de tunge og sjældne grundstoffer. Eksperimentet viser også, at tyngdebølger kan give uafhængige målinger af afstande i universet og dermed information om, hvor hurtigt universet udvider sig. Måske det kan give yderligere indsigt i den mørke energi, som er årsag til, at universet udvider sig stadig hurtigere?

Sidst men ikke mindst forventes flere og bedre tyngdebølge-teleskoper at blive bygget i fremtiden, så forskerne med tiden vil kunne udforske tyngdebølger ved alle bølgelængder. Det vil gøre det muligt at detektere signaler fra andre typer kilder end hidtil. Ved at gå til længere og længere bølgelængder (små

frekvenser) vil forskerne eksempelvis kunne måle sammenstød af tunge og tungere sorte huller, blandt andet de supertunge, som befinder sig i centret af fjerne galakser. I den sidste ende håber forskerne også at kunne måle tyngdebølger skabt i Big Bang.

Kraftige detektorer er allerede planlagt i Japan (Kagra) og i rummet (eLISA), og man er i gang med at bygge et kæmpe radioteleskop på den sydlige halvkugle kaldet *Square Kilometer Array* (SKA). Det vil være i stand til at detektere de supertunge sorte huller, som forskerne ved har stor betydning for beskaffenheden af vores egen galakse og galakser i vores nærhed, og dermed for muligheden for liv i universet.

Fremtiden lover rigtigt godt for forskerne. De glæder sig som børn til juleaften!

130 uddannelser 3 dage 1 overblik

Kom til tre dages åbent hus på
Aarhus Universitet

1., 2. og 3. marts 2018

TAG DINE ELEVER MED TIL U-DAYS

u-days tilbyder at betale 8.000 kr. til betaling af en bus, hvis I på egen hånd for jeres klasse eller for en større gruppe elever arrangerer bustransporten.

Ønsker I at benytte jer af muligheden for transportstøtte til og fra u-days, skal I blot sende en mail til udays@au.dk. Midlerne fordeles efter kriterierne: "først-til-mølle", afstand fra Aarhus og antal elever.



AARHUS
UNIVERSITET

study
with
Aarhus

u-days.dk

KAN FORSTÅElsen AF ET ENZYM LØFTE HUMØRET?

Et nyt forskningsprojekt skal afklare samspillet mellem strukturen og funktionen af et enzym, som spiller en central rolle i produktionen af "humørmolekylet" serotonin i hjernen.

Enzymet kan nemlig være et interessant mål for nye lægemidler mod depression.

Om forfatteren
Carsten R. Kjaer
Aktuel Naturvidenskab
crk@aktuelnaturvidenskab.dk



**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, Lars Arge. Læs mere på www.dff.dk

Tænk, hvis et enkelt molekyle alene regulerede vores humør. Så kunne man måske en gang for alle udrydde depression som folkesygdom ved at kontrollere mængden af dette molekyle i kroppen. Og man kunne undgå de daglige eller årstidsbestemte humørsvingninger med et tilskud af dette molekyle. Det kan lyde tillukkende, men så enkel er verden – desværre – ikke.

Et af de molekyler, som man dog ved spiller en rolle for vores humør og en række andre vigtige mentale fænomener som aggression og hukommelse, er signalstoffet serotonin. Siden slutningen af 1960'erne har man været klar over, at mangel på serotonin i hjernen kan være en faktor i udviklingen af depression. Det har været baggrunden for udviklingen af den klasse af antidepressiv medicin kaldet SSRI, som blandt andet den danske lægemiddelvirksomhed Lundbeck har haft stor succes med. Denne type medicin virker ved at gribe ind i de

biokemiske processer, der er med til at regulere niveauet af serotonin i hjernen.

På trods af, at der i efterhånden mange år har været stor videnskabelig og kommerciel interesse forbundet med at forstå, hvordan produktionen af serotonin reguleres i vores krop, er der stadig store huller i vores viden. På institut for Kemi på DTU står lektor Günther Herbert J. Peters i spidsen for et projekt finansieret af Danmarks Frie Forskningsråd | Natur og Univers, hvor han sammen med kolleger fra DTU, Københavns Universitet og University of Manchester vil lægge en af de manglende brikker i det komplicerede puslespil. Forskerne håber, at projektet vil være med til at åbne nye veje at gå for udvikling af lægemidler mod depression.

To veje til serotonin

Serotonin er som nævnt et signalstof (en neurotransmitter), og det betyder, at molekylet medvirker til

at overføre signaler mellem nerveceller. Serotonin dannes i kroppen ud fra tryptophan, som er en essentiel aminosyre – det vil sige en livsnødvendig aminosyre, som kroppen ikke selv kan danne ved stofskifte, så den skal optages via proteiner i kosten. Omdannelsen af tryptophan til serotonin er en kompliceret affære. Og i virkeligheden er der to forskellige signalveje, der fører til dannelsen af serotonin. Det har nemlig vist sig, at langt størstedelen af kroppens serotonin ikke findes i hjernen, men i fordøjelsessystemet, hvor det er med til at regulere tarmens bevægelser. Serotonin kan imidlertid ikke passere den såkaldte blod-hjerne-barriere, og derfor skal den serotonin, som hjernen har brug for, altså produceres direkte i hjernevævet. I en årrække var det lidt af et mysterium, hvordan det gik til. Men så opdagede man en ny variant af et enzym kaldet tryptophan-hydroxylase, der spiller en afgørende rolle i omdannelsen af tryptophan til serotonin. Og det

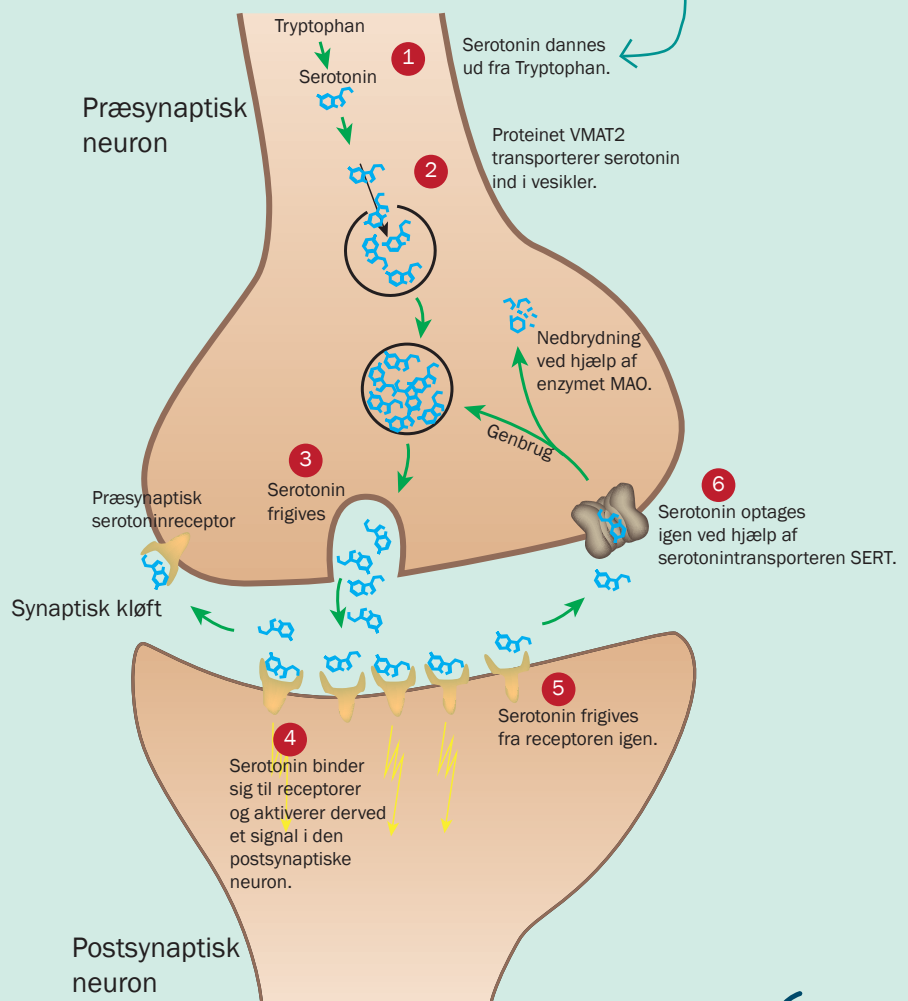
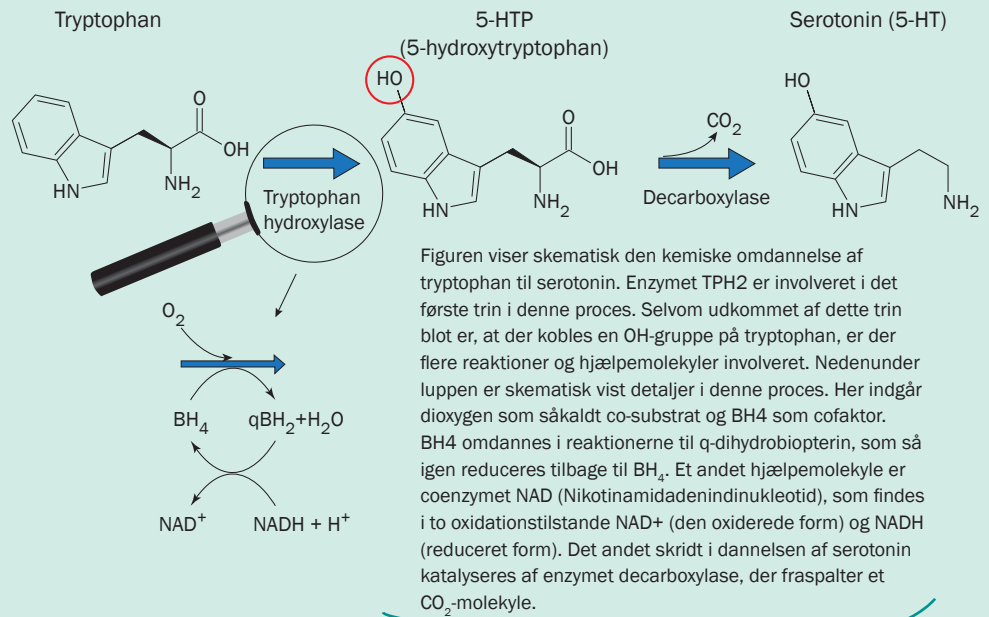
Serotonin i hjernen

Figuren nederst viser den overordnede forståelse af, hvordan serotonin opfører sig i hjernen i kontaktfladen mellem to nerveceller (neuroner). En sådan kontaktflade kaldes en synapse, og de to nerveceller kaldes henholdsvis den præsynaptiske og postsynaptiske neuron. Førstnævnte afgiver impulsen, mens den sidstnævnte er modtageren. Serotonin dannes i den præsynaptiske neuron ud fra tryptophan, og det transporteres herefter med enzymet VMAT2 ind i såkaldte vesikler. Herefter bringes serotonin til enden af neuronen, hvor det frigives i mellemrummet mellem de to celler. På den postsynaptiske neuron sidder særlige serotoninreceptorer, og når serotonin binder sig til disse, aktiveres et signal, der fortsætter gennem cellen. Der sidder også serotoninreceptorer på den præsynaptiske neuron, som spiller en rolle i forhold til at regulere frigivelsen af serotonin.

Et protein kaldet serotonintransporteren bringer serotonin ind i den præsynaptiske neuron igen, og her bliver en del af det genbrugt, mens en del nedbrydes af enzymet Monoamin-oxidase (MAO).

Serotonintransporteren (blot kaldet SERT) er det specifikke mål for den klasse af antidepressive lægemidler kaldet SSRI (*selective serotonin reuptake inhibitors*), som med et noget uheldigt udtryk populært er blevet kaldt "lykkepiller". Disse lægemidler virker ved at blokere "genoptagelsen" af serotonin, hvilket betyder at der forbliver mere serotonin i den synaptiske kløft. Det vil alt andet lige betyde, at mere serotonin kan binde sig til receptorer på den postsynaptiske neuron og dermed sikre, at nervesignalerne overføres effektivt mellem cellerne.

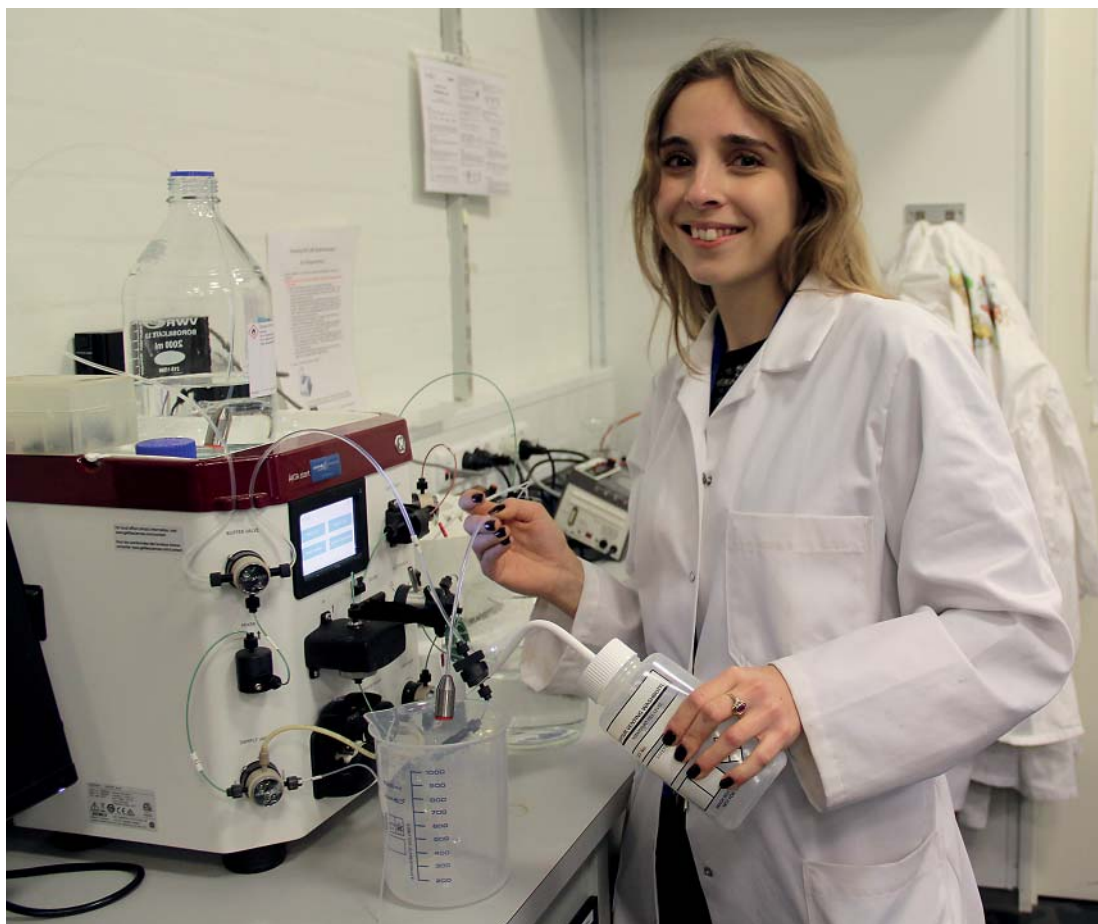
Hvis man kan udvikle lægemidler, der har enzymet TPH2 som mål (altså det enzym, som Günther H.J. Peters og kolleger interesser



sig for), vil det gribe ind et helt andet sted i serotoninssystemet – ved punkt 1 på figuren, hvor tryptophan omdannes til seroto-

nin. Hvis man kan øge aktiviteten af TPH2, vil der simpelthen blive produceret mere serotonin i nervecellen.

Ph.d.-studerende Natalia Teresa Skawinska arbejder også på projektet. Her er hun i færd med at betjene HPLC-udstyr (højtrykssvæskrokromatografi), som bruges til at adskille de enkelte komponenter i en prøve, hvorefter de kan bestemmes og kvantificeres.
Foto: Anne Frejberg



er denne "nye" variant af enzymet, som dette forskningsprojekt konkret drejer sig om.

Helt overordnet foregår omdannelsen af tryptophan til serotonin i to skridt: Først kobles en såkaldt hydroxygruppe (det vil sige en kemisk gruppe bestående af hydrogen og oxygen, OH) på tryptophan. Derefter omdannes dette mellemprodukt til serotonin ved, at der fraspaltes et CO₂-molekyle. Disse to trin i processen katalyseres af hvert deres enzym. Og enzymet tryptophan-hydroxylase (blot forkortet TPH) varetager det første af de to trin. Navnet på enzymet fortæller, at enzymets rolle er at hydroxylere (altså indsætte en OH-gruppe i) tryptophan. Det kan umiddelbart lyde simpelt, men det er en proces, der involverer flere forskellige reaktioner og medvirken fra andre molekyler. De to varianter af enzymet kaldes blot TPH1 og TPH2. Og det er TPH2, der er involveret i dannelsen af serotonin i hjernen, mens TPH1 indgår i dannelsen af

serotonin uden for hjernen.

Netop de reaktioner, som TPH2 katalyserer, er helt centrale, da det er dette trin i processen, der bestemmer, hvor stor produktionen af serotonin til enhver tid er i hjernen.

Enzym med ekstra lås

Når forskerne har kastet deres interesse på enzymet TPH2 skyldes det, at det populært sagt stadig er en hvid plet på landkortet i forhold til at forstå, hvordan dets struktur hænger sammen med dets funktion. Og da enzymet udgør et potentielt mål for lægemidler er det interessant at forstå detaljerne i, hvordan enzymet fungerer – specielt i forhold til, hvordan funktionen af TPH2 adskiller sig fra TPH1. Projektet bygger på, at Günthers kollega Hans Erik Mølager Christensen i en årrække har arbejdet med TPH1 og TPH2, så forskerne nu har en god ide om, hvad der er baggrunden for forskellen på virkemåder af de to enzymer. Deres hypotese er, at TPH2 har et såkaldt

"allosterisk bindingssted", som TPH1 ikke har. Et allosterisk bindingssted er et sted på enzymet, hvor et andet molekyle kan binde sig til enzymet og herved medvirke til, at enzymet bliver aktivt. Det er vigtigt at bemærke, at et sådant allosterisk bindingssted ikke er det samme som det, man kalder enzymets "aktive site". Det aktive site er det, man normalt forbinder med et enzyms katalytiske aktivitet. Det aktive site har normalt form som en lomme i enzymet, hvor det molekyle, som enzymet virker på (dets substrat), specifikt kan binde sig til. Et allosterisk bindingssted befinder sig derimod udenfor det aktive site, men har alligevel afgørende indflydelse på, at enzymet fungerer som det skal – nærmest som en ekstra sikkerhedslås på enzymet. I det konkrete tilfælde forestiller forskerne sig, at en del af enzymet TPH2 har form som en slags arm, der spærrer for adgangen til det aktive site. For at tryptophan kan binde sig til TPH2, skal enzymet først ændre struktur,

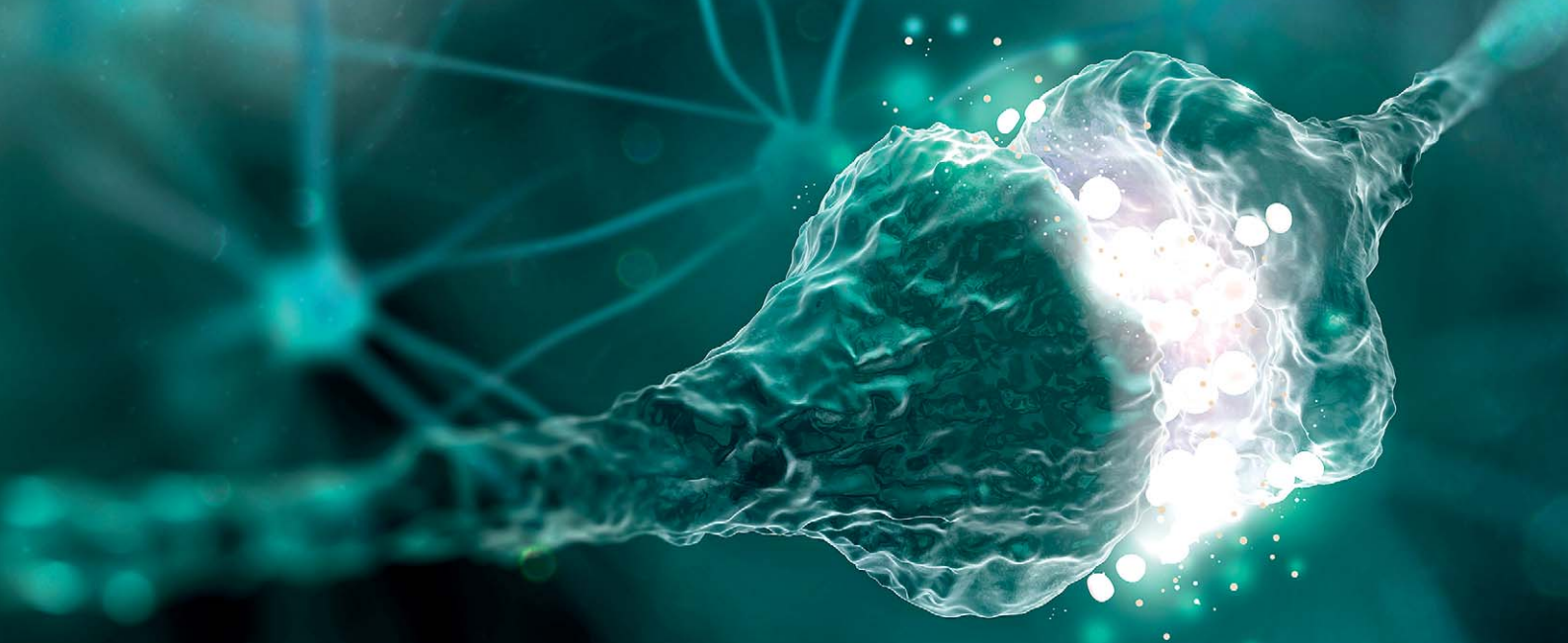
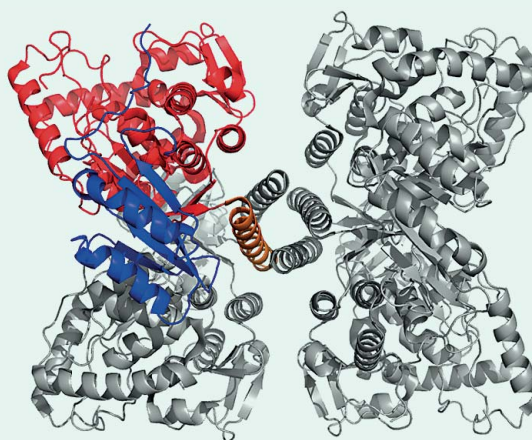


Illustration: Shutterstock

Enzymer – struktur og funktion

Enzymer er biomolekyler, hvis rolle i organismen er at katalysere kemiske reaktioner - det vil sige få reaktionerne til at forløbe, uden at enzymet selv bliver forbrugt i processen. Grundlæggende består et enzym af en lang kæde af aminosyrer, og denne kæde er foldet i en kompliceret struktur. Den tredimensionelle struktur af enzymet er afgørende for, at enzymet fungerer, som det skal. Ofte er et enzym delt ind i flere forskellige domæner, der hver især danner en kompakt, tredimensionel struktur, og som kan have forskellige funktioner. Vejen til at forstå, hvordan et specifikt enzym virker, går altså over at afklare, hvordan det er bygget op – både hvad angår sekvensen af aminosyrer og den tredimensionelle struktur.

Illustrationen viser enzymet phenylalanin-hydroxylase (i dette tilfælde fra en rotte). Det er et enzym, der ligner TPH2, som forskerne undersøger i deres projekt. Enzymet er opbygget som tetramerer – det vil sige en sammenkobling af fire ens enheder. Hver af disse fire enhe-



der består af et regulatorisk domæne (blå), et katalytisk domæne (rød) og et tetrameriseringsdomæne (orange). TPH2 ligner et langt stykke af vejen denne struktur, men der er forskelle – især i det regulatoriske domæne. En tilsvarende tredimensionel struktur af TPH2 med alle tre domæner kan endnu ikke vises, da forskerne endnu ikke kender denne struktur i sin fulde udstrækning.

Eksperimentelle metoder

Når forskerne i projektet skal undersøge strukturen af de forskellige varianter af enzymet TPH2, som de producerer på baggrund af deres computermødel, skal flere teknikker tages i brug. Den overordnede struktur kan bestemmes ved hjælp af røntgenkrystallografi eller småvinkel-røntgenspredning.

Proteinmolekyler har ikke en statisk struktur, men er derimod meget dynamiske molekyler, hvor forskellige områder fluktuerer med vidt forskellige hastigheder og dimensioner. Den nyeste forskning viser, at denne komplekse dynamik er tæt forbundet med vigtige aspekter af proteinernes funktion, regulering og vekselvirkninger. At kunne måle denne indre dynamik er derfor vigtigt for proteinforskere – og samtidig en udfordring. Men det kan gøres ved at måle hastigheden, hvormed

hydrogenatomer i et protein udveksles med deuterium (en tung udgave af hydrogen med en ekstra neutron i kernen). Da deuterium er tungere end hydrogen kan man påvise denne udveksling ved hjælp af massespektrometri. Rygraden i et protein udgøres af såkaldte amidgrupper, og på hver amidgruppe sidder et hydrogenatom, som kontinuert udveksles med deuterium, hvis proteinet befinder sig i tungt vand (det vil sige vand, hvor vandmolekylerne har fået udskiftet et eller begge hydrogenatomer med deuterium). De hydrogenatomer, der sidder i tætpakkede områder af proteinet, udveksles langsomt, mens hydrogenatomer, der sidder i fleksible eller åbne områder i proteinet, udveksles hurtigt. Med denne teknik – kaldet HDX-MS – kan man med høj følsomhed detektere og kortlægge selv små ændringer i proteins rumlige struktur og dynamik.



**DANMARKS FRIE
FORSKNINGSFOND**
INDEPENDENT RESEARCH
FUND DENMARK

Videre læsning
Forskernes projekt: Allosteric regulation of tryptophan hydroxylase isoform 2 er finansieret af Danmarks Frie Forskningsfond | Natur og Univers (DFF-Forskningsprojekt 1). Se DFF's bevillingsliste på www.dff.dk

så denne blokering fjernes. Og det sker, når det rigtige molekyle binder sig til det allosteriske bindingssted.

En tværfaglig øvelse

De senere år har der været en stigende interesse for enzyms allosteriske bindingssteder, netop fordi de repræsenterer mulige mål for lægemidler. I de fleste tilfælde opdager man dog allosteriske bindingssteder ved tilfældigheder. Hvis man vil udnytte deres potentiale indenfor behandling af sygdomme er der derfor brug for en mere systematisk tilgang til at afsløre disse vigtige kontaktpunkter i enzymer. Det er netop sådan en systematisk undersøgelse, forskerne nu er i gang med at udsætte THP2 for. Deres mål er at afklare strukturen af dette specifikke sted på enzymet, hvordan det fungerer, og hvordan det vekselvirker med enzyms katalytiske domæne.

Og det er i høj grad en tværfaglig øvelse. Først skal der bygges en computermodel af strukturen i den del af enzymet, hvor den afgørende vekselvirkning finder sted. Man kender i dag ikke den tredimensionelle struktur af hele TPH2, men man ved, at enzymet er inddelt i tre domæner. De to relevante domæner i denne sammenhæng er det katalytiske domæne – altså der, hvor tryptophan binder sig til enzymet – og så et domæne, der har en regulatorisk funktion. Hvilken funktion dette regulatoriske domæne har, ved man endnu ikke, men forskernes hypotese er, at det allosteriske bindingssted befinder sig i dette domæne af enzymet. Computermodellen vil også gøre det muligt for forskerne at identificere mulige molekyler (ligander), der vil være tilbøjelige til at binde sig til det allosteriske bindingssted.

Næste fase af projektet er så at producere virkelige udgaver af de varianter af de katalytiske og regulatoriske domæner, som computermodellerne er nået frem til, samt at teste bindingen til de ligander,

Om forskerne i projektet

Günther H. J. Peters er lektor ved Institut for Kemi ved DTU og leder af forskningsgruppen *Chemistry at the Interface to Biology*. Han forsknings er indenfor computermodellering af makromolekyler og bioinformatik.
ghp@kemi.dtu.dk



Pernille Harris er lektor ved Institut for Kemi ved DTU og leder af forskningsgruppen "Proteinstrukturer og -vekselvirkninger". Hun arbejder bl.a. med røntgenkrystallografi og småvinkel-røntgenspredning.
ph@kemi.dtu.dk



Hans Erik Mølager Christensen er lektor ved Institut for Kemi ved DTU og leder af forskningsgruppen Metalloprotein Chemistry and Engineering. Hans forskning er centreret omkring metalloenzymer involveret i neurologiske sygdomme.
hemc@kemi.dtu.dk



Kasper Dyrberg Rand er professor mso og gruppeleder ved Institut for Farmaci, Københavns Universitet, hvor han blandt andet arbejder med teknikken HDX-MS.
kasper.rand@sund.ku.dk



Desuden deltager Dr. Robin Curtis fra University of Manchester i projektet. Han er bl.a. ekspert inden for lysspredningsteknikker.
R.Curtis@manchester.ac.uk



som er blevet identificeret. Det er en lang proces og kommer til at involvere en lang række forskellige eksperimentelle metoder.

Håbet er, at de eksperimentelle resultater og resultaterne fra computersimuleringerne stemmer overens – eller at man på basis af de eksperimentelle resultater, kan lave nogle nye og bedre computermodeller, så vi kommer nærmere på en detaljeret forståelse af, hvordan især det regulatoriske domæne af TPH2 virker og spiller sammen med andre molekyler, der findes i hjernen.

Muligt mål for nye lægemidler

Som nævnt er det oplagte anvendelsesmæssige perspektiv af forskernes arbejde med TPH2, at det på længere sigt vil kunne gøre det muligt at udvikle lægemidler, der specifikt er rettet mod dette enzym. Hvis man med et lægemiddel kunne øge aktiviteten af TPH2, vil det være en ret direkte måde at øge produktionen af serotonin i hjernen. Og det vil være en principielt ander-

ledes måde at gribe ind i serotonin-systemet på end med klassiske SSRI-lægemidler, som virker ved at blokere et bestemt transportprotein, der kan siges at være en del af et "genbrugssystem" for serotonin i nervecellerne.

Når man designer lægemidler, der har til formål enten at aktivere et enzym eller blokere det, så er disse lægemidler normalt rettet mod det aktive site i enzymet. Men hvis man vil ramme TPH2 på den måde, kan man næppe undgå den uønskede bivirkning, at dets slægtning TPH1 også aktiveres og øger serotoninproduktionen andre steder i kroppen, for eksempel i fordøjelsessystemet. Det problem kan man undgå, hvis lægemidlet i stedet designes til at binde sig til det allosteriske bindingssted på TPH2, så det kun er dette specifikke enzym, der aktiveres. Netop potentialet for færre bivirkninger er en af grundene til, at der generelt er stigende interesse for enzyms allosteriske bindingssteder som mål for lægemidler. ■



**DANMARKS FRIE
FORSKNINGSFOND**
INDEPENDENT RESEARCH
FUND DENMARK

HJÆLP TIL DIT STUDIERETNINGS- PROJEKT?

DU KAN FÅ HJÆLP TIL EMNER SOM:

- SUPERLEDNING
- KVANTEMEKANISKE TUNNELEFFEKTER
- UV-LITOGRAFI
- BESTEMMELSE AF PLANCKS KONSTANT

Få sparring af dygtige
forskere og lav forsøg til dit
studieretningsprojekt i de
veludstyrede laboratorier på
Aalborg Universitet.

nano.aau.dk/srp



AALBORG UNIVERSITET
AALBORG ESBJERG KØBENHAVN

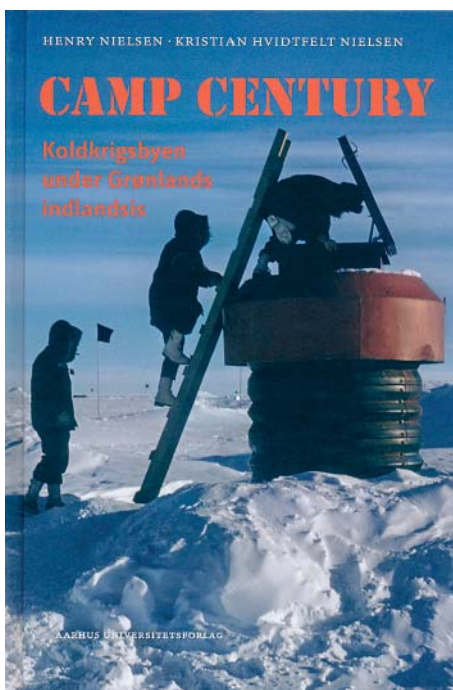
CAMP CENTURY

– en “varm kartoffel” fra den kolde krig

Et enormt missilforsvar gemt under Grønlands indlandsis stod på den amerikanske hærs ønskeliste i slutningen af 1950'erne. Forskningslejren Camp Century skulle bane vejen for projektet, men den blev ingen succes og har siden flere gange givet anledning til kriser mellem Danmark og Grønland.

Den 4. august 2016 udgav et internationalt hold af forskere, ledet af den canadiske klimaforsker William Colgan, en videnskabelig artikel, der skulle få vidtrækkende konsekvenser. I artiklen vurderede forfatterne, at efterladenskaberne efter den atomdrevne, amerikanske militære forskningslejr Camp Century – som blev lukket endegyldigt ned i 1966, og som alle dengang troede lå begravet i indlandsisen for evigt – sandsynligvis ville dukke op igen allerede i næste århundrede som følge af den globale opvarmning.

Efterladenskaberne, der omfatter såvel bygningsdele som radioaktivt, kemisk og biologisk affald, blev anslået at ligge 35-70 meter under overfladen. Forskernes forudsigelse blev startskuddet til en voldsom debat, der på dramatisk vis nedkølede forholdet mellem Danmark og Grønland. Det grønlandske pres er foreløbig resulteret i, at den danske regering i foråret 2017 har lovet, at den over de næste fem år vil bevilge 150 millioner kroner til miljøundersøgelser omkring forladte amerikanske baser,



Forsiden af forfatternes nye bog om Camp Century.

blandt andet ved Camp Century. Resultater herfra vil blive offentliggjort løbende.

Den aktuelle forskning vedrørende Camp Century har givet anledning til en af de alvorligste kriser mellem Danmark og Grønland i de seneste 200 år, men det er absolut ikke den eneste gang ordene “Camp Century” har fremkaldt dybe panderynker

hos politikere og embedsfolk i Danmark og Grønland. Men hvad var Camp Century egentlig for en lejr? Hvad var formålet med den? Hvad foregik der i og omkring lejren, mens den var i funktion? Hvorfor blev den lukket ned efter kun seks års eksistens? Og hvorfor er den blevet ved med at skabe problemer gennem de 50 år, der er forløbet siden dens død og begravelse? Det har forfatterne forsøgt at besvare i en ny bog, og det er også emnet for denne artikel.

Ismanden

Under Dwight D. Eisenhowers præsidentperiode i USA (1953-1960) skete der dramatiske ændringer inden for det amerikanske forsvar. Eisenhower og hans rådgivere ville ikke én gang til lade USA blive lokket ind i en konventionel krig a la Koreakrigen (1950-53), som kostede 37.000 amerikanske soldater livet, og som desuden lagde beslag på enorme ressourcer, der kunne have været anvendt til produktive formål. Fremover skulle der sættes på udvikling af langtrækkende bombefly og raketter, udstyret med atom- eller brintbomber. Sovjetunionens ledere skulle ikke længere være i tvivl om,

Om forfatterne



Henry Nielsen er lektor emeritus henry.nielsen@css.au.dk



Kristian Hvidtfelt Nielsen er lektor khn@css.au.dk

Begge ved Center for Videnskabsstudier, Aarhus Universitet

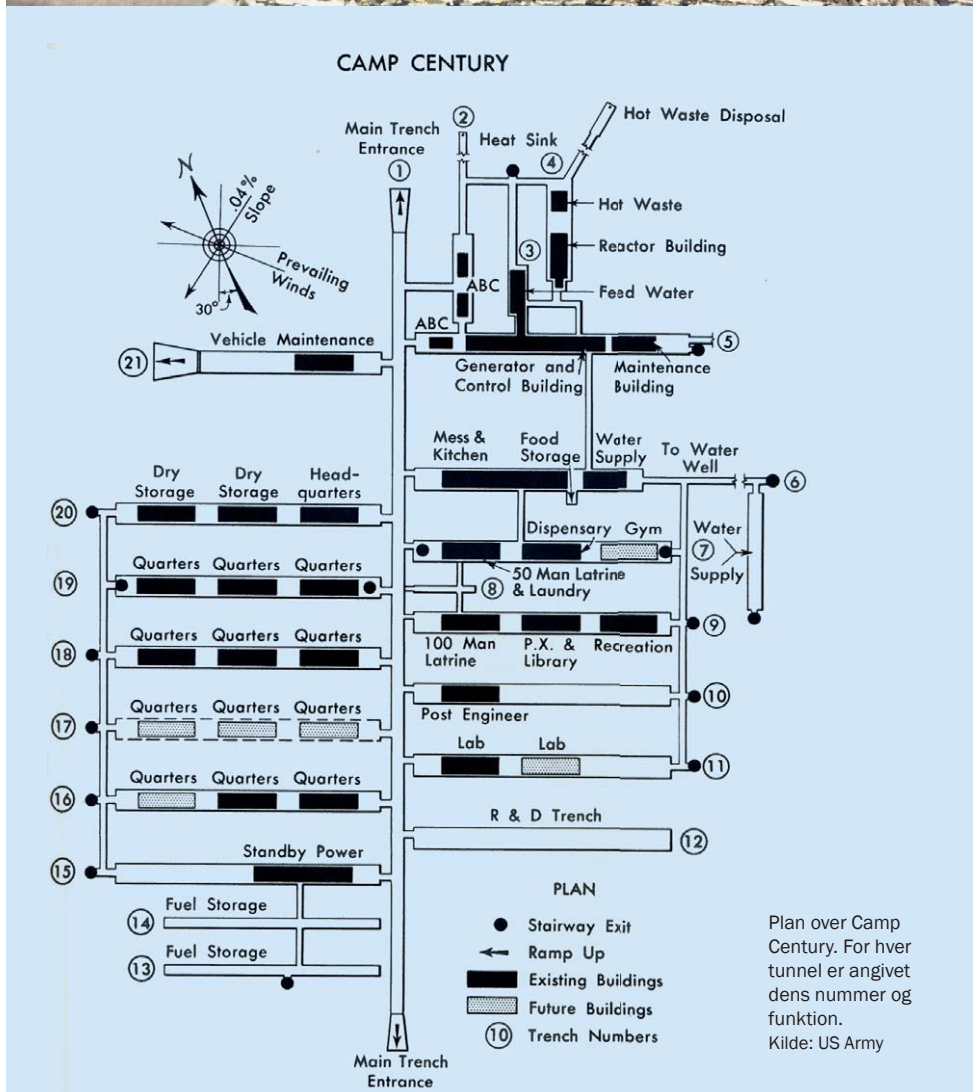
Tunnel nr. 4, der skulle rumme atomreaktoren PM-2A, er her ved at blive udgravet af snefræseren, der ses i billedets baggrund. Datoen er 20. august 1959. Foto: NARA-111-C-17385.



at de i tilfælde af aggression over for en NATO-partner eller et andet venligtsindet land risikerede "massiv gengældelse" med kernevåben.

Udviklingen af langtrækkende raketter blev lagt i hænderne på to af det amerikanske forsvars tre værn, nemlig luftvåbnet (den interkontinentale Minuteman-raket) og den amerikanske flåde (mellemdistance-raketten Polaris), mens hæren kun skulle arbejde med udvikling af korttrækkende missiler. Denne arbejdsfordeling medførte i løbet af få år en dramatisk ændring i de tre værns relative andel af forsvarsbudgettet, således at fordelingen i 1959 var 47 % til luftvåbnet, 29 % til flåden og 22 % til hæren, mens de tilsvarende tal ved koreakrigens slutning i 1953 var 30, 20 og 50.

Disse tal må have forekommet så horrible for den amerikanske hærstøt, at den beordrede sin tænketank US Army Engineer Study Center til at komme med et alternativt bud på et troværdigt afskrækkelsesvåben. Svaret blev *Project Iceworm*, kodeordet for et gigantisk projekt, der involverede installation af 600 atombevæbnede mellemdistance-raketter (kaldet "Iceman") i et netværk af tunneler under et 250.000 km² stort område af Nordgrønlands indlandsis. Når systemet var fuldt udbygget, skulle der være ikke mindre end 2.100 affyringspositioner. Missilerne skulle til stadighed fragtes rundt på jernbaneskinner i istunnelerne, hvorved det i praksis ville være umuligt for Sovjetunionen at sætte ret mange af dem ud af spillet ved et overraskelsesangreb. Systemet ville således have høj troværdighed som afskrækkelses-





Forsøg med skinneba-
seret transport foregik
i en speciel Camp
Century-tunnel i årene
1961-64. Foto: US Army.

våben. Det blev anset for at være et ekstra plus, at i tilfælde af en væbnet konflikt kunne sovjetiske angreb forventes koncentreret om et øde område langt fra det amerikanske moderland.

Atomkraft i Grønland

Iceworm-projektet, der blev udtænkt i sidste halvdel af 1950'erne, måtte naturligvis afprøves, før det amerikanske forsvarsministerium ville tage stilling til, om det skulle udvikles og deployeres i stor skala i Nordgrønland. Og det er her, Camp Century kommer ind i billedet, for Camp Century var udset til at være en teststation for vitale elementer i Iceworm-projektet.

Kun få mennesker i USA og slet ingen i Danmark anede noget om Project Iceworm, da det danske udenrigsministerium (UM) første gang hørte om Camp Century. Det skete i november 1958, da den amerikanske ambassade forberedte UM på, at der snart ville komme en ansøgning fra den amerikanske hær om tilladelse til at etablere en atomkraftdrevet, videnskabelig forsøgsstation under indlandsisen cirka hundrede miles fra Thulebasen (deraf navnet "Century").

Da den danske regering frygtede, at »et eventuelt forsøg med en atomreaktor på Grønland ville rejse en række problemer, som det [...] ville være ønskeligt at undgå«, forsøgte den at få USA til at opgive planerne. Det mislykkedes totalt. I september 1959 følte Danmark sig mere eller mindre tvunget til at give den amerikanske hær en foreløbig tilladelse til at bygge lejren. Den endelige tilladelse til også at installere en atomreaktor i Camp Century forelå 10. februar 1960. På det tidspunkt var konstruktionen af lejren allerede langt fremme.

Arktisk krig

Camp Century blev i det væsentlige færdigbygget i løbet af sommeren 1960. Lejren kom til at bestå af en otte meter bred og 330 meter lang hovedtunnel, kaldet "Main Street", hvorfra der udgik 20 sidetunneler som indeholdt energiforsyning, sovekahytter, køkken, dagligstue, toiletter, bruserum, bibliotek, biograf, kirkerum, lægeklinik og – naturligvis – diverse laboratorier. I de første måneder blev elektricitet og varme genereret af to dieselmotorer, men fra marts 1961 til maj 1963 overtog reaktoren PM-2A (kapacitet 1,5 MW elektrisk) energiforsyningen.

Lejrens overordnede formål var at være base for en række forskningsprojekter, som den amerikanske hær anså for overordentlig vigtigt at få udført. Antallet af projekter var meget stort, og tilsammen var de en del af "den anden kolde krig", som det amerikanske forsvar igangsatte i Arktis med henblik på at blive optimalt rustet til at udkæmpe en "varm krig" under arktiske forhold.

Et af de projekter, som fandt sted ved Camp Century, var studiet af og forsøget på at beherske white-out-vejr-situationer, et meteorologisk fænomen, der ofte optræder på indlandsisen. Fænomenet er karakteriseret ved en uigennemtrængelig tæt tåge, der får isen, horisonten og himlen til at gå i et, så man kan miste orienteringen totalt. Men trods en stor forskningsindsats i 1960-63 ved Camp Century, hvor man forsøgte at opløse whiteout'en ved hjælp af ballon- og raketbårne granater, der frigjorde tøris eller andre podningsmidler i tågeskyerne, måtte forskerne til sidst erkende, at deres anstrengelser kun havde haft meget begrænset succes.

Isen var for stor en mundfuld

Et centralt element i Project Iceworm var flere tusinde kilometer jernbane under indlandsisens overflade. Et andet af de forsøg, der fandt sted i Camp Century, foregik derfor i en specielt indrettet, hesteskoformet tunnel, som lå nogle hundrede meter fra selve lejren. Her var der lagt jernbanespor på forskellige underlag, og her blev der kørt tungt lastede lastbiler, udstyret med toghjul, frem og tilbage med henblik på at finde ud af, hvilken kombination af skinner og underlag, der var bedst. I starten var de ansvarshavende så optimistiske, at de forudså, at der allerede året efter ville blive etableret en jernbane under isen mellem Thulebasen og Camp Century, men sådan kom det ikke til at gå. Isen var langt vanskeligere at have med at gøre, end amerikanerne havde regnet med.

Man kan med en vis ret sige, at Camp Century var ét stort forsøgsprojekt. Her kunne man under realistiske forhold skaffe sig viden om et helt afgørende spørgsmål: hvor længe kan en tunnel i indlandsisen holde, uden at man bliver nødt til at foretage større reparationsarbejder? Siden 1957 havde den amerikanske hær lavet småskala-forsøg, der skulle afklare dette, men i Camp Century skulle man for første gang – belært af tidligere erfaringer – afprøve forudsigelserne i stor skala. Og det viste sig hurtigt, at forudsigelserne havde været alt for optimistiske. Man havde regnet med, at Camp Century kunne holde i ti år uden de store problemer, men allerede i løbet af et år viste nogle af tunnelerne i Camp Century så betydelige deformationer, at det med hyppige mellemrum var nødvendigt at "barbere" store mængder is og sne af vægge og lofter. I foråret 1963 var taget i reaktortunnelen sunket så langt ned, at lejrens ledelse besluttede at lukke reaktoren med øjeblikkelig virkning og få den fjernet, inden man risikerede en sammenstyrtning.

Kold krig og iskerner

Da lejrchefen i Camp Century besluttede at lukke reaktoren og fjerne den af sikkerhedsmæssige grunde, var dødsdommen over lejren i virkeligheden allerede fældet på højeste sted, nemlig i det amerikanske forsvarsministerium. Den nyvalgte præsident i USA, John F. Kennedy, havde straks efter sin tiltræden i januar 1961 anmodet sin forsvarsminister, Robert McNamara, om at gå de stadigt stigende forsvarsudgifter efter i sømmene. Som led denne proces nedsatte McNamara arbejdsgrupper, som skulle kigge kritisk på de store misiludviklingsprojekter, Minuteman, Polaris og Iceworm.

Og for at gøre en lang historie kort: I slutningen af 1962 eller begyndelsen af 1963 besluttede McNamara at skrotte Iceworm-projektet og kun satse på Minuteman og Polaris. Camp Centurys dage var dermed talte. Fjernelsen af atomreaktoren



I sommeren 1969, tre år efter den definitive lukning af Camp Century, tog en fotograf udsendt af den amerikanske hær dette billede, der viser en sammenpresset mandskabstunnel i den få år tidligere så omtalte by i indlandsisen. Foto: Austin Kovacs.

fandt sted i 1964. Denne operation blev overvåget af en ekspert fra den danske atomenergikommission, som skulle holde øje med, at alle radioaktive dele blev fjernet i overensstemmelse med den aftale, der var blevet indgået mellem UM og det amerikanske udenrigsministerium i 1959-60. Den danske ekspert, Risø-professoren Cecil Jacobsen, havde kun lovord til overs for den amerikanske oprydningsindsats.

For at en række igangværende forsøg kunne afsluttes ordentligt, fik Camp Century lov at fortsætte som sommerbase i årene 1964-1966, men nu kun med dieselmotorer til at klare energiforsyningen. Et af de videnskabelige forsøg, der foregik i Camp Century i disse år, var det siden så velkendte iskerneborings-projekt, der trods talrige vanskeligheder blev succesfuldt afsluttet i sommeren 1966, da det for første gang lykkedes at bore hele vejen gennem indlandsisen ned til den faste undergrund. Den resulterende iskerne og Willi Dansgaard og medarbejderes kompetente analyse af den regnes i dag for det vigtigste udbytte af den enorme investering, den amerikanske hær foretog med oprettelsen, driften og nedlæggelsen af Camp Century. Hvad det sidste angår, blev kun de mest værdifulde ting fjernet fra lejren og fragtet tilbage til USA. Resten blev efterladt i de hurtigt imploderende

tunneler, der for hvert år sank længere og længere ned under isens overflade.

En mulig genopstandelse

Mindst tre gange siden Camp Century blev forladt, har lejren givet anledning til store overskrifter i medierne. Første gang var i 1980, da den New Zealandske fredsforsker Wilke Owens såede tvivl om pålideligheden af de officielle rapporter om omfanget af let radioaktivt affald, som Danmark havde givet den amerikanske hær tilladelse til at lede ned i indlandsisen. Af mangel på beviser døde den historie dog hurtigt igen.

Anden gang var værre. Den fandt sted i 1997, da en gruppe historikere ved Dansk Udenrigspolitisk Institut kunne fremlægge dokumenter, fundet i et amerikansk arkiv, som i detalje beskrev Project Iceworm, og som dermed kastede et afslørende lys over det egentlige formål med Camp Century.

Men tredje gang var den værste. Den indtraf, som beskrevet i indledningen til denne artikel, i august 2016, da William Colgan og medarbejdere udgav en artikel i *Geophysical Research Letters*, hvori de forudså Camp Centurys snarlige genopstandelse, og hvorved de – uden at have intentioner om det – forårsagede de hidtil alvorligste rystelser af rigsfællesskabet mellem Danmark og Grønland. ■

Videre læsning

Forfatterens bog, Henry Nielsen og Kristian Hvidtfelt Nielsen, *Camp Century. Koldkrigsbyen under Grønlands indlandsis* (Aarhus Universitetsforlag 2017) indeholder udførlige henvisninger til alle benyttede kilder.

HVAD ER MENINGEN MED LIVET?

Uden at indregne den omstændighed, at hver eneste livsform har et indre formål, kan vi ikke forstå fænomenet liv. Men det betyder til gengæld ikke, at der dermed findes et stort samlende formål med det hele.



Foto: Shutterstock/PopTika



Forfatteren

Jesper Hoffmeyer er biokemiker og har en doktorgrad i biosemiotik. Han er emeritus ved Biologisk Institut, Københavns Universitet. jhoffmeyer@me.com

En af de helt store forskelle mellem fysik og biologi er, at biologien beskæftiger sig med levende væsner, som dårligt lader sig forstå, uden at man medregner, at de på en eller anden måde er bestemt af et formål, mens et sådant formål netop er helt tabuiseret i fysikken. Systemer, der ikke er levende, er aldeles uanfægtede af eventuelle formål. Det er måske – som jeg foreslår i min seneste bog, *7 ting vi plejer at tro*, netop derfor biologer er så ekstraordinært ihærdige i forsvaret for darwinismen – de antager, at den darwinske fortælling om evolutionen forklarer forskellen mellem fysik og biologi. Men det gør den ikke. Det eneste, den gør, er at lave biologi om til fysik. Den forklarer evolutionen på en måde, der netop ser bort fra planter og dyrs egne interesser. Det sker ved at anlægge en sindrig statistisk analyse,

som overbeviser de fleste, selv om den i udgangspunktet forudsætter det, den skulle bevise: Hvis ikke livsformerne allerede i udgangspunktet ønskede at overleve, så ville statistikken ikke virke, for der ville ikke være nogen konkurrence og altså ingen selektion.

Biosemiotikken foreslår en helt anderledes synsmåde: At vi tager forskellen alvorligt. Dels fordi det føles bedre eller mere rigtigt, og dels fordi det tvinger os til at fokusere på det egentlige: Hvorfor er der denne markante forskel mellem levende og dødt? Svaret er, at det kun er det levende, som er semiotisk, det døde er fuldstændig asemiotisk, eller med andre ord, det semiotiske element opstår i den selvsamme proces, hvor også livet opstår – i ursuppen eller hvor det nu var. Med det udgangspunkt er opgaven at vise, hvor stor en rolle en semiotisk

synsmåde spiller i begribelsen af, hvad de levende væsner foretager sig, hvilket selvfølgelig bliver særlig prekært, når opgaven er at forklare fremkomsten af et talende dyr, der føler sig i besiddelse af en fri vilje, mennesket. Samt at forklare, hvorfor ikke-semiotisk (asemiotisk) liv og bevidsthed er en umulighed. Hele denne problemkreds diskuteres nøje i min nye bog.

Mangel som udgangspunkt for evolutionen

Måske den vigtigste ressource, som semiotikken tilbyder, men som er aldeles fraværende i fysikken er begrebet "mangel". Et fysisk system "mangler" aldrig noget, for hvad skulle det overhovedet betyde? Måske vil bilen ikke starte, fordi akkumulatoren er løbet tør (sådan var det i gamle dage. Moderne batterier – eller akkumulatorer – er støbt vandtætte, så de i praksis er

vedligeholdelsesfri). Men i så fald er det netop ikke akkumulatoren, der mangler vand, akkumulatoren selv mangler ikke noget, den brokker sig ikke. Det er bilisten, der mangler noget, nemlig et ordentligt batteri.

Ethvert levende væsen kender – i modsætning til rent fysiske systemer – til at mangle. Det er netop manglen, som er udgangspunktet for evolutionen. Når fisken lever i mudder og derfor dels har adgang til mængder af fri ilt i luften, dels i alvorlig grad mangler adgang til opløst ilt i vandet, så udvikler den lunger, og vi får lungefisk. Senere, når fisken igen lever i frit vand med rigelig adgang til ilt opløst i vandet, udvikler den atter gæller og laver lungerne om til en luftfyldt blære – svømmeblæren – som den bruger til at kalibrere sin position i de nu rigelige vandmasser. Uden at medregne manglen vil man altså ikke forstå noget-som-helst. Darwinisterne er jo ikke dumme, de nægter bare at tænke semiotisk og kalde det en mangel – for det ville tvinge dem til at forklare, hvad det ord mon skulle betyde. Men det er jo netop det, vi må gøre, hvis vi vil kalde det en forklaring.

Den opfattelse, jeg gør mig til talsmand for her, er ikke en anti-darwinisme, men en post-darwinisme. Jeg anerkender fuldt ud sandheden af den darwinistiske pointe, men mener, at det nu er på tide, vi kommer videre. Darwinismen forklarer meget, men ikke alt.

OK, hvor kommer så denne mærkelige mangel fra, vil darwinisten måske spørge. Men hvis han/hun strækker sig så langt, er vi måske allerede enige, for det indebærer jo, at man har opgivet den darwinistiske bortforklaring (selektionen) og er begyndt at stille det dybe spørgsmål. Hvor kommer livsformernes interesser fra?

Livet i tærskel-fasen

Ingen af os ved, hvad svaret er på sådan et spørgsmål. Men det var netop det spørgsmål, som i 2002

Semiotik

Semiotik er læren (videnskaben) om tegnprocesser, hvor ordet tegn skal forstås bredt: For eksempel er der over det meste af verden et lille tegn på toiletdøren, som fortæller, om der er tale om et dame- eller et her-toilet. Tegn hedder semeion på græsk. Deraf navnet semiotik. Selve tegnprocessen – altså når tegnet fortolkes – hedder følgelig semiosis, så man kunne også sige, at semiotik er videnskaben om semiosis.

Biosemiotik er den del af semiotikken, der beskæftiger sig med tegnprocesser i naturen – fra "aflæsningen" af nukleinsyrerne (RNA og DNA) til signalgivning mellem aber og mellem mennesker.

fik mig til at deltage i et møde med Terrence Deacon, Claus Emmeche, Kalevi Kull og Frederik Stjernfelt i Estland, ude ved et lille sted, der hedder Saka. Mødet resulterede i en artikel *Theses on Biosemiotics: Prolegomena to a Theoretical Biology*. Jeg citerer fra abstractet til denne artikel:

»An aim of the biosemiotic approach is to explain how life evolves through all varieties of forms of communication and signification (including cellular adaptive behavior, animal communication, and human intellect) and to provide tools for grounding sign theories. We introduce the concept of a semiotic threshold zone and analyze the concepts of semiosis, function, Umwelt, and the like as the basic concepts for theoretical biology.«

Den vigtigste konklusion fra dette møde var netop det sidste, at vi alle altså forestiller os en tærskel-fase på overgangen fra det ikke-levende til de første levende systemer. Vi skal måske minde om, at dette problem er fælles for biosemiotikken og den traditionelle biologi. Den traditionelle biologi har heller ikke noget svar på, hvordan liv helt konkret er opstået. Hvad der konkret sker i denne overgangsfase, er det for tiden omsonst at spekulere over, men at den på en eller anden måde indebærer dannelsen af et første genuint semiotisk system, var vi enige om på mødet. Og dermed er det klart, at studiet af det levendes verden (livsverdenen), må betjene sig af et semiotisk begrebsapparat.

Handler evolutionen om at skabe semiotisk frihed?

Tilbage står selvfølgelig skræpspørgsmålet om, hvad meningen så er med liv. Det er den slags spørgsmål religionerne (herunder diverse New Age filosofier) har slået sig op på at besvare, men som vi tøver med. Vi var altså enige om, at uden at indregne formål, forstår vi ikke dette fænomen: Livet. Men den omstændighed, at hver eneste livsform har et indre formål, er jo ikke ensbetydende med, at der så findes et stort samlende formål med det hele. Hvis man endelig skulle forsøge sig i den retning, kan man måske sige, at skabelsen af genuint semiotiske systemer, livsformer, var en nødvendig forudsætning for, at der senere kunne opstå bevidste systemer, pattedyr, og dermed en forudsætning for, at der kunne opstå en fri vilje hos mennesket. Derom kan man læse meget mere i *7 ting, vi plejer at tro på*.

I det helt store perspektiv kunne man måske forledes til at tænke, at skabelsen af "semiotisk frihed" er det, udviklingshistorien, evolutionen, dybest set handler om. Og skulle man vove at være antropocentrisk (altså at tage det menneskelige som målestok), så kunne man tilføje den tanke, at skabelsen af selverkendelse skulle være livets, kulturens og evolutionens hele formål. Men dette er som sagt kun en spekulation – til ære for dem, der absolut vil have et definitivt formål at klynge sig til. Det er ikke noget, videnskaben eller biosemiotikken på nogen måde lægger op til. ■

Videre læsning:
Hoffmeyer, Jesper (2017). *7 ting vi plejer at tro på - men som måske ikke er sande*. Tiderne skifter. København.

Kull, Kalevi, Terrence Deacon, Claus Emmeche, Jesper Hoffmeyer og Frederik Stjernfelt (2009). "Thesis on Biosemiotics: Prolegomena to a Theoretical Biology" *Biological Theory* 4 (2), 167-17.

BOG

Pascal - Matematik og mirakler

Anmeldt af Vagn Lundsgaard Hansen, professor emeritus,
Danmarks Tekniske Universitet, vlha@dtu.dk



FAKTA

Carl Henrik Koch:
Pascal - Matematik og mirakler.
Lindhardt og Ringhof 2017.
474 sider, 399,95 kr.

Blaise Pascal (1623-1662) er en af verdenshistoriens store tænkere. Han gik hverken i skole eller studerede på et universitet, men blev undervist af sin far. Allerede som ung færdedes Pascal blandt tidens førende naturvidenskabeligt orienterede filosoffer og videnskabsmænd, herunder filosofen René Descartes (1596-1650), som han var meget uenig med i opfattelsen af hvordan geometriske argumenter skulle føres, juristen Pierre de Fermat (1601-65), som han var enig med i geometriske spørgsmål, og ikke mindst munken Marin Mersenne (1588-1648), som var en væsentlig aktør i udviklingen af den nye mere matematisk udformede naturvidenskab i 1600-tallet, og som Pascal beundrede.

Et skræmmende geni

I fysikken har Blaise Pascal lagt navn til en enhed for lufttryk og i datalogien til et kendt computersystem. I matematikken kendes han fra Pascals trekant, som er et talskema hvorfra de såkaldte binomialkoefficienter kan bestemmes. Men Pascal var langt mere end dette. Han nåede at bidrage til verdenshistorien med opfindelser og opdagelser, som har formet verden, som vi kender den i dag. Han var et dybt religiøst menneske og diskuterede religiøse spørgsmål med en skarpsindighed præget af matematisk præcision, men samtidig præget af mysticisme og forestillinger om Gud.

I 1802 udgav den kendte franske romantiker Chateaubrian et stort værk med titlen Kristendommens ånd eller den kristne religions ophøjethed. I dette værk omtaler han Blaise Pascal som et "skræmmende geni",

og beskriver de væsentligste træk af Pascals liv og virke i ordene: »Der har levet et menneske [Pascal], som tolv år gammel skabte matematikken ved hjælp af nogle "stave" og nogle "ringe"; som i sekstenårsalderen skrev den mest lærde afhandling om keglesnit, som man har set siden oldtiden; som nitten år gammel har reduceret en videnskab, der kun fuldt ud eksisterede i forstanden, til en maskine [Pascal opfandt en regnemaskine]; som treogtyve år gammel påviste luftens tyngde og tilbageviste en af den gamle fysiks graverende fejltagelser [Pascal opdagede luftens tryk og forstod betydningen af vakuum], og for hvem det lykkedes i den alder, hvor andre mennesker næppe er blevet voksne, at gennemstrefte alle menneskelige videnskaber og gennemskue deres tomhed, og som derefter rettede sine tanker mod religionen; som fra dette øjeblik og indtil sin død niogtredive år gammel i de korte mellemrum mellem sine anfald af sygdom [løste matematiske problemer hvor han bl.a. skabte grundlaget for sandsynlighedsregning og spilteori], samtidigt med at han nedskrev sine tanker om Gud og mennesker.«

Man kan også lære meget om Blaise Pascal ved at læse i hans omfattende private korrespondance. I et brev til en af sine søstre i forbindelse med deres fars død skriver Pascal således, at man kan finde lise for smerten i Guds omsorg og beskyttelse, og at alt er en del af Guds plan. I et brev til Dronning Christina af Sverige i sommeren 1652 i forbindelse med at en bekendt overbringer hende et eksemplar af hans regnemaskine skriver Pascal om dybe religiøse forhold. I

flere breve om religiøse spørgsmål skinner det igennem, at Pascal troede på mirakler. Han fortæller bl.a. om at en af hans niecer var blevet helbredt fra en meget ubehagelig sygdom ved at røre ved en torn fra Kristus' tjørnekran. I et brev til Fermat sammenligner Pascal sit matematiske arbejde med en dygtig håndværkers arbejde, men at han i udførelsen foretrækker åndens finesser, og at det er teologien, der virkelig betyder noget for ham.

Fremragende bog

Alt dette og meget mere kan man læse om i Kocks fremragende bog om Blaise Pascal. Eksempelvis om hvordan han medvirkede til at få organiseret omnibuskørsel på fem droscheruter gennem Paris i 1662.

Teologiske spørgsmål spiller en afgørende rolle i Pascals liv og Kock gengiver på forbilledlig vis de forskellige teologiske anskuelser gennem tiderne. Personligt blev jeg fængslet af beskrivelsen af kampen mellem Jansenisterne, der levede med en dyb følelse af menneskenes syndighed og udsigt til evig fortabelse, og Jesuitterne, der var overbeviste om guddommens overvældende kærlighed og grænseløse barmhjertighed. Pascal var Jansenist.

Pascals videnskabelige bedrifter er meget fint beskrevet, så også ikke specielt matematikkyndige kan følge med.

Jeg kan varmt anbefale denne bog til den, der vil forstå, hvordan matematik, naturfilosofi, teologi, og alle videnskaber med dybe rødder i tankens verden har noget at give hinanden. ■

SERVICE

FAKTA

Bent Lauge Madsen:

Naturhistorier fra bæk og å
BENT LAUGE MADSEN



Naturhistorier fra bæk og å. Forlaget Epsilon 2017. 360 sider, 365 kr.

FAKTA

Lars Brøndom: Gift.



Natur og Museum nr. 3/2017. 36 sider, 68 kr. + forsendelse. (Abo. på 4 numre 248 kr.)

Naturhistorier fra bæk og å

Siden de ganske unge år har Bent Lauge Madsen brugt utallige timer sommer og vinter ved de danske åer og bække. I denne bog fortæller han om de venner og bekendte, han har fået blandt smådyrene i det strømmende vand. Bent Lauge Madsen er om nogen manden, der forstår vore vandløbs biologi. Og i denne bog deler han ud af sin viden. Bogen er fyldt med naturhistorier om de små dyrs utrolige liv og færden og om års arbejde med at forstå og finde forklaringer.

Natur og Museum: Gift

Det nye nummer af Natur og Museum fra Naturhistorisk Museum i Aarhus handler om gift. I dette nummer fortæller biolog Lars Brøndom om giftige dyr fra ind- og udland. I dette hæfte kan læseren blive klogere på giftens mange facetter og erfare, at gift ikke kun findes i den farlige slange-variant, men at den varierer i intensitet, formål og virkning. Og man kan læse, at Danmarks giftigste dyr er en skrubtudse, der er en del giftigere end hugormen.

Naturvidenskab på Roskilde Universitet



Oplev og forstå naturvidenskab

Få besøg af studerende fra RUC. Et tilbud til gymnasier, HF og HTX på Sjælland
Læs mere på ruc.dk/tilbud-til-gymnasier-pa-institut-naturvidenskab-og-miljo

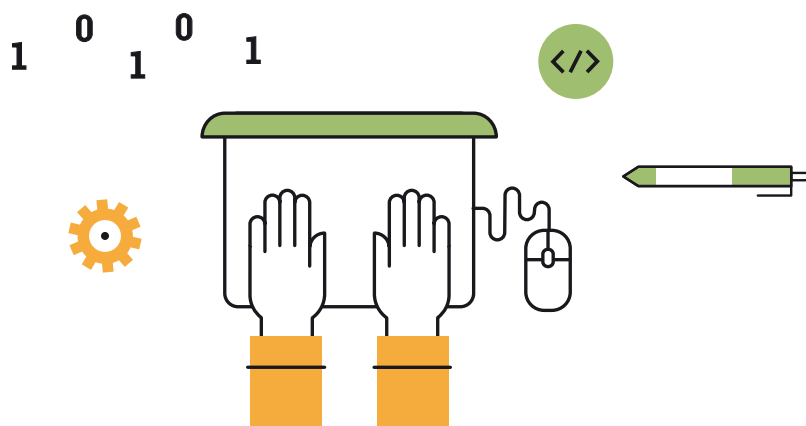


it camp for piger

26.-27. marts 2018
på SDU, Odense

www.sdu.dk/itcampforpiger

SDU 



Tilbud til dit gymnasium

Vælg imellem tre pakkestørrelser:

Gymnasieabonnement:

Antal blade i pakken:	10	20	40	60	eksemplarer
Pris eksklusiv moms:	450	475	725	975	kr.

(omfatter 6 numre/udgivelser pr. år.)

Den lave pris er mulig i en periode* som led et projekt, som VILLUM FONDEN støtter.

Nye undervisningsmaterialer

På hjemmesiden aktuelnaturvidenskab.dk finder du også undervisningsmaterialer.

Materialer om bananfluer og genetik

Du kan nu finde et forslag til lektionsplan og undervisningsmaterialer om "bananfluer og genetik" på hjemmesiden under punktet "undervisningsmaterialer". Planen indeholder blandt andet spørgsmål til følgende fem artikler fra Aktuel Naturvidenskab: *Flaskehalse – når genetisk variation går tabt* (AN 4-2017), *Indavl og miljøstress* (AN 5/2003), *Genetiske værktøjer kan redde truede bestande* (AN 3/2015), *Bananfluer og stress* (AN 1/2001) og *Psyko-fluer* (AN 3/2014).



Foto: André Karwath, CC BY-SA 2,5

Forsuring af verdenshavene

Der er også øvelser og opgaver relateret til artiklen *På vej mod et surt hav* af Katherine Richardson og Lone Thybo Mouritzen fra Aktuel Naturvidenskab 5/2006. Materialet er er tænkt som et anvendelsesorienteret supplement til et forløb i kemi B om syrer og baser.

Nye quizzer

Og så er der som altid nye quizzer at prøve på hjemmesiden: Test for eksempel din viden om *kirale molekyler*, *cryo-EM*, *voksende grønlandske deltaer* og *genetiske flaskehalse*. Find den quiz sammen med en masse andre på hjemmesiden.

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



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.

Gaveide:

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

OM AKTUEL NATURVIDENSKAB

Styregruppe

- Birgitte Lyhne**, kommunikationschef, Det Natur- og Biovidenskabelige Fakultet, Københavns Universitet
- Jens D. Holbech**, chefkonsulent, Science and Technology, Aarhus Universitet
- Mads Bendix Fjendsbo**, rektor, Viborg Gymnasium og HF
- Mette Christina Møller Andersen**, specialkonsulent, Det Tekniske Fakultet, Syddansk Universitet
- Niels Kring**, chefkonsulent, Det Naturvidenskabelige Fakultet, Syddansk Universitet
- Sanne Holm Nielsen**, kommunikationsmedarbejder, Det Teknisk-Naturvidenskabelige Fakultet, Aalborg 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: 6.400



Redaktionsgruppe

- Birgitte Dalgaard**, Det Tekniske Fakultet, Syddansk Universitet
- Birgitte Svennevig**, Det Naturvidenskabelige Fakultet, Syddansk Universitet
- Carsten Rabæk Kjaer**, Aktuel Naturvidenskab
- Jørgen Dahlgaard**, Aktuel Naturvidenskab
- Lene Pedersen**, Roskilde Universitet
- Peter Arnborg Videsen**, Viborg Gymnasium og HF
- Sanne Holm Nielsen**, Det Teknisk-Naturvidenskabelige Fakultet, Aalborg Universitet
- Svend Thaning**, Københavns Universitet

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, 8000 Aarhus C

Omslagsfoto:

En kunstners gengivelse af to sorte huler, som cirkulerer om et fælles tyngdepunkt. Illustration: LIGO/ Caltech/MIT/Sonoma State (Aurore Simonnet).

Parringskald for døve øren

Af Carsten R. Kjaer, Aktuel Naturvidenskab

Tænk dig at bruge hele aftenen i byen på skønsang og søde ord for at imponere en mulig kæreste, for så at finde ud af, at hun ikke kan høre en dyt. Og at det ikke bare gælder hende, men alle kvinder – og i øvrigt også en selv! Hvilken mening giver det så overhovedet at forsøge at kommunikere med lyd? Jeg tænker, at det er sådan græskarfrøen ville have det, hvis den pludselig indså, hvad den har gang i.

Denne lille, orange – og meget giftige – frø, lever i skove langs atlantehavskysten i Brasilien. I parringssæsonen er hannerne – som de fleste andre arter af frøer – flittigt optaget af at kvække, eller det lyder måske mere for os mennesker som svage knirkelyde, da græskarfrøen højst er et par centimeter stor. Der er dog ingen tvivl om, at de er meget optagede af deres forehavende, og de ser bestemt ud som om, at de er "ude på noget". Men lyden preller fuldstændig af på potentielle mager, da målinger i laboratoriet viser, at frøens høreorganer ikke reagerer på frekvenser omkring 5000 hertz, som frørernes parringskald ligger indenfor.

Evolution i fuld gang

Så hvad sker der lige for græskarfrøen? Det spørgsmål kan man passende stille Jakob Christensen-Dalsgaard, der er lektor ved Biologisk Institut ved Syddansk Universitet. Han er nemlig medforfatter på en artikel, som for nylig er publiceret i tidsskriftet *Scientific Reports*, hvor et internationalt forskerhold fortæller om to arter af græskarfrøer, der tilsyneladende er fuldstændig døve overfor deres egne lyde.

»Ja, det var lidt af en overraskelse at opda-



Stor er den ikke, den orange græskarfrø, som kvækker for døde øren. Foto: Sandra Goutte.

ge, at disse frøer ikke kan høre deres artsfællers parringskald – det giver umiddelbart ingen mening», siger Jakob. »Normalt tænker vi om dyr i naturen, at de ikke bruger energi på aktiviteter, som ikke giver dem en åbenlys fordel. Og at kvække for døde øren, kan endda være en decideret ulempe, for i stedet for en mage, kan det jo være et rovdyr eller måske parasitter, der lader sig lokke«.

Jakob fortæller, at det, vi nok er vidne til her, er "evolution in action". Altså at lydcommunication hos disse frøer er på vej helt ud – ligesom slangers ben, som stadig kan findes som sørgelige rester på en slanges skelet. Anatomiske undersøgelser på Cambridge Universitet i England viser, at det sanseorgan i det indre øre, der reagerer på høje frekvenser i andre frøarter, er reduceret og derfor ikke længere funktionelt hos græskarfrøen. Nu mangler græskarfrøen bare at tage den adfærdsmæssige konsekvens af det, kan man næsten sige.

Fra lyd til lys

»Men man kan dog godt forestille sig, at selve adfærden stadig kan have en funktion – hvis for eksempel hunnerne finder hannens bevægelser af kvækkeposen meget forførende, når den kvækker«, siger Jakob. »Frørerne er aktive om dagen, og derfor kan det give mening at erstatte lydcommunication med visuelle signaler. Vi tror, at det er det, der er ved at ske. Visuel kommunikation er jo ret oplagt, når man er skrigorange.«

Man kan også spekulere, at det faktum, at frøen er meget giftig, gør det mindre nødvendigt at skrue ned for larmen, selvom det kan lokke ubudne gæster til. At æde en af de små elskovssyge frøer er nemlig en fejl, man kun begår én gang. Så græskarfrøen har måske slet ikke travlt med at skille sig af med sin nedarvede vane med at kvække løs i parringssæsonen.

»Men at det vil ske på et tidspunkt, er jeg ret sikker på«, slutter Jakob. ■